

Mémoire, Partim A, COLLÉGIALITÉ

Auteur : p198866

Promoteur(s) : Leyh, Bernard

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences chimiques, à finalité didactique

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/19329>

Avertissement à l'attention des usagers :

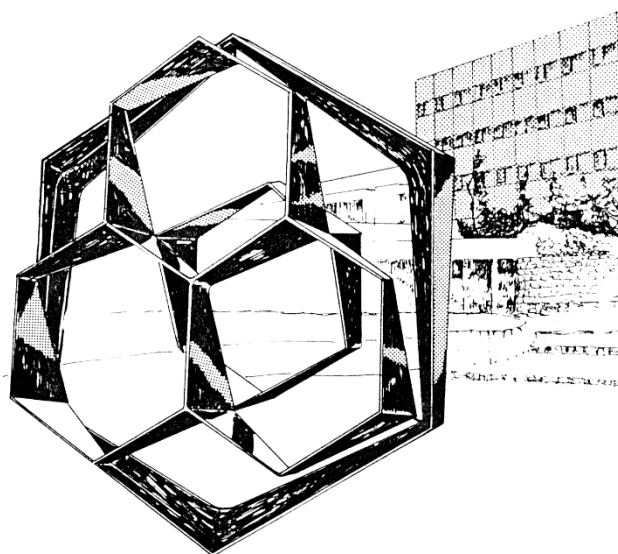
Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

FACULTE DES SCIENCES
Département de Chimie

Didactique de la chimie (UR DIDACTIfen) – Monsieur Leyh

Comment les élèves appréhendent-ils la structure tridimensionnelle des molécules en chimie organique ?



Année académique 2021-2022

Dissertation présentée par
BORGUET Vicky
en vue de l'obtention du diplôme de
Master en Sciences Chimiques

Remerciements

Pour commencer, je tiens à remercier chaleureusement M. Bernard Leyh, professeur à l'Université de Liège et promoteur de ce mémoire, pour m'avoir guidée et conseillée tout au long de ce travail. Je le remercie également pour tout le temps qu'il a consacré à m'aider à construire les questionnaires, l'activité et les analyses statistiques.

Je remercie également M. Natalis et Mme Nihant du service de didactique de la chimie (UR DIDACTIfen) pour m'avoir respectivement aidée à réaliser les tests statistiques et développer l'activité avec les élèves de rhétorique.

Je désire également adresser mes remerciements à tous les professeurs et les collaborateurs de l'Université de Liège ainsi que des écoles secondaires qui ont accepté de participer à mes questionnaires et aux phases de validation de ceux-ci. De plus, mes remerciements vont également aux différents professeurs de chimie de l'enseignement secondaire qui ont accepté de faire passer le questionnaire à leurs élèves : M. Piret et Mme Derwa (Collège Sainte-Véronique à Liège), Mme Lemaire (Athénée Royal de Visé), Mme Flagothier (Collège Saint-François-Xavier 1 à Verviers) et M. Karous (Collège Saint-Roch à Ferrières). En outre, je remercie Mme Broers, directrice de l'Institut Sainte-Marie Huy et Mme Habay, professeure de chimie dans cette école, d'avoir accepté que je teste mon activité sur une classe de rhétorique.

Je remercie vivement ma famille et mes proches pour leurs conseils, leur soutien moral et économique ainsi que pour leur aide à la relecture et à la correction de mon travail.

Table des matières

Introduction.....	6
Chapitre 1 : État de l'art	9
1.1) Capacité spatiale.....	9
1.1.1) Fondements historiques	9
1.1.2) Facteurs de capacité spatiale	9
1.1.3) Tests de capacité spatiale.....	11
1.1.4) Capacité spatiale à grande et à petite échelle	13
1.1.5) L'effet du genre sur la capacité spatiale	14
1.1.6) Etudes de neurosciences sur les fonctions cognitives spatiales.....	16
1.2) Capacité spatiale en chimie organique	18
1.2.1) Histoire de la représentation spatiale en chimie	19
1.2.2) Compétences représentationnelles.....	19
1.2.3) Types de représentations	20
1.3) Obstacles didactiques	24
1.4) Méthodes didactiques pour améliorer les compétences de visualisation tridimensionnelle	28
1.4.1) Outils d'aide	28
1.4.2) Exemples d'outils utilisables	31
1.4.3) Activités et enseignement.....	32
1.4.4) Stratégies employées	33
1.5) Lien avec le genre	35
Chapitre 2 : Analyse didactique de manuels et traités de chimie organique ..	36
2.1) Contexte de l'analyse des manuels et traités	36
2.2) Critères destinés à l'analyse qualitative	39
2.3) Manuels de l'enseignement secondaire supérieur	40
2.3.1) Analyse qualitative des manuels	40
2.3.2) Analyse quantitative des manuels	44
2.4) Traités de chimie organique du 1er cycle de l'enseignement supérieur	47
2.4.1) Analyse qualitative des traités	47
2.4.2) Analyse quantitative des traités	51
2.5) Discussion générale et suggestions didactiques découlant de l'analyse des ouvrages	54

Chapitre 3 : Analyse des compétences de visualisation tridimensionnelle d'élèves de fin d'enseignement secondaire général et d'étudiants de 1er cycle universitaire.....57

3.1) Évaluation des compétences des étudiants de 1er cycle universitaire57

 3.1.1) Construction du questionnaire 57

 3.1.2) Validation du questionnaire..... 59

 3.1.3) Echantillon..... 62

 3.1.4) Résultats 62

3.2) Évaluation des compétences des élèves de fin d'enseignement secondaire général..... 70

 3.2.1) Construction du questionnaire 70

 3.2.2) Validation du questionnaire..... 71

 3.2.3) Échantillon..... 71

 3.2.4) Résultats 72

3.3) Comparaison entre les étudiants d'université et les élèves du secondaire 77

3.4) Analyse des méthodes utilisées par les professeurs pour développer les compétences de visualisation tridimensionnelle de leurs élèves 78

 3.4.1) Construction du questionnaire 78

 3.4.2) Echantillon..... 79

 3.4.3) Résultats 79

Chapitre 4 : Développement d'une ingénierie didactique visant à promouvoir les compétences de visualisation tridimensionnelle82

4.1) Introduction82

 4.2) Préparation de l'activité 82

 4.3) Phase de validation..... 85

 4.4) Echantillon 85

 4.5) Résultats 86

 4.5.1) Résultats quantitatifs 86

 4.5.2) Résultats qualitatifs 88

Conclusion, limitations et perspectives90

Bibliographie :94

Annexes99

1) Annexe 1 : Comparaison de six applications pour smartphone 100

2) Annexe 2 : Critères d'analyse des ouvrages didactiques de chimie organique..... 103

3) Annexe 3 : Analyse quantitative des manuels de l'enseignement secondaire supérieur ...	104
4) Annexe 4 : Analyse quantitative des traités utilisés dans les études supérieures.....	106
5) Annexe 5 : Questionnaire sur la visualisation tridimensionnelle en chimie organique pour les étudiants d'université (version initiale).....	109
6) Annexe 6 : Questionnaire sur la visualisation tridimensionnelle en chimie organique pour les étudiants d'université (version finale).....	119
7) Annexe 7 : Résultats des étudiants en chimie à l'Université de Liège	129
8) Annexe 8 : Questionnaire sur la visualisation tridimensionnelle en chimie organique pour les élèves de l'enseignement secondaire	142
9) Annexe 9 : Résultats des élèves de fin d'enseignement secondaire.....	151
10) Annexe 10 : Réponses des professeurs au questionnaire permettant d'identifier les approches préférentiellement mises en place dans les écoles secondaires pour aider les élèves à visualiser les molécules dans l'espace.....	157
11) Annexe 11 : Ingénierie didactique sur les énantiomères.....	168

Introduction

Ce travail de fin d'études porte sur les compétences de visualisation tridimensionnelle (3D) des molécules organiques des apprenants à la fin de l'enseignement secondaire supérieur et au premier cycle des études supérieures universitaires. Nous pourrions nous demander s'il y a réellement un intérêt à examiner si les étudiants des difficultés. En effet, nous utilisons constamment la 3D autour de nous car notre monde est en 3D. Nous pourrions donc penser que cela devrait être plutôt naturel de visualiser les molécules organiques en trois dimensions. Cependant les concepts chimiques au niveau des particules submicroscopiques sont abstraits et invisibles (Stull et al., 2012). C'est pourquoi les chimistes développent des représentations mentales des molécules (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014). Afin de pouvoir communiquer entre eux dans des articles et des discussions ou pour enseigner à des étudiants, les chimistes ont développé de nombreuses représentations afin de rendre l'abstrait, c'est-à-dire les visualisations internes mentales, plus concrètes. Ces représentations peuvent être de trois niveaux différents (macroscopique, submicroscopique et symbolique (Johnstone, 2000)) et posséder un degré d'abstraction variable (il peut s'agir d'objets physiques comme des modèles en sphères et tiges, de schémas à deux dimensions (2D), d'animations,...) (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014; Boukhechem & Dumon, 2016; Ferik et al., 2005; Wu et al., 2001). C'est justement l'utilisation de ces différentes représentations et la compréhension du lien unissant les structures moléculaires aux différentes propriétés qui peuvent poser problèmes (Cooper et al., 2013; Taskin et al., 2015; Underwood et al., 2016). Ces difficultés peuvent mener les étudiants à penser que la chimie organique est un cours nécessitant la mémorisation et que c'est un cours compliqué, qualifié parfois de rite de passage (Akkuzu & Uyulgan, 2016).

Ce travail est divisé en quatre parties principales. Le chapitre 1 consacré à l'état de l'art passe en revue les études liées aux compétences de visualisation spatiale en général et en chimie organique et évoque aussi les questions didactiques correspondantes. Ces aspects sont approfondis dans le chapitre 2 qui examine de manière critique les approches didactiques de manuels d'enseignement secondaire et de traités de 1^{er} cycle universitaire (études de bachelier). Le chapitre 3 présente les méthodes et les résultats d'une étude que nous avons menée pour évaluer le niveau de compétences de visualisation tridimensionnelle en chimie organique d'élèves de fin d'enseignement secondaire général et d'étudiants de bachelier en chimie. Le chapitre 4 propose une ingénierie didactique visant à stimuler la capacité spatiale d'élèves de l'enseignement secondaire.

Dans le chapitre 1, nous discuterons d'abord du concept de capacité de raisonnement spatial, appelée plus brièvement capacité spatiale (« spatial ability ») de manière globale puis au niveau de la chimie. Concernant la discussion sur la capacité spatiale globale, nous aborderons d'abord brièvement les fondements historiques car les investigations à ce sujet ont débuté au début des années 1800 (Harle & Towns, 2011). Ces fondements reprendront les facteurs de capacité spatiale via deux méta-analyses souvent citées. Ensuite, les différents tests permettant de mesurer la capacité spatiale selon les trois facteurs de Lohman - relations spatiales, orientation spatiale et visualisation - seront cités. Cependant, d'autres études de neuroimagerie et de recherche comportementale proposent de diviser la capacité spatiale en deux échelles distinctes : la capacité spatiale à grande échelle et à petite échelle (Wang et al., 2014; Yuan et al., 2019) : nous développerons donc sommairement cette distinction. Dans la vie de tous les jours, nous entendons parfois que les hommes voient mieux que les femmes dans l'espace. En fait, un facteur supposé

de variation de la capacité spatiale est le genre. Il y a des débats concernant l'impact du genre sur la capacité spatiale mais certaines études, dont une méta-analyse, suggèrent qu'il y a bel et bien une différence entre les hommes et les femmes (Harle & Towns, 2011; Yuan et al., 2019). Il existe de nombreuses fonctions cognitives relatives à la capacité spatiale et aux représentations spatiales comme l'attention visiospatiale, l'imagerie spatiale, la rotation mentale. C'est pour cela que les neurosciences se sont également intéressées au sujet afin de déterminer quelles zones du cerveau s'activaient lors d'un processus de réflexion spatiale mais également celles qui s'activent pour les différentes fonctions cognitives (Cona & Scarpazza, 2019; Zacks, 2008). Pour la capacité spatiale du point de vue de la chimie, nous commencerons par une brève analyse historique des représentations en chimie. Nous discuterons ensuite les différentes compétences représentationnelles identifiées par Kozma & Russel (2005), ainsi que l'utilité de la visualisation tridimensionnelle en chimie organique et nous décrirons les modèles mentaux et les différents types de représentations. Ces points nous mèneront aux difficultés des étudiants ainsi qu'aux études présentant la façon dont différents types d'enseignement (Underwood et al., 2016) ou différentes associations de représentations (modèle 3D et animations par exemple (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014; Stull et al., 2013)) peuvent améliorer les résultats des étudiants. Récemment, quelques études ont tenté de voir si l'utilisation de la réalité augmentée pouvait améliorer les performances des étudiants dans les exercices nécessitant la visualisation tridimensionnelle (Abdinejad et al., 2021; Gandhi et al., 2020). C'est pourquoi nous les évoquerons également.

Au cours de la recherche bibliographique de ce travail de fin d'études, un fait intéressant concernant la résolution des problèmes nécessitant la capacité spatiale est apparu. En effet, certaines études ont démontré que malgré l'importance de la capacité spatiale dans la résolution de problèmes en chimie organique, d'autres stratégies étaient développées. Celles-ci peuvent être analytiques, schématiques ou bien encore algorithmiques (Stieff, 2011; Stieff et al., 2005, 2012). Etant donné que ce sont des stratégies qui permettent aux étudiants de surmonter leurs difficultés vis-à-vis de la visualisation, il est intéressant d'en discuter et de voir si l'enseignement permet d'aiguiller les étudiants vers telle ou telle stratégie.

L'enseignement fait évidemment également appel aux manuels scolaires et nous verrons dans le chapitre 2 que ceux-ci n'établissent pas toujours de liens clairs entre les niveaux submicroscopique, macroscopique et symbolique (Gkitzia et al., 2011; Upahi & Ramnarain, 2019). Afin d'évaluer les différentes proportions de représentations, des manuels francophones ont été analysés qualitativement en suivant les mêmes critères que les deux études précédemment citées (Gkitzia et al., 2011; Upahi & Ramnarain, 2019). De plus, certains de ces livres seront analysés quantitativement afin de déterminer les proportions des différents types de représentations que nous pouvons y rencontrer. Ensuite, une analyse similaire a été réalisée sur deux livres régulièrement utilisés dans l'enseignement supérieur : les traités de J.E. McMurry et de P. Arnaud (Jamart et al., 2009; McMurry & Simanek, 2007).

Ce travail a également pour objectif de contribuer à établir un état des lieux des compétences des élèves de fin d'enseignement secondaire et de 1^{er} cycle universitaire en Fédération Wallonie-Bruxelles. Dans le cadre de ce travail et vu le temps limité imparti à notre étude, nous nous sommes limités à quelques écoles d'enseignement secondaire général de la région liégeoise et à l'Université de Liège. Des questionnaires adaptés aux deux niveaux d'enseignement concernés ont été élaborés en se basant sur les données de la littérature et en ciblant les différentes opérations mentales requises (chapitre 1). Après une phase de validation, ils ont été soumis aux apprenants dans le cadre d'une de leurs périodes de cours. Un questionnaire en ligne a également été proposé aux professeurs d'enseignement secondaire afin d'identifier leurs méthodes d'enseignement privilégiées dans le cadre de la visualisation tridimensionnelle des molécules. Les résultats de cette étude sont présentés et discutés dans le chapitre 3.

Le chapitre 4 présente une ingénierie didactique abordant l'énantiométrie, activité de dépassement conçue pour des élèves de fin d'enseignement secondaire général dans un cours de sciences générales (2 périodes de chimie/semaine). La conception de cette activité prend en compte les constats et résultats des chapitres précédents. Cette activité a été testée avec un nombre limité d'élèves et les résultats, nécessairement préliminaires, sont présentés et discutés.

Chapitre 1 :

Etat de l'art

1.1) Capacité spatiale

1.1.1) Fondements historiques

Comme évoqué dans l'introduction, la capacité spatiale est étudiée depuis plus de 200 ans. En effet, ce domaine de recherche s'est développé durant le 19^e siècle avec Sir Frances Galton. Ce dernier a défini l'imagerie mentale comme étant « *les différents degrés de vivacité avec lesquels différentes personnes ont la faculté de rappeler des scènes familières sous la forme d'images mentales, et les particularités des visions mentales de différentes personnes* » (Harle & Towns, 2011).

Jusqu'au début du 20^e siècle, on pensait que la capacité spatiale était caractéristique de l'intelligence globale. Or, à partir des années 1920, avec le développement des méthodes d'analyse des facteurs, les chercheurs ont déterminé que la capacité spatiale était un facteur différent de l'intelligence globale. Ils l'ont appelé « le facteur spatial » (Harle & Towns, 2011). Cependant, cela a suscité des nombreux débats dans le domaine (G. M. Bodner & Guay, 1997). Lorsque ces méthodes ont continué d'être développées, des années 70 aux années 90, les chercheurs ont trouvé qu'en réalité la capacité spatiale était elle-même constituée de nombreux autres facteurs. Le débat concernant la capacité spatiale s'est donc porté sur les facteurs la composant (G. M. Bodner & Guay, 1997). Comme nous le verrons dans la partie sur les facteurs de capacité spatiale, le même facteur peut être désigné de différentes façons en fonction de l'étude et le nombre de facteurs varie également d'une étude à l'autre. Par exemple, Lohman et son équipe ont trouvé trois facteurs majeurs de capacités spatiales (Lohman, 1979) tandis que Carroll en a identifié cinq (Harle & Towns, 2011). Dans le domaine de la capacité spatiale, différents types de recherche se sont développés : la recherche des facteurs faisant varier la capacité spatiale (âge, genre,...), des méta-analyses et des études sur son développement (Harle & Towns, 2011).

1.1.2) Facteurs de capacité spatiale

Nous allons présenter plus en détail les facteurs de Lohman et Carroll car ce sont les deux méta-analyses les plus citées et les plus utilisées dans les articles plus récents. Lohman (1979) définit la capacité spatiale comme étant la capacité à construire des images visuelles abstraites ainsi qu'à les manipuler. D'autres donnent comme définition de la capacité spatiale qu'il s'agit de la capacité à « *comprendre les relations entre différentes positions dans l'espace ou à imaginer des mouvements d'objets en deux et trois dimensions* » (Wang et al., 2014; Yuan et al., 2019). Il existe trois facteurs majeurs et quatre facteurs mineurs (Lohman, 1979). Les trois facteurs majeurs de la capacité spatiale sont (Boukhechem & Dumon, 2016; Carlisle et al., 2015; Harle & Towns, 2011; Lohman, 1979) :

1. Les relations spatiales : ce facteur concerne la rotation mentale. En effet, il s'agit des tâches dans lesquelles une rotation mentale est effectuée que ce soit dans un diagramme 2D (rotation dans le plan) ou dans une représentation 3D (rotation en dehors du plan). Lohman indique tout de même que ce facteur de capacité spatiale majeur ne tient probablement pas compte de la vitesse à laquelle la rotation mentale est effectuée.
2. L'orientation spatiale : il s'agit de la capacité à changer de point de vue, de perspective et à voir à quoi un objet ressemblerait après ce changement. Il est évident qu'il est compliqué d'évaluer ce facteur étant donné qu'au lieu de changer de point de vue, l'observateur peut plutôt effectuer une rotation mentale.
3. La visualisation : dans ce facteur, nous avons classé les tâches consistant à voir le mouvement d'une partie de l'objet ou de la figure.

Il est intéressant de noter que d'autres études ont repris ces trois facteurs majeurs mais en ajoutant des tâches supplémentaires. Par exemple, Barnea (2000) a ajouté les tâches impliquant l'inversion et la réflexion dans le facteur « relations spatiales » et la capacité à passer d'une représentation 2D à une représentation 3D et inversement dans le facteur « visualisation spatiale » (Barnea, 2000; Ferk et al., 2003; J. K. Gilbert, 2005).

En plus de ces trois facteurs majeurs, ces auteurs ont identifié quatre facteurs mineurs. Le premier est la rapidité de fermeture, c'est-à-dire la vitesse à laquelle nous sommes capables d'apparier des stimuli incomplets avec leur représentation dans notre mémoire à long terme. Les deux suivants sont la vitesse de perception, c'est-à-dire la vitesse à laquelle nous sommes capables de retrouver un objet parmi d'autres ou de comparer des objets ou motifs, et la mémoire visuelle qui se rapporte à la réminiscence à court terme de ces stimuli visuels. Le dernier se nomme la kinesthésique et se rapporte à la discrimination gauche-droite (Barnea, 2000; Harle & Towns, 2011).

Comme l'indiquent Harle & Towns (2011) dans leur étude, Carroll a quant-à-lui identifié cinq facteurs majeurs parmi lesquels les relations spatiales et la visualisation sont identiques à ceux de Lohman. Cette fois-ci la vitesse de fermeture et la vitesse de perception sont classés dans les facteurs majeurs et non dans les facteurs mineurs comme Lohman l'avait proposé (Harle & Towns, 2011). Le dernier facteur majeur de Carroll est la flexibilité de fermeture : il s'agit de la capacité à dissocier une figure soit obscurcie d'une figure plus grande et plus complexe (Harle & Towns, 2011) ou encore de la vitesse à laquelle nous sommes capables de garder un schéma visuel en tête malgré des distractions (J. K. Gilbert, 2005). Il est intéressant d'observer que certains facteurs mineurs de Lohman se retrouvent dans les facteurs majeurs de Carroll. Nous constatons donc que même si les différentes études soulignent les mêmes facteurs, elles ne leur attribuent pas toujours la même importance.

Pour illustrer que le nombre de facteurs peut bel et bien fortement varier d'une étude à l'autre, signalons que deux facteurs principaux ont été proposés par une autre recherche : l'orientation spatiale et la visualisation spatiale (G. M. Bodner & Guay, 1997). Le premier est défini comme la capacité à utiliser la rotation spatiale dans des tâches sans se laisser perturber ou distraire par ces changements d'orientation. Nous pouvons donc remarquer que cela ne correspond pas au facteur orientation spatiale de Lohman (1979) mais plutôt au facteur relations spatiales. Le second facteur principal proposé par Bodner & Guay (1997), la visualisation spatiale, correspond au facteur de visualisation de Lohman (1979). Donc, dans les trois exemples présentés, nous évoluons de deux facteurs principaux à sept facteurs (trois majeurs et quatre mineurs) avec Lohman (1979) en passant par les cinq facteurs de Carroll.

Des travaux plus récents (Carlisle et al., 2015; Ferk et al., 2003; J. K. Gilbert, 2005) invoquent surtout les facteurs de Lohman (1979) avec les ajouts de Barnea (2000). De nombreux tests permettent de tester ces trois facteurs majeurs comme nous allons le voir dans la section suivante.

1.1.3) Tests de capacité spatiale

Dans les études concernant l'impact de différents moyens pour améliorer les performances des étudiants en chimie ou déterminer les stratégies utilisées dans les résolutions, les chercheurs mesurent souvent la capacité spatiale des étudiants grâce à différents tests (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014; Carlisle et al., 2015; Hegarty et al., 2013; Stull et al., 2012) qui évaluent les différents facteurs mentionnés ci-dessus.

Pour la mesure du facteur des relations spatiales, nous pouvons citer deux tests souvent rencontrés : le test de visualisation de Purdue des rotations (G. M. Bodner & Guay, 1997) et le test de rotation mentale de Vandenburg et Kuse (1978) (Harle & Towns, 2011).

- 1) Test de visualisation de Purdue des rotations (PVROT) : Comme nous pouvons le voir dans la Figure 1, qui représente l'item 7 du test, les items sont constitués de trois lignes distinctes. Dans la première ligne, il est d'abord demandé aux étudiants d'observer la façon dont l'objet est tourné. Ensuite, il leur est demandé d'imaginer la figure de la ligne centrale après avoir subi la même rotation que celle utilisée à la ligne précédente et de sélectionner la figure représentant leur image mentale parmi les cinq figures de la dernière ligne (G. M. Bodner & Guay, 1997; Harle & Towns, 2011). Ce test est constitué de 20 items devant être réalisés en dix minutes (G. M. Bodner & Guay, 1997) et les étudiants passant ce test ne sont pas autorisés à faire des marques sur le test, les rotations devant être mentales (Harle & Towns, 2011). Dans ce test, il y a des exercices qui nécessitent plusieurs axes de rotation contrairement à ce qui est illustré dans la Figure 1.

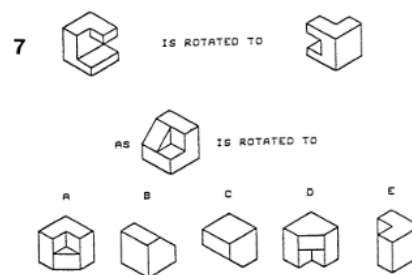


Figure 1: Item 7 du test PVROT (G. M. Bodner & Guay, 1997; Harle & Towns, 2011)

- 2) Test de rotation mentale de Vanderburd et Kuse (MRT) : nous pouvons voir dans la Figure 2 un exemple d'item proposé dans ce test. Dans ce genre d'exercices, une figure est représentée à gauche et il est demandé aux étudiants de retrouver les deux figures qui la représentent mais tournée selon différents axes de rotation (Harle & Towns, 2011).

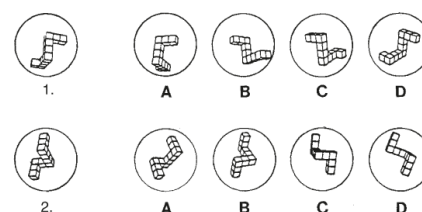


Figure 2: Items 1 et 2 du test MRT (Harle & Towns, 2011)

La mesure du facteur d'orientation spatiale a suscité de nombreuses critiques au départ car les chercheurs estimaient que ces tâches pouvaient être réalisées en effectuant une rotation mentale. Cependant, ils ont tout de même réussi à développer des tests nécessitant un changement de perspective plutôt qu'une rotation mentale. Nous pouvons citer deux tests souvent employés : le test de visualisation spatiale de Purdue de Guay (1976) (Harle & Towns, 2011) et le test « Prise de perspective / Test d'orientation spatiale » (Harle & Towns, 2011; Hegarty et al., 2008; Hegarty & Waller, 2004).

1) Test de visualisation spatiale de Purdue de Guay (PSVT) : En fait ce test est composé de trois parties, une pour la visualisation que nous expliciterons dans les tests destinés à la visualisation, une sur la rotation mentale (relations spatiales) et une sur l'orientation spatiale qui nous concerne ici. Comme nous pouvons le voir dans la Figure 3, le test demande aux étudiants de choisir parmi les figures proposées celle correspond à la figure du dessus lorsque nous regardons par un des coins du cube (Harle & Towns, 2011).

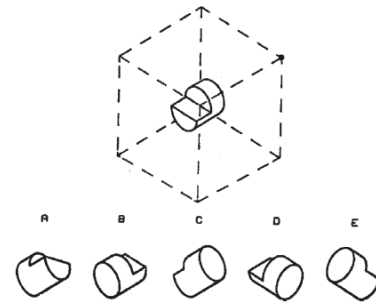


Figure 3: Item 26 du test PSVT de Guay (Harle & Towns, 2011)

2) Test « Prise de perspective / Test d'orientation spatiale » (PTSOT) : Dans ce test, un schéma 2D reprenant différents objets est présenté (Figure 4). Ensuite, les personnes testées doivent s'imaginer être au niveau d'un des objets tout en regardant vers un deuxième. Elles doivent alors indiquer à l'aide d'une flèche sur le cercle la direction dans laquelle se trouve un troisième objet (Harle & Towns, 2011; Hegarty & Waller, 2004). Une des versions du test est constituée de 12 items à résoudre en cinq minutes (Hegarty et al., 2008) sans dessiner ou écrire sur le questionnaire (Harle & Towns, 2011).

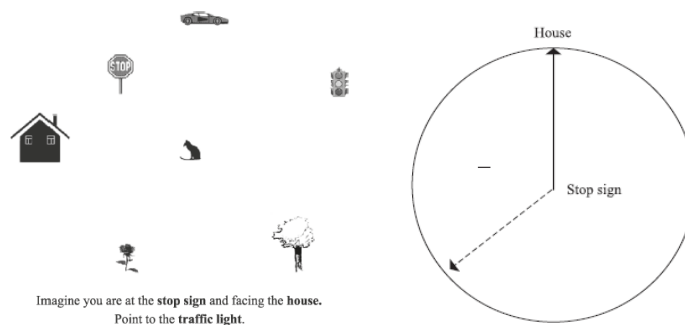


Figure 4: Item trouvé dans le test PTSOT (Harle & Towns, 2011; Hegarty et al., 2008; Hegarty & Waller, 2004)

Concernant les tests de visualisation spatiale, nous pouvons également en citer deux : la partie visualisation du PSVT et le test de Guilford et Lacy (Harle & Towns, 2011).

1) Test de visualisation spatiale Purdue de Guay (PSVT) (Figure 5) : Il faut imaginer à quoi ressemblerait l'objet 3D formé lorsque nous refermons le développement illustré dans la partie supérieure de l'item. La surface foncée indique le fond de l'objet. Il faut cependant noter qu'il faut également effectuer des rotations pour trouver la réponse correcte (Harle & Towns, 2011).

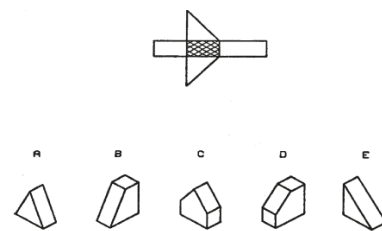


Figure 5: Item du test PSVT de Guay (Harle & Towns, 2011)

2) Test de Guilford et Lacy : Les tâches de ce test font référence à des feuilles pliées plusieurs fois et sur lesquelles une découpe est effectuée, comme illustré dans la Figure 6. L'objectif

est d’imaginer comment ce trou va se propager lors du dépliage de la feuille. Il s’agit donc bien de faire déplacer des parties de la figure (Harle & Towns, 2011).

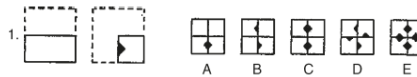


Figure 6: Item du test de Guilford et Lacy (Harle & Towns, 2011)

Après avoir identifié les facteurs influençant la capacité spatiale et les tests permettant de les évaluer, se pose la question de son amélioration. Il est commun de dire qu’elle peut être améliorée par de l’entraînement. Il a en effet été montré que quelles que soient les stratégies de résolution utilisées (analytique ou imagerie), l’entraînement améliore la capacité spatiale (Harle & Towns, 2011). De plus, il apparaît que cette amélioration est persistante dans le temps. Nous pouvons donc conclure que la capacité spatiale n’est pas immuable (Harle & Towns, 2011). Nous reviendrons sur ces stratégies dans la suite de ce travail (Chapitre 1.4.4).

1.1.4) Capacité spatiale à grande et à petite échelle

La capacité spatiale peut également être examinée selon un autre point de vue qui distingue la capacité spatiale à petite échelle et la capacité spatiale à grande échelle (Hegarty et al., 2006; Wang et al., 2014; Yuan et al., 2019). La première fait référence à la capacité de pouvoir effectuer des tâches ne nécessitant qu’un seul point de vue comme manipuler des représentations 2D ou 3D (Yuan et al., 2019). Cette échelle de capacité spatiale reprend deux facteurs de Lohman cités plus haut : la visualisation spatiale et les relations spatiales. Par exemple, une tâche spécifique à la capacité spatiale à petite échelle consiste à effectuer une rotation d’un objet ou encore à passer de 2D à 3D (Wang et al., 2014; Yuan et al., 2019). Elle est également utilisée dans des tâches nécessitant le pliage et le dépliage de feuilles comme évoqué précédemment dans le test de Guilford et Lacy (Hegarty et al., 2006; Yuan et al., 2019). Dans ce type de capacité spatiale, le cadre de référence est qualifié d’allocentrique, ce qui signifie qu’il est plutôt centré sur l’objet que sur la personne. Dans la littérature, la capacité spatiale à petite échelle peut porter de nombreux autres noms comme « transformation basée sur des objets », « rotation mentale », « manipulation d’objets » ou encore « capacité spatiale psychométrique » (Wang et al., 2014).

La capacité spatiale à grande échelle fait, quant à elle référence à la capacité à résoudre des tâches dans lesquelles la perspective de l’observateur varie dans un environnement plus grand. Cependant, les relations spatiales entre les différents objets de cet environnement ne varient pas (Wang et al., 2014; Yuan et al., 2019). Cette fois-ci, l’observateur doit se trouver dans un cadre de référence égocentrique, c’est-à-dire centré sur soi-même (Wang et al., 2014). La capacité spatiale à grande échelle reprend la capacité de navigation environnementale (Wang et al., 2014; Yuan et al., 2019) et le facteur d’orientation spatiale (Yuan et al., 2019). Un exemple de tâche est de pouvoir naviguer dans un environnement large (Yuan et al., 2019), appréhender la disposition de bâtiments dans une ville et comprendre des indications de directions de manière verbale (Hegarty et al., 2006).

Certaines études suggèrent que les deux échelles de capacités spatiales sont dissociées soit partiellement (Hegarty et al., 2006) soit de manière plus distincte (Wang et al., 2014). Cette méta-analyse a montré que le coefficient de corrélation de Pearson entre les différentes échelles de capacité spatiale est de 0,269, ce qui correspond à une force de relation faible à moyen. Par conséquent, cela signifie que la capacité spatiale est mieux décrite lorsqu’elle est séparée en deux catégories distinctes (Wang et al., 2014). De plus, les études de neurosciences concluent que les deux échelles n’activent pas les mêmes régions dans le cerveau (Wang et al., 2014; Yuan et al., 2019). Nous reviendrons sur ces différentes zones dans la prochaine section consacrée à l’effet du genre car les zones activées varient non seulement en fonction de l’échelle de capacité spatiale

mais également en fonction du genre. Si les deux échelles sont effectivement séparées, les tests précédemment cités échouent à évaluer la capacité spatiale à grande échelle étant donné que cette dernière est mieux évaluée avec la navigation environnementale (Wang et al., 2014).

Wang et al. (2014) ont mis en évidence que le degré de corrélation entre les deux capacités spatiales variait selon les études. Ils ont formulé l'hypothèse qu'il devait y avoir des modérateurs comme l'âge ou le genre (Wang et al., 2014). Ils ont confirmé un effet modérateur significatif concernant l'âge mais pas le genre (Wang et al., 2014). D'autres études observent cependant des corrélations significatives entre la capacité spatiale et le genre comme nous le discutons dans la prochaine section.

1.1.5) L'effet du genre sur la capacité spatiale

Dans ce domaine, les publications de recherche citent souvent la méta-analyse de Linn (1985). Celle-ci a démontré qu'il existait une corrélation entre la capacité spatiale et le genre mais que la situation variait selon les tâches. En effet, il semblerait qu'une grande différence entre les genres soit trouvée pour les tâches impliquant la rotation mentale (Harle & Towns, 2011; Wang et al., 2014; Yuan et al., 2019). Une différence plus mitigée est trouvée dans les tâches impliquant le facteur d'orientation spatiale mais aucune dans les tâches de visualisation spatiale (Wang et al., 2014; Yuan et al., 2019). Une méta-analyse plus récente a donc étudié la différence entre les genres pour ces deux types de capacités spatiales tant au niveau comportemental que des apports des neurosciences (Yuan et al., 2019).

Au niveau comportemental, ils ont conclu que dans n'importe laquelle des deux échelles, les hommes surpassaient les femmes. Cependant la différence causée par le genre est considérée comme forte pour la capacité spatiale à grande échelle et moyenne pour la capacité spatiale à petite échelle. Ils ont également trouvé qu'il y avait d'autres effets modérateurs de la différence dans les différentes tâches de capacité spatiale. Les modérateurs les plus importants sont l'âge (la différence augmente avec l'âge) et l'origine géographique. Il semblerait que l'éducation joue également un rôle dans la différence entre les genres (Yuan et al., 2019). Concernant l'origine géographique, il semblerait que la différence entre les sexes soit plus importante en Europe et en Amérique qu'en Asie. Cependant, ils n'ont pu expliquer cette observation car de nombreuses causes sont possibles (Yuan et al., 2019).

Au niveau des neurosciences, Yuan et al. (2019) ont analysé les zones activées du cerveau rapportées dans la littérature pour les hommes et les femmes séparément dans des tâches de capacité à grande échelle (Figure 7). Puis ils ont fait de même pour la capacité spatiale à petite échelle. Ils ont montré que la base neuronale commune aux hommes et aux femmes pour cette capacité spatiale est la région de l'hippocampe (Wang et al., 2014; Yuan et al., 2019) et plus précisément au niveau du gyrus parahippocampique (Yuan et al., 2019). Cependant, une autre zone était fortement activée chez les femmes lors de ce type de tâches : le noyau lentiforme bilatéral. Or, cette zone est connue comme étant liée à l'expérience émotionnelle des individus ainsi qu'aux émotions négatives, ce qui suggère que les femmes ont une anxiété spatiale plus importante que les hommes. Par exemple, un élément important dans la performance plus importante des hommes par rapport aux femmes serait la limite de temps qui induirait un stress générateur d'anxiété chez les femmes en état d'anxiété (Yuan et al., 2019). De plus, les hommes n'ont pas montré de base neurale spécifique pour les tâches de capacité spatiale à grand échelle, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de zone spécifiquement activée chez les hommes par rapport aux femmes. Par conséquent, comme les femmes sont moins performantes que les hommes mais que leur gyrus parahippocampique montre une activité plus intense, les auteurs concluent à un fonctionnement moins performant du gyrus parahippocampique des femmes.

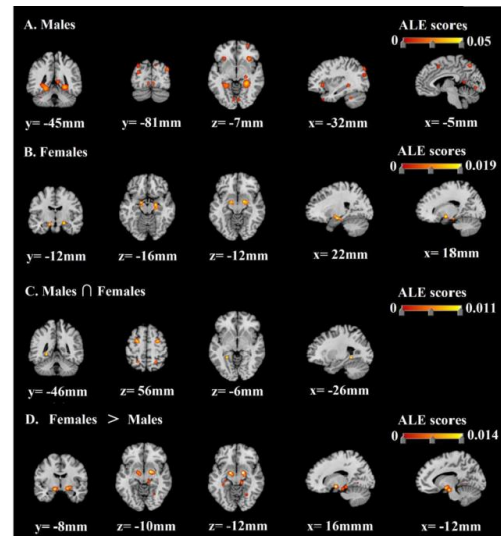


Figure 7: Méta-analyse ALE (« Activation Likelihood Estimation ») d'études de neuroimagerie sur la capacité spatiale à grande échelle des hommes (A) et des femmes (B). Analyse des conjonctions (C) et des contrastes (régions cérébrales plus activées par les femmes) (D) (Yuan et al., 2019)

Pour la capacité spatiale à petite échelle, les résultats sont donnés dans la Figure 8. La base neurale chez les hommes et les femmes est constituée du gyrus frontal moyen bilatéral, du gyrus frontal inférieur bilatéral, du gyrus fusiforme gauche, du gyrus occipital inférieur gauche, du lobule pariétal inférieur bilatéral et du précunéus bilatéral. La base neurale est donc très importante contrairement à la capacité spatiale à long terme, ce qui pourrait expliquer que la différence entre les genres est moins grande pour la capacité spatiale à petite échelle (Yuan et al., 2019). Cependant, dans ce cas également, certaines zones étaient plus activées chez les femmes : le sub-gyral droit, le précunéus droit et le gyrus préfrontal moyen gauche. La première est responsable du contrôle exécutif et les deux dernières semblent être responsables de l'utilisation de la stratégie égocentrique. Par conséquent, les femmes utiliseraient plus souvent la stratégie égocentrique que les hommes (Yuan et al., 2019). Or, comme nous l'avons mentionné plus haut, la meilleure stratégie pour les capacités spatiales à petite échelle est la stratégie allocentrique (Wang et al., 2014; Yuan et al.,

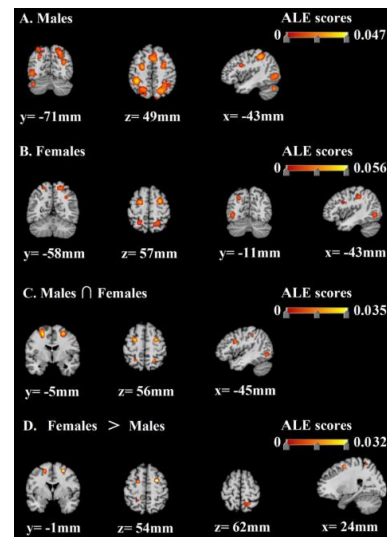


Figure 8: Méta-analyse ALE d'études de neuroimagerie sur la capacité spatiale à petite échelle des hommes (A) et des femmes (B). Analyse des conjonctions (C) et des contrastes (régions cérébrales plus activées par les femmes) (D) (Yuan et al., 2019)

2019), ce qui pourrait expliquer leurs performances moindres dans ces tâches. De plus, il semblerait que leur sub-gyral droit fonctionnerait moins bien. Différents arguments basés sur les neurosciences semblent donc établir un lien entre le genre et la capacité spatiale.

Les études de neurosciences ont également tenté de comprendre quelles zones étaient partagées par les différentes fonctions cognitives spatiales ainsi que de déterminer les zones qui s'activaient spécifiquement pour chacune de ces fonctions. C'est l'objet du paragraphe suivant.

1.1.6) Etudes de neurosciences sur les fonctions cognitives spatiales

Dans cette section, nous allons discuter du traitement spatial et des zones du cerveau qui sont activées lors de l'utilisation de différentes fonctions cognitives utilisant des représentations spatiales : l'attention spatiale, la mémoire de travail spatiale, la rotation mentale (Cona & Scarpazza, 2019; Zacks, 2008) et l'imagerie spatiale, la mémoire à long terme et la navigation (Cona & Scarpazza, 2019). Nous allons nous concentrer spécifiquement sur le modèle expliquant quelles zones s'activent lors du traitement spatial et sur la fonction d'imagerie et de rotation mentale. En effet, la rotation mentale et l'imagerie, définie comme étant la capacité à pouvoir construire et manipuler des images mentales sans support externe, sont essentielles dans le domaine de la chimie où il faut être capable de se représenter mentalement une molécule pour établir des liens avec diverses propriétés physico-chimiques ou de pouvoir la manipuler par la pensée pour reconnaître, par exemple, des stéréoisomères. L'intérêt des neurosciences pour le traitement spatial et les zones anatomiques qu'il implique remonte au début du 20^e siècle (Cona & Scarpazza, 2019). Une des techniques largement utilisée actuellement dans ce cadre est l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, c'est-à-dire l'IRM.

Concernant le réseau central du traitement spatial, la méta-analyse de Cona & Scarpazza (2019) a indiqué que plusieurs zones du cerveau s'activaient de façon bilatérale lors de l'utilisation des différentes fonctions cognitives comme nous pouvons le voir dans la Figure 9. Tout d'abord, nous retrouvons les régions supérieures des lobes frontaux (gyrus frontal moyen, champ oculaire frontal (FEF) et le cortex prémoteur dorsal) et pariétaux (précuneus, lobules pariétaux supérieurs et le sillon intra pariétal (IPS)) (Cona & Scarpazza, 2019). Nous appelons ces régions le réseau frontopariétal. Le FEF et l'IPS constituent les parties essentielles du réseau d'attention dorsale (DAN). Ce réseau contiendrait des cartes topographiques de l'espace qui permettraient de hiérarchiser les emplacements du champ visuel selon le comportement. En d'autres termes, elles permettraient de classer les emplacements dans l'environnement selon la pertinence pour le comportement. Cette classification de la priorité des informations spatiales sur une base comportementale est dynamique et varie en fonction des informations visuelles reçues, des objectifs poursuivis, ... (Cona & Scarpazza, 2019). L'activation du DAN signifierait peut-être que lorsque nous avons besoin d'une représentation interne de l'environnement, l'orientation attentionnelle vers celle-ci permettrait de la maintenir active (Cona & Scarpazza, 2019). Comme cette activation a lieu dans de nombreuses tâches de mémoire de travail ou d'imagerie mentale par exemple, l'orientation attentionnelle constituerait un mécanisme important dans la maintenance des représentations internes liées à ces tâches. L'insula antérieure

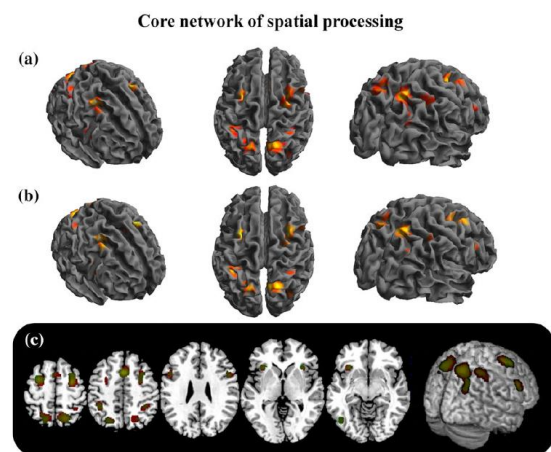


Figure 9: Zones activées dans le réseau central pour le traitement spatial. Méta-analyse de toutes les études (a); méta-analyse des études ayant réalisé une correction pour comparaisons multiples (b); conjonction entre les deux méta-analyses (c) (Cona & Scarpazza,

et l'opercule frontal permettent de détecter des stimuli pertinents qui peuvent être soit externes soit internes. Cela permet d'influencer les comportements et les pensées en fonction de ces stimuli. La zone motrice pré-complémentaire (Pré-SMA) quant à elle, joue un rôle dans le traitement de la séquence des tâches visiospatiales de manière séquentielle (Cona & Scarpazza, 2019). L'activation de ces différentes zones, quelles que soient les tâches spatiales, conforte l'idée qu'il existe une base neuronale globale au traitement spatial (Cona & Scarpazza, 2019).

L'imagerie mentale et la rotation mentale sont impliquées dans des tâches souvent retrouvées en chimie organique comme déterminer si deux objets ou représentations sont identiques malgré leur orientation différente ou encore déterminer s'ils sont images l'un de l'autre (Cona & Scarpazza, 2019). Dans l'opération psychologique mettant en œuvre la rotation mentale, la représentation mentale d'un objet ou d'une figure est manipulée et tournée mentalement autour d'un axe dans l'espace 3D (Zacks, 2008). Au début des années 70, les chercheurs ont discuté pour la première fois de la rotation spatiale et c'était dans le cadre de recherches comportementales. Ils ont également découvert que plus le nombre de rotations entre deux éléments à comparer était important, plus le temps de réflexion était important (Zacks, 2008). Comme zones du cerveau activées, nous retrouvons les zones frontopariétales, qui, pour rappel, sont supposées focaliser l'attention vers ce qui est essentiel et créer des cartes topographiques permettant de déterminer les emplacements cibles pour une action précise (Cona & Scarpazza, 2019; Zacks, 2008). Il semblerait également que l'activation augmente lorsque de nombreuses rotations sont nécessaires (Zacks, 2008), ce qui pourrait expliquer pourquoi cette tâche requiert une durée supérieure. La pré-SMA présente le même phénomène et cette région a un rôle dans la transformation des représentations spatiales (Cona & Scarpazza, 2019). Zacks (2008) a mis en évidence une activation des régions motrices du cortex précentral, ce qui signifierait qu'un observateur exécute une simulation avec ses mains d'objets en mouvements. Cona & Scarpazza (2019) avaient également observé une activation des régions frontales inférieures. L'activation du cortex préfrontal pourrait confirmer l'utilisation de simulations motrices pour ces tâches (Zacks, 2008). Zacks (2008) propose un rôle supplémentaire pour le cortex pariétal supérieur et le cortex préfrontal : ces zones permettraient de mettre en relation deux cadres de références différents et donc l'activation pourrait également être modulée par la simulation motrice. Il est en effet suggéré que, lorsqu'un objet tourne, deux cadres de références existent ; un centré sur l'objet et le second par rapport à l'environnement. Ces deux cadres doivent être alignés pour comparer, par exemple, si deux objets sont identiques (Zacks, 2008). Il existerait également un troisième cadre de références centré sur l'effecteur. Ces deux méta-analyses ont aussi détecté une activation dans le gyrus occipital inférieur gauche et dans le sillon post-central droit (Cona & Scarpazza, 2019; Zacks, 2008). L'activation de ces régions mène à l'hypothèse que des informations somatosensorielles (c'est-à-dire provenant de la surface du corps) et visuelles sont intégrées et codées pour permettre le processus de rotation mentale ou d'imagerie mentale (Cona & Scarpazza, 2019).

Dans la Figure 10, les différentes zones s'activant lors du traitement spatial sont illustrées. Le modèle neurocognitif suivant a été proposé par Cona & Scarpazza (2019) sur la base de ces différentes zones. Tout d'abord, l'attention serait déplacée vers les stimuli via des entrées d'informations grâce au réseau frontopariétal ventral (jonction temporopariétale et gyrus frontal inférieur). La seconde étape est l'encodage des caractéristiques spatiales des stimuli. Pour cela, l'attention interne est dirigée vers les différentes représentations grâce à l'activation du réseau frontopariétal dorsal. De plus, la pré-SMA s'active également pour intégrer les différentes informations dans une carte de l'espace de manière séquentielle. La troisième étape est la hiérarchisation des cartes spatiales venant d'être formées selon les objectifs de l'individu et les stimuli externes grâce à l'opercule frontal et au cortex insulaire. Les régions frontales et préfrontales vont ensuite modifier les cartes en fonction des modifications de l'environnement ou

des objectifs. Une éventuelle dernière étape se déroule lorsqu'il est nécessaire d'impliquer la mémoire à long terme : l'activation des régions parahippocampiques et rétrospléniales qui permettent de reconnaître des points de références et de stocker les différentes cartes spatiales formées durant le processus (Cona & Scarpazza, 2019).

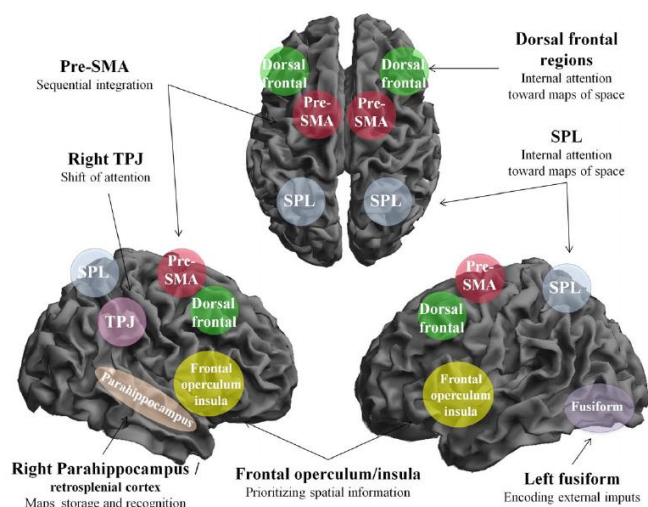


Figure 10: Illustration schématique du modèle proposé pour le traitement spatial. Pré-SMA: zone motrice pré-complémentaire; SPL: lobe pariétal supérieur; TPJ: jonction temporopariétale analyses (Cona & Scarpazza, 2019)

1.2) Capacité spatiale en chimie organique

La science est un domaine dans lequel la visualisation est un élément clé. En biologie et biochimie, des représentations sont nécessaires afin de former une image mentale des cellules ou encore des structures des protéines par exemple. On sait d'ailleurs que Watson et Crick se sont basés sur un modèle moléculaire tridimensionnel pour proposer la structure en double hélice de l'ADN en 1953. C'est une des représentations moléculaires les plus connues. En physique, lors de la résolution de problèmes concernant les forces s'appliquant sur un objet, celles-ci sont représentées par des flèches. En géologie, il est nécessaire de pouvoir représenter les différentes couches terrestres ou illustrer ce qu'il se passe dans certains phénomènes qui prennent des milliers d'années. Dans ce travail, nous nous concentrons sur la chimie organique. Depuis les travaux pionniers de van't Hoff (1875) sur le carbone tétraédrique, on sait que la chimie est une science à trois dimensions : il est dès lors crucial de pouvoir visualiser dans l'espace les molécules et leurs transformations au cours des réactions.

Après avoir réalisé ce tour d'horizon concernant la capacité spatiale de manière générale, nous allons nous concentrer sur la chimie organique. En effet, la chimie étant un domaine dans lequel on ne voit pas directement les objets fondamentaux d'étude au niveau moléculaire, il a été nécessaire de développer des représentations spécifiques. Nous allons donc examiner dans cette partie en quoi la capacité de visualisation est importante en chimie et discuter les différentes capacités nécessaires ainsi que les différents outils existants d'aide à la visualisation. Mais avant cela, il est intéressant de se plonger dans l'histoire pour comprendre d'où viennent les représentations que nous utilisons actuellement et quels grands scientifiques ont contribué dans ce domaine. Un des objectifs de ce travail étant de développer un outil permettant d'aider les apprenants à mieux se représenter mentalement les structures moléculaires tridimensionnelles, nous discuterons ensuite des difficultés des élèves et étudiants et des améliorations apportées par les différents outils.

1.2.1) Histoire de la représentation spatiale en chimie

Le début de la visualisation des atomes et des molécules remonte évidemment au développement des symboles chimiques et de la nomenclature (Kozma & Russel, 2005). Nous devons les symboles chimiques tels que nous les connaissons à Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) qui les a développés sur la base des noms latins au cours du début du 19^e siècle (Leyh, 2020). Ensuite, comme nous l'avons déjà évoqué, Jacobus Henricus van't Hoff publia dans les années 1870 un traité intitulé « *La chimie dans l'espace* » dans lequel il a proposé une géométrie tétraédrique autour des atomes de carbone. Cette hypothèse reposait sur l'identification des isomères de composés $CR_1R_2R_3R_4$ (Leyh, 2020; van't Hoff, 1875). Ensuite, le développement des moyens de représentation entraîna une amélioration de la compréhension de la chimie et permit donc le développement de ce domaine (Kozma & Russel, 2005). Après le développement des premières représentations de molécules, des formules structurales ont été développées à partir du 20^e siècle. Ces structures ont permis de mieux visualiser la géométrie tridimensionnelle des molécules, c'est-à-dire la composition mais aussi les liaisons liant les différents atomes. La conséquence de ce développement est qu'il a été plus facile d'identifier où se trouvent les zones les plus réactives d'une molécule. Effectivement, à cette époque, l'étude de la chimie s'est concentrée sur la conception des molécules et leur formation (Kozma & Russel, 2005). Par après, entre les années 1930 et 1960, les chimistes ont développé des modèles moléculaires tridimensionnels comme le modèle compact ou encore le modèle éclaté nommé également le modèle en sphères et bâtons (« ball and stick »). Cette évolution a permis d'encore mieux visualiser l'agencement spatial des molécules mais, en plus, étant donné qu'il était possible de les manipuler, une approche des opérations devenait possible (Kozma & Russel, 2005). A partir des années 1960, l'informatique s'est développée et la création de divers logiciels de chimie quantique a rendu possible le calcul théorique des longueurs et des angles de liaison. Même si les modèles 3D solides restent utiles, la tâche est plus compliquée pour des molécules de plus grande taille. Les logiciels ont permis la représentation tridimensionnelle non seulement de la structure géométrique de molécules plus grosses, que ce soit en sphères et bâtons ou en modèles compacts, mais aussi de la distribution de la densité électronique (Kozma & Russel, 2005). A partir de ce moment, les chercheurs disposaient d'outils pour mieux interpréter l'influence de l'encombrement stérique, de la stéréochimie, de l'électrophilie et de la nucléophilie (Kozma & Russel, 2005).

Après avoir évoqué brièvement l'histoire de la représentation en chimie, nous allons examiner les liens que nous pouvons établir avec la capacité spatiale.

1.2.2) Compétences représentationnelles

Les liens avec la capacité spatiale sont assez évidents car comme nous utilisons énormément de représentations pour communiquer ou pour enseigner, il faut être capable de les générer, de les manipuler et de les interpréter correctement pour bien visualiser les phénomènes (Kozma & Russel, 2005). Or, c'est justement une des définitions de la capacité spatiale citée plus haut (Boukhechem & Dumon, 2016). Les compétences représentationnelles sont les compétences spécifiques requises afin de pouvoir utiliser et interpréter correctement les représentations individuellement ou en les associant pour comprendre des phénomènes chimiques (Carlisle et al., 2015; Harle & Towns, 2011; Kozma & Russel, 2005). En effet, l'utilisation de représentations est importante dans tous les domaines de la chimie et en particulier en chimie organique qui est l'objet de ce mémoire. Par exemple, les représentations spatiales sont utiles pour aborder la stéréochimie, en particulier la chiralité et l'énantiométrie, ainsi que leur rôle dans les mécanismes réactionnels (exemple avec la substitution nucléophile d'ordre 2). En connaissant ces différents concepts ainsi que les angles et les longueurs des liaisons, il est possible de pouvoir prédire la réactivité et les propriétés physico-chimiques qu'un composé peut avoir (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014). Il existe de nombreuses représentations en chimie telles que la projection de Fischer, la projection de

Newman, les représentations de Cram (avec des traits continus, en pointillés et en gras pour indiquer ce qui se trouve dans un plan et ce qui est en-dehors). La compréhension de modèles visuels implique la capacité à pouvoir les utiliser, à extraire des informations importantes et pertinentes pour l'objectif souhaité mais aussi à pouvoir passer d'une représentation à une autre, ce que l'on désigne sous le terme de « traduction » (Dickmann et al., 2019; Harle & Towns, 2011). La traduction consiste aussi à pouvoir établir des liens entre les différentes représentations pour étudier un concept chimique précis (Boukhechem & Dumon, 2016). Ces auteurs ont mis en évidence le fait que la compréhension des modèles visuels était en corrélation avec la cognition spatiale générale et avec la capacité spatiale. Ils ont également observé une troisième corrélation avec la connaissance du contenu chimique. Il semblerait que la compréhension des représentations améliore la connaissance du contenu chimique mais que cette connaissance ainsi améliorée permet à son tour une meilleure compréhension des modèles (Dickmann et al., 2019). Cependant, cette hypothèse n'a pas pu être confirmée de manière significative dans le cas spécifique de la chimie organique. Plusieurs causes ont été proposées pour expliquer ce problème : le taux d'abandon entre les mesures, la motivation des étudiants restants ou encore le fait que les étudiants considèrent la chimie organique comme étant un cours de mémorisation (Dickmann et al., 2019).

D'après Kozma & Russel (2005), les compétences représentationnelles sont au nombre de sept :

- 1) Pouvoir utiliser des représentations dans la description de phénomènes chimiques.
- 2) Savoir quelle représentation il faut générer et/ou utiliser pour atteindre un objectif précis.
- 3) Savoir identifier les caractéristiques des différents types de représentation et savoir les analyser.
- 4) Savoir comparer différentes représentations, c'est-à-dire indiquer les informations identiques qu'elles procurent mais également savoir quelle information est spécifique à un type de représentation.
- 5) Pouvoir réaliser des connexions entre différentes représentations (au niveau des caractéristiques)
- 6) Adopter une position épistémologique cohérente vis-à-vis des représentations, en les distinguant des phénomènes eux-mêmes.
- 7) Utiliser les représentations pour communiquer avec d'autres chercheurs, faire des prédictions, établir des schémas de preuves.

Evidemment, au cours de l'apprentissage, ces compétences s'acquièrent progressivement à divers niveaux. C'est pourquoi cinq niveaux de compétences représentationnelles ont été définis (Graulich, 2015; Kozma & Russel, 2005). Les étudiants débutant dans le domaine sont souvent au niveau 1 dans lequel seulement les caractéristiques des représentations sont utilisées. Par conséquent, cela limite leur capacité à pouvoir interpréter de manière complète les informations données par les représentations (Graulich, 2015). Les experts sont quant à eux au niveau 5, c'est-à-dire l'utilisation rhétorique des représentations. Dans ce niveau, les personnes sont capables d'appliquer correctement les sept compétences représentationnelles citées ci-dessus (Graulich, 2015; Kozma & Russel, 2005). Cette classification est en accord avec Dickmann et al. (2019) qui ont rapporté que la compréhension des représentations était une construction dynamique que les étudiants peuvent améliorer au cours du temps.

1.2.3) Types de représentations

Les représentations permettent à un individu de construire des modèles mentaux (Stieff et al., 2005). Certains auteurs ont tenté de définir un modèle mental comme étant un modèle interne et personnel réalisé par un individu. Autrement dit, personne d'autre ne peut accéder au modèle mental qu'un individu précis a d'un phénomène scientifique. Un exemple de modèle mental est la façon dont un individu imagine à quoi ressemble un atome (John K. Gilbert, 2005). Pour

d'autres par contre, il n'est pas possible de donner une définition précise de ce qu'est un modèle mental pour quatre raisons différentes (Rapp, 2005). Tout d'abord, c'est un concept abstrait qu'on ne peut pas visualiser dans des expériences de neuroimagerie par exemple. Ensuite, les modèles mentaux d'un individu ne sont pas immuables mais peuvent évoluer. La troisième raison est que les tentatives de définition proposées dans la littérature dans différents contextes de recherche n'ont pas toujours de liens entre elles Et enfin, les modèles mentaux ne sont pas nécessairement corrects. Par conséquent, ils peuvent soit améliorer la performance de l'individu soit empêcher celui-ci de répondre correctement (Rapp, 2005). Malgré ces difficultés de définition, certaines caractéristiques communes des modèles mentaux émergent toutefois. Tout d'abord, les modèles mentaux servent de stockage d'informations tant au niveau des caractéristiques spatiales que des caractéristiques physiques ou conceptuelles. Ils permettent de prendre des décisions, de résoudre des problèmes ou encore de structurer les connaissances qu'un individu peut posséder. Leur troisième caractéristique est de permettre d'exécuter des simulations conceptuelles. Enfin, les modèles mentaux ne représentent que des fractions des informations externes, pas des répliques entières. Lorsque nous en avons besoin, notre mémoire les mobilise en fonction de nos objectifs (Rapp, 2005).

Rapp (2005) a mis en avant trois facteurs qui peuvent influencer la formation de modèles mentaux. Tout d'abord, il y a l'engagement cognitif à la base de la théorie de l'apprentissage connue sous le nom de constructivisme. Ce facteur implique que les étudiants soient engagés dans une activité cognitive requérant une bonne concentration. Le traitement profond d'un concept permettrait d'avoir plus de chances de s'en souvenir par après alors qu'un traitement superficiel provoquerait un stockage moins ancré dans la mémoire. Il faut toutefois considérer cette affirmation avec prudence car la qualité d'un traitement profond varie avec les situations rencontrées (Rapp, 2005). Dans une approche constructiviste, la mobilisation des connaissances antérieures et leur confrontation aux nouvelles informations est cruciale. Les apprenants construisent leurs connaissances de façon itérative (Rapp, 2005). Deuxièmement, il y a l'interactivité. L'apprentissage est meilleur lorsque les étudiants peuvent modifier les caractéristiques des phénomènes observés pour les personnaliser de façon significative (Rapp, 2005). Les animations numériques sont un exemple de matériel permettant cela car il est possible de modifier des paramètres pertinents comme la température, ... Ce facteur peut être relié au premier car, lorsqu'il y a de l'interactivité, les étudiants s'impliquent plus. Dans cette optique, nous pouvons considérer que tout modèle mental, étant manipulable, est aussi interactif. Le troisième facteur est l'apprentissage multimédia (Rapp, 2005). Ce facteur se base sur la théorie du double codage de Paivio. Cette théorie affirme que l'apprentissage est meilleur en cas d'utilisation de sources redondantes, visuelles et verbales, car elles peuvent permettre aux étudiants de créer des connexions dans la mémoire (Kumi et al., 2013; Rapp, 2005; Wu et al., 2001). Ce phénomène est possible car ces deux types d'informations ne sont pas codés et traités par la même partie du cerveau. Ce facteur est donc une justification de l'utilisation de représentations multiples. Il faut toutefois souligner que l'efficacité de ce genre de représentation est corrélée au degré de complémentarité des informations (Kumi et al., 2013; Rapp, 2005). Si elles ne sont pas correctement corrélées, elles peuvent plutôt être source de confusion chez les étudiants (Rapp, 2005).

Comme nous l'avons vu dans la partie historique des représentations en chimie organique, de nombreux types de représentations ont été utilisés et le sont toujours actuellement. Nous allons maintenant discuter ces différentes représentations auxquelles nous ferons souvent référence dans les prochains points de ce travail. Elles sont souvent utilisées en chimie car elles permettent de rendre les différents concepts abstraits plus concrets (John K. Gilbert, 2005; Rapp, 2005). De plus, l'utilisation récurrente de représentations externes (les modèles concrets, diagrammes, ...) peut aider les étudiants à construire de meilleures modèles mentaux (Carlisle et al., 2015). Un troisième

bénéfice de l'utilisation des représentations est qu'elle permet de faciliter la résolution de problèmes en diminuant la charge cognitive normalement nécessaire (Carlisle et al., 2015). Les représentations peuvent être classées en trois niveaux : macroscopique, submicroscopique et symbolique (Dickmann et al., 2019; Ferk et al., 2005; John K. Gilbert, 2005; Johnstone, 2000; Upahi & Ramnarain, 2019; Wu et al., 2001).

Le niveau macroscopique se rapporte à tout ce qui est observable par nos sens (Gkitzia et al., 2011; Johnstone, 2000; Upahi & Ramnarain, 2019). Il se rapporte donc aux observations que l'on peut faire lors d'expériences, par exemple l'établissement de propriétés des composés (Dickmann et al., 2019; John K. Gilbert, 2005; Wu et al., 2001).

Le niveau symbolique, également appelé niveau représentationnel (Johnstone, 2000; Upahi & Ramnarain, 2019), inclut les symboles, les formules structurales, les équations, les graphes, ... (Dickmann et al., 2019; John K. Gilbert, 2005; Gkitzia et al., 2011; Johnstone, 2000; Upahi & Ramnarain, 2019; Wu et al., 2001). Il existe différents types de représentations symboliques que nous croisons dans l'étude de la chimie comme les formules de Lewis, les formules développées, semi-développées et topologiques, les représentations de Cram, les projections de Newman et de Fischer. Les trois dernières citées tentent de décrire en deux dimensions le caractère tridimensionnel des molécules (Gkitzia et al., 2011). Tout d'abord, il y a les représentations développées qui ont pour avantage d'indiquer l'entièreté des liaisons (Figure 11). Cependant, leur défaut est de ne donner aucune information sur la structure (angles de liaison, ...) (Bucat & Mocerino, 2009). D'autres représentations utilisées communément dès le début de l'apprentissage sont les représentations semi-développées et topologiques (Figure 11). Les apprenants doivent toutefois apprendre à les décoder (Bucat & Mocerino, 2009), particulièrement dans le cas des formules topologiques.

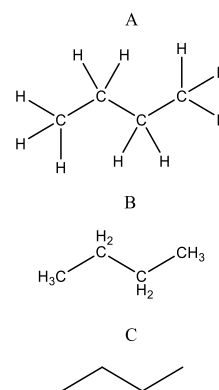


Figure 11: Formule développée (A) ; semi-développée (B) et topologique (C)

Plus tard dans leur cursus, les étudiants rencontrent la représentation de Cram qui permet de mettre en évidence l'arrangement spatial des groupements composant les molécules en utilisant des indices de profondeur (Boukhechem & Dumon, 2016; Stull et al., 2012). Les liaisons indiquant quels groupements s'approchent de nous sont en gras tandis que celles indiquant les groupements qui s'éloignent de nous sont en pointillés (Bucat & Mocerino, 2009; Olimpo et al., 2015). Cette représentation montre toujours une molécule de profil (Stull et al., 2012). Elle possède toutefois certains désavantages. Tout d'abord, elle est statique et ne montre pas les mouvements de rotation possibles. Ensuite, même s'il est possible d'illustrer une molécule en conformation éclipsée ou décalée avec une représentations de Cram, ce n'est pas celle qui met le mieux en avant la conformation la plus stable, autrement dit la conformation décalée, ni les gênes stériques qui peuvent exister entre les différents substituants de la molécule (Bucat & Mocerino, 2009). Plus loin encore dans les études, lorsque les diagrammes d'énergie sont abordés, les étudiants rencontrent la projection de Newman. Elle permet effectivement de montrer que l'énergie d'une conformation peut varier de manière significative en fonction de la rotation gênée des groupements autour de la liaison σ carbone-carbone (Boukhechem & Dumon, 2016) et des modifications au niveau des gênes stériques qu'elle entraîne (Stull et al., 2012). Cette projection permet de voir la molécule de face. En effet, les trois substituants du carbone que nous voyons directement sont représentés par les trois lignes provenant du centre du cercle et les trois substituants du second carbone sont indiqués par les lignes provenant de la circonférence du cercle (Olimpo et al., 2015; Stull et al., 2012). Il existe un autre type de projection : la projection de Fischer. Nous retrouvons surtout cette représentation lors de l'étude des sucres car elle permet de mettre en avant les relations stéréochimiques de composés appartenant à cette famille chimique

(Boukhechem & Dumon, 2016). Cependant, cette projection ne donne aucun indice de profondeur pour permettre de visualiser la molécule en 3D contrairement aux deux autres. En effet, il faut juste savoir que les lignes verticales indiquent ce qui s'éloigne de l'observateur et que les lignes horizontales indiquent ce qui vient vers l'observateur (Olimpo et al., 2015). L'intersection entre les lignes indique la présence d'un carbone. Un autre désavantage est que nous pouvons seulement voir la molécule dans la conformation éclipsée (Stull et al., 2012). Nous constatons donc qu'il est nécessaire de connaître les conventions de ces différents diagrammes afin de pouvoir établir un lien avec la structure tridimensionnelle (Stull et al., 2012). Ces trois derniers types de représentations sont illustrés dans la Figure 12.

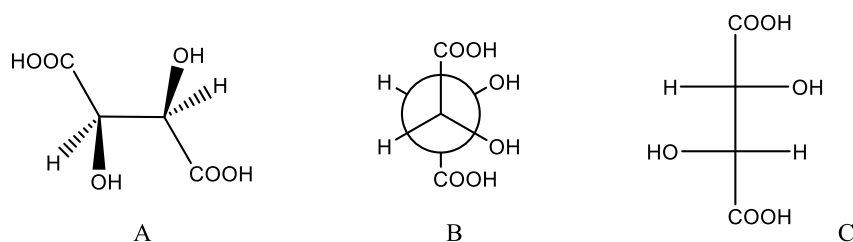


Figure 12: Représentation de Cram (A), projection de Newman (B) et projection de Fischer (C)

Le troisième niveau de représentation est le niveau submicroscopique. Celui-ci se rapporte non seulement aux structures, c'est-à-dire à l'arrangement spatial, mais aussi aux déplacements des molécules (Gkitzia et al., 2011; Wu et al., 2001). Cela ne concerne pas seulement les molécules mais aussi les ions, les atomes et les particules subatomiques (John K. Gilbert, 2005; Gkitzia et al., 2011; Johnstone, 2000; Upahi & Ramnarain, 2019; Wu et al., 2001). Dans ce niveau, nous rencontrons typiquement les représentations externes comme les modèles moléculaires (Dickmann et al., 2019; Gkitzia et al., 2011). Les plus classiques sont les modèles en sphères et tiges et les modèles compacts (Dickmann et al., 2019; Gkitzia et al., 2011). Ils illustrent correctement la structure autour d'un atome particulier (Kozma & Russel, 2005) étant donné que les tiges et les sphères sont produites pour respecter les contraintes des angles de liaisons (Stull et al., 2012). On peut également disposer de représentations informatiques ou encore d'animations (Gkitzia et al., 2011). Contrairement aux représentations du niveau symbolique, il n'est pas nécessaire de connaître des conventions pour obtenir la tridimensionnalité des structures (Stull et al., 2012), elles illustrent bien que la matière est constituée de particules (Gkitzia et al., 2011) et peuvent être manipulées explicitement (Kozma & Russel, 2005). Cependant, il faut bien comprendre que les atomes sont représentés dans ces modèles par des sphères et les liaisons par des tiges solides alors qu'en réalité un atome est composé de particules subatomiques (noyaux et électrons) décrites par des fonctions d'ondes (Stull et al., 2012). En effet, il peut arriver que cette façon d'illustrer la molécule entraîne des conceptions alternatives (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014). Cette méthode de représentation a d'autres limitations qui peuvent être contournées par les outils informatiques. Les représentations via des logiciels informatiques peuvent être aussi manipulées, tournées ou observées selon diverses perspectives. La différence avec les modèles concrets est que nous pouvons utiliser les représentations informatiques pour représenter la densité électronique mais aussi pour calculer les longueurs de liaisons et les angles comme indiqué dans la partie historique (Kozma & Russel, 2005). Afin d'avoir des informations sur la dynamique, il existe des simulations et des animations informatisées (Gkitzia et al., 2011; Kozma & Russel, 2005). Celles-ci permettent de faire varier des paramètres pour analyser leurs effets sur les molécules individuelles ou lors d'une réaction chimique. Les paramètres peuvent être la température, la pression, la quantité de réactifs, etc (Kozma & Russel, 2005).

Nous venons de voir de nombreuses façons de représenter une molécule ou un phénomène chimique au travers de ces trois niveaux de représentations. De plus, chaque représentation possède ses propres conventions à connaître et met en avant des caractéristiques bien différentes.

Par exemple, les projections de Newman permettent de correctement visualiser les gênes stériques alors que la représentation de Cram illustre mieux la structure tridimensionnelle des molécules. Les représentations d'une même molécule peuvent sembler tellement différentes que les étudiants débutants peuvent penser qu'il s'agit de molécules différentes (Bucat & Mocerino, 2009). Toutes ces conventions sont évidemment essentielles à la compréhension de la chimie car, pour comprendre les concepts chimiques que nous étudions avec différents modèles, il faut d'abord comprendre ce qu'ils signifient (Dickmann et al., 2019). Il est donc évident que l'utilisation et la compréhension de toutes ces représentations puissent sembler compliquées pour les étudiants et génèrent de nombreuses difficultés (Graulich, 2015; Harle & Towns, 2011). De plus, ces représentations n'illustrent, pour la plupart, pas le caractère dynamique des structures moléculaires (Olimpo et al., 2015). Dans les prochains points de ce travail, nous allons discuter les différentes difficultés rapportées dans la littérature ainsi que les conclusions atteintes à propos de l'utilisation des représentations.

1.3) Obstacles didactiques

Dans ce point, nous allons passer en revue une partie des études réalisées sur le sujet afin de déterminer les différents problèmes que les étudiants rencontrent quand ils sont confrontés aux représentations et à des prédictions de propriétés physico-chimiques.

Un problème que nous allons aborder se rapporte à la compréhension et la manipulation des différentes représentations, c'est-à-dire pouvoir reconnaître les conventions, pouvoir visualiser les molécules en trois dimensions (nous nommerons cette capacité : la perception) ou encore pouvoir effectuer des rotations ou des réflexions sur les molécules. Il est important de pouvoir utiliser les représentations et effectuer des opérations afin de pouvoir résoudre des tâches comme déterminer si une molécule est polaire. En effet, pour faire cela, il faut pouvoir visualiser si un dipôle de liaison est contrebalancé par un autre en effectuant une rotation partielle de la molécule (Carlisle et al., 2015). Il peut être difficile de visualiser la structure tridimensionnelle à partir de structures bidimensionnelles car cela nécessite non seulement la maîtrise des facteurs de capacité spatiale mais aussi la connaissance des conventions et la capacité de changer de perspective (Boukhechem & Dumon, 2016; Gkitzia et al., 2011). La représentation, nécessairement approximative, d'une molécule en 2D peut mener les étudiants à créer de faux modèles mentaux et à ne pas comprendre le caractère dynamique des molécules (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014; Gkitzia et al., 2011; Olimpo et al., 2015).

Différentes études ont été menées concernant la perception, la rotation et la réflexion dont celles de Ferk et al. (2003, 2005). Dans ces études, il a été demandé aux étudiants de répondre à différentes questions nécessitant ces trois opérations avec différents types de représentation. Il semblerait que les étudiants ont plus de difficultés à utiliser les modèles abstraits, la représentation de Cram par exemple, que les illustrations de modèles concrets (Ferk et al., 2003). Il est important de noter que les étudiants à l'université ont quant à eux été plus performants avec des photos de modèles 3D ou avec des modèles informatiques (Ferk et al., 2003). Il semblerait pourtant que, pour certains, la perception des molécules est meilleure lorsqu'ils utilisent des représentations de Cram plutôt que des modèles informatiques statiques grâce aux indices de profondeur (Ferk et al., 2005). Les conventions peuvent poser problèmes aux étudiants (Head & Bucat, 2002; Taskin et al., 2015; Wu et al., 2001). Par exemple, les étudiants ont des difficultés à nommer des molécules illustrées par des représentations moins courantes comme la projection de Newman par rapport à une formule semi-développée (M. G. Bodner & Domin, 2000). Une autre étude a établi que de nombreux étudiants avaient des difficultés à utiliser les indices de profondeur dans le but de visualiser les molécules en trois dimensions (Tuckey et al., 1990). Dans l'étude de Ferk et al. de 2003, les conventions n'étaient pas rappelées contrairement à celle de 2005 qui a conduit à de

meilleures performances des étudiants (Ferk et al., 2005). Il faut toutefois noter que les échantillons de ces deux études étaient différents.

Par contre, pour les opérations de rotation, les modèles informatiques statiques sont favorisés car cette méthode a la capacité de montrer le volume occupé par la molécule, d'indiquer plus clairement la position des atomes et de permettre d'utiliser plus facilement les informations nécessaires à la résolution des tâches impliquant la rotation (Ferk et al., 2005). Il est donc évident que cette représentation est plus simple à visualiser lorsque les molécules sont grandes. Les étudiants éprouvent des difficultés avec la représentation de Cram car ils n'arrivent pas à savoir comment les indices de profondeur vont changer après une opération de rotation (Wu et al., 2001). Cependant, pour les tâches impliquant l'opération de réflexion, les formules stéréochimiques permettent aux étudiants d'avoir de meilleurs résultats qu'avec des modèles informatiques statiques. La raison serait que les étudiants utilisent des règles avec, par exemple, la représentation de Cram, alors qu'avec les modèles informatiques statiques, l'opération reste mentale (Ferk et al., 2005). Il est plus facile d'appliquer une règle que de faire des processus mentaux. Lorsque les auteurs de cette étude proposent aux étudiants d'utiliser des modèles 3D pour les aider, un autre problème est apparu dans les tâches impliquant la réflexion : les étudiants ne comprennent pas bien la différence entre rotation et réflexion (Ferk et al., 2005; Tuckey et al., 1990). De plus, il semble qu'un nombre important d'étudiants aient des difficultés à identifier les axes de rotation et les plans de symétrie (Tuckey et al., 1990), utiles pour la détermination des centres chiraux (Carlisle et al., 2015) et à visualiser la position des différents atomes ou groupes d'atomes après avoir effectué des opérations (Boukhechem & Dumon, 2016; Head & Bucat, 2002; Tuckey et al., 1990). L'étude de Tuckey et al. (1990) a montré qu'une simple remédiation de deux heures durant lesquelles des explications sur ces deux problèmes sont données suffit à améliorer les résultats. Nous pouvons donc dire que, selon le type de tâches, le type de représentation sera une source plus ou moins importante de difficultés chez les étudiants. Pour les tâches de rotation et de réflexion, un autre problème a été mis en avant. Plus le nombre de procédés augmente, plus la proportion de réussite diminue et ce pour tous les types de représentation (Ferk et al., 2003). Par conséquent, les tâches impliquant de la perception, de la rotation et de la réflexion sont plus compliquées à résoudre que les autres. Il ne s'agit pas uniquement de la complexité au niveau du type d'opérations mais aussi au niveau du nombre d'opérations. En effet, les étudiants auront plus de difficultés à résoudre des exercices nécessitant plusieurs rotations que ceux limités à une seule rotation (Carlisle et al., 2015; Ferk et al., 2003).

Différents facteurs influencent la difficulté des exercices comme l'a montré Taskin et al. (2015). L'objectif de son étude était de développer un test appelé « Chemical representation inventory » (CRI) afin de déterminer le niveau de connaissance des étudiants concernant les représentations chimiques. Ce test reprend différents thèmes : la nomenclature, les équations chimiques, les formules squelettes (représentation de Cram,...), les modèles concrets en tiges et sphères et la traduction entre différents types de représentation (Taskin et al., 2015). Outre le type de représentation chimique et le nombre d'étapes nécessaires pour la résolution comme nous l'avons indiqué ci-dessus, il y a trois autres facteurs : le contenu chimique (taille et complexité du composé), le fait de devoir ou non imaginer des structures supplémentaires et le plus important, le degré de familiarité avec le type de représentation utilisé dans l'exercice (Taskin et al., 2015). Il faut donc un entraînement plus important si nous souhaitons que les étudiants éprouvent moins de difficultés.

Une autre tâche souvent rencontrée dans les exercices et les examens cause de nombreux problèmes : la traduction entre les représentations (Carlisle et al., 2015; Gkitzia et al., 2011; Olimpo et al., 2015; Stieff, 2011; Stull et al., 2012; Wu et al., 2001). Les étudiants semblent avoir des difficultés à comprendre ce que chaque représentation 2D peut apporter comme information spatiale. Par conséquent, l'utilisation de cette dernière lors de la résolution d'exercices devient

impossible (Carlisle et al., 2015). Lors de traductions entre la représentation de Cram, la projection de Newman et la projection de Fischer, les étudiants ont tendance à modifier l'arrangement spatial. En d'autres termes, ils forment la majorité du temps des stéréoisomères (Boukhechem & Dumon, 2016; Olimpo et al., 2015; Stull et al., 2012). Il est tout de même important de noter qu'en termes de connectivité des substituants, les étudiants font moins d'erreurs (Stull et al., 2012). Les problèmes rencontrés avec ce type de tâches sont évidemment reliés aux problèmes déjà cités, à savoir les conventions (Kumi et al., 2013), le nombre d'opérations et l'application d'opérations successives différentes (Olimpo et al., 2015). En effet, lorsque les étudiants doivent effectuer des traductions des représentations de Cram en projections de Newman puis réaliser une ou plusieurs rotations afin de retrouver la projection correcte parmi cinq propositions, le degré de rotation à effectuer fait varier le taux de réussite. Il est intéressant de noter que la conformation de la représentation de Cram (éclipsée ou décalée) n'affecte pas la réussite. Ainsi, s'il n'y a pas de rotation, les étudiants sont capables de répondre ; s'il y a une rotation simple (un seul carbone) le taux de réussite diminue et s'il y a plusieurs rotations (les deux carbones par exemple), alors il y a de nombreux échecs. Le plus souvent, les étudiants sélectionnent l'énantiomère (Olimpo et al., 2015). Comme précédemment, cela semble assez logique étant donné que plus il y a de rotations, plus le nombre d'opérations mentales augmente et plus la charge cognitive devient importante (Olimpo et al., 2015). Le problème avec les conventions se marque particulièrement avec la traduction de la représentation de Cram en projection de Fischer. Lorsque la représentation de Cram n'est pas en position éclipsée et qu'elle possède le Y formé par les substituants vers le bas, les étudiants aplatissent simplement sans respecter les conventions de la projection de Fischer, c'est-à-dire sans mettre la représentation en position éclipsée (Boukhechem & Dumon, 2016; Olimpo et al., 2015). Ce problème est également en lien avec la nature dynamique des molécules que les étudiants ont tendance à oublier dans ce type de tâches (Boukhechem & Dumon, 2016). De plus, la maîtrise insuffisante des conventions fait que les étudiants se concentrent non pas sur les concepts cachés derrière les représentations mais plutôt sur les caractéristiques de surface (Boukhechem & Dumon, 2016). Plusieurs facteurs influencent donc la difficulté des exercices de traduction : le contenu chimique, le type de traduction (directe ou rotation pour respecter les conventions) et la familiarité des représentations (Taskin et al., 2015).

Comme nous l'avons brièvement évoqué au début de cette section, les propriétés physico-chimiques sont reliées à la structure de la molécule. Par exemple, la réactivité dépend du nombre et du type d'atomes et de la façon dont les substituants sont configurés dans l'espace (Stull et al., 2012). Il est évident que si des difficultés apparaissent pour imaginer cette structure et la manipuler, des problèmes vont également apparaître au niveau de la prédiction et de la justification argumentée des propriétés. Diverses études ont rapporté ce genre de difficultés (Akkuzu & Uyulgan, 2016; Cooper et al., 2012, 2013; Dickmann et al., 2019). Cooper et al (2012) ont développé un test demandant aux étudiants de sélectionner toutes les informations pouvant être déduites de la structure de Lewis, le test ILSI. Ils ont trouvé que les étudiants éprouvaient beaucoup de difficultés à déterminer les informations implicites comme déterminer la température d'ébullition relative, ou encore les forces intermoléculaires (Cooper et al., 2012). Les propriétés implicites sont celles qui nécessitent le passage de la structure de Lewis en structure tridimensionnelle grâce à la théorie VSEPR. Les propriétés explicites sont celles que nous pouvons directement déterminer à partir de la structure de Lewis en elle-même. Dans une étude demandant aux étudiants d'expliquer le phénomène de changements de phases, il est montré qu'ils confondent les forces intermoléculaires avec des liaisons covalentes, les liaisons hydrogènes par exemple (Cooper et al., 2013). On peut donc supposer que le même problème apparaît dans le cas des molécules en chimie organique. De plus, il semble que les étudiants possèdent une compréhension assez limitée des groupes fonctionnels et de nombreuses idées fausses concernant la polarité, la solubilité, le caractère nucléophile/ électrophile ou encore la déduction de la température d'ébullition relative (Akkuzu & Uyulgan, 2016). Une étude a été menée sur des

étudiants qui ont suivi un cours d'une année (deux semestres) en chimie générale et ensuite un cours d'une année également en chimie organique (Underwood et al., 2016). En utilisant le test ILSI précédemment cité, ils ont ainsi déterminé quel pourcentage d'étudiants était capable de réaliser un lien entre la structure et une propriété précise à la fin des quatre semestres. Leur première observation est qu'au terme du premier semestre, les étudiants étaient capables d'établir des liens entre la structure de Lewis et les informations relativement explicites comme l'ordre de liaison par exemple (Underwood et al., 2016). Par contre, cinq propriétés sont particulièrement compliquées à lier à la structure pour les étudiants : la température d'ébullition relative, la température de fusion relative, les propriétés physiques, l'acidité/basicité et la réactivité (Figure 13) (Underwood et al., 2016). Les développeurs du test ILSI ont placé dans leur questionnaire des réponses larges et des réponses plus précises. C'est pour cela que nous trouvons l'item « propriétés physiques » ainsi que « température de fusion relative » (Cooper et al., 2012). Ainsi, il est possible de voir si les étudiants savent que des liens peuvent être établis entre la structure de Lewis et les propriétés physiques de manière générale. Ensuite, il est possible de faire de même mais avec les propriétés physiques de manière plus précise, donc avec la température de fusion relative, la température d'ébullition relative, ... Cette figure montre les résultats des cohortes nommées CLUE – il s'agit d'un autre type d'apprentissage sur lequel nous reviendrons dans le prochain point – et traditionnelle. Dans la cohorte CLUE, les étudiants ont suivi un cursus CLUE en chimie générale mais un cursus traditionnel en chimie organique tandis que les étudiants de la cohorte traditionnelle ont suivi un cursus entièrement traditionnel (Underwood et al., 2016). Nous allons nous intéresser aux résultats de la cohorte traditionnelle. Il semble qu'à la fin du second semestre, seuls environ 50% peuvent lier ces cinq propriétés à la structure moléculaire. Or, le nombre d'abandons est conséquent entre la première année et la seconde année. En effet, seulement 10% des étudiants de départ ont terminé les quatre semestres de ces deux années. Donc une grande partie des étudiants partent sans savoir réaliser ces liens. De même, après les quatre semestres, une proportion non négligeable d'étudiants ne savent toujours pas faire le lien entre structure et propriétés (Underwood et al., 2016).

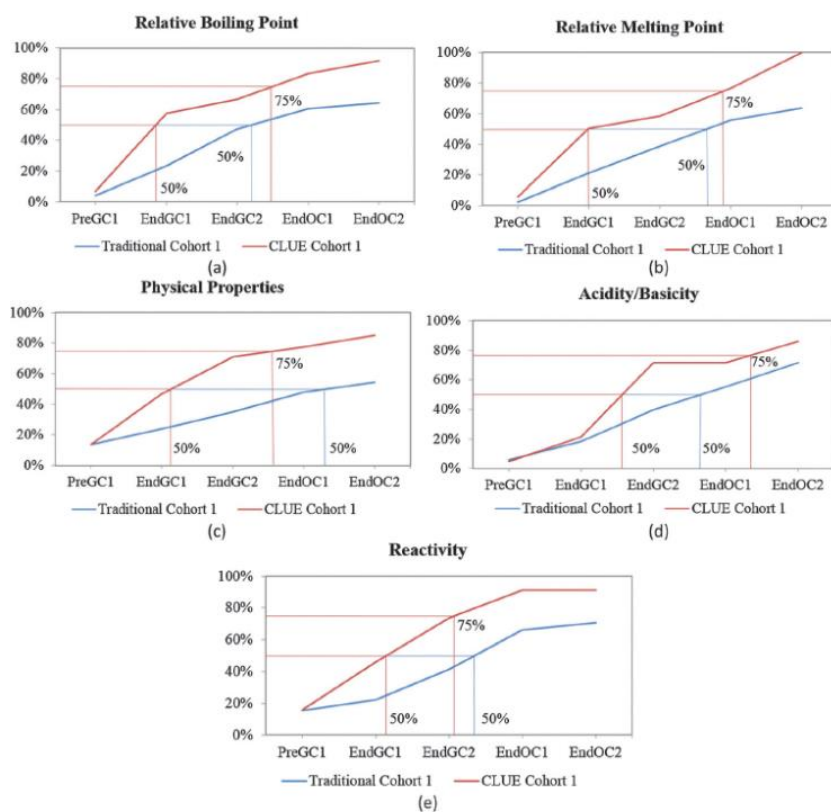


Figure 13: Proportion d'étudiants pouvant faire le lien entre la structure et (a) la température d'ébullition relative, (b) la température de fusion relative, (c) les propriétés physiques, (d) l'acidité et la basicité et (e) la réactivité en fonction du moment de l'instruction (PreGC1 : pré-instruction du premier semestre de chimie générale ; EndGC1 : fin du premier semestre de chimie générale ; EndGC2 : fin du second semestre de chimie générale ; EndOC1 : fin du premier semestre de chimie organique et EndOC2 : fin du second semestre de chimie organique (Underwood et al., 2016)

1.4) Méthodes didactiques pour améliorer les compétences de visualisation tridimensionnelle

1.4.1) Outils d'aide

Un moyen d'aider les étudiants à comprendre et manipuler mentalement les représentations est l'utilisation de couleurs qui est particulièrement efficace dans les tâches de rotation et de réflexion (Ferk et al., 2003). Cependant, un excès de couleur peut avoir l'effet inverse et diminuer l'efficacité de l'aide (Ferk et al., 2005).

Plusieurs méthodes ont été testées pour aider les étudiants à surpasser leurs difficultés. Tout d'abord l'utilisation conjointe d'autres types de représentation. Ferk et al (2005) ont conclu que le problème concernant la position des atomes dans les modèles informatiques statiques pouvait être corrigé avec des outils d'aide comme des modèles concrets, des modèles virtuels ou une combinaison des deux. La différence des modèles virtuels avec les modèles informatiques statiques est que nous pouvons les faire tourner grâce à une souris. Ces outils aident donc dans les tâches de perception mais une combinaison des deux perturbe les étudiants car leur attention est partagée simultanément entre plus d'informations (Ferk et al., 2005). Les auteurs de cette étude ont mené des interviews et il en est ressorti que le nombre d'informations permettant de percevoir la tridimensionnalité des molécules diminue entre les modèles concrets, les modèles virtuels et les modèles informatiques statiques. La perception des structures moléculaires dans les trois dimensions dépend de trois propriétés : l'observation directe, la rotation de la molécule et la palpabilité (Ferk et al., 2005). Les modèles concrets possèdent les trois propriétés, les modèles informatiques manipulables possèdent les deux premières alors que les modèles informatiques statiques ne font intervenir que l'observation. Par conséquent, dans ce dernier cas, la position des atomes peut être ambiguë (Ferk et al., 2005). Cependant, une étude a tenté de voir si les différences dans les indices haptiques, c'est-à-dire relatifs au toucher, et si une interactivité contrainte ont un impact sur les résultats obtenus entre les modèles concrets et les modèles virtuels manipulables lorsque les autres différences entre les deux sont contrôlées (Stull et al., 2013). Ces autres différences sont les indices de profondeur, la colocalisation de l'interface avec l'image visualisée et une interface de manipulation directe (Stull et al., 2013). Pour cela, ils ont développé un équipement permettant de donner l'illusion de pouvoir manipuler le modèle virtuel directement avec les mains. Ils ont ainsi montré que lorsque ces différences sont contrôlées, les différences d'indices haptiques n'affectent pas la précision de la traduction. De plus, l'interactivité contrainte, autrement dit le fait de ne pouvoir tourner que la liaison C-C et que cette liaison soit le point de pivot des rotations, permet d'augmenter la rapidité de résolution (Stull et al., 2013). Dans ce cas particulier, les modèles virtuels sont aussi voire même plus efficaces que les modèles concrets (Stull et al., 2013).

Les modèles concrets peuvent aider à effectuer des rotations car les étudiants peuvent mieux évaluer la position des atomes d'une représentation de Cram en rendant l'abstrait plus concret (Stull et al., 2012), ce qui permet de créer une image mentale plus précise tout en diminuant la charge cognitive nécessaire (Boukhechem & Dumon, 2016; Carlisle et al., 2015). Les étudiants ont une meilleure visualisation des liaisons, atomes et molécules étant donné le caractère concret du modèle (Wu et al., 2001). En plus d'améliorer la capacité d'effectuer les tâches de rotation, cela améliore aussi les tâches de traduction car les deux aspects sont liés comme nous l'avons vu avec l'exemple de la projection de Fischer (Stull et al., 2012). Les modèles moléculaires concrets sont utilisés dans le but de faire un alignement avec le diagramme cible et cet alignement se révèle être corrélé à la précision du dessin effectué (Stull et al., 2012).

Cependant, mettre un modèle concret entre les mains des étudiants ne les aide pas nécessairement, un apprentissage étant nécessaire. Il faut, par exemple, expliciter les conventions (Boukhechem & Dumon, 2016; Stull et al., 2012). Boukhechem & Dumon (2016) ont montré que l'efficacité de modèles concrets pour aider les étudiants dans les tâches de traduction était limitée par deux facteurs. Tout d'abord, la familiarité des représentations présentes dans l'exercice fait varier le taux de réussite. Il semble que les modèles concrets jouent très bien le rôle d'aide avec des représentations de Cram car celles-ci illustrent correctement la tridimensionnalité des molécules. Par contre, l'aide est moins efficace avec des projections de Newman et elle est nulle pour la projection de Fischer. Cette observation n'est pas étonnante étant donné que les enseignants mettent particulièrement l'accent sur les représentations de Cram, puis sur la projection de Newman et introduisent en dernier lieu la projection de Fischer (Boukhechem & Dumon, 2016). Les auteurs de cette étude ont également analysé l'impact des modèles concrets en fonction de la distribution des substituants autour des carbones asymétriques dans la molécule impliquée dans l'exercice. Leurs résultats indiquent que l'impact du modèle est plus important quand la molécule est éclipsée plutôt que décalée, l'aide varie donc en fonction de la distribution autour des carbones asymétriques. De plus, l'impact des modèles concrets sur la visualisation de la distribution des substituants autour des carbones asymétriques est plus important lorsque la distribution des substituants est symétrique, autrement dit, lorsque les substituants des deux carbones s'opposent comme dans la Figure 14A (Boukhechem & Dumon, 2016). Stull et al (2012) ont proposé aux étudiants d'utiliser des modèles concrets et ont remarqué que certains les utilisaient mal ou pas du tout. Plusieurs hypothèses ont été avancées. Tout d'abord, les étudiants peuvent utiliser d'autres stratégies de résolution comme nous le discuterons dans la section 1.4.4 donc ils ne voient pas la nécessité d'utiliser des modèles concrets. Une seconde hypothèse est qu'ils n'arrivent pas à faire la différence entre la représentation sous forme de diagramme 2D et la réalité tridimensionnelle. Par conséquent, il peut y avoir des difficultés à établir des correspondances (Stull et al., 2012). L'utilisation correcte des modèles requiert en effet la compréhension des différentes étapes impliquées dans la tâche. Celles-ci consistent à d'abord comprendre les conventions de la représentation 2D de départ, puis à orienter le modèle concret pour qu'il corresponde au diagramme de départ, à effectuer une rotation pour qu'il soit aligné au diagramme cible et enfin à utiliser les conventions de cette dernière pour la représenter (Stull et al., 2012). La compréhension des conventions reste donc importante même lors de l'utilisation de modèles concrets.

Leurs résultats indiquent que l'impact du modèle est plus important quand la molécule est éclipsée plutôt que décalée, l'aide varie donc en fonction de la distribution autour des carbones asymétriques. De plus, l'impact des modèles concrets sur la visualisation de la distribution des substituants autour des carbones asymétriques est plus important lorsque la distribution des substituants est symétrique, autrement dit, lorsque les substituants des deux carbones s'opposent comme dans la Figure 14A (Boukhechem & Dumon, 2016). Stull et al (2012) ont proposé aux étudiants d'utiliser des modèles concrets et ont remarqué que certains les utilisaient mal ou pas du tout. Plusieurs hypothèses ont été avancées. Tout d'abord, les étudiants peuvent utiliser d'autres stratégies de résolution comme nous le discuterons dans la section 1.4.4 donc ils ne voient pas la nécessité d'utiliser des modèles concrets. Une seconde hypothèse est qu'ils n'arrivent pas à faire la différence entre la représentation sous forme de diagramme 2D et la réalité tridimensionnelle. Par conséquent, il peut y avoir des difficultés à établir des correspondances (Stull et al., 2012). L'utilisation correcte des modèles requiert en effet la compréhension des différentes étapes impliquées dans la tâche. Celles-ci consistent à d'abord comprendre les conventions de la représentation 2D de départ, puis à orienter le modèle concret pour qu'il corresponde au diagramme de départ, à effectuer une rotation pour qu'il soit aligné au diagramme cible et enfin à utiliser les conventions de cette dernière pour la représenter (Stull et al., 2012). La compréhension des conventions reste donc importante même lors de l'utilisation de modèles concrets.

Les étudiants ont peu l'occasion de pouvoir examiner les molécules en trois dimensions alors que cela pourrait les aider à réaliser des liens entre les trois niveaux de représentation. Si ceux-ci ne sont pas utilisés et reliés correctement, des idées fausses peuvent être créées (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014). Par conséquent, un moyen d'aider les étudiants serait d'utiliser beaucoup plus souvent les différents niveaux de représentation, ce que nous appelons des représentations multiples (Gkitzia et al., 2011; Wu et al., 2001). Cependant, il faut également enseigner les relations entre les niveaux. De cette manière, cela pourra aider les étudiants dans les tâches de traduction par exemple (Gkitzia et al., 2011). En effet, les liens entre les niveaux de représentation peuvent servir à lier les concepts et les caractéristiques de surface. S'il n'y a pas de lien, les étudiants vont tenter de faire des connexions entre les représentations en se basant uniquement sur les caractéristiques de surface (symboles, couleurs, ...) et non sur la base des concepts (Wu et

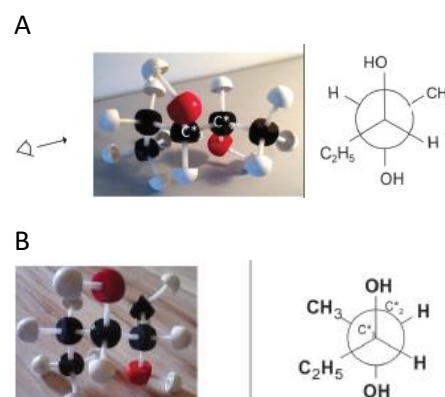


Figure 14: Distribution symétrique des substituants autour des centres chiraux (A) et distribution asymétrique des substituants autour des centres chiraux (B) (Boukhechem & Dumon, 2016)

al., 2001). Les animations et les programmes pour générer des modèles virtuels peuvent aider les étudiants en illustrant plusieurs types de représentations simultanément. De plus, ces aides permettent aux étudiants de faire tourner les molécules et de changer de perspectives. Par conséquent, cela peut améliorer les résultats dans les tâches de traduction (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014). Les animations permettent aux étudiants d'analyser la chiralité, les angles de liaisons et la stéréochimie par exemple de manière concrète au lieu de devoir « visualiser » les propriétés mentalement, cela réduit donc la charge mentale et le risque de faire émerger des conceptions alternatives (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014).

Une étude a également été menée afin de voir si l'association d'animations et de modèles concrets permet une aide plus importante qu'uniquement l'utilisation des modèles concrets (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014). Dans le cadre de cette recherche, ces auteurs ont développé environ 15 cours informatisés durant lesquels les étudiants doivent identifier des molécules, traduire entre différentes représentations, prédire le produit d'une réaction, etc. La combinaison d'animations et de modèles concrets permet d'améliorer la compréhension des étudiants et améliore les résultats dans les tâches de traduction. L'association des deux outils réduit la charge mentale, le côté abstrait des propriétés et par conséquent, elle favorise une image mentale plus précise et dynamique. Or, une construction dynamique permet d'améliorer la compréhension des modèles par les étudiants (Dickmann et al., 2019). C'est pour cela que l'association des deux a un impact positif (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014). De plus, il semble que cela accélère l'acquisition des compétences représentationnelles présentées dans la section 1.2.2 (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014). Les auteurs précisent qu'il faut considérer l'effet de nouveauté qui pourrait biaiser leurs conclusions. En effet, les étudiants du groupe test utilisent des ordinateurs, voient des animations et peuvent les manipuler donc il y a une certaine forme d'engouement qui accroît la motivation contrairement au groupe contrôle utilisant uniquement les modèles concrets (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014).

Les technologies ont continué d'évoluer et désormais la réalité virtuelle et la réalité augmentée se développent de plus en plus. La réalité virtuelle plonge des objets physiques ou des personnes dans un environnement virtuel, un monde créé numériquement qui simule la réalité (Lowood, 2021). Généralement cette technologie nécessite des lunettes, un casque ou encore des gants. La réalité augmentée quant à elle, permet de voir le monde réel dans lequel des images générées par ordinateur ont été superposées (Furht, 2006). Il existe désormais des outils qui combinent les deux. En fait, la combinaison entre monde réel et monde virtuel a été utilisée dans le domaine de la médecine, des mathématiques et de l'éducation dès les années 90 (Abdinejad et al., 2021). Les outils utilisant ces technologies permettent de mieux visualiser la profondeur, ce qui peut être utile pour étudier les structures ou encore les angles. Cela permet également aux étudiants de faire des liens entre des phénomènes macroscopiques et les concepts microscopiques à l'échelle atomique (niveau submicroscopique) (Gandhi et al., 2020). Par exemple, l'outil nommé SimView peut être utilisé comme outil de réalité virtuelle ou comme outil de réalité augmentée (Gandhi et al., 2020). Celui-ci permet également d'avoir des simulations dynamiques, ce qui est positif étant donné que nous avons vu que les étudiants avaient des difficultés à comprendre ce caractère dynamique. Ce système permet également une interactivité car les paramètres comme la température et la densité sont modifiables. La collaboration entre les étudiants est suscitée car ils sont tous reliés à la même table et ils doivent discuter ensemble pour modifier les paramètres (Gandhi et al., 2020). Les étudiants trouvent l'apprentissage de la chimie plus intéressant avec la réalité virtuelle (Gandhi et al., 2020). Un exemple d'outil permettant d'utiliser la réalité augmentée est l'application pour téléphone « ARchemy » (Abdinejad et al., 2021). Cette application utilise un système de marqueurs, c'est-à-dire qu'il y a des dessins qui viennent interagir avec la caméra du téléphone. Il est évident que cela pourrait être intégré dans les livres pour améliorer les images statiques que nous pouvons y trouver (Abdinejad et al., 2021). Cet outil

peut aider les étudiants à comprendre les structures et les interactions en leur permettant de visualiser les molécules sous différentes perspectives (Abdinejad et al., 2021). Les concepteurs de cet outil ont testé cette application sur des étudiants pour avoir leur retour concernant l'expérience. Celui-ci a été positif concernant l'efficacité de la réalité augmentée pour les aider à comprendre les concepts chimiques et pour les aider à visualiser les structures tridimensionnelles. De plus, comme pour le cas de la réalité virtuelle, leur intérêt et leur motivation ont augmenté (Abdinejad et al., 2021). Cependant, cette application n'est pas disponible en Belgique. Ces deux études ont étudié la réaction des étudiants face à ces technologies mais elles n'ont pas étudié de manière quantitative l'impact sur leurs performances. Il faudrait donc étudier de manière quantitative ces outils dans les prochaines études.

1.4.2) Exemples d'outils utilisables

Un exemple d'outil d'aide est le programme eChem. Cet outil permet de construire des molécules, de les visualiser via différents moyens de représentation simultanément et de les analyser via certaines propriétés (Ferk et al., 2005; Wu et al., 2001). Dans la section « construire », il est possible de construire des molécules (Figure 15). Pour cela, il faut sélectionner l'atome que l'on souhaite ajouter, puis sélectionner l'arrangement tridimensionnel que l'atome aura autour de lui. Un panneau d'aide se trouve en haut de l'écran, celui-ci permet d'expliquer ce que l'on doit faire à chaque étape. La molécule est construite à l'aide de tiges et de sphères et la formule chimique moléculaire est donnée dans le coin supérieur droit. Le fait d'avoir le choix de l'arrangement spatial peut aider les étudiants à réaliser des modèles corrects et diminue la charge cognitive nécessaire (Wu et al., 2001). De plus, la formule moléculaire change en fonction des atomes que nous ajoutons en 3D. Par conséquent, il s'établit un lien entre les niveaux symbolique et submicroscopique, ce qui peut éventuellement aider les étudiants dans les tâches de traduction (Wu et al., 2001). Dans la partie « visualiser », il est possible de pouvoir comparer la même molécule sous trois représentations (Figure 16) : en tiges et sphères, en « fil de fer » et de manière compacte. De plus, il est possible de construire d'autres molécules et de pouvoir les comparer entre elles. Dans l'exemple de la Figure 16, il est possible de comparer le propan-1-ol et le butan-1-ol. Il est ensuite possible d'analyser les molécules, autrement dit, nous pouvons obtenir les propriétés physiques des molécules construites (Figure 17). Il est possible d'obtenir les températures d'ébullition et de fusion, le moment dipolaire, le coefficient de partage octanol/eau (logP), la superficie de la molécule et la superficie accessible au solvant. Cependant, pour certaines molécules, toutes les propriétés ne sont pas disponibles. Cet outil a deux avantages. Comme les étudiants doivent choisir le type de liaison qu'un atome va établir avec un autre, ils sont obligés d'utiliser des concepts chimiques. Cette réflexion sur les concepts est aussi mise en avant lorsque différents types de représentation sont illustrés côte à côte (Wu et al., 2001). Avec

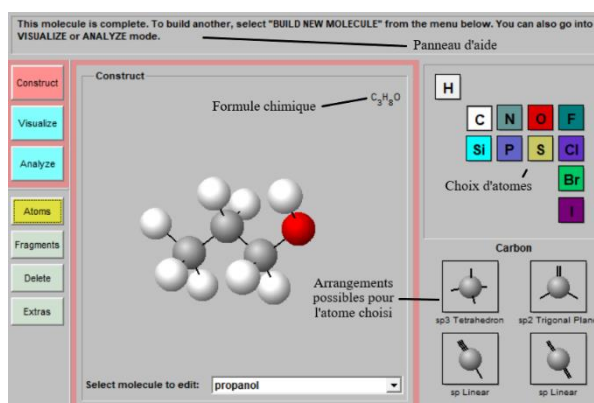


Figure 15 : Interface de la section "construire" du programme eChem

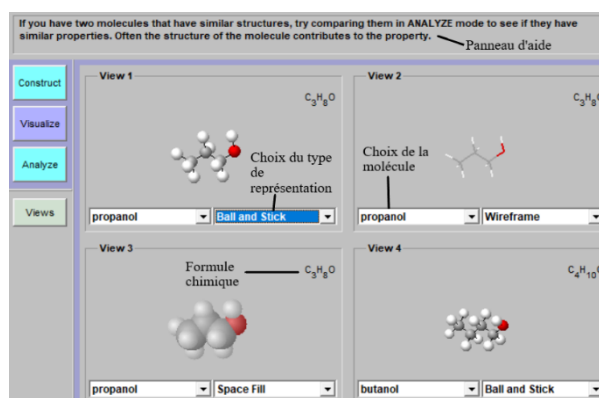


Figure 16 : Interface de la section "visualiser" du programme eChem

comparer la même molécule sous trois représentations (Figure 16) : en tiges et sphères, en « fil de fer » et de manière compacte. De plus, il est possible de construire d'autres molécules et de pouvoir les comparer entre elles. Dans l'exemple de la Figure 16, il est possible de comparer le propan-1-ol et le butan-1-ol. Il est ensuite possible d'analyser les molécules, autrement dit, nous pouvons obtenir les propriétés physiques des molécules construites (Figure 17). Il est possible d'obtenir les températures d'ébullition et de fusion, le moment dipolaire, le coefficient de partage octanol/eau (logP), la superficie de la molécule et la superficie accessible au solvant. Cependant, pour certaines molécules, toutes les propriétés ne sont pas disponibles. Cet outil a deux avantages. Comme les étudiants doivent choisir le type de liaison qu'un atome va établir avec un autre, ils sont obligés d'utiliser des concepts chimiques. Cette réflexion sur les concepts est aussi mise en avant lorsque différents types de représentation sont illustrés côte à côte (Wu et al., 2001). Avec

cet outil, il est possible de faire tourner les molécules, donc cela aide à réaliser des connexions entre la 2D et la 3D, ce qui contribue à améliorer les capacités spatiales des étudiants. De plus, eChem permet d'aider les étudiants de basse capacité spatiale à réaliser des rotations par un processus d'externalisation de la rotation mentale (Wu et al., 2001).

The solvent-accessible surface area describes the amount of the surface which is free to interact with solvents in solution. Often some fraction of a molecule's surface isn't accessible to a solvent coming in from the outside, so this number is usually smaller than the total surface area. Panneau d'aide



Construct	Atom count	Boiling point	Carbon count	dipole moment	log P	Melting point	Molecular weight	Surface area	SAS area	Choose Property
Visualize										Choix de la propriété
Analyze	propanol	12.0	97.0 °C	3.0	1.54 debye	0.546	Unknown	76.98 Å²	50.36 Å²	
										
	butanol	15.0	117.0 °C	4.0	1.53 debye	0.942	-89.8 °C	74.12	94.68 Å²	58.127 Å²
	Molécule(s) construite(s)									

Figure 17 : Interface de la section "analyser" du programme eChem

Evidemment, les ordinateurs, les casques de réalité virtuelle, ... ont un coût non négligeable et c'est donc compliqué de les mettre en place dans les écoles. Par contre, une très grande majorité des gens possèdent un smartphone, donc l'utilisation d'applications peut permettre de surmonter les difficultés de place et de coût que les écoles pourraient rencontrer. Nous avons identifié et comparé six applications afin de voir les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles (annexe 1). Nous pouvons remarquer que selon l'application choisie, les caractéristiques mises en avant ne seront pas les mêmes. L'application WebMO permet de représenter de nombreuses propriétés au niveau de la géométrie comme les éléments de symétrie. Il est également possible d'observer le potentiel électrostatique. Par contre, cela reste un modèle informatique statique alors que d'autres applications comme Mirage : Molécules simples permettent de réellement voir la molécule en 3D et de changer de perspective. Etant donné que les applications ne fournissent pas le même niveau d'informations, il est possible de choisir l'application en fonction du degré d'enseignement auquel nous nous trouvons. Ainsi, l'application WebMO, qui fournit les éléments de symétrie, pourra être utile pour les étudiants à l'université qui apprennent la théorie des groupes. Les applications de réalité augmentée peuvent être utiles dans le secondaire lorsque la géométrie des molécules est abordée. Les applications qui semblent moins utiles sont « molécule 3D » et « 3D VSEPR » car il n'est pas possible de construire de molécules. Dans la première, il est seulement possible de visualiser les molécules faisant partie d'une liste. Elle a tout de même un avantage, il est possible de visualiser des molécules de très grande taille qui sont difficilement construites sur les autres applications. La seconde ne montre pas forcément des molécules mais plutôt les géométries possibles en utilisant la théorie VSEPR.

1.4.3) Activités et enseignement

Le développement d'activités didactiques spécifiques peut également aider les étudiants. Carlisle et al (2015) ont par exemple montré que trois courtes activités de 15 à 20 minutes toutes les quatre semaines environ permettent d'améliorer les capacités de raisonnement spatial des étudiants. Ces activités n'améliorent pas uniquement leur capacité à percevoir les molécules ou faire des rotations mais cela les aide également à identifier les plans de symétrie des molécules ainsi qu'à traduire entre les différentes représentations en 2D et en 3D (Carlisle et al., 2015). En effet, les activités consistent en des entraînements durant lesquels les étudiants devaient compléter des feuilles de travail par groupes de 2 à 4. Ces feuilles de travail guident les groupes au travers de quatre compétences : l'identification de plans de symétrie, la visualisation, la représentation et la traduction. Une autre étude a montré que des activités de 25 minutes sur la géométrie moléculaire réalisées sur ordinateur ont permis de gagner de la compréhension sur les angles de liaison, l'hybridation, les moments dipolaires, etc (Appling & Peake, 2004). Par contre le gain est moins important dans la construction de modèles (Appling & Peake, 2004). Cette étude et celle

de Carlisle et al (2015) montrent donc que de courtes activités permettent d'augmenter les performances des étudiants.

Le type d'enseignement peut influencer les résultats des étudiants. Par exemple, dans le cas de l'étude menée par Underwood et al (2016) sur les liens entre structure et propriétés, ils ont montré qu'un curriculum modifié nommé CLUE (Chemistry, Life, the Universe and Everything) peut aider les étudiants à réaliser ces connexions plus rapidement dans leur cursus. Ce programme met l'accent sur des idées interconnectées : la structure moléculaire, les propriétés physico-chimiques, l'énergie et les forces (Underwood et al., 2016). Autrement dit, contrairement au programme traditionnel dans lequel la structure et les propriétés sont des chapitres distincts, le programme CLUE aborde les deux sujets conjointement. Les étudiants commencent par étudier comment les molécules interagissent grâce à différentes forces et propriétés puis au fur et à mesure, ils abordent des molécules et des interactions plus complexes, mais en continuant de présenter en parallèle structure et propriétés (Underwood et al., 2016).

1.4.4) Stratégies employées

Un autre point essentiel est l'utilisation de différentes stratégies de résolution pour pallier les difficultés de visualiser des structures tridimensionnelles et d'effectuer des opérations mentales.

Rien que dans le cas de l'utilisation d'opérations mentales, différentes stratégies peuvent être employées. Head & Bucat (2002) ont interrogé des étudiants en chimie sur la façon dont ils résolvent des questions leur demandant si deux molécules sont superposables ou images miroir. Ils ont ainsi trouvé qu'il y avait quatre grands types de stratégie (Head & Bucat, 2002) :

1. Grâce à des opérations mentales, une structure est comparée à la seconde.
2. Les deux images tridimensionnelles sont manipulées mentalement puis comparées entre elles.
3. L'image miroir d'une des structures est manipulée mentalement et comparée à la seconde structure.
4. L'image d'une des structures est construite. Ensuite, la seconde structure est manipulée mentalement pour voir si elle est superposable à la première structure ou à l'image de celle-ci.

Les méthodes de résolution qui nécessitent de générer des représentations mentales en interprétant les conventions de la représentation et d'effectuer des opérations mentales, comme celles citées ci-dessus, sont regroupées sous le terme de stratégie imaginaire (Olimpo et al., 2015; Stieff, 2011; Stull et al., 2012). Comme nous l'avons vu dans la section 1.4.1, quand plus de manipulations mentales sont nécessaires, les étudiants sont sujets à commettre plus d'erreurs (Olimpo et al., 2015). La seconde stratégie nommée analytique ou schématique n'implique pas de modèles mentaux, elle consiste à appliquer des heuristiques ou des algorithmes à un schéma de structure pour réaliser des transformations (Olimpo et al., 2015; Stieff, 2011; Stull et al., 2012). Pour illustrer cela, nous pouvons utiliser l'exemple de la traduction d'une représentation de Cram en une projection de Newman. Pour rappel, la représentation de Cram illustre généralement la molécule de profil. Par conséquent, une stratégie analytique est de dessiner les substituants à gauche de la représentation de Cram comme étant les substituants à l'avant dans la projection de Newman et ceux de droite sont illustrés en arrière-plan dans la projection de Newman (Olimpo et al., 2015; Stull et al., 2012). Un second exemple de tâche mettant en avant une autre stratégie analytique consiste à demander à des experts et à des étudiants universitaires de comparer deux molécules et de donner leur lien (énantiomères, ...). Il ressort qu'avant de tenter d'effectuer des rotations mentales, ils cherchent la présence d'un plan de symétrie ou de centres chiraux (Stieff et al., 2012). L'utilisation de ces stratégies ou de la combinaison de celles-ci dépend du type de tâches demandées aux étudiants. Stieff (2011) a mené des interviews d'étudiants suivant un cours

de chimie organique universitaire de deux semestres sur trois types de tâche : (i) l'analyse de la réactivité possible, de la structure, de la fonctionnalité ou nommer des molécules, (ii) la traduction entre des représentations et (iii) les problèmes étendus (proposer un mécanisme ou une synthèse ou déduire le produit d'une réaction). Il semble que les étudiants utilisent le raisonnement imaginaire spatial pour pouvoir résoudre les tâches de traduction car cela nécessite de percevoir les caractéristiques tridimensionnelles mais ils utilisent plutôt le raisonnement schématique-analytique pour les autres tâches (Stieff, 2011). Les experts, contrairement aux étudiants, utilisent beaucoup plus les deux stratégies de manière combinée. Les étudiants utilisent soit l'une, soit l'autre mais rarement les deux. Ces conclusions pourraient cependant ne pas être généralisables car le nombre d'étudiants interrogés (12) était faible (Stieff, 2011). Dans un travail ultérieur, les stratégies ont été classées en quatre catégories selon les réponses données par les étudiants. En effet, les étudiants devaient répondre à 6 questions (identification de relations entre des molécules et transformation de schémas de structure) et choisir une phrase parmi une liste résumant ce qu'ils ont fait pour résoudre le problème (Stieff et al., 2012). Dans le tableau 1, nous pouvons voir les quatre types de stratégie et les phrases descriptives proposées aux étudiants (Hegarty et al., 2013; Stieff et al., 2012).

Tableau 1: Types de stratégie et phrases descriptives du raisonnement des étudiants (Hegarty et al., 2013; Stieff et al., 2012)

Type de stratégie	Exemples de phrases proposées pour indiquer le raisonnement des étudiants
Spatial-Imaginaire (imagerie mentale)	<ul style="list-style-type: none"> - « <i>J'imagine la molécule en 3D et j'effectue des rotations mentales</i> » - « <i>Je m'imagine me déplacer dans la feuille de papier ou autour de la molécule</i> »
Spatial-Schématique (construction de nouveaux schémas de structure)	<ul style="list-style-type: none"> - « <i>J'ai tendance à dessiner d'abord une structure squelettique de base, puis à apporter des modifications au fur et à mesure.</i> » - « <i>J'ai tendance à redessiner la molécule en utilisant une représentation chimique différente pour m'aider à y réfléchir.</i> »
Spatial-Analytique (utilisation de règles ou d'heuristiques qui agissent sur les informations spatiales)	<ul style="list-style-type: none"> - « <i>J'ai tendance à attribuer des étiquettes R/S à chaque molécule.</i> »
Algorithmique (utilisation de règles ou d'heuristiques qui agissent sur les informations non-spatiales)	<ul style="list-style-type: none"> - « <i>Je sais simplement que dans les molécules stables, des groupes particuliers doivent être dans une relation spécifique.</i> » - « <i>J'ai tendance à utiliser une formule spécifique pour calculer le nombre de stéréoisomères.</i> »

Les chercheurs se sont ensuite demandé comment le choix de stratégie évolue avec l'instruction et s'il y a un lien avec la capacité spatiale (Stieff et al., 2012). Pour cela, le test a été effectué directement après le cours abordant spécifiquement le sujet d'une question et après avoir eu l'entièreté du cours de chimie organique (après 6 semaines) et ils ont testé la capacité spatiale des étudiants avec le MRT (mental rotation test) et un second test de visualisation de Guay (Harle & Towns, 2011). Ils ont obtenu comme résultat que l'instruction a un impact important sur le choix de stratégie. Au départ, les étudiants utilisent surtout la stratégie spatial-imaginaire mais après l'instruction, le nombre d'étudiants utilisant des stratégies alternatives (spatial-schématique et spatial-analytique) a augmenté. Il est donc possible de dire que l'utilisation de la stratégie spatial-imaginaire diminue avec le degré d'expertise (Stieff et al., 2012). Cependant, la stratégie majoritaire reste le raisonnement spatial-imaginaire. Cela vient peut-être du fait que l'instruction s'est déroulée sur une période relativement courte, ce qui a empêché les étudiants d'utiliser encore

plus les autres stratégies (Stieff et al., 2012). De plus, un biais possible est que les étudiants ne pouvaient donner qu'une seule réponse. Par conséquent, ils n'ont peut-être pas détecté l'utilisation de plusieurs stratégies en même temps. Il apparaîtrait que les étudiants ayant une capacité spatiale plus faible changent plus facilement de stratégie, favorisant les stratégies alternatives. Par contre, pour ceux ayant une capacité spatiale plus élevée, il semblerait qu'ils continuent d'utiliser plus souvent la stratégie spatiale-imaginaire (Hegarty et al., 2013; Stieff et al., 2012). Cela semblerait logique étant donné que ceux possédant une capacité spatiale plus importante ont plus de facilités à utiliser des modèles mentaux et à effectuer des opérations mentales. Nous pouvons ensuite nous demander si le type d'instruction, c'est-à-dire si le type de stratégie mis en avant durant l'instruction peut influencer le raisonnement des étudiants (Hegarty et al., 2013). Pour cela, les auteurs de cette étude ont étudié trois classes de chimie organique, une d'elles a reçu une instruction mettant l'accent sur les stratégies alternatives, la deuxième sur les stratégies spatiales-imaginaires et la dernière a reçu une instruction mettant l'accent sur les deux types de stratégie (Hegarty et al., 2013). Comme résultats, ils ont trouvé que le type d'instruction a une influence sur le choix de stratégies de résolution des étudiants. En effet, les étudiants ayant reçu l'instruction imaginaire ont moins utilisé les stratégies alternatives que les deux autres classes. La classe ayant reçu l'instruction avec les stratégies alternatives rapporte plus souvent l'utilisation de celles-ci. Lorsque l'enseignant met autant l'accent sur les différents types de stratégie, les étudiants utilisent plus souvent les stratégies imaginaires (Hegarty et al., 2013). Une observation générale est que l'utilisation de toutes les stratégies a augmenté quelle que soit l'instruction, ce qui est cohérent avec l'hypothèse que lorsque les étudiants gagnent de l'expertise, ils développent la capacité d'utiliser les stratégies alternatives (Hegarty et al., 2013; Stieff et al., 2012). De plus, il semble que les étudiants utilisant plusieurs stratégies en même temps exécutent mieux les différentes tâches (Hegarty et al., 2013). Par conséquent, il serait intéressant d'enseigner les différentes stratégies aux étudiants pour surmonter leurs difficultés et résoudre plus facilement les exercices.

1.5) Lien avec le genre

Comme nous avons discuté de la différence des genres dans la capacité spatiale en général dans la section 1.1.5, il est intéressant de voir si les études relatives à la chimie organique ont détecté une différence significative. Lors d'une étude sur la compréhension des différentes représentations, une corrélation a été trouvée entre les résultats et les facteurs de relations spatiales et de visualisations, qui font pour rappel partie de la capacité spatiale à petite échelle, mais il n'y avait aucune différence significative entre les genres (Appling & Peake, 2004; Ferk et al., 2003; Tuckey et al., 1990). Or, nous avons vu que les hommes sont généralement plus performants que les femmes et qu'une corrélation moyenne existe entre les genres et la capacité spatiale à petite échelle (Yuan et al., 2019). Dans la méta-analyse de Yuan et al. (2019), nous avons vu que cette corrélation entre les genres semble augmenter avec l'âge. Cette méta-analyse a été effectuée sur base d'articles étudiant des populations de 0 à plus de 26 ans. Par conséquent, une différence aurait dû se marquer. Néanmoins, Yuan et al. (2019) avaient précisé que les résultats n'étaient pas applicables à toutes les méta-analyses ou études à cause des relations complexes qui peuvent exister avec d'autres facteurs comme les différences individuelles ou l'environnement d'apprentissage par exemple. Au niveau du choix de stratégie en fonction du genre, il y a une possible interaction mais cela n'a pas pu être montré très clairement (Stieff et al., 2012) : les femmes seraient plus susceptibles de changer de stratégie de résolution, c'est-à-dire de passer de la stratégie spatiale-imaginaire à des stratégies alternatives (Stieff et al., 2012). En effet, les résultats de cette étude semblent suggérer que celles effectuant ce basculement sont celles qui performant moins bien dans les tests de rotations mentales et de changements de perspectives (Stieff et al., 2012).

Chapitre 2 :

Analyse didactique de manuels et traités de chimie organique

2.1) Contexte de l'analyse des manuels et traités

Il est évident que l'enseignement de la chimie organique fait aussi appel aux manuels scolaires et traités universitaires. En effet, du début du secondaire jusqu'à l'université, des livres de référence sont conseillés pour aider à comprendre la matière. C'est également en se basant sur ces manuels que les étudiants révisent pour les examens. Une question pertinente est donc de savoir si ces livres abordent correctement la structure tridimensionnelle des molécules ou s'ils s'en tiennent à la représentation bidimensionnelle. Nous avons souligné dans les sections 1.2.2 et 1.2.3 du chapitre 1 l'importance de pouvoir générer de nombreuses représentations en chimie organique, de les manipuler mentalement ou encore de pouvoir passer de l'une à l'autre. Les représentations sont essentielles car elles permettent de rendre explicite l'implicite et donc de diminuer la charge cognitive (Kozma & Russel, 2005; Kumi et al., 2013). Comme vu précédemment, diminuer la charge cognitive peut aider les étudiants à dépasser leurs difficultés. Une autre façon de réduire cette charge cognitive est de lier les anciennes connaissances aux nouvelles (Kumi et al., 2013). Il est couramment accepté que l'association de représentations et de textes permet d'aider les étudiants à comprendre et à apprendre les concepts présentés par le livre (Gkitzia et al., 2011). D'après la théorie du double codage de Paivio, l'intégration correcte de diagrammes avec les textes ainsi que les liens entre les deux sont essentiels dans l'apprentissage (Kumi et al., 2013; Paivio, 1986). Evidemment, il est nécessaire que les liens soient correctement réalisés et apparaissent de manière claire et compréhensible pour les étudiants (Gkitzia et al., 2011). Dans le chapitre précédent, nous avons abordé les difficultés que rencontraient les étudiants vis-à-vis des représentations ainsi que des manières de les contourner. Deux parmi celles-ci peuvent être utilisées par les manuels scolaires : l'utilisation des trois niveaux (macroscopique, submicroscopique et symbolique) et l'enseignement des relations entre les différentes représentations (Gkitzia et al., 2011). Pour cela, l'utilisation de représentations multiples, c'est-à-dire des représentations dans lesquelles deux ou trois niveaux sont utilisés, s'avère utile car cela permet de mettre en parallèle différentes représentations qui mettent en avant des caractéristiques différentes (Gkitzia et al., 2011; Upahi & Ramnarain, 2019). Cela permet donc d'avoir des informations complémentaires. De plus, cela peut permettre aux étudiants d'apprendre à faire des liens entre elles (Gkitzia et al., 2011). Un problème inhérent à l'objet didactique « livre » est la nécessité de représenter conventionnellement des objets et des phénomènes intrinsèquement tridimensionnels en deux dimensions. Ce passage 3D → 2D s'accompagne d'approximations qui peuvent entraîner la formation de modèles mentaux incorrects (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014).

Les cinq critères indiqués dans la Figure 18 ont donc été développés pour analyser les représentations présentes dans les manuels scolaires (Gkitzia et al., 2011; Upahi & Ramnarain, 2019). La première de ces deux études a analysé un livre destiné au secondaire en Grèce et a découvert que la majorité des représentations appartiennent au niveau symbolique et qu'elles sont surtout implicites. En d'autres termes, la majorité des représentations n'indiquent pas correctement leurs caractéristiques de surface, c'est-à-dire les symboles (traits gras et pointillés par exemple), les couleurs (lorsque des densités électroniques sont utilisées ou avec des modèles en sphères et tiges), etc. Ce sont donc les conventions (Gkitzia et al., 2011). L'abondance du niveau symbolique a aussi été rapportée dans l'étude de Dickmann et al. (2019). En effet, parmi toutes les représentations qui permettent d'améliorer la compréhension, 71,5% étaient des représentations de niveau symbolique (Dickmann et al., 2019). Gkitzia et al (2011) ont également trouvé qu'elles étaient souvent en rapport avec le texte qui accompagne l'illustration mais qu'elles ne sont pas explicitement liées à celui-ci (Gkitzia et al., 2011). Autrement dit, on ne fait pas directement référence à la figure dans le texte. Une dernière observation intéressante de cette étude est que parmi les représentations multiples, plus de la moitié ne lient pas les deux niveaux représentés et 42% possèdent des liens relatifs à certaines caractéristiques de surface mais pas à toutes (Gkitzia et al., 2011). Une autre étude a repris trois des critères développés par Gkitzia (2011) : le type des représentations, les liens avec le texte et l'utilisation des légendes (Upahi & Ramnarain, 2019). Dans cette étude, les auteurs concluent que le niveau de représentation le plus utilisé est le niveau symbolique, c'est-à-dire les équations, les symboles, etc. Cependant, malgré l'utilité des représentations multiples pour aider les étudiants à mieux comprendre les différents niveaux de représentation et les concepts chimiques sous-jacents, ils en ont trouvé très peu dans les manuels qu'ils ont analysés. De plus, malgré le fait que les représentations avaient un lien avec le texte, le texte n'était pas directement relié à celles-ci, via une citation par exemple. C'est un problème pour les étudiants car ils doivent essayer de faire des liens par eux-mêmes, ce qui entraîne une charge cognitive plus élevée et des erreurs d'interprétation (Upahi & Ramnarain, 2019). Les étudiants peuvent donc éprouver des difficultés à comprendre les concepts ou même être découragés et abandonner (Upahi & Ramnarain, 2019).

Criterion	Typology for each criterion
C1: Type of representation	i. Macro
	ii. Submicro
	iii. Symbolic
	iv. Multiple
	v. Hybrid
	vi. Mixed
C2: Interpretation of surface features	i. Explicit
	ii. Implicit
	iii. Ambiguous
C3: Relatedness to text	i. Completely related and linked
	ii. Completely related and unlinked
	iii. Partially related and linked
	iv. Partially related and unlinked
	v. Unrelated
C4: Existence and properties of a caption	i. Existence of appropriate caption (explicit, brief, comprehensive, providing autonomy)
	ii. Existence of problematic caption
	iii. No caption
C5: Degree of correlation between representations comprising a multiple one	i. Sufficiently linked
	ii. Insufficiently linked
	iii. Unlinked

Figure 18: Critères pour évaluer les représentations et leurs caractéristiques (Gkitzia et al., 2011)

Nous avons vu, dans les difficultés éprouvées par les étudiants, qu'ils avaient des difficultés avec la tâche de traduction entre les différents types de représentations causées entre autre par des difficultés à comprendre les conventions ou la démarche étape par étape pour les construire (Boukhechem & Dumon, 2016; Carlisle et al., 2015; Gkitzia et al., 2011; Kumi et al., 2013; Olimpo et al., 2015; Stull et al., 2012; Wu et al., 2001). La traduction a surtout été étudiée avec la représentation Cram, la projection de Fischer et la projection de Newman. Une étude a donc analysé la façon dont la projection de Newman et la projection de Fischer étaient abordées dans des livres de chimie organique (Kumi et al., 2013). Nous allons nous concentrer sur leurs résultats concernant la projection de Newman car la projection de Fischer est souvent abordée dans les derniers chapitres des cours de chimie organique et met moins en avant le caractère tridimensionnel des molécules.

Kumi et al (2013) ont développé un outil permettant d'accorder un certain score aux différents livres selon plusieurs critères tels que l'introduction de la projection, la manière dont est expliquée la construction de la projection et son utilisation à travers le texte (Kumi et al., 2013). Plusieurs problèmes ont ainsi été mis en lumière. Premièrement, les manuels ne se distinguent pas vraiment

au niveau des liens réalisés avec d'autres représentations. Par contre, la manière d'introduire et d'expliquer la construction de la projection de Newman variait. Ensuite, seuls deux livres sur les six analysés ont indiqué que cette projection pouvait être vue selon différentes perspectives grâce à des indices de visualisation. Ce qui signifie que les informations schématiques ou textuelles varient énormément d'un livre à l'autre, ce qui peut être très déroutant et troublant pour les étudiants (Kumi et al., 2013). Troisièmement, moins de la moitié des manuels analysés indiquaient une méthode étape par étape pour pouvoir la construire. Or, cette démarche par étapes pourrait permettre aux étudiants de diminuer la charge cognitive nécessaire pour aborder ce nouveau type de représentation car l'implicite devient explicite. De plus, cela leur permettrait de voir correctement comment il faut procéder pour résoudre ce genre de tâches et donc leur éviter de commettre certaines erreurs (Kumi et al., 2013). Quatrièmement, très peu de livres illustrent comment représenter des molécules à deux centres chiraux dont les substituants sur chaque carbone sont différents via des projections de Newman en partant de représentations de Cram. En effet, dans la majorité des manuels, les auteurs utilisent des molécules non chirales (Kumi et al., 2013). Enfin, peu de manuels ont tenté d'illustrer le caractère dynamique des molécules en montrant différentes conformations et en illustrant le fait que tous les groupes sont animés de rotations internes, alors que la littérature a prouvé que les étudiants considèrent les molécules de manière statique, sans rotation autour des liaisons carbone-carbone (Kumi et al., 2013; Stieff et al., 2005).

De la même manière que pour le cours théorique, ces auteurs ont également développé des critères d'analyse pour les exercices et problèmes qui, idéalement : (i) nécessitent d'utiliser différentes perspectives, (ii) utilisent des molécules asymétriques, (iii) nécessitent des traductions (par exemple entre la représentation de Cram et la projection de Newman) et (iv) font des liens avec des concepts tels que les conformations et la stéréochimie (Kumi et al., 2013). Un premier problème trouvé dans une minorité de livres est que les exercices ne remplissent aucun de ces critères mais demandent seulement aux étudiants de compléter la projection de Newman déjà pré-dessinée avec les différents substituants, ce qui ne permet pas aux étudiants de s'exercer dans l'utilisation des représentations (Kumi et al., 2013). Un deuxième problème est que très peu de manuels demandent aux étudiants de traduire la projection de Newman en représentation de Cram. Les étudiants s'entraînent donc seulement à traduire dans une seule direction. Ils ont alors moins conscience du caractère 3D des molécules et ils n'utilisent qu'une seule perspective (Kumi et al., 2013). Comme pour l'analyse des cours théoriques, lors des exercices de traduction de la représentation de Cram vers la projection de Newman, l'utilisation de molécules symétriques est favorisée (Kumi et al., 2013). Il a été montré qu'avec des molécules chirales, la compréhension des positions des substituants et leurs relations entre les deux types de représentations impliquées dans la traduction est encore plus compliquée pour eux (Bucat & Mocerino, 2009).

Plusieurs pistes d'amélioration ont été proposées. La première est l'utilisation de représentations multiples pour diminuer la charge cognitive et aider les étudiants à faire des liens et traduire (Kumi et al., 2013). Par exemple : faire des schémas reliant la représentation de Cram, la projection de Fischer et la projection de Newman. Un lien pourrait également être réalisé entre ces diagrammes 2D et des représentations 3D (sphères et tiges,...) pour permettre aux étudiants de visualiser la tridimensionnalité sous-jacente (Kumi et al., 2013). La deuxième piste serait d'obliger l'élève à travailler en changeant de perspectives et en effectuant des traductions dans les deux sens. La troisième piste est l'utilisation des molécules à plusieurs centres chiraux pour aider les apprenants à visualiser la façon dont chaque substituant se place sur les différents types de représentations impliqués dans une traduction ainsi que leurs interrelations (Kumi et al., 2013). Enfin, il faudrait montrer de manière plus claire le caractère dynamique des molécules en montrant plusieurs conformations, par exemple, ou en montrant que les deux groupements CR_3 d'une liaison C-C tournent indépendamment (Kumi et al., 2013).

2.2) Critères destinés à l'analyse qualitative

Nous allons à présent analyser qualitativement selon différents critères la manière dont quelques livres francophones français et belges introduisent et utilisent les représentations moléculaires. L'objectif est de voir si elles sont utilisées d'une manière telle que les étudiants puissent les utiliser et les comprendre de manière optimale. Pour cela, nous nous sommes inspirés des critères développés par Gkitzia (2011) (Figure 18) mais en les modifiant quelque peu. Les critères que nous avons développés sont décrits dans l'annexe 2 et justifiés ci-après.

Tout d'abord, contrairement à Gkitzia (2011), nous allons nous concentrer sur les représentations de molécules. Par conséquent, elles sont forcément au niveau symbolique ou submicroscopique. Nous avons décidé d'analyser les représentations selon neuf types allant de la formule développée aux photos de modèles, en passant par des schémas en deux dimensions qui tentent de représenter symboliquement la tridimensionnalité, telle la représentation de Cram ou encore la projection de Newman. En outre, nous verrons que certains livres fournissent des animations via des codes QR. Un type de représentation également considéré est la représentation multiple car nous avons vu précédemment que sa présence permettait de mettre en parallèle des informations complémentaires, d'établir des liens entre les représentations impliquées et ainsi de diminuer la charge cognitive afin d'aider les étudiants à faire des traductions (Gkitzia et al., 2011; Kumi et al., 2013; Upahi & Ramnarain, 2019).

Le second critère est identique à celui de Gkitzia (2011). Il s'agit du critère associé aux caractéristiques de surface (Gkitzia et al., 2011). De nombreuses sources de la littérature rapportent des problèmes à manipuler les représentations à cause d'un manque de compréhension des conventions (Boukhechem & Dumon, 2016; Ferik et al., 2005; Taskin et al., 2015; Wu et al., 2001). Nous pouvons classer les descriptions des caractéristiques de surface en trois typologies : explicite, implicite et ambiguë. Le terme explicite implique que la signification de l'entièreté des caractéristiques est indiquée que ce soit dans la légende, dans le chapitre ou dans le manuel. Le terme implicite signifie que la signification de seulement certaines caractéristiques est indiquée et ambiguë que les significations ne sont pas indiquées (Gkitzia et al., 2011). Dans ces deux derniers cas, les étudiants pourraient comprendre de manière erronée le concept mis en avant par ces représentations ou encore considérer qu'elles ne sont là qu'à titre décoratif (Gkitzia et al., 2011).

Le troisième critère se rapporte aux liens qui peuvent exister entre le texte et les représentations. Comme dit précédemment, la théorie de double codage de Paivio nous indique qu'une bonne intégration entre le texte et la représentation est importante pour l'apprentissage (Kumi et al., 2013). Si les représentations ne sont que partiellement en relation avec le texte, ce qui est le cas des exemples, les étudiants doivent essayer de comprendre un concept global à partir d'un cas particulier, ce qui est à nouveau réputé augmenter la charge cognitive (Gkitzia et al., 2011). Il faut également un lien direct entre le texte et la représentation, par une citation directe comme « voir figure... » ou « comme nous pouvons le voir... », sinon les étudiants risquent de passer outre la représentation (Gkitzia et al., 2011). Par contre, contrairement à Gkitzia (2011), nous ne faisons pas de distinction entre le texte et les légendes des figures. Nous considérons donc les liens des figures avec le texte et les légendes. Nous utilisons la classification typologique de Gkitzia (2011). Deux aspects doivent être considérés : la relation du contenu et l'explicitation de cette relation par des appels textuels. La figure peut être (i) complètement en relation, c'est-à-dire que la représentation illustre le contenu du texte, (ii) partiellement en relation (cela peut être des exemples particuliers donc ce n'est pas exactement le contenu du texte) ou (iii) pas du tout en relation (Gkitzia et al., 2011). D'autre part, la figure et le texte peuvent être liés ou non par des citations ou des références directes à la représentation.

Notre quatrième critère est le degré de corrélation entre les représentations 2D et 3D au sein de représentations multiples. En d'autres termes, ce critère sert à vérifier qu'il existe suffisamment

de liens entre le niveau submicroscopique et le niveau symbolique pour que les étudiants comprennent les relations qui existent entre les deux (Gkitzia et al., 2011). Si ces relations sont suffisamment explicites, l'équivalence entre les caractéristiques de surface des deux représentations est clairement indiquée. Il y a donc des couleurs, des flèches pour indiquer les éléments qui se correspondent, une mise en parallèle des représentations, ... Pour les deux autres typologies de Gkitzia (2011) (Figure 18), nous avons quelque peu modifié les définitions. Nous considérons que la représentation multiple est insuffisamment liée quand il y a uniquement une mise en parallèle des deux types. Elle est décrite comme non liée si les représentations submicroscopique et symbolique ne sont même pas placées côte à côte et si aucune caractéristique ne les relie.

Notre cinquième critère n'est pas inspiré des études précédemment citées, il s'agit des relations établies avec des propriétés physico-chimiques. Nous avons vu que les étudiants éprouvaient des difficultés à réaliser des liens entre les structures moléculaires et ces propriétés (Cooper et al., 2012). Il est donc intéressant d'analyser si des liens sont proposés et si oui, comment ils sont discutés et illustrés dans les manuels. C'est pourquoi nous avons sélectionné six typologies pour ce critère : lien avec la polarité, la solubilité, les interactions inter et/ou intramoléculaires, la réactivité, autre propriété ou aucun lien avec une propriété physico-chimique. Nous avons choisi ces propriétés car ce sont celles qui sont abordées à la fin du secondaire supérieur.

2.3) Manuels de l'enseignement secondaire supérieur

2.3.1) Analyse qualitative des manuels

Pour cette analyse qualitative, nous avons sélectionné huit livres français destinés aux dernières années du secondaire (seconde, première et terminale) et deux livres belges destinés à la cinquième et sixième secondaire qui étaient disponibles dans la bibliothèque du service de didactique de la chimie de l'Université de Liège :

- Barde, N., Barde, M., Besnard, V., Caillet, D., & Jackel, L. (2001). *Physique chimie 1re S*. Hachette Education.
- Bellier, J.-P., Calafell, J., & Nicolas, L. (2019). *Physique chimie 1re spécialité programme 2019*. Hachette Education.
- Bouyrie, G., Bessy, G., Dulaurans, T., Grossetête, C., & Marsan, D. (1997). *Chimie 1re S*. Belin
- Chaffard, P., Le Tressoler, E., Cédric, M., Michel, V., Philippini, V., Servant, S., & Vigneron, I. (2020). *Physique chimie enseignement de spécialité Première*. Hachette Education.
- Clavel-Monin, C., Garcia, G., Hild, N., Martel, L., Miguet, A.-M., & Thorat, J. (2011). *Chimie 1re S*. Hatier.
- Decroix, S., Cariat, T., Lozé, G., Mora, V., Riahi, I., Serrano, S., Vassiaux, W., & Toussaint, G. (2011). *Chimie 1reS programme 2011*. Bordas.
- Dulaurans, T., Calafell, J., & Giacino, M. (2015). *Physique Chimie 1reS*. Hachette Education.
- Durupthy, A., & Durupthy, O. (2001). *Chimie 1reS*. Hachette Education.
- Pirson, P., Bribosia, A., Snauwaert, P., Tadino, A., & Van Elsuwé, R. (2017). *Chimie 5e 6e sciences de base* (3e ed.). de boeck.
- Pirson, P., Bribosia, A., Snauwaert, P., Tadino, A., & Van Elsuwé, R. (2018). *Chimie 6e sciences générales* (3e ed.). de boeck.

Comparer des livres du secondaire entre eux est assez compliqué étant donné que selon l'année de parution, le programme peut avoir évolué. Nous avons donc choisi d'analyser les chapitres traitant de l'introduction de la chimie organique, des groupes fonctionnels, des alcanes et alcools et de la chimie organique appliquée (pétrole, plastiques, matériaux, ...). Ce dernier chapitre cité est analysé car il a une place importante dans les programmes belges. Évidemment, au travers de ces chapitres, nous pouvons retrouver différents concepts comme la polarité, la solubilité, ... En raison des difficultés de comparaison entre tous les manuels scolaires, cette analyse qualitative restera assez générale. Nous reprenons les cinq critères précédemment cités et pour chacun, la tendance générale des livres sera donnée. Dans cette section, nous avons considéré les activités des manuels ainsi que les parties théoriques mais pas la partie exercice pour des raisons de temps disponible. Les activités sont de deux sortes : (i) expérimentales et (ii) documentaires et mises en situation. Dans la première catégorie, ce sont des propositions de laboratoires que ce soit des expériences chimiques à réaliser (Clavel-Monin et al., 2011; Decroix et al., 2011; Durupthy & Durupthy, 2001; Pirson et al., 2017) ou la manipulation de modèles moléculaires ou de logiciels de représentations (Barde et al., 2001; Bellier et al., 2019; Bouyrie et al., 1997; Dulaurans et al., 2015; Durupthy & Durupthy, 2001). Dans ce genre d'activités, il est par exemple demandé aux étudiants de construire des molécules, les manipuler et de les nommer. Dans les activités documentaires, il y a des activités de recherche, des mises en situation ou encore des problèmes (Bellier et al., 2019; Clavel-Monin et al., 2011; Decroix et al., 2011; Dulaurans et al., 2015; Durupthy & Durupthy, 2001; Pirson et al., 2018). Ce sont des activités qui demandent une plus grande réflexion et une discussion plus approfondie. Par exemple, dans le manuel de Bellier et al (2019), il y a une réflexion détaillée sur l'identification de la géométrie d'une molécule et dans le manuel de Clavel-Monin et al (2011), on trouve une activité de questionnement, de la représentation de Lewis à l'écriture topologique. L'objectif de cette activité est de faire découvrir la correspondance entre les formules semi-développées et topologiques. De plus, ils utilisent aussi un modèle 3D dans cet exemple.

Abordons le premier critère, les types de représentation. Une première observation à signaler est qu'il n'y a pratiquement pas de représentation utilisant les modèles moléculaires dans les livres belges (Pirson et al., 2017, 2018). En effet, les représentations utilisées sont surtout les formules semi-développées et les formules développées. Il y a quelques représentations 3D mais elles ne sont pas employées de manière efficace. Elles servent à illustrer une réaction de combustion entre le méthane et l'oxygène ou à illustrer la complexité de molécules telles une protéine ou l'hémoglobine. Afin de comprendre pourquoi ce manque de représentation de modèles moléculaires existe, nous avons fait une recherche dans les programmes scolaires belges. Dans le programme de 2001, nous trouvons des conseils concernant l'utilisation de modèles moléculaires principalement dans le chapitre nommé « Du pétrole à l'essence ». Cependant, cela ne concerne pas les représentations dans les livres. En effet, nous trouvons la phrase « *L'utilisation et la manipulation de modèles moléculaires sont vivement conseillées. Toutefois la représentation des molécules sera limitée aux formules développées et semi-développées (dans le plan).* » (AGERS, 2001). Dans les nouveaux programmes, il est possible de trouver des conseils destinés aux professeurs pour donner les différents cours. Par exemple, dans l'unité « liaisons chimiques et configuration spatiale des espèces chimiques », ils proposent d'introduire les modèles moléculaires. Cependant, il était surtout demandé aux professeurs de montrer des molécules ou de montrer des fonctions organiques. Globalement, il n'était pas demandé de faire manipuler les étudiants ou d'utiliser des illustrations de modèles moléculaires comme représentations.

Concernant les livres français, cela varie énormément et dans un même livre, cela peut varier en fonction du chapitre. Dans la majorité des livres, les représentations majoritaires sont les formules semi-développées et développées (Barde et al., 2001; Bellier et al., 2019; Bouyrie et al., 1997; Chaffard et al., 2020; Clavel-Monin et al., 2011). Il est important de noter que dans les

formules développées, nous comptons également les structures de Lewis. Par contre dans d'autres livres, la prépondérance variait avec le chapitre (Decroix et al., 2011; Dulaurans et al., 2015; Durupthy & Durupthy, 2001). Par exemple, dans le cas du manuel de Decroix (2011), la théorie du chapitre traitant de la géométrie des molécules est dominée par les représentations développées alors que nous découvrons majoritairement des représentations semi-développées dans les chapitres sur les familles des composés chimiques et l'introduction des molécules organiques. Cependant, dans d'autres chapitres, comme par exemple celui sur les alcanes et les alcools, nous trouvons majoritairement des images de modèles moléculaires. Nous pouvons encore citer un second exemple afin d'illustrer cette variabilité au sein d'un livre : le manuel de Durupthy & Durupthy (2001). Dans l'introduction de la chimie organique, les images de modèles moléculaires étaient majoritaires et servaient à montrer des exemples de composés carbonés, la tétravalence du carbone ou encore la comparaison d'isomères de structure. Par contre, dans le chapitre sur le squelette carboné des molécules organiques, nous trouvons environ autant de modèles 3D que de formules semi-développées et de formules topologiques. La proportion de modèles moléculaires chute encore dans le chapitre sur les groupes caractéristiques pour atteindre environ 10%. Enfin, nous ne trouvons plus de représentations 3D dans le chapitre intitulé « les modifications du squelette carboné », qui aborde le pétrole et sur les matières plastiques. Dans ce dernier chapitre, les formules semi-développées représentaient la majorité des représentations. Ce critère sera développé de manière quantitative pour une sélection de livres parmi ceux cités.

Concernant le critère de l'explicitation des caractéristiques de surface des représentations, la majorité des manuels ont leurs représentations classées comme ambiguës (Barde et al., 2001; Bouyrie et al., 1997; Clavel-Monin et al., 2011; Decroix et al., 2011; Dulaurans et al., 2015; Pirson et al., 2018). Nous nous concentrons sur les conventions des modèles moléculaires, des représentations de Cram, celles de la densité électronique ou encore la formule topologique car il n'y a pas de réelle convention pour les formules semi-développées et développées. Si la majorité des livres sont classés comme ambiguës de ce point de vue, c'est parce que les conventions ne sont pas du tout indiquées dans le livre. Toutefois, lorsque les modèles moléculaires sont utilisés en parallèle avec une représentation 2D ne nécessitant pas de convention, il est possible de « deviner » les significations. Dans les deux seuls livres contenant des représentations de Cram, il n'y a pas non plus de description des conventions (Barde et al., 2001; Bouyrie et al., 1997). Un des livres du secondaire belge n'utilisait aucune autre représentation que les formules développées et semi-développées, donc ce manuel n'a pas pu être classé (Pirson et al., 2017). Les autres manuels sont considérés comme étant explicites car nous trouvons les conventions soit au début du livre dans le rabat (Bellier et al., 2019) soit dans une feuille récapitulative présente avant le chapitre abordant la chimie organique (Durupthy & Durupthy, 2001) ou encore directement dans le début du chapitre comme nous pouvons le voir dans la Figure 19 (Chaffard et al., 2020). Dans le manuel de Bellier (2019), nous trouvons également les conventions de couleurs pour les représentations avec des densités électroniques directement lorsque nous les rencontrons. Le manuel de Decroix et al (2011) est particulier car selon les chapitres, les représentations utilisées sont ambiguës ou explicites. En effet, la majorité des chapitres comportent des représentations ambiguës car les conventions ne sont pas indiquées. Cependant, dans un chapitre analysé, les symboles des éléments étaient indiqués à côté des sphères représentant le même atome, ce qui permet de faire des liens et de bien comprendre les codes de couleurs. Ce manuel, de manière générale, possède donc plutôt des représentations ambiguës. Les trois manuels contenant des représentations explicites datent de 2001, 2019 et 2020 donc nous ne

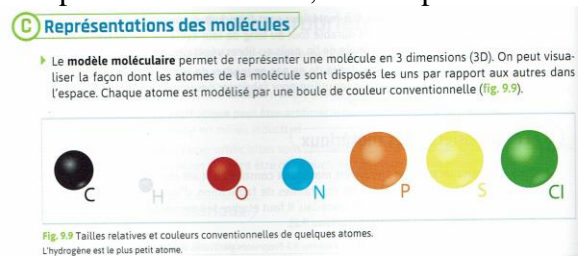


Figure 19: Légende reprenant la couleurs des différents atomes dans les modèles moléculaires (Chaffard et al., 2020)

pouvons pas vraiment avancer que l'année de parution des manuels a un rôle dans ce critère. La seule observation que nous pouvons faire est que les deux manuels les plus récents sont explicites.

Le troisième critère concerne les liens réalisés entre les représentations et le texte. Les manuels se répartissent relativement équitablement entre complètement en relation et lié au texte et partiellement en relation et lié au texte. Cette dernière classification reprend les représentations montrant des exemples de ce qui est expliqué dans le texte mais qui ne sont pas directement discutées dans celui-ci. Par facilité, lorsque la majorité des représentations étaient classées d'une certaine façon, nous avons considéré qu'elles étaient toutes classées ainsi. Nous pouvons donc considérer que toutes les représentations des chapitres analysés des manuels belges sont complètement en relation et liées au texte (Pirson et al., 2017, 2018). D'autres manuels, au contraire, ont montré une majorité de représentations partiellement en relation mais toujours liées au texte (Bellier et al., 2019; Chaffard et al., 2020). Pour d'autres manuels, par contre, la situation est plus complexe. En effet, selon le chapitre, les représentations ne sont pas classées de la même façon (Decroix et al., 2011; Durupthy & Durupthy, 2001). Pour le manuel de Decroix, seules les représentations du chapitre abordant la solubilité sont décrites comme étant complètement en relation mais les autres chapitres, eux, peuvent être qualifiés de partiellement en relation. De plus, dans le même chapitre, il peut y avoir la moitié des représentations complètement en relation et l'autre moitié partiellement en relation (Barde et al., 2001; Clavel-Monin et al., 2011; Dulaurans et al., 2015). Comme nous pouvons le voir, la grande majorité des manuels lient correctement le texte aux représentations de par la citation des numéros de document ou de figure ou via un placement correct dans le texte ne laissant pas de doute sur le lien qui existe. Cependant, le manuel le plus ancien se distingue des autres (Bouyrie et al., 1997) car les représentations ne sont pas liées au texte. Elles sont complètement ou partiellement en relation avec le texte mais pour une partie non négligeable des représentations, elles ne sont pas appelées par le texte et/ou n'ont pas un placement correct dans celui-ci. Néanmoins, les représentations sont présentées dans la légende, donc des liens sont tout de même réalisables. Insistons à nouveau sur le fait qu'une intégration des représentations et du texte est essentiel à l'apprentissage d'après la théorie du double codage de Paivio (Kumi et al., 2013; Paivio, 1986).

Le quatrième critère ne concerne que les livres contenant des représentations multiples. Il sera étudié de manière plus quantitative dans la prochaine partie mais une observation directe est que la majorité des manuels ont des représentations multiples dans lesquelles la 3D et la 2D ne sont pas suffisamment liées (Barde et al., 2001; Bellier et al., 2019; Bouyrie et al., 1997; Chaffard et al., 2020; Clavel-Monin et al., 2011; Decroix et al., 2011; Dulaurans et al., 2015; Durupthy & Durupthy, 2001). Cependant, les trois manuels français les plus récents possèdent quelques représentations multiples suffisamment liées grâce à des cercles entourant le groupe fonctionnel dans les représentations 2D et 3D respectivement, grâce à la couleur identique des doublets électroniques dans les deux représentations ou encore grâce à la mention des charges partielles à la fois sur la formule 2D et sur l'image du modèle moléculaire (Bellier et al., 2019; Chaffard et al., 2020; Dulaurans et al., 2015). Il semblerait donc que les manuels plus récents cherchent à tenir compte de l'importance de réaliser ces liens.

Dans ces différents manuels, certaines propriétés sont mises en relation avec les représentations (cinquième critère). Les auteurs semblent faire particulièrement appel aux images de modèles moléculaires pour aborder les propriétés physico-chimiques. Il faut toutefois noter que certains livres n'abordent pas les propriétés physico-chimiques ou du moins pas dans les chapitres analysés, et que les livres n'abordent pas tous nécessairement les mêmes propriétés. Dans les chapitres traitant des groupes fonctionnels, nous trouvons souvent des tests d'identification (Barde et al., 2001; Bouyrie et al., 1997; Clavel-Monin et al., 2011; Dulaurans et al., 2015; Durupthy & Durupthy, 2001). Plusieurs façons d'aborder la réactivité sont possibles : créer une section dédiée à cela dans le chapitre (Barde et al., 2001) ou bien établir un parallélisme dans un tableau comme il est possible de le voir dans la Figure 20 (Durupthy & Durupthy, 2001).

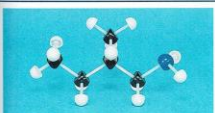
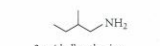

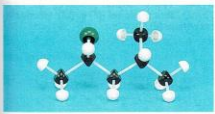
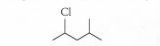

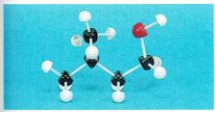
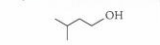

Exemple	Formule semi-développée ; écriture topologique ; nom	Test de reconnaissance
	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{NH}_2 \end{array}$  2-méthylbutylamine	 ■ Les amines sont des bases : elles font bleuir le bleu de bromothymol.
	$\begin{array}{c} \text{Cl} \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{Cl} \end{array}$  2-chloro-4-méthylpentane	 ■ Les composés halogénés donnent avec les ions Ag^+ un précipité d'halogénure d'argent AgX .
	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH} \end{array}$  3-méthylbutan-1-ol	 ■ Certains alcools réagissent avec une solution de permanganate de potassium.

Figure 20 : Exemples de tests de reconnaissance de groupes fonctionnels (Durupthy & Durupthy, 2001)

Une propriété souvent mise en relation avec des représentations est la polarité (Bellier et al., 2019; Bouyrie et al., 1997; Decroix et al., 2011; Dulaurans et al., 2015). Cette relation est effectuée à l'aide de molécules non organiques comme le dioxyde de carbone en modèle moléculaire ou l'eau (Bellier et al., 2019; Bouyrie et al., 1997) mais aussi des molécules organiques comme le méthanol ou le cyclohexane (Dulaurans et al., 2015). Il est par contre important de noter que dans le manuel de Bellier (2019), il y a des codes QR qui mènent à des vidéos expliquant par exemple comment déterminer la polarité d'une molécule. Cela peut contribuer à aider les étudiants qui sont plutôt auditifs.

Les interactions intermoléculaires (ponts hydrogènes, liaisons de van de Waals, ...) sont également abordées dans les manuels ce qui permet la discussion des températures de changements d'états et de la solubilité, également en lien avec la polarité. Ces propriétés sont souvent abordées au même moment que la polarité (Bouyrie et al., 1997; Decroix et al., 2011; Dulaurans et al., 2015). Par exemple, dans le manuel de Bouyrie (1997), les ponts hydrogène et la solubilité sont mis en relation grâce à une représentation de Cram. Les ponts hydrogène et les forces de van der Waals permettent également de discuter les température de changements d'états (Decroix et al., 2011; Dulaurans et al., 2015; Durupthy & Durupthy, 2001). Dans ces deux derniers manuels, les auteurs illustrent l'effet des isomères de structure sur la température d'ébullition grâce à des images de modèles moléculaires. Cependant, dans le manuel de Dulaurans (2015), les auteurs expliquent ce phénomène avec les forces de Van der Waals dans le texte alors que dans le second, la différence entre isomères est visible dans la légende des modèles moléculaires mais n'est pas expliquée dans le texte.

D'autres propriétés sont abordées mais pas directement à l'aide de représentations. Par exemple, le manuel de Decroix (2011) fait un lien avec les longueurs d'onde d'absorption des chromophores alors que le manuel de Bellier (2019) aborde la spectroscopie infrarouge dans le chapitre sur les groupes caractéristiques.

2.3.2) Analyse quantitative des manuels

Pour cette analyse quantitative des manuels, nous avons sélectionné uniquement les livres français car les livres belges précédemment décrits et discutés dans la partie qualitative ne contiennent presque pas de représentation moléculaire. Dans cette analyse, l'objectif est de quantifier les différents types de représentations rencontrées dans les chapitres sélectionnés. De

plus, nous avons sélectionné des manuels de différentes années afin de déceler une évolution éventuelle avec le temps de la fréquence d'utilisation des différents types de représentations. Comme la façon d'enseigner et les programmes varient avec le temps, il est parfois difficile de comparer directement les manuels entre eux. C'est pourquoi dans chaque manuel, nous avons sélectionné les chapitres qui sont les plus susceptibles d'être comparables. Dans le manuel de Bouyrie de 1997, nous avons sélectionné les chapitres abordant les composés organiques oxygénés, une activité sur les modèles moléculaires et le chapitre sur la dissolution des composés (Bouyrie et al., 1997). Dans ce dernier chapitre, nous ne considérons que les points sur la géométrie, la polarité et la solubilité, incluant la solubilité des composés organiques. Dans ces points, les auteurs n'utilisent toutefois pas vraiment de molécules organiques (Bouyrie et al., 1997), contrairement à d'autres manuels analysés, raison pour laquelle nous considérons tout de même ce thème dans notre analyse. Dans deux livres datant de 2001 (Barde et al., 2001; Durupthy & Durupthy, 2001), nous avons sélectionné les chapitres abordant la chimie organique au quotidien, la chaîne carbonée, les modifications de cette dernière et les groupes caractéristiques. Les chapitres sélectionnés dans le manuel de Dulaurans de 2015 sont « Des atomes aux molécules », la dissolution des composés ioniques et moléculaires, la structure et les propriétés des alcanes et alcools ainsi que le chapitre sur les composés organiques oxygénés (Dulaurans et al., 2015). Dans le manuel de Bellier de 2019, nous avons analysé les chapitres intitulés « De la structure à la polarité d'une entité chimique » et « structures des entités organiques » (Bellier et al., 2019). Le dernier livre sélectionné, celui de Chaffard de 2020, ne possédait qu'un seul chapitre intéressant pour ce travail, intitulé « De quoi sont faits les objets autour de nous ? » (Chaffard et al., 2020). Nous avons considéré les parties théoriques, les activités et les exercices.

Il faut noter préalablement que les programmes ont évolué sur la période considérée (1997-2020) et que les différents manuels ne s'adressent pas tous aux mêmes publics. Par exemple, le livre de Bellier et al. (2019) suit le programme actuel français pour la terminale de spécialité physique-chimie (Ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse, 2019a) tandis que celui de Chaffard et al. (2020) se base sur le programme destiné aux étudiants de terminale de la section Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable (Ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse, 2019b). Malgré l'évolution des programmes, les ouvrages de Bouyrie et al. (1997) et de Bellier et al. (2019) semblent toutefois suivre une logique d'apprentissage similaire et aborder les mêmes fonctions organiques (alcools, aldéhydes, cétones, acides carboxyliques) et leurs nomenclature, pour les identifier ensuite expérimentalement. Seule la technique d'identification change, passant de tests chimiques (Bouyrie et al., 1997) à la spectroscopie infrarouge (Bellier et al., 2019). De manière générale, quels que soient le public concerné, l'accent mis sur tel ou tel aspect et le degré d'approfondissement de la matière, la nécessité d'introduire une visualisation correcte de la tridimensionnalité des molécules reste une priorité pour un enseignement authentique de la chimie organique. Comme nous allons le voir, des tendances générales émergent.

Nous avons comparé de manière quantitative ces chapitres en dénombrant les sept types de représentations suivants : les images de modèles moléculaires 3D, les représentations 3D dans lesquelles les paires non-liantes sont indiquées, les représentations 3D de la densité électronique, les formules topologiques, semi-développées, développées et la représentation de Cram. Les trois premiers types représentent l'aspect tridimensionnel de manière directe et se réfèrent donc au niveau submicroscopique du triangle de Johnstone tandis que les quatre derniers font référence au niveau symbolique en incluant (représentation de Cram) ou non (formules développées, semi-développées ou topologiques) des informations spatiales tridimensionnelles. Nous avons également compté le nombre de représentations multiples et identifié si les niveaux de représentations sont correctement liés et s'il y a des liens avec le texte. Les résultats sont donnés sous forme de graphiques circulaires dans l'annexe 3.

Nous observons tout d'abord que la proportion de modèles 3D est plus importante (plus de 20%) dans les trois livres les plus récents tandis que dans les trois manuels les plus anciens, nous trouvons des pourcentages variant entre 9% et 14%. Il semblerait donc que l'évolution récente des manuels vise à mettre en avant la structure tridimensionnelle des molécules et donc d'aider les étudiants à pouvoir comprendre et analyser le niveau submicroscopique. Dans ce niveau 3D, nous incluons non seulement les images de modèles moléculaires mais également les modèles 3D dans lesquelles les doublets non-liants sont représentés ainsi que ceux illustrant les densités électroniques. En additionnant ces trois contributions, nous atteignons 28% de niveau submicroscopique dans le livre de 2015 (Dulaurans et al., 2015), 26% dans le livre de 2019 (Bellier et al., 2019) et 26% en 2020 (Chaffard et al., 2020). Nous concluons donc que les représentations illustrent bien le niveau submicroscopique mais en minorité par rapport au niveau symbolique. Cependant, nous avons vu que pour vraiment aider les étudiants à faire des liens entre ces deux niveaux, il faut qu'il y ait des représentations multiples suffisamment liées (Gkitzia et al., 2011). C'est pour cela que nous avons également compté le nombre de représentations multiples dans ces différents livres et examiné si les niveaux sont suffisamment liés (Figure 21). Afin de calculer le nombre de représentations multiples, nous avons compté le nombre de représentations individuelles contenues dans des représentations multiples dans les chapitres et nous avons fait le rapport avec le nombre de représentations individuelles dans ces mêmes chapitres. Malgré certaines fluctuations, nous pouvons remarquer une tendance à l'utilisation accrue de représentations multiples dans les manuels plus récents. Dans cette figure, un phénomène assez intéressant est visible. En effet, il semblerait que dans les manuels les plus anciens, la 2D et la 3D ne sont pas suffisamment liées et qu'avec le temps cette proportion diminue en faveur des représentations suffisamment liées. Il faut cependant noter que nous trouvons des représentations non-liées dans le manuel de 2019 contrairement à celui de 2015. Cependant, si nous combinons les représentations insuffisamment liées et non liées pour le livre de 2019, nous obtenons 72% de représentations problématiques, ce qui reste toutefois moins que dans le manuel de 2015. Les manuels plus récents semblent donc utiliser de plus en plus de représentations multiples et lier de mieux en mieux les niveaux 2D et 3D. Il serait évidemment nécessaire de confirmer cette hypothèse en analysant un corpus plus étendu de manuels scolaires.

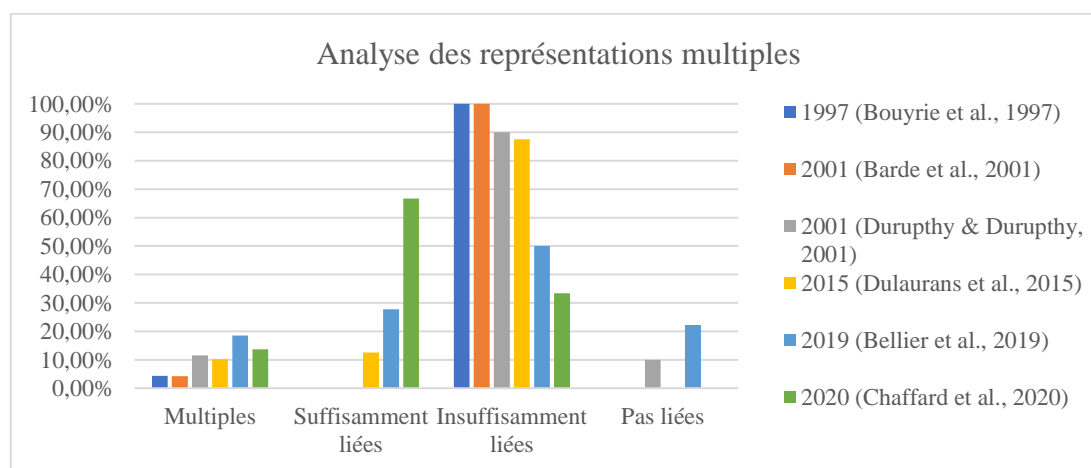


Figure 21 : Graphique en bâtonnets illustrant le nombre de représentations faisant partie de représentations multiples et les proportions de représentations multiples liant suffisamment, liant insuffisamment et ne liant pas du tout les niveaux 2D et 3D.

Notons encore une autre observation intéressante concernant la présence de représentations de Cram. En effet, nous en retrouvons en faible quantité dans le livre de 1997 (Bouyrie et al., 1997) et dans un des livres de 2001 (Barde et al., 2001) mais plus dans les ouvrages plus récents.

2.4) Traités de chimie organique du 1er cycle de l'enseignement supérieur

Dans cette section, nous avons sélectionné deux livres de chimie organique couramment utilisés dans les études supérieures : la traduction française du livre de John McMurry (McMurry & Simanek, 2007) intitulé « Chimie Organique. Les grands principes » et le livre de Paul Arnaud « Les Cours de Paul Arnaud. Chimie Organique » (Jamart et al., 2009). Nous avons séparé les différents chapitres analysés en trois grands thèmes afin d'avoir plus de facilités dans la comparaison des deux livres. Le premier concerne les alcanes, les alcènes et les groupes fonctionnels. Ce thème inclut la discussion des positions équatoriales et axiales, les conformations possibles donc aussi la projection de Newman. Le second thème se rapporte à la stéréochimie, la chiralité, l'énantiométrie, ... Dans le même chapitre que celui présentant ces concepts, le manuel basé sur les cours de Arnaud inclut également l'isomérie E/Z. Le dernier thème inclut les chapitres sur la substitution nucléophile. Cette séparation a été effectuée car il est évident que les différents types de représentation ne seront pas utilisés de la même manière. Par exemple, la nécessité d'illustrer le caractère tridimensionnel des molécules est plus important dans la partie stéréochimie.

2.4.1) Analyse qualitative des traités

Dans cette section, nous allons surtout comparer les deux traités entre eux selon les cinq critères de l'annexe 2 pour chaque thème. De plus, nous allons également examiner la façon dont la projection de Newman est introduite et les liens effectués avec d'autres types de représentation (Kumi et al., 2013).

2.4.1.1) Premier thème : alcanes, alcènes et groupes fonctionnels

Selon le critère des types de représentation, il semblerait que dans les deux livres, les représentations les plus utilisées sont les formules développées et semi-développées. Ensuite, nous trouvons également de nombreuses représentations de Cram dans les deux livres. La fréquence des autres représentations dépend du manuel considéré. Il semblerait que le manuel d'Arnaud utilise plus de projections de Newman que celui de McMurry, même si ce dernier les introduit dans la partie sur les conformations. Cependant, le traité de McMurry utilise quant à lui beaucoup plus de modèles 3D et de représentations multiples. Nous en trouvons aussi dans le livre d'Arnaud mais en quantité beaucoup moins importante. Nous pouvons aussi voir d'autres types de représentations beaucoup moins fréquents comme des représentations tridimensionnelles avec les potentiels électrostatiques ou l'utilisation d'orbitales sp^3 dans le traité de McMurry mais aussi l'illustration de sphères d'encombrement dans celui d'Arnaud. Enfin, nous pouvons observer assez facilement qu'il y a plus de représentations 2D dans les exercices des manuels. Il y a tout de même une différence majeure dans les exercices : le livre de McMurry possède une partie nommée « Visualisons la chimie dans l'espace », qui utilise uniquement des modèles 3D alors que celui d'Arnaud n'utilise pas de modèle 3D dans les exercices. Ce critère sera analysé plus en profondeur dans la partie quantitative.

Ces représentations sont explicites en grande majorité car elles explicitent les conventions de la représentation de Cram et la projection de Fischer à un moment donné dans les manuels. Par contre, au niveau des représentations en modèles 3D, elles sont relativement explicites dans le cas du traité de McMurry mais implicites voir même ambiguës dans celui d'Arnaud. Tout d'abord, le livre d'Arnaud explique à quoi les modèles 3D servent ainsi que les différences qui existent entre le modèle compact et le modèle éclaté mais il ne donne pas les conventions des couleurs. En effet, il faut comprendre selon le contexte, c'est-à-dire en comparant avec les formules brutes ou avec les représentations 2D dans le cas de représentations multiples. Dans le cas du traité de McMurry, les modèles 3D sont considérés explicites car les conventions des couleurs sont données dans un tableau au tout début du premier chapitre. Comme nous pouvons le remarquer dans la Figure 22, les conventions sont rapidement fournies dans ce tableau du chapitre introduisant la chimie organique mais ne sont pas rappelées ensuite. Les conventions de couleur des potentiels électrostatiques sont rapidement données lors de la première rencontre avec ce type de représentation. Une incohérence a été observée dans les représentations impliquant les potentiels électrostatiques (Figure 23) : les liaisons multiples présentes dans les formules développées apparaissent comme des liaisons simples dans les diagrammes de densité électronique. On pourrait argumenter que les traits de liaison, qui symbolisent la densité électronique, ne devraient pas apparaître dans une image de densité électronique. Cela permettrait, à condition de l'expliciter dans le texte, de bien faire ressortir le caractère conventionnel et symbolique de ces traits de liaison simples et multiples par la comparaison directe des deux types de représentation.

FIGURE 1.1
Position du carbone dans la classification périodique. Les autres éléments communément rencontrés en chimie organique sont montrés avec les couleurs utilisées habituellement pour les représenter.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	112	113	114	115	116		

Figure 22 : Figure illustrant les couleurs communément utilisés dans les modèles moléculaires (McMurry & Simanek, 2007)

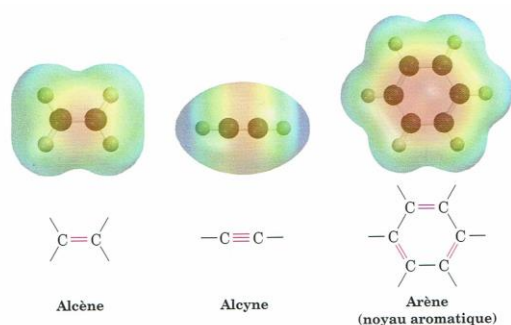


Figure 23 : Représentations multiples dans lesquelles les potentiels électrostatiques et des formules développées sont représentés (McMurry & Simanek, 2007)

Concernant le troisième critère, la grande majorité des représentations sont complètement en relation avec le texte et sont bien liées à celui-ci dans les deux manuels. En effet, soit les représentations se trouvent dans des figures numérotées appelées par le texte soit elles sont directement insérées dans celui-ci au moment où elles sont employées. C'est donc un point positif car cela respecte la théorie du double codage de Paivio (Kumi et al., 2013).

Revenons aux représentations multiples avec l'analyse du quatrième critère. Dans le livre de McMurry, il s'agit surtout de combinaisons de modèles 3D et de potentiels électrostatiques ou de modèles 3D avec des représentations de Cram. Dans ce traité, la majorité lie insuffisamment la 2D et la 3D car les représentations sont juste juxtaposées, surtout lorsqu'il s'agit de la première combinaison citée. Cependant, il semblerait qu'à peu près un quart des représentations multiples lie suffisamment la 2D et la 3D, grâce à des couleurs par exemples ou des flèches illustrées sur les deux parties de la représentation multiple. Dans ces représentations suffisamment liées, nous retrouvons des combinaisons de modèles 3D avec une projection de Newman ou une représentation de Cram. Dans le livre d'Arnaud, il y avait moins de représentations multiples mais le plus souvent la 3D et la 2D étaient suffisamment liés. Et comme nous l'avons dit plus haut, des liens corrects peuvent aider les étudiants dans les tâches de traduction et à pouvoir lier des représentations qui mettent des caractéristiques différentes de la molécule en avant (Gkitzia et al., 2011; Upahi & Ramnarain, 2019). Ce critère sera lui aussi analysé de manière quantitative.

Dans les chapitres analysés, les ouvrages font quelques liens avec les propriétés. Comme dit plus haut, l'utilisation des potentiels électrostatiques dans le manuel de McMurry permet de faire des liens avec la polarité. Même si, rappelons-le, le problème des conventions et des représentations problématiques peut empêcher les étudiants de réaliser ce lien. Ensuite, les deux manuels ont abordé les conformations et les barrières d'énergie grâce à des projections de Newman. Les deux manuels discutent également de la stabilité des positions axiales et équatoriales. Ce n'est pas réellement une propriété en soi mais cela peut être lié à la réactivité.

En plus des cinq critères, nous allons brièvement analyser la façon dont les manuels introduisent la projection de Newman selon les critères vus précédemment (Kumi et al., 2013). En effet, les étudiants éprouvent des difficultés à manipuler cette projection. Kumi (2013) a donc développé des critères d'analyse pour voir si les manuels scolaires l'introduisent correctement. Au niveau de l'introduction, McMurry fait directement le lien avec les conformations contrairement à Arnaud qui relie cette projection aux conformations plus loin dans le même chapitre. Cependant, les deux manuels ne donnent pas une définition complète de cette projection, en particulier au niveau de la signification du cercle (Kumi et al., 2013). Le traité de McMurry utilise d'autres représentations que celle de Cram (représentation développée et modèles 3D) pour établir des liens, contrairement à celui d'Arnaud. Il est également intéressant de remarquer que les deux ouvrages utilisent des couleurs pour aider les étudiants à visualiser ce que deviennent les substituants lors du passage d'une représentation à la projection de Newman.

2.4.1.2) Deuxième thème : stéréochimie, chiralité, énantiométrie

Dans ce thème, nous retrouvons en grande majorité la représentation de Cram dans les deux manuels. C'est assez logique étant donné que la stéréochimie met en œuvre la structure tridimensionnelle des molécules et nécessite plus de visualisations 3D que le chapitre présentant les différents groupes fonctionnels par exemple. Il est par exemple nécessaire de pouvoir déterminer la position de chaque substituant par rapport aux autres pour pouvoir attribuer la configuration absolue R et S. L'observation assez étonnante est que malgré cette importance de la 3D, le traité d'Arnaud n'utilise pas du tout de modèle 3D tandis que celui de McMurry en utilise beaucoup. Cependant, ils sont presque toujours combinés à des représentations de Cram. Dans le livre d'Arnaud, nous trouvons moins de représentations multiples. Par contre, dans ce dernier, les auteurs utilisent des projections de Newman avec des représentations de Cram afin d'expliquer la configuration absolue alors que le seul endroit où une projection de Newman est utilisée dans ce but dans le manuel de McMurry est dans les exercices. D'ailleurs, au niveau des exercices, nous trouvons en majorité des représentations de Cram et des formules semi-développées dans les deux livres. Néanmoins, nous trouvons toujours la partie des exercices destinée à la visualisation dans l'espace dans le livre de McMurry. Ce dernier tente donc de faire plus de liens avec le niveau submicroscopique que le manuel d'Arnaud.

Les commentaires pour le deuxième critère seront similaires à ceux pour le premier thème car la très grande majorité des représentations sont explicites. Elles sont classées de cette façon car, même si les conventions des couleurs ou celles des projections ne sont pas rappelées à proximité, nous les trouvons dans d'autres chapitres du livre.

Pour le troisième critère, le même commentaire que pour le premier thème reste de mise car les figures sont toujours complètement en relation et une très grande majorité est reliée au texte grâce à des citations ou une insertion dans le texte favorisant la compréhension.

Nous avons observé qu'il y a beaucoup plus de représentations multiples dans le traité de McMurry que dans celui d'Arnaud. Dans ce dernier, seulement la moitié semblait correctement lier la 3D et la 2D alors que, chez McMurry, la grande majorité des représentations multiples les relient correctement. Pour ce faire, les auteurs ont utilisé des couleurs ou des flèches. Pour passer d'une représentation à une autre, ils utilisent des couleurs pour indiquer où se trouvent les substituants dans chaque représentation. De plus, ils utilisent également une flèche pour indiquer la contrainte stérique dans chaque type de représentation. Dans le livre d'Arnaud, la moitié était suffisamment liée aussi mais cette fois grâce à des numéros. En effet, les auteurs attribuent un nombre à chaque substituant dans une des représentations et les replacent dans la seconde. Cette méthode est peut-être moins visuelle mais permet tout de même de faire des liens corrects. Evidemment, il y a aussi des représentations multiples non liées comme nous pouvons le voir dans la Figure 24 reprise du livre de McMurry : les formules semi-développées et des modèles 3D illustrant les mêmes molécules ne sont pas reliées de manière optimale car l'isomère *cis* en modèle 3D se trouve sous l'isomère *trans* en formule semi-développée.

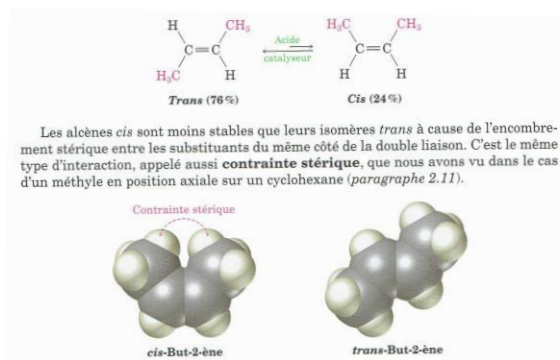


Figure 24 : Exemple de représentation multiple dans laquelle la 2D et la 3D ne sont pas liées (McMurry & Simanek, 2007)

Dans ce thème, les ouvrages tentent de faire des liens avec des propriétés. Dans la première partie de ce thème, ils abordent l'activité optique mais sans aucune représentation. Ce n'est que plus loin, lorsqu'ils abordent la configuration absolue qu'ils mettent en relation l'activité optique avec la configuration R et S. De plus, dans l'ouvrage de McMurry, les auteurs présentent sous forme de tableau des propriétés physiques comme le point de fusion, la densité ou la solubilité de l'acide tartrique dextrogyre, lévogyre ou méso. Cela permet de voir que ces propriétés ne varient pas entre lévogyre et dextrogyre mais bien si le composé est méso. Ce tableau n'est toutefois pas relié à une représentation en particulier.

2.4.1.3) Troisième thème : substitution nucléophile

Ce thème a également été sélectionné dans cette analyse car c'est un exemple typique de réaction illustrant des modifications dans la structure tridimensionnelle. En effet, durant la substitution nucléophile d'ordre 1, le produit peut avoir une inversion ou une rétention de configuration alors que durant la substitution nucléophile d'ordre 2, il y a une inversion de configuration. Il est donc intéressant de pouvoir analyser la façon dont la tridimensionnalité des molécules est illustrée dans ce genre de réaction.

Il s'avère qu'au niveau des types de représentation utilisés, le caractère 3D est surtout illustré par des représentations de Cram mais les représentations 3D ne sont cependant pas les plus utilisées dans ce contexte. En effet, les formules topologiques, semi-développées et développées sont les plus utilisées. Dans le traité de McMurry, la grande majorité des représentations sont semi-développées même si des représentations utilisant les modèles 3D et des potentiels électrostatiques sont également présentes. De plus, comme pour les autres thèmes, McMurry utilise les modèles 3D en parallèle avec des représentations de Cram par exemple. Au niveau des exercices, nous trouvons toujours la partie avec des exercices portant sur la visualisation tridimensionnelle dans le traité de McMurry tandis que dans celui d'Arnaud, il n'y a que des formules topologiques et semi-développées.

Comme pour les autres thèmes, la majorité des représentations sont explicites car les conventions ont toutes été citées dans les deux livres, à l'exception du symbole « † » (état de

transition) dans le traité d'Arnaud. Contrairement au cas du premier thème, McMurry décrit explicitement dans la légende les conventions des cartes de potentiels.

Dans ce cas-ci également, comme pour les deux autres thèmes, les représentations sont toujours en relation avec le texte. Dans le livre d'Arnaud, ils sont reliés car la représentation est correctement placée dans le texte, ce qui permet de comprendre assez facilement que le texte et la représentation illustrent le même concept. McMurry réfère les numéros des figures dans le texte.

Le quatrième critère, relatif aux représentations multiples, ne s'applique pas au traité d'Arnaud qui n'en présente pas pour ce thème. Par contre, nous avons déjà signalé qu'il y avait des représentations multiples combinant les modèles 3D avec des représentations de Cram ou avec des formules semi-développées dans le livre de McMurry. Dans ce cas également, la 2D et la 3D sont correctement reliées grâce à des couleurs. Par exemple, dans les deux représentations, le nucléophile est illustré avec la même couleur.

Au niveau des liens avec les propriétés, seul le traité de McMurry tente de faire des liens. En effet, les auteurs font le lien entre la réactivité et les gênes stériques. De plus, ils abordent la cinétique de la substitution nucléophile d'ordre 2, contrairement au traité d'Arnaud. Pour la substitution nucléophile d'ordre 1, le livre de McMurry illustre l'obtention d'un mélange racémique grâce à une représentation de modèles 3D contrairement à l'ouvrage d'Arnaud. Ils établissent ainsi le lien entre représentations et absence d'activité optique du mélange obtenu.

2.4.2) Analyse quantitative des traités

Dans cette partie, nous allons reprendre les trois thèmes décrits plus haut. Nous avons calculé pour chaque thème le nombre de représentations de chaque type présentes dans les deux manuels : McMurry et Arnaud. Cela permet de mieux visualiser la fréquence de leur utilisation. Les résultats sont repris dans l'annexe 4. Ensuite, après avoir calculé le nombre d'illustrations incluses dans les représentations multiples, nous les avons réparties en trois classes : (i) informations suffisamment liées, (ii) insuffisamment liées et (iii) non liées.

Si nous considérons le premier thème, nous pouvons remarquer que l'utilisation des modèles 3D est beaucoup plus importante dans le livre de McMurry. De plus, ce dernier utilise également plus de représentations 3D auxquelles les densités électroniques étaient ajoutées alors qu'il n'y en a aucune dans le livre d'Arnaud. Cela permet de pouvoir réaliser des liens avec la polarité en premier lieu puis avec la réactivité. Par contre, la projection de Newman, qui nous donne également une information sur la structure tridimensionnelle, est beaucoup plus employée dans le traité d'Arnaud. Afin de voir quel livre utilisait le plus de représentations 2D, c'est-à-dire les formules topologiques, semi-développées et développées, nous additionnons le pourcentage des trois. Nous obtenons ainsi un total de 50% de représentations 2D dans le livre de McMurry et 54% pour celui d'Arnaud. Si nous effectuons un classement des trois types de représentation les plus utilisés, nous avons pour le traité de P. Arnaud : les formules développées, la projection de Newman et la représentation de Cram. Concernant l'ouvrage de McMurry, nous avons la représentation de Cram, les formules développées puis les modèles 3D en ex aequo avec les formules semi-développées. Cette observation permet de montrer que selon les livres, l'accent sur la structure n'est pas réalisé de la même manière. D'autres observations peuvent être faites : le livre de McMurry utilise aussi des représentations avec des orbitales sp^3 contrairement à celui d'Arnaud. Cependant, il est possible de trouver dans ce dernier une représentation utilisant des sphères d'encombrement. Nous avons ensuite analysé les représentations multiples. Dans ces dernières, nous trouvons 33% des représentations dans le livre de McMurry et 18% dans celui d'Arnaud. Puis nous les avons classées selon les trois catégories précédemment citées. Comme nous pouvons le remarquer dans la Figure 25, McMurry introduit dans ce thème certes plus de représentations multiples mais elles sont insuffisamment liées par rapport au livre d'Arnaud. Ce

résultat peut être expliqué par le fait que nous trouvons un grand nombre de représentations multiples liant des densités électroniques avec des formules semi-développées ou des représentations de Cram dans le chapitre sur les groupes fonctionnels. Or, les représentations 2D et 3D ne sont reliées que grâce à une mise en parallèle. L'utilisation des couleurs n'est pas optimisée, il n'y a pas de flèche ni d'autres symboles visuels permettant de réaliser des liens. Rappelons l'incohérence déjà mentionnée dans l'analyse qualitative concernant la représentation des liaisons par des traits simples dans les diagrammes de densité électronique.

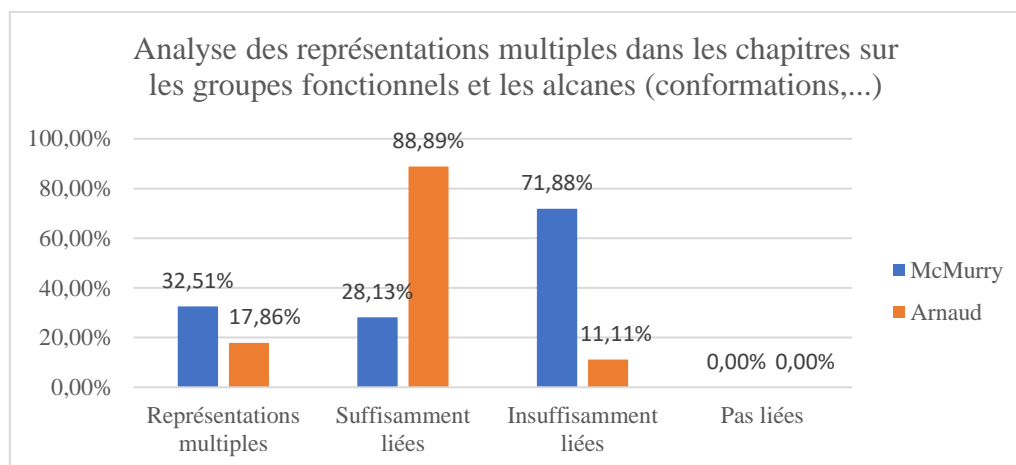


Figure 25 : Analyse des représentations multiples dans les chapitres sur les groupes fonctionnels et les alcanes

Concernant le deuxième thème, la stéréochimie, la première observation est l'absence d'utilisation d'images de modèles moléculaires 3D dans le traité d'Arnaud alors qu'ils représentent 21% des représentations dans celui de McMurry. A la place, le livre d'Arnaud utilise plus de formules topologiques et semi-développées ainsi que des représentations de Cram. Ces dernières sont d'ailleurs majoritaires dans les deux manuels, ce qui est assez logique étant donné le thème abordé qui requiert la spécification de l'organisation spatiale des substituants autour d'un carbone chiral. Les trois représentations majoritaires dans le livre d'Arnaud sont la représentation de Cram, la formule semi-développée et la formule topologique. Dans celui de McMurry, ce sont la représentation de Cram, la formule semi-développée et les modèles 3D. Le traité de McMurry semble donc mettre l'aspect 3D plus en évidence mais la somme des nombres de représentations 2D (formules topologiques, semi-développées et développées) fournit 41% pour le traité de McMurry et 47% pour celui d'Arnaud. La différence n'est donc guère significative. La projection de Newman est présente dans les deux manuels en très faible proportion. De nouveau, l'entièreté des représentations n'est pas illustrée dans le même manuel. Par exemple, nous retrouvons des cartes de densité électronique en très faible proportion dans le McMurry, alors que nous n'en trouvons pas dans le second traité. Comme il est possible de le voir dans la Figure 26, dans ce thème également, un plus grand nombre de représentations font partie des représentations multiples dans l'ouvrage de McMurry (23,5%). Cependant, cette fois-ci, plus de trois quarts des représentations sont suffisamment liées contre 50% chez Arnaud.

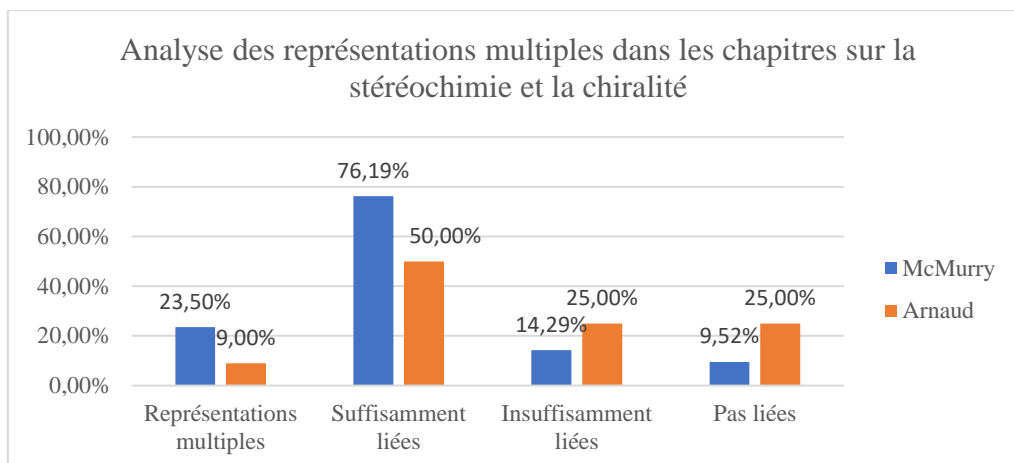


Figure 26 : Analyse des représentations multiples dans les chapitres sur la stéréochimie et la chiralité

Les liens sont réalisés par une mise en parallèle correcte des représentations 2D et 3D, ainsi que par une bonne utilisation des couleurs qui permet de passer correctement d'une représentation à l'autre (Figure 27). Dans le cas du livre de P. Arnaud, les représentations suffisamment liées ont toujours une mise en parallèle correcte mais l'utilisation des couleurs est remplacée par une utilisation de nombres (Figure 28). Les représentations insuffisamment liées sont celles qui présentent seulement une bonne mise en parallèle mais aucune autre caractéristique pour établir des liens. Les représentations non liées ne sont même pas mises en parallèle correctement et représentent tout de même 25% des représentations multiples de ces chapitres chez Arnaud et presque 10% chez McMurry.

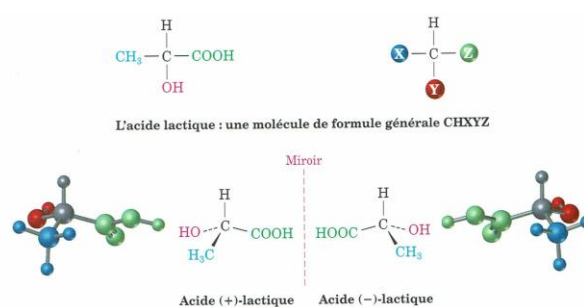


Figure 27 : Exemple de représentation multiple où les couleurs sont utilisées pour réaliser des liens (McMurry & Simanek, 2007)

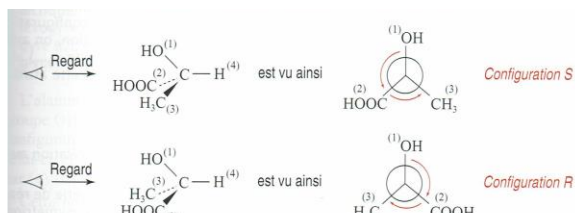


Figure 28 : Exemple de représentation multiple où des nombres sont utilisés pour réaliser des liens (Jamart et al., 2009)

Pour les deux ouvrages, les proportions des différentes représentations dans les chapitres sur la substitution nucléophile se distinguent nettement de celles des deux autres thèmes. La proportion globale de représentations 2D n'est pas la même dans les deux manuels mais la différence n'est pas assez significative que pour tirer une conclusion. En effet, il y a 79% de représentations 2D chez Arnaud et 70% chez McMurry. Une analyse plus détaillée montre que les deux traités n'utilisent pas les représentations dans les mêmes proportions. Illustrons cela par le classement des trois représentations les plus utilisées dans les deux livres. Pour le livre d'Arnaud, ce sont les formules topologiques (33%) puis les formules développées (26%) et les formules semi-développées (19%) alors que dans celui de McMurry, ce sont les formules semi-développées (62%) et en ex aequo les modèles 3D (14%) et les représentations de Cram (14%). Pour illustrer au mieux le caractère tridimensionnel des molécules, ils utilisent des méthodes différentes. En effet, l'ouvrage de McMurry utilise les modèles 3D à hauteur de 14% du total des représentations mais aussi, en faible proportion, ceux de la densité électronique (2,7%) alors que celui d'Arnaud utilise des modèles 3D dans lesquels sont représentées des orbitales sp^3 (14%). Il est possible d'avancer pour chaque livre une hypothèse qui pourrait expliquer pourquoi la représentation 2D est autant utilisée. Dans le traité de McMurry, la théorie est expliquée à l'aide

des représentations de Cram et des modèles 3D mais les exercices emploient surtout des formules semi-développées. Il est important de rappeler que nous trouvons dans le livre de McMurry une partie nommée « visualisons la chimie dans l'espace » mais le nombre d'exercices dans cette partie est nettement inférieur aux nombres d'exercices « classiques ». Pour le traité d'Arnaud, une autre hypothèse peut être avancée. Dans ce manuel, les auteurs présentent également la substitution nucléophile sur un groupe carbonyle et sur un cycle benzénique. Ces composés, de par leurs carbones sp^2 , n'impliquent pas le besoin de visualiser leur structure tridimensionnelle. Dans la Figure 29, nous pouvons voir que 13% des représentations font partie de représentations multiples et qu'elles sont toutes suffisamment liées grâce à des couleurs. L'ouvrage d'Arnaud ne possède pas de représentations multiples pour ce thème.

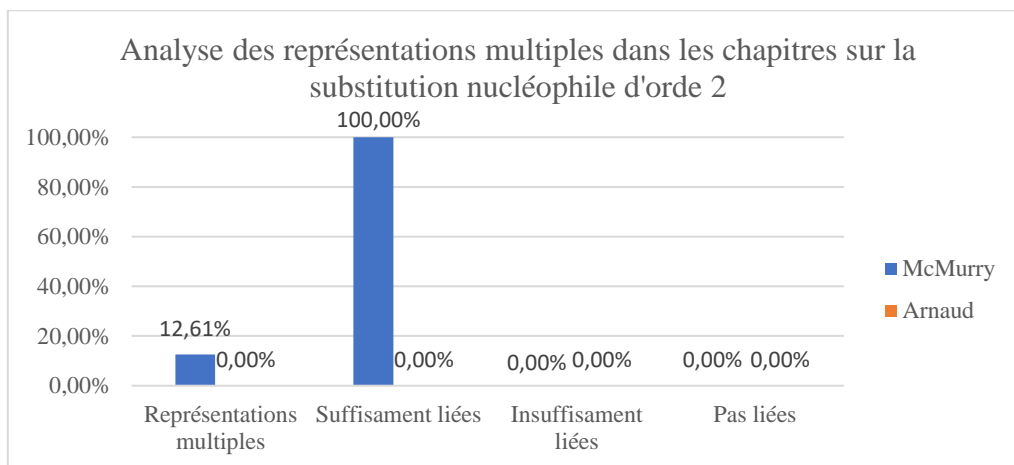


Figure 29 : Analyse des représentations multiples dans les chapitres sur la substitution nucléophile d'ordre 2

Si nous considérons les deux manuels de manière globale, nous pouvons remarquer que l'utilisation des modèles 3D et des représentations multiples est plus importante dans le cas du traité de McMurry. De plus, ces dernières sont correctement utilisées et liées grâce à des couleurs et des flèches par rapport au livre d'Arnaud, à l'exception du chapitre sur les alcanes et les conformations mais une hypothèse a été avancée afin d'expliquer cela. Ces observations montrent qu'en fonction des livres utilisés durant l'enseignement de la chimie organique aux étudiants, ceux-ci seront plus ou moins confrontés à l'établissement de liens entre les différents types de représentations et donc entre le niveau symbolique et submicroscopique. Leurs capacités représentationnelles (Dickmann et al., 2019) seront dès lors stimulées de manière très variable.

2.5) Discussion générale et suggestions didactiques découlant de l'analyse des ouvrages

Au niveau des manuels de secondaire, nous constatons tout d'abord, même si le corpus étudié est limité à huit ouvrages, que les livres récents utilisent plus de modèles 3D pour illustrer les molécules. Même si cette proportion reste minoritaire (environ 25% en moyenne), la confrontation plus importante des étudiants avec le niveau submicroscopique pourrait les aider à mieux visualiser la structure tridimensionnelle des molécules et mieux visualiser les relations avec les deux autres niveaux de représentation. Tout comme pour les manuels du secondaire, la proportion des différentes représentations varie en fonction du traité d'enseignement supérieur utilisé. Dans le traité de P. Arnaud (2009), très peu de représentations 3D ou multiples ont été observées dans les parties analysées. Par contre, les modèles 3D et les représentations multiples sont beaucoup plus utilisés dans le traité de McMurry (2007), même si une incohérence a été évoquée dans la comparaison entre les représentations de densité électronique et les formules symboliques 2D. À part la partie « Visualisons la chimie dans l'espace » du traité de McMurry, la majorité des

exercices proposés font appel à des représentations 2D. Il serait donc intéressant que les auteurs de manuels et traités essaient d'équilibrer un peu plus les représentations utilisées dans la théorie et dans les exercices. En fonction du livre utilisé pour enseigner la chimie organique, les étudiants auront plus ou moins d'entraînement concernant la visualisation des molécules en trois dimensions. Il faut donc que les manuels du secondaire et les traités de l'enseignement supérieur continuent d'utiliser plus régulièrement les représentations tridimensionnelles pour aider davantage les étudiants à visualiser et manipuler mentalement les molécules en trois dimensions.

La seconde conclusion à propos des manuels du secondaire se rapporte au manque d'utilisation de la représentation de Cram. En effet, nous avons vu que seuls les anciens manuels utilisaient ce type de représentation mais que les conventions n'étaient pas indiquées. Or, comme nous l'avons montré dans l'analyse des manuels de l'enseignement supérieur, cette représentation est très utilisée dans la suite du cursus des étudiants. Ces derniers devront utiliser les représentations de Cram pour représenter des réactions ou encore réaliser des traductions avec d'autres représentations comme la projection de Newman. Par conséquent, si dès la première rencontre des étudiants avec la représentation de Cram, les conventions ne sont pas suffisamment explicitées, cela pourrait provoquer des incompréhensions et des conceptions alternatives par la suite. Par contre, si les étudiants ne rencontrent pas du tout cette représentation dans le secondaire, ils devront apprendre ses conventions et son utilisation en même temps que de nouvelles représentations comme la projection de Newman. Il serait donc intéressant de les utiliser un peu plus dans les manuels afin de déjà s'y habituer. De plus, son utilisation conjuguée à celle des modèles 3D pourrait aider les étudiants à s'entraîner à effectuer des traductions. Pour cela il faudra évidemment que les différents types de représentations soient correctement liés entre eux et au texte.

Les problèmes d'explicitations insuffisantes des conventions ne sont pas spécifiques à la représentation de Cram dans les manuels du secondaire car la majorité de ceux-ci ont été évalués comme étant ambigus de ce point de vue. Il est assez évident que cela peut poser des problèmes aux étudiants dans la compréhension de ce type de représentation car un manque d'explicitation augmente la charge cognitive au détriment de l'apprentissage et de la compréhension (Kumi et al., 2013). Dans tous les chapitres et points analysés du traité de McMurry, les représentations peuvent être considérées comme explicites car les conventions sont présentées dès les premiers chapitres. Elles ne sont pas rappelées systématiquement ensuite, ce qui peut créer des difficultés lors d'une lecture non-linéaire du livre. Une étude a mis en avant que certains étudiants ne connaissaient pas les conventions de couleurs des modèles moléculaires et ne savaient donc pas utiliser correctement ceux-ci même s'ils avaient manipulé de tels modèles ou en avaient vu des illustrations lors du cours (Stull et al., 2012). Il serait donc intéressant de rappeler les conventions un peu plus souvent ou de prévoir un tel rappel sur un rabat ou la deuxième de couverture.

Ensuite, contrairement aux ouvrages de l'enseignement supérieur, nous avons vu que beaucoup de représentations n'étaient pas complètement en relation avec le texte dans les manuels du secondaire. De plus, cette proportion varie d'un livre à l'autre et même d'un chapitre à l'autre. En effectuant plus de liens et en mettant mieux en relation les représentations et le texte, les apprenants peuvent mieux appréhender et maîtriser le concept enseigné.

Même si les manuels actuels présentent plus de représentations multiples, le pourcentage de telles représentations reste faible (inférieur à 20%). Un point positif est qu'il semble que les manuels plus récents tentent de mieux lier les représentations en 2D et en 3D. Dans les ouvrages de l'enseignement supérieur, le pourcentage de représentations impliquées dans des

représentations multiples est plus élevé que dans les manuels de secondaire. Par exemple, les représentations 3D sont rarement présentées isolément dans les deux ouvrages de l'enseignement supérieur : dans le livre d'Arnaud, elles apparaissent majoritairement associées à des représentations de Cram et dans celui de McMurry, elles font partie de représentations multiples. Dans ce livre, l'usage intensif des couleurs permet de relier les représentations 2D et 3D. Dans les représentations multiples, les modèles 3D ne sont pas directement utilisés ou cités dans les textes mais ils permettent, mis en parallèle avec les représentations de Cram, d'aider les étudiants à mieux visualiser la molécule en trois dimensions. Une hypothèse au niveau des représentations multiples est qu'il y a un phénomène de coopération entre les deux types de représentations. Par exemple, les étudiants ayant des difficultés de visualisation en trois dimensions en utilisant les représentations de Cram peuvent considérer le modèle 3D tandis que ceux ayant du mal à voir en trois dimensions avec le modèle peuvent utiliser les conventions de la représentation de Cram pour s'aider et comparer avec le modèle. Leur utilisation permet également d'aider les étudiants à faire des liens entre les représentations donc entre les niveaux symbolique et submicroscopique (Gkitzia et al., 2011). Or nous avons vu précédemment l'importance de l'utilisation des trois niveaux de représentation pour comprendre parfaitement un concept en chimie. Il est donc essentiel que les manuels mettent en avant ces liens. De plus, pour réaliser des liens corrects et aider les étudiants à mieux effectuer des tâches de traduction, il faut que les représentations soient suffisamment liées. Par conséquent, les ouvrages de référence devraient plus mettre l'accent sur les représentations multiples et s'assurer qu'elles sont correctement et explicitement liées.

Au niveau des liens entre les aspects tridimensionnels et les propriétés physico-chimiques, nous avons vu que les ouvrages analysés n'abordent pas tous les mêmes propriétés et que certains n'en abordent même pas du tout. Les propriétés discutées dans les livres de l'enseignement supérieur sont surtout la stabilité de certaines conformations à l'aide de la représentation de Newman et l'activité optique des énantiomères. Dans le cas du livre de McMurry, nous trouvons tout de même un lien avec la polarité dans l'introduction des groupes fonctionnels et un lien avec la réactivité dans la substitution nucléophile. Par contre les propriétés ne sont pas toujours bien reliées. Il serait donc intéressant de relier davantage dans les ouvrages de référence les trois niveaux du triangle de Johnstone (macroscopique, submicroscopique et symbolique) et les propriétés entre elles car les chimistes expérimentés utilisent fréquemment les trois niveaux de représentation et passent facilement de l'un à l'autre (Gkitzia et al., 2011), alors que les étudiants éprouvent beaucoup plus de difficultés.

Une observation faite dans les deux ouvrages de l'enseignement supérieur que nous avons analysés est qu'ils illustrent très peu les molécules selon différentes vues. Pourtant on associe souvent la capacité spatiale à trois facteurs qui sont les relations spatiales (rotation mentale), la visualisation (mouvement ou déplacement de parties de la figure) et l'orientation spatiale (Boukhechem & Dumon, 2016; Carlisle et al., 2015; Harle & Towns, 2011; Lohman, 1979). Cette dernière, consiste à pouvoir voir un objet sous diverses perspectives en déplaçant l'observateur. Par conséquent, montrer les molécules sous différentes perspectives dans les livres pourrait peut-être aider les étudiants à maîtriser ce facteur majeur de la capacité spatiale et à résoudre des tâches de traduction.

Chapitre 3 :

Analyse des compétences de visualisation tridimensionnelle d'élèves de fin d'enseignement secondaire général et d'étudiants de 1er cycle universitaire

La recherche présentée dans ce chapitre a pour objectif d'évaluer les compétences de visualisation tridimensionnelle en chimie d'étudiants de 1^{er} cycle universitaire et d'élèves suivant un cours de sciences générales en dernière année de l'enseignement secondaire général et d'ainsi identifier les difficultés majeures qu'ils éprouvent. Ce travail s'appuie sur les résultats de recherche disponibles décrits dans le chapitre 1 et sur l'analyse de manuels et traités présentée dans le chapitre 2. Les conclusions que nous pourrions en tirer sont susceptibles de fournir des pistes didactiques pour contribuer à améliorer les aptitudes de manipulation mentale de structures moléculaires dans l'espace à trois dimensions. Une première tentative en ce sens sera présentée sous la forme d'une ingénierie didactique dans le chapitre 4.

Nous présentons également dans ce chapitre les résultats d'une enquête réalisée auprès de professeurs d'enseignement secondaire sur les méthodes qu'ils mettent en œuvre pour enseigner la tridimensionnalité en chimie organique.

3.1) Évaluation des compétences des étudiants de 1er cycle universitaire

3.1.1) Construction du questionnaire

L'objectif de ce questionnaire est de déterminer quelles difficultés les étudiants de bachelier dans les études supérieures en Belgique francophone rencontrent lors de la résolution d'exercices nécessitant la visualisation tridimensionnelle en chimie organique. Les exercices proposés dans ce test ciblent les différentes difficultés identifiées dans la littérature scientifique et sont en partie adaptés d'exercices de tests publiés (Al-Balushi & Al-Hajri, 2014; Boukhechem & Dumon, 2016; Carlisle et al., 2015; Cooper et al., 2012; Ferk et al., 2003, 2005; McMurry & Simanek, 2007; Stieff et al., 2012; Stull et al., 2012). Au moment du passage du test, les étudiants ont suivi un premier cours de chimie organique d'environ 8 à 10 crédits et ont réussi les épreuves associées à ce cours.

La version initiale de ce test (Annexe 5) est composée de 20 questions à choix multiples avec des coefficients de certitude afin que le test dure 45 minutes maximum. Ce test n'intervient pas dans une cote pour le cursus des étudiants et ces coefficients de certitude sont présents qualitativement dans le but de déterminer si les étudiants sont ou non conscients d'avoir éprouvé des difficultés lors de la résolution de certains exercices. Comme ces coefficients de certitude ne sont présents que d'une manière qualitative, les étudiants devraient normalement indiquer leur véritable ressenti au lieu d'adopter une quelconque stratégie de réussite. Ils ont d'ailleurs été explicitement encouragés à évaluer leur véritable perception de certitude. Comme nous pouvons le voir dans l'Annexe 5, nous avons choisis une échelle asymétrique (Prosperi, 2016; SMART — Système Méthodologique d'Aide à la Réalisation de tests, n.d.). Cela permet d'être plus précis dans la seconde moitié de l'échelle, les étudiants utilisant plus cette moitié-là (Prosperi, 2016). Trois questions sur les 20 ne sont pas des exercices mais plutôt des informations pour l'analyse : elles concernent leur genre, leur filière d'étude ainsi que leur avis concernant l'importance de la visualisation en chimie organique afin de déterminer dans quelle mesure les étudiants sont conscients du caractère essentiel de la visualisation tridimensionnelle en chimie organique. Les 17 autres questions sont réparties selon six thèmes se rapportant aux différentes difficultés rapportées dans le chapitre 1 et requièrent des connaissances vues au cours de leur première année d'études supérieures comme le moment dipolaire, l'énantiométrie, la chiralité, ... Les différents exercices de ces thèmes ont été mélangés afin qu'il n'y ait jamais deux exercices du même thème qui se suivent. En effet, cela introduirait un biais, les étudiants s'habituant à la tâche demandée (Ferk et al., 2003).

Le premier thème concerne les liens entre la structure et les propriétés. La première des trois questions concernant ce thème est une version modifiée du test IILSI (Implicit Information from Lewis Structure Instrument) développé par Cooper et al., (2012) (item 16). Il est modifié d'une telle façon qu'en plus de demander aux étudiants les informations qu'ils pensent pouvoir extraire d'une structure de Lewis, il est également demandé de dire si l'information peut être extraite de manière directe ou indirecte. Nous pourrions donc voir quels types d'information les étudiants peuvent extraire d'une telle structure et voir s'ils savent eux-mêmes classer les informations. La proposition « aucune information » a été ajoutée afin de vérifier que les participants ne cochaient pas tout sans réfléchir (Cooper et al., 2012). La seconde question (item 12), inspirée de l'item 8 de Al-Balushi & Al-Hajri (2014), et la troisième question (item 20) permettent de mettre en évidence si les étudiants sont capables de faire des prédictions sur des propriétés chimiques telles que la température d'ébullition ou le moment dipolaire sur la base de représentations 3D ou sur la base de modèles mentaux.

Comme il a souvent été rapporté que les étudiants éprouvaient des difficultés dans l'exercice de traduction entre les représentations (Boukhechem & Dumon, 2016; Harle & Towns, 2011; Stull et al., 2012; Taskin et al., 2015), nous avons conçu quatre exercices permettant de tester cela. Nous n'avons pas utilisé la projection de Fischer car le sujet de ce travail est la visualisation de la structure tridimensionnelle. Or, cette projection n'est pas la plus pertinente au niveau de la structure 3D. Le premier exercice (item 11) relie la représentation de Cram avec la projection de Newman (Boukhechem & Dumon, 2016; Stieff et al., 2012; Stull et al., 2012). Le second concerne la traduction d'un modèle 3D en représentation de Cram lorsque nous regardons dans une certaine direction (item 18) (Carlisle et al., 2015). Le troisième est le passage de la projection de Newman à une représentation 3D (item 6) (Boukhechem & Dumon, 2016; Stull et al., 2012). Le dernier quant à lui rassemble les trois types de représentation (item 13) (Stieff et al., 2012). Les propositions de réponse de chacun de ces exercices ont été pensées pour tester si les étudiants comprennent les conventions des différents types de représentation. Autrement dit, elles permettent de voir si les étudiants comprennent ce que signifient les traits en gras et en pointillés,

quel carbone est représenté par le centre du cercle dans la projection de Newman mais aussi de voir s'ils savent reconnaître des conformations éclipsées ou décalées.

Le troisième thème concerne la symétrie car la détermination de plans de symétrie est utile pour prédire si une molécule est polaire mais aussi pour la détermination de centres chiraux (Carlisle et al., 2015). Comme c'est une source possible d'erreurs, nous avons développé trois exercices. Les deux premiers items (5 et 15), demandent aux étudiants de donner le nombre d'atomes pouvant être présents au maximum dans un plan de symétrie donné (Carlisle et al., 2015). Les molécules sont données avec leur formule brute. Les étudiants doivent donc pouvoir se représenter mentalement la molécule de façon tridimensionnelle pour ensuite pouvoir s'imaginer les plans de symétrie possible, choisir celui qui comporte le plus d'atomes pour ensuite compter le nombre d'atomes. Le troisième exercice (item 17) est un peu différent car il faut trouver la molécule qui ne contient pas de plan de symétrie parmi des molécules en représentation 3D (Carlisle et al., 2015). Les étudiants ont donc moins d'étapes à réaliser mentalement pour trouver la solution.

Les trois thèmes suivants se basent sur les recherches de Ferk et al (2003) qui concluent que plus il y a d'opérations à effectuer pour résoudre un problème, plus le taux de réussite chute et ce, pour chaque type de représentation. Nous avons donc conçu deux exercices de perception, trois exercices de perception incluant aussi la rotation et deux exercices de perception de molécules subissant une rotation et une réflexion. Dans ces trois thèmes, nous avons à chaque fois au moins un exercice avec la représentation de Cram et un avec une représentation d'un modèle tridimensionnel. Nous pourrions ainsi voir si effectivement les étudiants de bachelier éprouvent plus de difficultés lorsque plus d'opérations mentales sont nécessaires mais également pour quels types de représentation ils rencontrent le plus de problèmes.

Pour les exercices de perception, il s'agit de demander aux étudiants d'identifier les atomes ou groupes d'atomes qui sont les plus proches ou les plus éloignés de l'observateur que ce soit dans une représentation de Cram (item 8) ou en modèle 3D (item 19)(Ferk et al., 2003, 2005). De nouveau, pour la représentation de Cram, il est nécessaire de comprendre les conventions pour pouvoir y répondre.

Concernant la rotation, Carlisle et al. (2015) ont conclu que les étudiants répondent moins bien lorsqu'il faut effectuer plusieurs rotations. Par conséquent, l'item 7 ne nécessite qu'une seule rotation dans le plan du cycle (Carlisle et al., 2015). Ensuite, les deux autres exercices, nécessitent plusieurs rotations. Cela permettra de tester la conclusion de Carlisle (2015). Cependant, un des deux exercices met en œuvre une représentation de Cram (item 10) et l'autre une représentation 3D (item 14) (McMurry & Simanek, 2007).

Les deux derniers exercices mettent en œuvre la perception de molécules ayant subi une réflexion et une ou plusieurs rotations (Ferk et al., 2003, 2005). Les exercices répondant au mieux à ce thème impliquent la recherche d'énantiomères parmi différentes propositions. En effet, les énantiomères sont des images miroirs non superposables. Le premier exercice de ce thème, l'item 4, est en représentation de Cram et nécessite seulement une rotation autour des carbones chiraux (Ferk et al., 2003, 2005). L'item 9, qui est en représentation 3D nécessite quant à lui des rotations au niveau des carbones chiraux mais aussi dans l'espace (Ferk et al., 2003, 2005).

3.1.2 Validation du questionnaire

Avant de soumettre ce questionnaire aux étudiants, une étape de validation était nécessaire. C'est pourquoi nous avons demandé à différents testeurs de réaliser ce questionnaire en se chronométrant. Il s'agit de vérifier que le questionnaire prend 45 minutes maximum mais aussi de s'assurer que les différentes questions sont clairement posées. Nous avons donc demandé à des personnes du Département de Chimie, à une assistante pédagogique, aux auteurs d'un livre

d'exercices résolus de niveau de premier bac (Agnello et al., 2021) ainsi qu'à des étudiants de premier master en sciences chimiques de le réaliser et de donner leurs remarques et suggestions afin de l'améliorer. Cela nous a permis de calculer un alpha de Cronbach afin de déterminer la cohérence interne des questions posées. Pour être acceptable, celui-ci doit être, selon certains auteurs, supérieur ou égal à 0,8 (IRDP, n.d.). En effet, plus il est proche de 1, meilleure est la cohérence interne du test, ce qui signifie que toutes les questions mesurent bien la même dimension, ici l'aptitude au raisonnement tridimensionnel en chimie organique

Dans le Tableau 2, nous pouvons voir les moyennes des testeurs (n=14), les écarts-types ainsi que le calcul de l'alpha de Cronbach pour le test entier. Toutes les questions ont été ramenées sur un point. Comme nous pouvons le remarquer, la question la moins réussie est la question 9, c'est-à-dire la question où le plus de procédés mentaux sont nécessaires et dans laquelle nous utilisons des modèles 3D. Le temps mis pour réaliser cette première version du questionnaire est en moyenne d'environ 37 minutes (± 17 minutes). Notons que le alpha de Cronbach de ce questionnaire, mesuré lors de la phase de validation est de 0,65, donc inférieur à la limite de 0,8 citée plus haut (IRDP, n.d.).

Tableau 2: Résultats des testeurs à la première version du questionnaire (moyenne, écart-type, variance et alpha de Cronbach pour le test entier)

Question	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Total
Moyenne	0,71	0,64	0,93	0,86	1,00	0,29	0,50	1,00	0,86	1,00	0,71	0,86	0,59	0,93	0,43	1,00	0,85	13,16
Ecart-type	0,47	0,50	0,27	0,36	0,00	0,47	0,52	0,00	0,36	0,00	0,47	0,36	0,17	0,27	0,51	0,00	0,24	2,33
Alpha de Cronbach	0,65																	

Il faut toutefois utiliser le coefficient α de Cronbach avec prudence. En effet, la littérature montre que l'utilisation de ce critère peut être assez subjective. Taber (2018) a analysé de nombreux articles provenant de quatre journaux en science de l'éducation et faisant référence à ce coefficient. Dans la Figure 30 issue de cet article, nous pouvons voir les différentes zones de alpha associées à divers qualificatifs utilisés dans les articles examinés (Taber, 2018). Par exemple, le terme « acceptable » a été utilisé pour des valeurs de alpha allant de 0,45 à 0,98. Par conséquent, il n'y a pas de consensus clair sur la façon d'interpréter les valeurs de alpha calculées. Nous pouvons également constater qu'en fonction de l'article, une valeur (0,5 par exemple) pourra être considérée comme étant non satisfaisante, suffisante et acceptable. En outre, malgré l'existence d'un seuil d'acceptabilité, les valeurs inférieures à celui-ci ne sont pas toujours considérées comme insatisfaisantes.

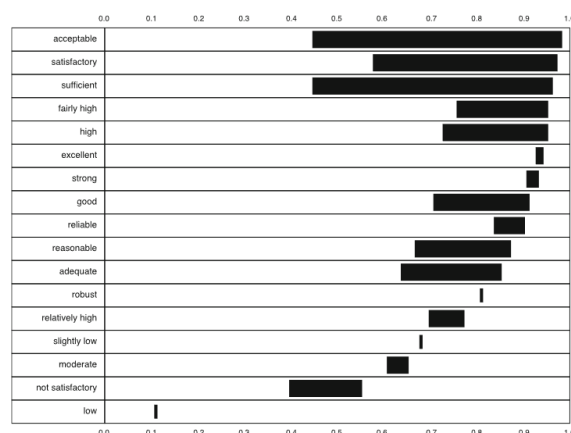


Figure 30 : Descripteurs qualitatifs utilisés pour les valeurs/plages de valeurs de l'alpha de Cronbach rapportées dans des articles publiés dans des revues en science de l'éducation (Figure 1 de Taber, 2018)

Un autre point important souligné par Taber (2018) est que le coefficient alpha de Cronbach ne devrait pas être considéré comme une mesure absolue de la cohérence interne d'un instrument de test mais seulement comme une mesure associée à l'application de cet instrument à une population donnée.

En outre, pour interpréter correctement le coefficient alpha de Cronbach, il faut être également conscient du fait que les différents items du test que nous avons mis au point ne sont

pas tous censés mesurer la même dimension puisque, comme détaillé précédemment, nous les avons développés explicitement pour couvrir des compétences diverses en manipulation mentale tridimensionnelle et que, pour chacune de ces aptitudes, des degrés de complexité croissants ont été introduits, par exemple, en augmentant le nombre d'opérations mentales requises.

Dans le Tableau 3, nous pouvons voir les moyennes, les écarts-type et les alphas de Cronbach pour chaque thème afin de voir s'il y a une cohérence interne intra-thème car les compétences des étudiants peuvent fortement varier d'un thème à l'autre. Seul le thème de la perception et de la rotation est très proche de la valeur limite de 0,8. Nous pouvons donc considérer que ce thème possède une bonne cohérence interne. Par contre, nous avons deux thèmes aux environs de 0,3 et un thème possède un alpha de Cronbach de 0, ce qui signifierait que la cohérence interne est mauvaise et que les items ne mesureraient pas la même compétence. Une hypothèse possible est que dans un même thème la difficulté des questions n'est pas la même. Par exemple dans le thème de la perception, rotation et réflexion, une question a été réussie par tout le monde (item 13) et la seconde (item 9) a été la question la moins réussie. La valeur négative pour le thème de la traduction est relativement proche de 0, nous pouvons donc faire la même hypothèse que la cohérence interne est nulle. Nous pouvons également observer une valeur non définie. La raison est que tous les testeurs ont répondu correctement aux deux questions de ce thème. Par conséquent, tous les écarts-type sont nuls.

Tableau 3: Résultats des testeurs pour chaque thème de la première version du questionnaire (moyenne, écart-type, variance et alpha de Cronbach pour chaque thème)

Thème	Lien entre structure et propriétés	Traduction	Symétrie	Perception	Perception et rotation	Perception, rotation et réflexion
Moyenne	2,30	3,07	2,43	2,00	2,07	1,29
Ecart-type	0,53	0,73	0,76	0,00	1,14	0,47
Alpha de Cronbach	0,33	-0,05	0,32	Pas défini	0,78	0,00

En tenant compte des commentaires réalisés par les testeurs, le questionnaire a été modifié comme nous pouvons le voir dans l'Annexe 6. Les principales modifications du questionnaire consistent en la suppression de propositions de réponses dans la question 4 de l'annexe 5 et d'items jugés perturbants ou sensibles à diverses interprétations dans la question 16. Nous avons également dû modifier l'énoncé pour des raisons techniques liées à la plate-forme LimeSurvey¹ et pour rendre les termes « direct » et « indirect » plus clairs. En outre, nous avons inversé les exercices 4 et 13 de l'annexe 5 afin d'éviter une démotivation des étudiants dès la première question. De plus, nous avons remarqué que certains testeurs cochaient plusieurs réponses pour une même question. C'est pourquoi une phrase indiquant qu'une seule réponse était possible a été ajoutée. A l'instar de la calculatrice qui est un outil pour la résolution d'exercices numériques, nous avons mis des modèles moléculaires à disposition des étudiants. Nous avons donc ajouté une 21^{ème} question pour demande aux répondants d'évaluer l'importance de leur utilisation des modèles moléculaires lors de la réponse au questionnaire en utilisant une échelle de six valeurs : 0 (pas d'utilisation) ; 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 et 1 (utilisation intensive). La question 20 a quant à elle été modifiée en vue de la mise en ligne du questionnaire. En effet, relier n'étant pas possible via un questionnaire en ligne, il a été nécessaire de trouver une autre forme de question. Nous avons donc décidé de le réaliser sous forme de tableau dans lequel les étudiants doivent cocher la valeur du moment dipolaire qu'ils pensent correcte pour chaque molécule. Nous avons également modifié l'échelle des coefficients de certitude car un testeur a fait remarquer qu'il n'était pas très pratique de devoir toujours aller revoir au début du questionnaire la signification de chaque

¹ Nous avons utilisé LimeSurvey par facilité car nous avons déjà un compte sur ce site.

chiffre. Nous avons donc remplacé l'échelle non-linéaire par une échelle linéaire : les participants doivent entourer leur degré de certitude parmi 0% ; 20%, 40%, 60%, 80% et 100%. Nous espérons que ces modifications permettront de réaliser ce questionnaire en 45 minutes maximum. A cause du temps limité pour réaliser ce travail, il n'était pas possible de faire tester cette nouvelle version du questionnaire à d'autres testeurs.

3.1.3) Echantillon

Concernant l'échantillon sélectionné, nous avons décidé de soumettre le questionnaire aux étudiants de bachelier en chimie et en pharmacie à l'Université de Liège, à l'issue de leur premier enseignement de chimie organique (1^{ère} année de bachelier pour les chimistes ; 2^{ème} année pour les pharmaciens). A cause de contraintes de temps, les étudiants de deuxième année en chimie (n = 15) ont été testés au début de l'année académique 2021-2022, c'est-à-dire au début de leur deuxième année. Nous considérons cette procédure adéquate parce que le questionnaire ne nécessite pas une mémorisation de matière ou de réactions chimiques. Les étudiants de deuxième année en pharmacie (n = 5) ayant quant à eux leur cours de chimie organique durant le premier quadrimestre, il a été possible de leur proposer ce questionnaire au début du mois de mai 2021. Nous nous sommes ensuite demandé si les étudiants acquièrent une plus grande facilité à visualiser les molécules dans l'espace avec le temps et la pratique liée aux cours ultérieurs. Pour cela, le questionnaire a aussi été soumis aux étudiants de troisième année de bachelier en chimie (n = 17) à l'ULiège. Nous arrivons donc à un total de 47 étudiants. En raison des règles sanitaires liées à la pandémie de COVID-19, le mode de diffusion des questionnaires a été différent. Pour les étudiants en pharmacie, le questionnaire était en ligne. Par conséquent, ils pouvaient l'interrompre à tout moment. Seuls cinq étudiants ont répondu jusqu'à la fin. Par contre, pour les deux autres sections, le questionnaire a été soumis dans le cadre d'une séance d'exercices ou de laboratoire. Les étudiants présents n'ont pas eu l'occasion de l'interrompre.

3.1.4) Résultats

3.1.4.1) Analyse des annotations faites sur les questionnaires

Avant d'analyser les résultats en eux-mêmes, nous allons discuter les observations faites sur les questionnaires des étudiants. En effet, nous avons trouvé des dessins ou des annotations qui donnent des indications sur leurs modes de réflexion pour résoudre les exercices. Ces annotations ou dessins ont uniquement été trouvés dans les deux cohortes d'étudiants en chimie. Pour ne pas alourdir cette analyse des annotations, nous nous concentrerons sur les questions pour lesquelles nous avons observé une fréquence d'apparition relativement plus importante : 4 fois pour la question 10, 5 fois pour la question 5 et 7 fois pour la question 15. Il est intéressant de noter que ces trois items font partie de deux thèmes. L'item 10 fait partie du thème sur la perception et la rotation tandis que les items 5 et 15 sont les deux questions dans lesquelles il faut trouver combien d'atomes au maximum font partie d'un plan de symétrie.

Commençons par la question abordant la problématique des rotations (item 10). Pour cette question, nous avons observé quatre types d'annotations différents. Tout d'abord, deux étudiants ont tenté de redessiner les molécules. Le premier étudiant a redessiné une partie de la molécule en représentation de Cram et l'a fait tourner de 180° afin d'observer ce qu'il advient des indices de profondeur. Ensuite, le second étudiant a traduit les représentations de Cram en projections de Newman pour tenter de déterminer quelles sont les molécules identiques. Cependant, cette stratégie ne lui a pas permis de résoudre correctement cet exercice. Une hypothèse est que l'étudiant comparait les projections de Newman sans faire tourner les différentes parties de la molécule, c'est-à-dire en oubliant le caractère dynamique des molécules. Les deux autres étudiants ont plutôt comparé les molécules ou des parties de la molécule. Le premier de ces deux étudiants

a coupé les molécules en deux étant donné qu'elles contiennent deux carbones chiraux. Ensuite, il a déterminé dans quelles molécules nous trouvions chacune des moitiés. Ainsi, il a pu correctement retrouver les deux molécules identiques. Le second étudiant a quant à lui comparé les molécules deux à deux.

Les deux autres items abordent l'identification d'un plan de symétrie comportant un maximum d'atomes. Pour l'item 5, il s'agit du trifluorure de bore et l'item 15 concerne le dichlorométhane. La stratégie qui revient le plus est l'illustration de la molécule grâce à la représentation de Cram ou en représentation développée. Cependant, cela semble plus utile pour l'item 15. En effet, pour la question 5, celle concernant le BF_3 , les trois étudiants ayant utilisé la représentation de Cram se sont trompés. Par exemple, un étudiant a hésité entre une configuration spatiale tétraédrique et plane. Néanmoins, il a estimé que la configuration tétraédrique était plus probable. Il est possible que l'étudiant ne sache plus si le bore possède un doublet d'électrons non-liants ou non. D'ailleurs, un autre étudiant a clairement dessiné ce doublet non-liant. Ils ont donc peut-être pensé que l'atome de bore était comparable à un atome d'azote. De plus, il semble que certains sachent que la molécule de trifluorure de bore est plane mais oublient que le plan de la molécule est aussi un plan de symétrie. Un autre raisonnement intéressant d'un étudiant est qu'il s'est souvenu que la structure électronique du bore peut être associée à des orbitales sp^2 et donc que la molécule est plane. Par contre, pour l'item 15, la majorité des élèves ayant fait des annotations ont correctement répondu en utilisant la représentation de Cram pour s'aider dans leur visualisation de la molécule. Il s'avère que parfois, les étudiants la représentent correctement mais n'arrivent pas à trouver le plan de symétrie. Un des étudiants a ainsi représenté un tétraèdre en le dessinant dans un cube mais il n'a pas répondu correctement.

3.1.4.2) Présentation des scores

Etant donné le faible nombre de répondants dans la section de deuxième année en pharmacie (seuls 5 étudiants ont répondu à l'entièreté du questionnaire), nous allons surtout concentrer notre analyse sur les sections de chimie. Si nous observons les Figures 31 et 32, nous pouvons constater que les étudiants sont relativement d'accord avec le fait que la visualisation tridimensionnelle des molécules est importante en chimie organique. Il semble tout de même que la section la plus convaincue est celle des étudiants en troisième année de bachelier. Il est possible d'expliquer ce résultat par le fait que l'importance de la géométrie a été abordée dans d'autres cours de leur cursus contrairement aux étudiants de deuxième année qui ne les ont toujours pas eus.

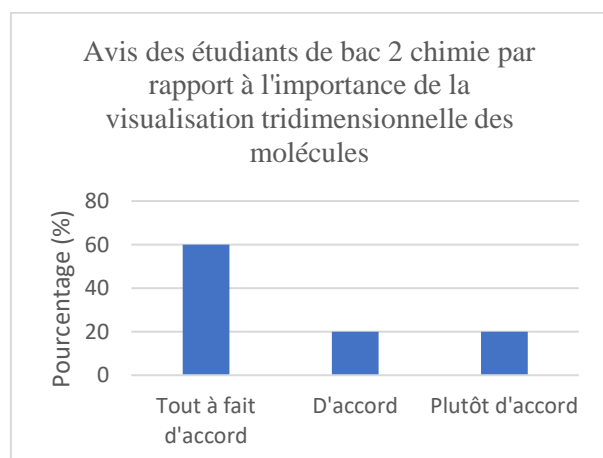


Figure 31 : Importance de la visualisation 3D des molécules pour les étudiants de bac 2

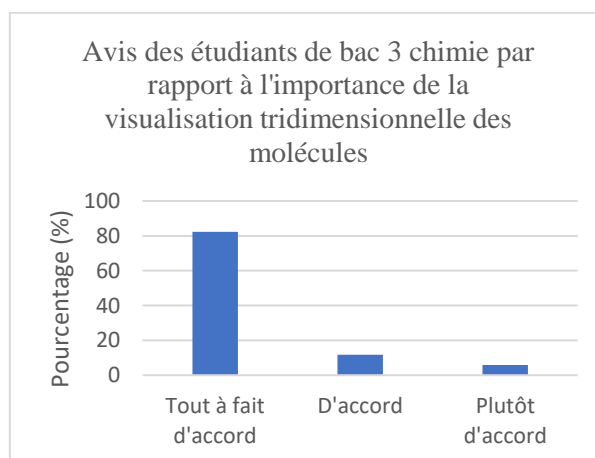


Figure 32 : Importance de la visualisation 3D des molécules pour les étudiants de bac 3

Les graphiques illustrant les résultats et les coefficients de certitude pour les sections de chimie se trouvent dans l'annexe 7. Dans cette dernière, les questions ont été classées selon le thème qu'elles abordent afin de pouvoir dégager des tendances. Nous commençons donc par analyser les différentes questions par thème.

Le premier thème concerne la traduction entre différents types de représentation. Il semble que ce thème est maîtrisé par les étudiants de bloc 2 et bloc 3. En effet, pour chaque question, la moyenne est supérieure à 0,7 et la certitude est relativement bonne à part pour la question demandant de traduire un modèle moléculaire en une représentation de Cram pour laquelle une grande dispersion des certitudes est observée. Cela peut s'expliquer par le fait que ce n'est pas un exercice habituel d'autant plus que la configuration était particulière (la représentation de Cram illustre deux substituants venant vers l'observateur).

Le deuxième thème est celui sur la symétrie. L'item 5 montre que les étudiants ont des difficultés à trouver le nombre maximum d'atomes contenus dans un plan de symétrie. En effet, moins de 50% ont répondu correctement, avec une dispersion importante des coefficients de certitude. Pour environ 47% des étudiants de troisième année, deux atomes au maximum sont contenus dans un plan de symétrie. Une hypothèse pour expliquer ce résultat est que les étudiants ne savent plus déterminer la géométrie de BF_3 et pensent que cette molécule possède une géométrie pyramidale trigonale. En ce qui concerne l'item 15 concernant la molécule CH_2Cl_2 , la population de troisième année a toujours une dispersion importante des coefficients de certitude mais la moyenne est nettement plus élevée que pour la question sur le BF_3 . Les étudiants de deuxième année semblent plus sûrs d'eux mais leur score est inférieur. Si nous comparons avec la question sur BF_3 , nous constatons que les résultats sont meilleurs. Cela peut s'expliquer par le fait que la géométrie tétraédrique d'un carbone est mieux connue et plus utilisée. Les étudiants ont très bien répondu à l'item 17 et la dispersion des coefficients de certitude est toujours présente mais nettement moins que pour les deux autres items. Les élèves semblent plus confiants pour trouver les molécules possédant ou non un plan de symétrie plutôt que de déterminer le nombre d'atomes maximum contenus dans un plan. Comme nous l'avons expliqué dans la section 3.1.1, ce type de tâche demande moins d'opérations mentales que les items 5 et 15, ce qui conduit à de meilleurs résultats.

Le troisième thème, qui aborde les liens entre la structure et les propriétés macroscopiques, débute avec une question sur la température d'ébullition (question 12). La majorité des étudiants répondent correctement mais ont tendance à sous-estimer leurs compétences. Un résultat très surprenant qui concerne environ 30% des étudiants est la sélection de la cétone comme composé possédant la plus grande température d'ébullition. Nous avons interrogé une étudiante qui avait répondu la cétone et nous lui avons demandé pourquoi avoir choisi cette réponse. Elle nous a répondu que soit ils avaient discuté de la cétone dans un cours les jours précédant le questionnaire et ils se sont embrouillés soit elle a répondu au hasard. Dans tous les cas, ces étudiants semblent ne pas avoir intégré correctement le concept de liaisons hydrogènes.

La question 16 est l'un des items qui apportent de nombreuses informations par rapport aux difficultés des étudiants. Afin de pouvoir comparer les deux sections, nous allons nous intéresser aux items pour lesquels moins de 50% des étudiants ont répondu correctement. Pour les étudiants de troisième année, cela concerne quatre items : la température d'ébullition relative, la température de fusion relative, la géométrie moléculaire et la résonance. Les trois premiers sont déterminés de manière indirecte et le dernier de manière directe de la structure de Lewis. Parmi

les items ayant le plus faible pourcentage de réponses correctes, une majorité est composée d'items indirectement liés à la structure de Lewis comme le mentionne une étude précédente (Cooper et al., 2012). Pour la résonance et les forces intermoléculaires, entre 20 et 30% des étudiants ont indiqué qu'on ne les déterminait pas de la structure de Lewis, ni directement, ni indirectement. 40% des étudiants indiquent qu'il est possible de déterminer de façon directe la géométrie des molécules, ce qui implique un oubli des méthodes de prédiction des géométries. Les items pour lesquels le pourcentage de bonnes réponses n'atteint pas 50% pour les étudiants de 2^{ème} année sont les ordres de liaisons, les angles de liaisons, les charges formelles, la température de fusion relative, la géométrie et l'acidité/basicité. Parmi ces items, il y en a autant qui peuvent être déterminés de manière directe que de manière indirecte. Contrairement à la section de troisième année, les étudiants savent que nous pouvons extraire indirectement la température d'ébullition de la structure de Lewis mais ils ont de moins bons résultats concernant les angles de liaisons. Les difficultés récurrentes dans les deux sections concernent la géométrie moléculaire et la température de fusion relative. De plus, nous trouvons de nouveau un pourcentage non négligeable d'étudiants qui pensent que l'ordre de liaison, la température d'ébullition et de fusion, les forces intermoléculaires et la résonance ne peuvent pas être déterminés du tout à partir de la structure de Lewis. Jusqu'à maintenant, nous nous sommes concentrés sur les items pour lesquels le pourcentage de bonnes réponses n'atteint pas 50%. Cependant, il est important de noter qu'à part les items sur les éléments chimiques (pour les deux sections) et l'item sur les angles de liaison (troisième année de bachelier), tous les autres résultats sont inférieurs ou égaux à 60%. Les résultats sont donc assez faibles. Par conséquent, nous pouvons conclure que les élèves éprouvent de grandes difficultés à prédire des propriétés à partir de la structure des molécules.

La dernière question abordant le thème des propriétés macroscopiques se rapporte à la polarité et au moment dipolaire. Pour les deux sections, les pourcentages de réponses correctes sont tous inférieurs à 50% à part pour le DMSO dans la section de troisième année de bachelier. Le cas de ce solvant peut être expliqué par le fait qu'il est discuté durant les cours de chimie organique. Les étudiants ont donc beaucoup de difficultés à déterminer la polarité d'une molécule. Cet exercice demande aux étudiants de déterminer si les liaisons sont polarisées, de se représenter la géométrie moléculaire mentalement puis de déterminer si les centres des charges positives et des charges négatives coïncident ou non. Il s'agit donc de plusieurs étapes à réaliser mentalement. Considérons deux exemples. Tout d'abord, le cas du CCl_4 est intéressant car seuls 40% des étudiants ont répondu correctement. Nous ne pouvons pas attribuer cela à un problème de géométrie car nous avons vu avec la question 15 que plus de 60% des étudiants de bac 2 et plus de 85% de bac 3 connaissent la géométrie tétraédrique. Par contre, il existe une préconception chez les étudiants à propos de la polarité qui pourrait expliquer ce résultat. Il semble que les étudiants pensent que la polarité est déterminée par la polarité des liaisons uniquement et pas par la géométrie (Tsaparlis et al., 2018). Le second exemple abordé est le BCl_3 car cela rejoint l'hypothèse énoncée dans le thème de la symétrie. Il se peut que le faible résultat soit dû au fait que les étudiants attribuent à cette molécule une géométrie pyramidale.

La perception est abordée dans le quatrième thème grâce aux questions 8 et 19. Il semble que ce thème ne pose pas de problème aux étudiants. En effet, le pourcentage de bonnes réponses est supérieur à 90% pour les deux sections. Les certitudes sont élevées et leur dispersion est faible.

Ensuite, nous abordons le thème de la perception et de la rotation grâce aux questions 7, 10 et 14. Dans celles-ci, les molécules subissent respectivement une rotation (illustrée en

représentation de Cram), plusieurs rotations illustrées en représentation de Cram et plusieurs rotations illustrées grâce à des images de modèles moléculaires. Les étudiants ont correctement répondu à la première question. La dispersion des certitudes montre que les étudiants n'étaient cependant guère sûrs d'eux. Par contre, lorsque la tâche consiste en plusieurs rotations, les pourcentages de réponses correctes chutent à moins de 30% et la dispersion des certitudes est grande. Par conséquent, nous pouvons faire comme hypothèse que si le nombre de rotations augmente, les étudiants éprouvent plus de difficultés. Afin de comprendre pourquoi le pourcentage de bonne réponse est si bas, nous avons réalisé une interview d'une étudiante s'étant trompée à la question 10. La méthode utilisée pour résoudre ce type de tâche a été de regarder la moitié de la molécule (un des deux carbones chiraux) et de regarder si on retrouvait la même configuration dans une des autres représentations. Puis, elle faisait la même chose avec le second carbone chiral. Cependant, c'est la molécule entière que l'étudiante faisait tourner lors des comparaisons. En effet, elle considérait la molécule comme figée, c'est-à-dire sans rotation interne autour de la liaison C-C. Or, pour résoudre cet exercice, il était nécessaire d'effectuer des rotations autour de cet axe. Le pourcentage élevé de mauvaises réponses peut être expliqué par le fait que les étudiants négligent le fait que les molécules ne sont pas statiques. Lorsque le même exercice est proposé avec les modèles moléculaires, la moyenne est plus élevée. En effet, les résultats de cette question ressemblent à ceux obtenus pour la question 7 mais avec une certitude moyenne plus faible. Il est possible que la visualisation de modèles aide mieux à identifier des molécules identiques que les représentations symboliques de Cram.

Le dernier thème aborde la réflexion en plus de la perception et de la rotation grâce à deux questions sur la notion d'énantiomères. Les résultats des étudiants sont relativement bas et leurs coefficients de certitude montrent qu'ils ont tendance à se surestimer. De plus, la dispersion est très importante pour ces deux questions. L'application des opérations de réflexion aux molécules est donc mal maîtrisée par les étudiants.

En conclusion, les thèmes provoquant le moins de difficultés sont la perception et la traduction entre les représentations. Concernant la symétrie, les étudiants sont capables d'identifier des plans de symétrie mais pas le nombre d'atomes maximum contenus dans un plan de symétrie car cela demande plus d'opérations mentales. Comme nous l'avons supposé pour le BF_3 , cela peut résulter d'une détermination incorrecte de la géométrie des molécules. Les liens entre la structure et les propriétés macroscopiques, plus précisément la polarité et les propriétés que l'on peut déterminer, directement ou indirectement, de la structure de Lewis, semblent également mal maîtrisés. Nous avons émis la possibilité que les étudiants avaient la préconception que la polarité des molécules était causée par la polarité des liaisons sans prendre la structure tridimensionnelle des molécules en compte. Des difficultés ont également été détectées dans les thèmes abordant la rotation et la réflexion. Nous avons remarqué que les pourcentages de bonnes réponses diminuent lorsque le nombre d'opérations mentales à réaliser augmente. Ainsi, lorsque nous considérons le thème de la rotation, nous observons une diminution des scores lorsqu'il faut comparer des molécules ayant subi plusieurs rotations. Ces résultats sur l'influence du nombre d'opérations mentales confirment d'autres données de la littérature (Carlisle et al., 2015; Ferk et al., 2003).

3.1.4.3) Tendances générale : corrélations

Nous avons utilisé les moyennes et les écarts-type des réponses et des certitudes des étudiants pour mettre en évidence différentes corrélations. Il semble qu'il n'y ait pas de différence significative entre les deux sections comme nous pouvons le voir dans la Figure 33 qui montre une corrélation satisfaisante entre les résultats des deux années, avec un coefficient de Pearson de +0,87. Certains points s'éloignent tout de même de la droite comme la question 12 (relative à la température d'ébullition) pour laquelle les étudiants de deuxième année ont mieux répondu que leurs homologues de troisième année. Ensuite, nous avons fait de même avec les moyennes des certitudes pour chaque question afin de voir si une section est plus ou moins assurée que l'autre. D'après la droite de la Figure 34, les étudiants des deux sections manifestent des certitudes corrélées (coefficient de Pearson égal à 0,95). Dans ce graphique également, la question 12 se distingue des autres car les étudiants de deuxième année étaient beaucoup plus confiants pour cette question.

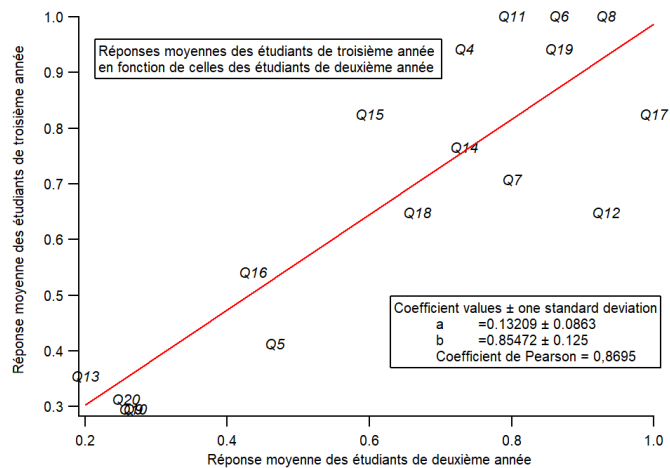


Figure 33 : Graphique illustrant les résultats des étudiants de troisième année en fonction de ceux des étudiants de deuxième année

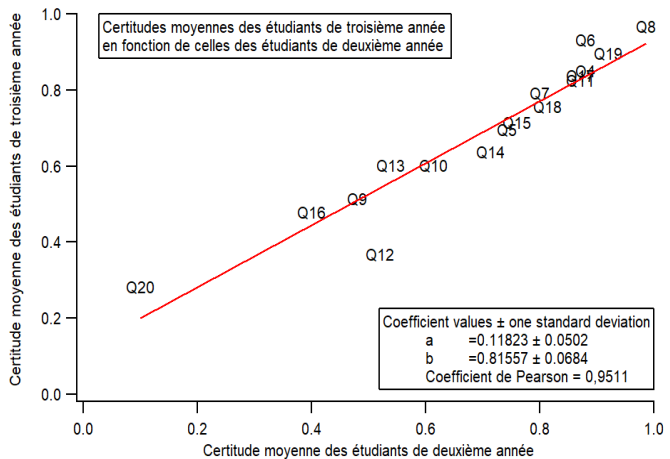


Figure 34 : Graphique illustrant les certitudes des étudiants de troisième année en fonction de celles des étudiants de deuxième année

L'analyse des scores des étudiants aux différentes questions en fonction de leur certitude permet d'identifier pour quelles questions ils se sous-estiment ou se surestiment. Une corrélation linéaire indiquerait que leurs certitudes reflètent leurs résultats. Or, que ce soit pour les étudiants de deuxième année (Figure 35) ou de troisième année (Figure 36), on n'observe qu'une corrélation nettement plus faible (coefficients de Pearson de 0,72 et 0,77 respectivement). Les points se situant sous la courbe correspondent à des questions pour lesquelles la certitude des étudiants est supérieure à leur performance réelle. Dans les deux populations, nous constatons globalement les mêmes questions sous la droite ; les questions 5, 9, 10, 13 et 18. Pour ces cinq points, la certitude la plus basse est d'environ 0,5 alors que le score est situé entre 0,2 et 0,3. La question 5 fait partie du thème sur la symétrie et concerne BF₃. Nous avons vu que les étudiants avaient des difficultés avec l'établissement de la géométrie plane. La question 10 se rapporte au thème sur la rotation et met en œuvre plusieurs rotations. Les questions 9 et 13 font intervenir la réflexion en plus de la rotation. La question 18 fait partie des tâches de traduction entre une représentation en modèles moléculaires et une représentation de Cram. Nous avons abordé les difficultés liées à ces différentes questions dans la section 3.1.4.2.

Les étudiants sont peu confiants en leurs capacités à établir des relations structure-propriétés. Les étudiants des deux sections se sous-estiment dans la question 12 (relative à la température

d'ébullition). Pour les questions 16 (informations déduites des formules de Lewis) et 20 (moments dipolaires) également relatives aux propriétés macroscopiques et pour lesquelles des difficultés ont été détectées et discutées plus haut, les étudiants sont conscients du peu de fiabilité de leurs réponses et se sous-estiment légèrement. Etant donné que l'étudiante interviewée nous a dit qu'elle avait peut-être choisi la réponse au hasard, il n'est pas exclu qu'une partie des étudiants aient fait de même.

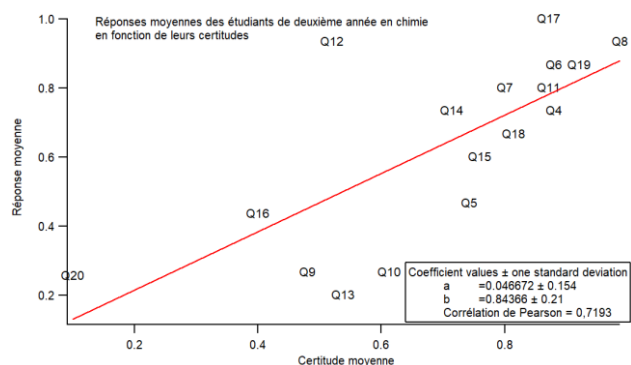


Figure 35 : Graphique illustrant les résultats des étudiants de deuxième année en fonction de leurs certitudes

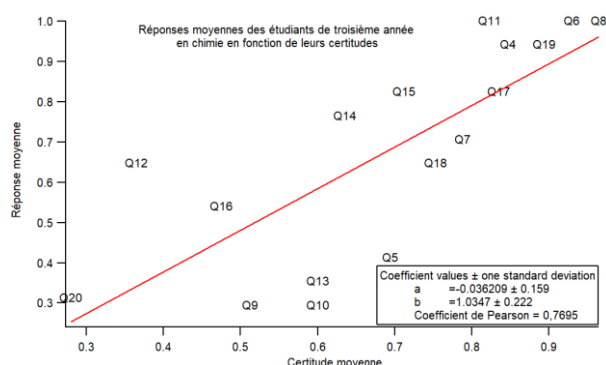


Figure 36 : Graphique illustrant les résultats des étudiants de troisième année en fonction de leurs certitudes

3.1.4.4) Analyses statistiques

Le but de ce questionnaire est non seulement d'identifier quelles difficultés les élèves peuvent éprouver dans différents thèmes se rapportant à la visualisation spatiale des molécules mais aussi de détecter des différences éventuelles entre genre, section, thèmes, ... Pour cela, nous analysons les résultats avec le programme R. Pour les différents tests statistiques, nous adoptons un risque d'erreur (significance level) $\alpha=0,05$ auquel nous comparons les valeurs-p fournies par les tests. Pour commencer, nous effectuons un test de Shapiro-Wilk afin de voir si la distribution est normale, ce qui est le cas ($p=0,307 > \alpha=0,05$). Par conséquent, nous allons réaliser des tests de Welch pour comparer des moyennes. Ce test est sélectionné car il permet d'analyser des populations possédant des variances différentes contrairement au test t de Student. Nous commençons par comparer les genres (tableau 4) et nous pouvons constater dans la Figure 37 que les résultats sont relativement similaires. De plus, la valeur-p est de 0,567 ($> 0,05$) donc nous ne décelons pas de différence significative entre les genres. Nous faisons de même pour l'utilisation des modèles moléculaires. Nous avons calculé la moyenne et

Résultats des étudiants en fonction du genre

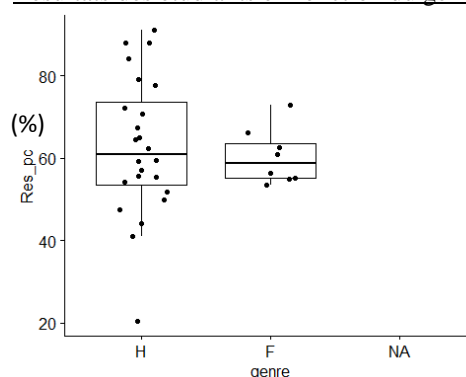


Figure 37 : Résultats des étudiants en fonction de leur genre

Résultats des étudiants en fonction de l'utilisation de modèles moléculaires

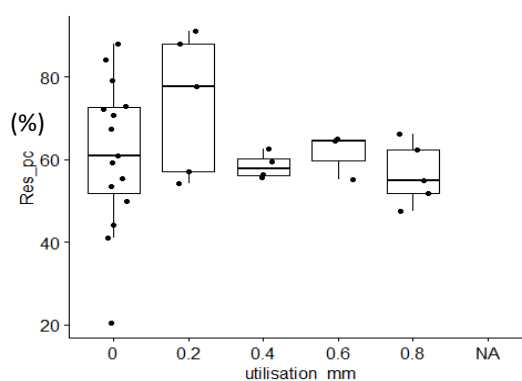


Figure 38 : Résultats des étudiants en fonction de leur utilisation des modèles moléculaires

l'écart-type pour chaque valeur (Figure 38). Ensuite, nous avons réalisé des tests de Welch entre les catégories deux à deux (tableau 4). Etant donné que nous réalisons des tests multiples pour comparer les catégories par paires, nous devons modifier la valeur de référence du risque d'erreur α grâce à l'ajustement de Bonferroni (Statistica, n.d.), qui consiste à diviser α par le nombre de tests effectués, 10 dans le cas présent. La nouvelle valeur limite du risque d'erreur vaut donc $\alpha = 0,05/10 = 0,005$. Nous constatons qu'il n'y a pas de corrélation significative entre les résultats et l'utilisation des modèles moléculaires comme aide. Par après, nous avons également réalisé ce test afin de comparer les deux sections. Dans la section 3.1.4.3, nous avons déjà conclu que les résultats des deux sections étaient comparables, ce qui est confirmé par l'analyse statistique ($p=0,501 > 0,05$). Nous pouvons également le constater dans la Figure 39.

Résultats des étudiants en fonction de leur section

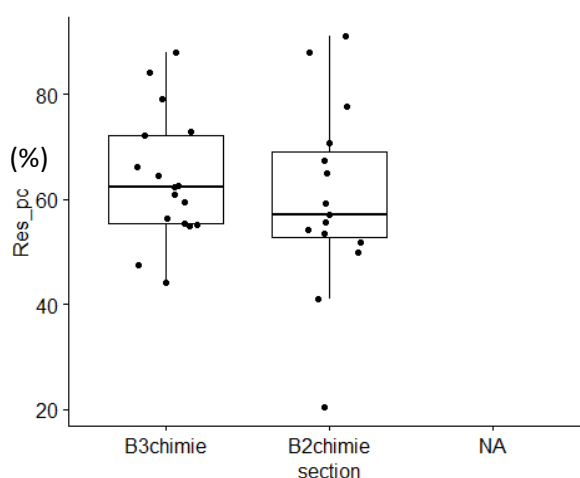


Figure 39 : Résultats des étudiants en fonction de leur section

Tableau 4: Analyse statistiques des résultats des étudiants de 1^{er} cycle universitaire

	Population	Nombre (n)	Moyenne (%)	Ecart-type (sd) (%)	Test de Welch (valeur-p)
Genre	Homme	8	60,3	6,71	0,567
	Femme	24	62,7	16,9	
Utilisation des modèles moléculaires	0	15	61,3	18	Comparaison 0/0,2 : 0,213 Comparaison 0/0,4 : 0,58
	0,2	5	73,6	17,2	Comparaison 0/0,6 : 0,963 Comparaison 0/0,8 : 0,423
	0,4	4	58,5	3,23	Comparaison 0,2/0,4 : 0,122 Comparaison 0,2/0,6 : 0,206
	0,6	3	61,5	5,57	Comparaison 0,2/0,8 : 0,093 Comparaison 0,4/0,6 : 0,459
	0,8	5	56,5	7,64	Comparaison 0,4/0,8 : 0,624 Comparaison 0,6/0,8 : 0,33
Section	B2 chimie	15	60,1	17,9	0,501
	B3 chimie	17	63,9	12,1	

Examinons maintenant les résultats pour les différents thèmes. Nous souhaitons comparer les résultats de chaque élève pour les différents thèmes, nous devons donc utiliser des tests appariés. Pour ces deux raisons, nous utilisons des tests de Wilcoxon appariés. Etant donné que nous réalisons 15 tests multiples pour comparer les thèmes par paires, nous appliquons l'ajustement

de Bonferroni (Statistica, n.d.) : $\alpha = 0,05/15 = 0,0033$. Nous pouvons observer les différentes valeurs obtenues lorsque nous comparons les thèmes deux à deux dans le tableau 5.

Tableau 5 : Comparaison statistique des résultats des différents thèmes

	Traduction	Symétrie	Propriétés	Perception	Rotation	Réflexion
Traduction	/	/	/	/	/	/
Symétrie	p = 0,0115	/	/	/	/	/
Propriétés	p < 0,001	p = 0,0110	/	/	/	/
Perception	p = 0,0070	p < 0,001	p < 0,001	/	/	/
Rotation	p < 0,001	p = 0,1573	p = 0,2048	p < 0,001	/	/
Réflexion	p < 0,001	p < 0,001	p = 0,0016	p < 0,001	p < 0,001	/
Moyenne	0,83	0,69	0,52	0,94	0,59	0,28
Ecart-type	0,24	0,27	0,20	0,17	0,29	0,40

Nous pouvons voir qu'il existe cinq paires de thèmes pour lesquelles les distributions ne sont pas discernables ($p > 0,0033$). Ceci peut résulter d'une corrélation entre ces thèmes, d'un niveau de difficulté similaire ou d'une combinaison des deux. Certaines corrélations semblent plausibles. Les trois premiers thèmes qui apparaissent liés entre eux sont la symétrie, les propriétés et la rotation. L'analyse de la symétrie d'une molécule implique logiquement d'appliquer des opérations de rotation. La symétrie gouverne également les propriétés physicochimiques, la polarité par exemple. Il est donc vraisemblable que les scores aux items relatifs à la symétrie, à la rotation et aux propriétés soient liés. Notons également que les étudiants de 1^{er} cycle universitaire ont des cours de cristallographie et de théorie des groupes qui les initient à ce type d'opérations mentales, même en dehors du cadre de la chimie organique. Nous identifions également une corrélation possible entre le thème de la traduction et le thème de la perception. En effet, pour pouvoir traduire d'une représentation à une autre, il est nécessaire de pouvoir déterminer ce qui sort du plan de la molécule. Le thème de la traduction est également lié à celui de la symétrie qui implique entre autres la visualisation de plans moléculaires.

3.2) Évaluation des compétences des élèves de fin d'enseignement secondaire général

3.2.1) Construction du questionnaire

Un questionnaire a également été réalisé pour les élèves de dernière année d'humanités suivant un cours de sciences générales (deux périodes de chimie par semaine). Il se base sur celui réalisé pour les étudiants dans l'enseignement supérieur mais il est modifié afin de respecter la matière vue en secondaire qui est bien sûr beaucoup plus restreinte que celle de l'enseignement supérieur. Les exercices restent basés sur les six mêmes thèmes : les liens entre structure et propriétés, la traduction entre différents types de représentation, la symétrie dans les molécules, la perception dans l'espace de structures tridimensionnelles, les tâches combinant perception et opérations de rotation des molécules et enfin des exercices combinant perception et opérations de rotation et de réflexion au travers de plans miroirs. Ce test est plus court et comporte 18 questions. Il y a quatre questions démographiques portant sur le genre des répondants, le nombre d'heures de chimie par semaine, leur participation à des séances de laboratoires et, si oui, la fréquence des

ces séances, et une question demandant leur avis sur l'importance de la visualisation tridimensionnelle en chimie organique. Il y a ensuite 12 questions de chimie et une question demandant aux élèves d'évaluer l'importance de leur utilisation des modèles moléculaires lors de la résolution du questionnaire. De plus, nous expliquons les conventions de la représentation de Cram dans l'introduction et nous indiquons la convention des couleurs des sphères dans les modèles moléculaires. Il n'y aura pas de question sur la projection de Newman étant donné qu'il ne s'agit pas de matière d'humanité.

Par rapport au questionnaire destiné aux étudiants d'université, nous avons modifié les questions relatives à la perception et à la rotation en simplifiant les molécules représentées. Par exemple, les molécules possèdent un seul carbone asymétrique au lieu de deux. Pour la question relative à la structure de Lewis, nous avons retiré des items qui semblaient trop complexes par rapport à la matière vue en secondaire. Il en est de même pour la question sur le moment dipolaire car, plutôt que relier les molécules à leur valeur de moment dipolaire, il est demandé aux étudiants de classer les molécules selon leur polarité. Pour faire cela, ils doivent choisir parmi quatre propositions de classement. Des mini-sets de modèles moléculaires identiques ont été fournis aux élèves afin qu'ils puissent bénéficier de cette aide s'ils le souhaitent.

3.2.2) Validation du questionnaire

Comme pour le questionnaire destiné aux étudiants d'université, nous avons réalisé une phase de validation. Pour cela, nous avons demandé à plusieurs professeurs de chimie dans l'enseignement secondaire supérieur de lire le questionnaire dans le but de nous faire un retour. Grâce à ces remarques, nous avons amélioré le questionnaire en ajoutant des questions démographiques comme par exemple « Combien d'heures de chimie avez-vous par semaine ? ». Ensuite, nous avons ajouté une introduction à la question concernant les molécules images-miroirs (item 9) afin que les élèves comprennent mieux cette notion. Cette introduction débute par un exemple du quotidien : notre main gauche est l'image miroir de notre main droite et elle se poursuit avec une molécule très simple. En illustrant ces deux exemples, nous pouvons supposer que les élèves du secondaire comprennent la consigne de cet item. Concernant le thème reliant la structure aux propriétés macroscopiques, nous avons modifié deux des trois questions. Tout d'abord, nous avons complété et précisé des items de la question portant sur la structure de Lewis et supprimé d'autres (l'item de la charge formelle). Étant donné que le programme du secondaire n'aborde pas le moment dipolaire, nous avons uniquement mentionné le concept de polarité. Pour tenir compte de différentes remarques plus générales, nous avons veillé à ce qu'il y ait uniquement quatre propositions par question et nous avons précisé à quoi correspondent les pourcentages de certitude. La version finale de ce questionnaire correspond à l'annexe 8.

3.2.3) Échantillon

Afin de constituer l'échantillon, nous avons demandé à quelques professeurs de soumettre le questionnaire à leurs élèves. Cinq professeurs provenant de quatre écoles différentes de la province de Liège ont accepté. Trois de ces écoles proviennent du réseau libre et la quatrième provient du réseau officiel. Cela représente un total de 158 élèves de dernière année de l'enseignement secondaire général. Ces questionnaires ont été soumis aux élèves fin novembre et début décembre 2021. Il est important de noter qu'à cause de la crise sanitaire, les élèves n'ont pas tous vu l'entièreté des programmes des deux dernières années scolaires. En effet, les écoles secondaires ont été fermées durant quelques semaines, ce qui a causé un gros retard dans l'enseignement des programmes.

3.2.4) Résultats

Nous allons analyser les résultats des élèves d'humanité comme nous avons fait pour les étudiants d'Université. Nous commencerons donc par analyser qualitativement les graphiques représentant les résultats de l'annexe 9. Ensuite, nous ferons des analyses statistiques en fonction du genre et de leur utilisation des modèles moléculaires.

3.2.4.1) Présentation des scores

Les élèves sont majoritairement conscients de l'importance de la visualisation tridimensionnelle en chimie organique (Figure 40) mais moins que les étudiants universitaires (Figures 31 et 32). Cela peut s'expliquer par le fait que la visualisation tridimensionnelle n'est pas énormément abordée dans les cours du secondaire et que peu de liens sont réalisés entre les structures tridimensionnelles et d'autres concepts.

Nous avons ensuite classé les questions selon leur thème (annexe 9) pour avoir une vue d'ensemble. Le premier thème est la traduction et ne comporte qu'une question (question 11). Nous constatons qu'en moyenne, les élèves sont plutôt sûrs d'eux mais la dispersion est importante. Le pourcentage de bonnes réponses s'élève environ à 52%, ce qui est moyen. Il est tout de même intéressant de comparer avec les étudiants d'université et nous voyons que ces derniers ont de meilleurs résultats que les élèves du secondaire. Cela peut s'expliquer par le fait que la représentation de Cram et l'illustration des modèles moléculaires ne sont pas les moyens de représentation les plus utilisés dans le secondaire. Rappelons que les conventions relatives à ces représentations avaient été fournies au début du questionnaire. De plus, comme nous le verrons dans la section 3.3, seul 45% des professeurs font des exercices de traduction avec des représentations illustrant le caractère tridimensionnel des molécules. Par conséquent, ce n'est pas un exercice habituel.

Pour le thème se rapportant à la symétrie, nous trouvons deux questions identiques au questionnaire d'université. Nous avons demandé aux élèves de déterminer le nombre maximal d'atomes que nous trouvons dans un plan de symétrie dans les molécules de BF_3 et CH_2Cl_2 . Pour la première, les résultats sont semblables à ceux des étudiants de chimie mais leurs certitudes sont beaucoup plus dispersées. Les élèves réussissent moins bien le second exercice. Il semble donc que les élèves connaissent mieux la première molécule. Cela peut s'expliquer par le fait que la géométrie plane est beaucoup plus abordée durant les cours que la géométrie tétraédrique. Globalement, ce thème a été mieux réussi par les étudiants d'université.

Le troisième thème est celui abordant les liens entre la structure tridimensionnelle des molécules et leurs propriétés macroscopiques. Pour la question sur la température d'ébullition (question 10), les résultats sont semblables à ceux de l'université. Cependant, comme pour les premiers thèmes, la certitude des élèves est dispersée. La différence majeure est que, contrairement aux étudiants plus expérimentés, lorsqu'ils se trompaient, ils choisissaient l'alcool et non la cétone. Par conséquent, les liaisons hydrogènes semblent être comprises mais ils ne

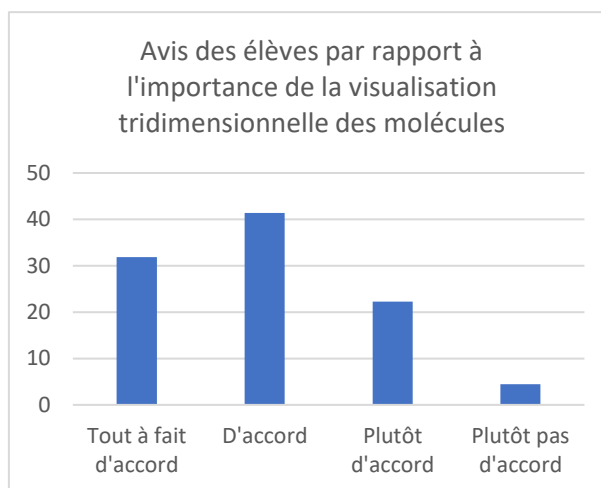


Figure 40 : Avis des élèves sur l'importance de la visualisation 3D des molécules en chimie organique

savent peut-être pas que les molécules peuvent établir plusieurs liaisons hydrogènes lorsque c'est possible. C'est par exemple le cas de l'acide carboxylique. Pour les propriétés déterminées à partir de la structure de Lewis, moins de 50% des étudiants ont pu déterminer les liens indirects. De plus, beaucoup d'élèves pensent qu'on ne peut pas du tout déterminer toutes ces propriétés, ni directement, ni indirectement. Ils n'arrivent donc pas à faire de lien entre les structures et les propriétés. Nous pouvons constater que les élèves pensent que la géométrie moléculaire est directement liée à la structure de Lewis et oublient qu'il faut appliquer un modèle théorique comme la méthode VSEPR, qui est la seule approche qui leur a été enseignée, pour pouvoir proposer la géométrie d'une molécule. Cependant, leur certitude moyenne reflète correctement leur résultat moyen, donc ils ont conscience d'avoir des difficultés. La dernière question de ce thème, sur la polarité, a été relativement peu réussie. Le résultat moyen est de nouveau semblable à celui des étudiants d'université mais les élèves sont très peu sûrs d'eux. Ils ont correctement déterminé que la polarité de l'éther diéthylique est supérieure à celle du propène, elle-même supérieure aux deux autres molécules (réponses 1 et 3 de la question 17). Cependant, la majorité des étudiants (40%) ont indiqué que la polarité du trifluorure de bore est supérieure à celle de l'éthylène (réponse 3). Deux explications sont possibles. La première est que les élèves n'ont pas considéré le BF_3 comme étant plan et dans ce cas-là, la molécule serait polaire. La seconde est une préconception sur la polarité. En effet, les élèves penseraient que la polarité est causée par la polarité des liaisons sans tenir compte de la géométrie. La liaison B-F est plus polarisée que la liaison C-H de l'éthylène donc, pour eux, la molécule de BF_3 serait plus polaire. De nouveau, les élèves hésitent beaucoup et se rendent compte qu'ils ont de nombreuses difficultés avec ce thème.

Le thème de la perception est bien réussi et les élèves sont sûrs d'eux dans l'ensemble. Par conséquent, les résultats sont assez semblables à ceux d'Université. La certitude est plus basse et la dispersion plus grande pour la question impliquant les illustrations de modèles moléculaires, ce qui peut être expliqué par la faible utilisation de ce type de représentation dans les séances d'exercices.

Les résultats des questions du thème sur la rotation varient en fonction de la représentation et du nombre d'opérations mentales à effectuer. La question en représentation de Cram qui implique uniquement un type de rotation est bien réussie tandis que le pourcentage de bonnes réponses pour les deux autres est d'environ 40%. De nouveau, ces deux questions impliquent des modèles moléculaires qui sont moins utilisés dans les séances d'exercices. De plus, ils impliquent plusieurs rotations, ce qui augmente également la difficulté. La dispersion des certitudes est importante.

Le résultat du dernier thème est très faible, ce qui n'est pas étonnant : étant donné que les élèves éprouvent déjà beaucoup de difficultés à effectuer des rotations mentales, ils auront encore plus de difficultés à les combiner à des réflexions. Une cause pourrait être le caractère plus abstrait d'une réflexion, contrairement aux rotations. En effet, il est aisé d'illustrer les rotations grâce à des modèles moléculaires durant les cours tandis qu'il n'est pas évident d'illustrer une réflexion si ce n'est grâce à un miroir. Par conséquent ce type d'opération se fait uniquement par la pensée, ce qui est beaucoup plus compliqué.

3.2.4.2) Tendances générale : corrélations

Nous avons ensuite analysé les scores moyens des élèves en fonction de leurs certitudes moyennes (Figure 41). La corrélation observée est faible (coefficient de Pearson = 0,57). Les élèves se surestiment lorsque les questions sont sous la droite de régression, ce qui est surtout le cas des questions 9 et 13. La première de ces deux questions se rapporte au thème de la réflexion (question 9). Comme nous l'avons dit, elle a posé des problèmes à de nombreux élèves car c'est une opération abstraite qui ne leur est pas familière mais ils n'en sont pas suffisamment conscients. La question 13 fait partie du thème sur la symétrie et se rapporte à la molécule de dichlorométhane. Les élèves ont des difficultés avec la géométrie tétraédrique sans en être vraiment conscients.

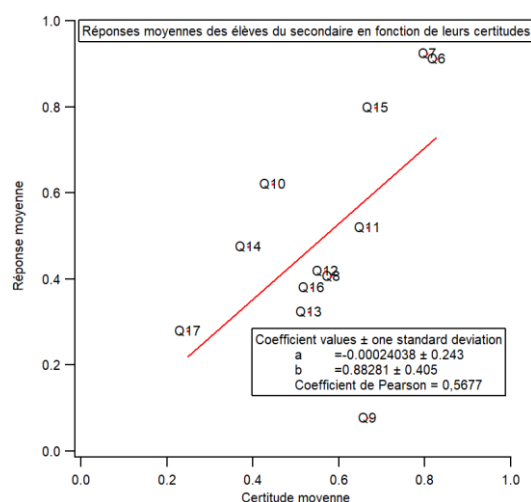


Figure 41 : Graphique illustrant les résultats des élèves du secondaire en fonction de leurs certitudes

Par contre, d'autres questions se trouvent presque sur la droite comme les questions 11,12 ou 16 par exemple. Ces deux dernières questions font partie du thème sur la rotation pour lequel les élèves semblent bien évaluer leur niveau de compétences.

Les élèves sous-estiment leurs compétences essentiellement pour les questions 6,7, 10 et 15. Les questions 6 et 15 se rapportent au thème de la perception qui a été globalement très bien réussi tant par les élèves de l'enseignement secondaire que par les étudiants universitaires. La question 7 est la question la plus facile du thème de la rotation puisqu'elle n'implique qu'une seule rotation. La question 10 est relative à la température d'ébullition dans le thème structure-propriétés, thème pour lequel nous avons vu que les élèves, à l'instar des étudiants universitaires, se sentent très incertains.

3.2.4.3) Analyses statistiques

Comme pour le questionnaire proposé aux étudiants d'université, nous allons analyser s'il existe des différences significatives entre les genres, les élèves qui utilisent ou non des modèles ainsi qu'entre les différents thèmes. Pour cela, nous utilisons de nouveau le programme R afin de réaliser différents tests. Nous commençons par réaliser un test de Shapiro-Wilk pour tester la normalité de la distribution des résultats. Cette dernière est normale car la valeur-p vaut 0,273 (>0,05).

Ensuite, nous pouvons tester la différence de moyenne entre les genres grâce au test de Welch car la distribution des résultats est normale mais nous ne supposons pas l'homogénéité des variances. Dans le tableau 6, nous constatons que la différence entre les moyennes n'est pas significative ($p = 0,513$). Nous n'avons donc pas mis un effet de genre en évidence (Figure 42).

Résultats des élèves en fonction du genre

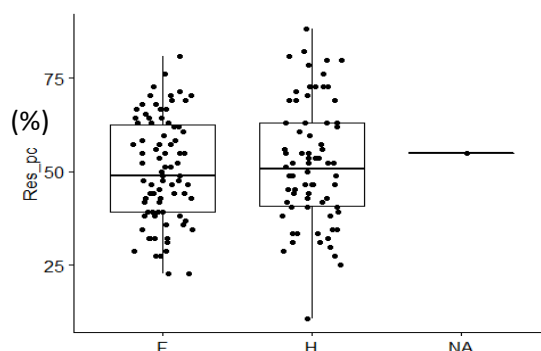


Figure 42 : Résultats des élèves en fonction de leur genre

Nous utilisons également ce test pour comparer les élèves selon leur degré d'utilisation des modèles moléculaires comme aide. Dans un premier temps, nous les avons classés en deux catégories : ceux qui ont sélectionné un coefficient inférieur à 0,5 (N) et ceux qui ont choisi un coefficient supérieur à 0,5 (O). Comme nous pouvons le voir dans la Figure 43, la différence n'est pas significative ($p = 0,361 > 0,05$). Nous avons donc affiné l'analyse en séparant les élèves en cinq groupes en fonction de leur coefficient d'utilisation des modèles moléculaires : 0 ; 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 et 1. Cependant, il est nécessaire d'appliquer la correction de Bonferroni car nous effectuons des tests multiples (Statistica, n.d.). Nous obtenons ainsi $\alpha = 0,0033$ comme nouvelle limite. Les valeurs de p des différentes comparaisons sont données dans le tableau 6. Il n'y a pas de différence significative entre tous les groupes comme nous pouvons également le voir dans la Figure 44.

Résultats des élèves en fonction de l'utilisation des modèles

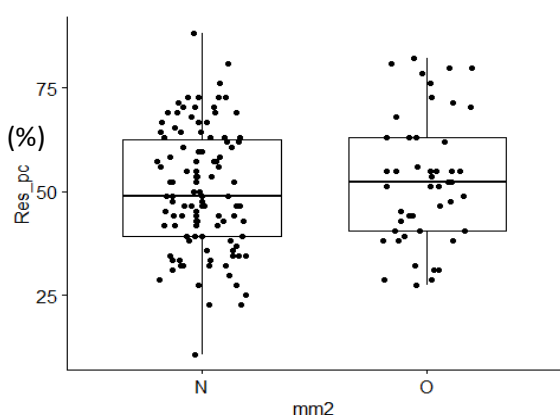


Figure 43 : Résultats des élèves selon leur utilisation des modèles (N : < 0,5 ; O : > 0,5)

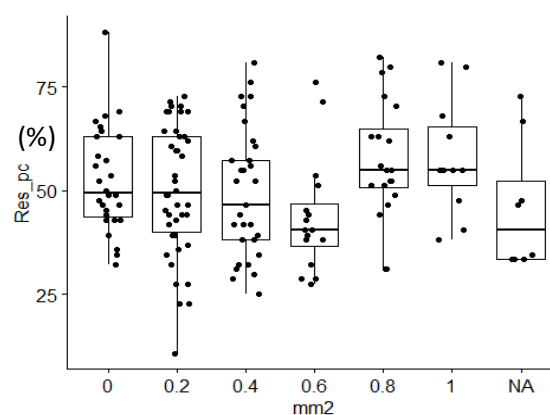


Figure 44 : Résultats des élèves selon leur degré d'utilisation des modèles

Tableau 6 : Analyses statistiques des résultats des élèves du secondaire

	Population	Nombre (n)	Résultats test de Welch (valeur de p)
Genre	Homme	83	p = 0,513
	Femme	74	
Utilisation des modèles moléculaires	0	28	Comparaison 0/0,2 : p = 0,473
	0,2	42	Comparaison 0/0,4 : p = 0,42
	0,4	33	Comparaison 0/0,6 : p = 0,043
	0,6	16	Comparaison 0/0,8 : p = 0,252
	0,8	20	Comparaison 0/1 : p = 291
	1	11	Comparaison 0,2/0,4 : p = 0,904
			Comparaison 0,2/0,8 : p = 0,085
			Comparaison 0,2/1 : p = 0,13
			Comparaison 0,4/0,6 : p = 0,172
			Comparaison 0,4/0,8 : p = 0,077
			Comparaison 0,4/1 : p = 0,118
			Comparaison 0,6/0,8 : p = 0,007
			Comparaison 0,6/1 : p = 0,016
			Comparaison 0,8/1 : p = 0,906

Nous comparons ensuite les résultats aux différents thèmes entre eux. Etant donné que nous voulons comparer les résultats de chacun des élèves dans les différents thèmes, nous devons utiliser des tests de Wilcoxon appariés, en suivant la même procédure qu'avec les étudiants universitaires. Comme nous allons de nouveau réaliser des tests multiples, nous devons également appliquer l'ajustement de Bonferroni : le risque d'erreur corrigé est $\alpha = 0,0033$. Dans le tableau 7, nous pouvons voir les différentes valeurs obtenues lorsque nous comparons les thèmes par paires.

Tableau 7 : Comparaison statistique des résultats des différents thèmes

	Traduction	Symétrie	Propriétés	Perception	Rotation	Réflexion
Traduction	/	/	/	/	/	/
Symétrie	p < 0,001	/	/	/	/	/
Propriétés	p = 0,2032	p = 0,0034	/	/	/	/
Perception	p < 0,001	p < 0,001	p < 0,001	/	/	/
Rotation	p = 0,4725	p < 0,001	p < 0,001	p < 0,001	/	/
Réflexion	p < 0,001	p < 0,001	p < 0,001	p < 0,001	p < 0,001	/
Moyenne	0,52	0,36	0,46	0,85	0,57	0,08
Ecart-type	0,50	0,33	0,21	0,25	0,28	0,27

Nous pouvons voir que tous les résultats des élèves sont statistiquement différents lorsque nous les comparons par thème à part pour trois cas. Tout d'abord, les résultats du thème sur les liens entre la structure des molécules et les propriétés sont semblables à ceux des tâches de traduction et des tâches impliquant la symétrie (cases grisées). Cela semble assez logique étant donné que pour déterminer les propriétés macroscopiques, il faut être capable de passer d'une représentation à une autre et repérer les éléments de symétrie. Prenons l'exemple de la polarité : lorsque nous donnons une formule brute aux élèves, ils doivent d'abord la représenter en structure de Lewis pour pouvoir appliquer ensuite la méthode VSEPR. De cette manière, ils déterminent la structure tridimensionnelle des molécules et utilisent les éléments de symétrie pour prévoir la polarité de la molécule. Ensuite, nous constatons que les résultats de tâches de traduction sont semblables à ceux des tâches de rotation. Nous n'avons pas d'interprétation évidente pour cette observation. Il ne faut pas oublier que la similarité des distributions de résultats n'implique pas automatiquement une corrélation entre les opérations mentales mais peut également provenir d'une similarité de niveaux de difficulté.

3.3) Comparaison entre les étudiants d'université et les élèves du secondaire

Nous comparons maintenant les scores moyens et les certitudes moyennes des étudiants universitaires (population globale des étudiants de 2^e et 3^e année de bachelier en chimie) et des élèves de l'enseignement secondaire (Figures 45 et 46). Tout d'abord, nous pouvons constater qu'il y a une corrélation linéaire entre les résultats des deux populations (coefficient de Pearson = 0,86). Il y a toutefois un décalage systématique entre les résultats des étudiants et ceux des élèves mais celui-ci est minimisé grâce au fait que nous avons adapté les questions en fonction du niveau questionné. Nous trouvons la même tendance dans les thèmes : la réflexion est le thème le moins bien réussi tandis que la perception est le thème le mieux réussi. Celui se rapportant aux propriétés n'est pas très bien réalisé quelle que soit la section. Il est également intéressant de noter que dans les deux cas, les résultats de la tâche de perception sont supérieurs à ceux de la tâche de rotation, eux-mêmes supérieurs à ceux des tâches de réflexion. Par conséquent, plus il y a d'opérations mentales à réaliser plus les résultats seront faibles. Si nous nous concentrons sur les certitudes moyennes, nous retrouvons la même séquence que pour les scores moyens à part une inversion. La perception, qui est le thème le plus réussi, est également celui pour lequel les répondants sont le plus sûrs d'eux. Une inversion apparaît entre la tâche de réflexion et la tâche relative aux propriétés. Dans le premier cas, les répondants se surestiment car leur certitude est supérieure à 0,5 alors que leurs résultats sont inférieurs à 0,3. Par contre, pour les questions sur les propriétés, les répondants se sous-estiment. Leur certitude est inférieure à 0,4 alors que leurs résultats sont supérieurs à 0,45 pour les deux échantillons. Ces observations peuvent être compatibles avec nos hypothèses. Les élèves ne comprennent peut-être pas la notion d'images-miroirs. Comme nous l'avons dit, cette notion est abstraite et il est difficile de l'illustrer de manière concrète par une manipulation pratique de modèles. Ils pensent donc répondre correctement sans se rendre compte de leur incompréhension, donc ils se surestiment. Par contre, les exercices sur les propriétés ressemblent beaucoup plus à des problèmes nécessitant une démarche réflexive. Par conséquent, les étudiants et élèves peuvent se rendre compte de leurs difficultés à réaliser cette démarche. Comme cette dernière est relativement complexe, les élèves ont plus d'occasions de penser qu'ils se sont trompés, d'où la sous-évaluation de leurs

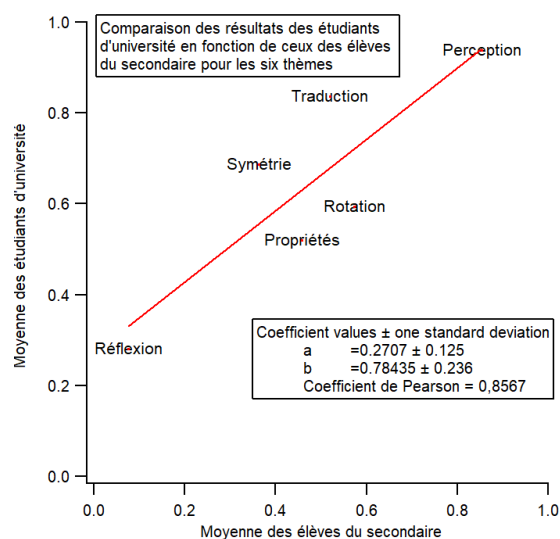


Figure 45 : Comparaison des résultats des étudiants d'université en fonction de ceux des élèves du secondaire pour les six thèmes

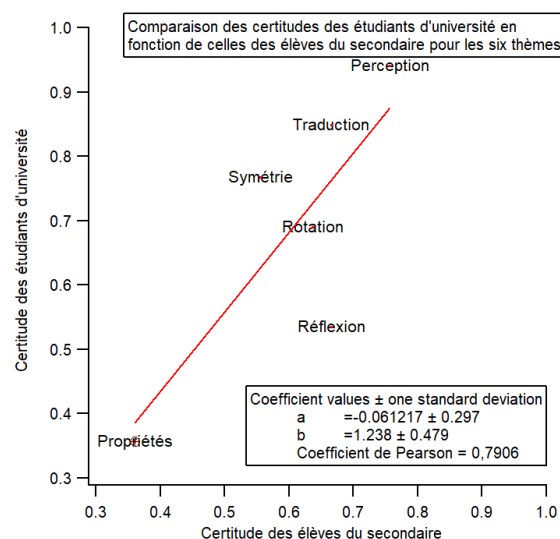


Figure 46 : Comparaison des certitudes des étudiants d'université en fonction de ceux des élèves du secondaire pour les six thèmes

compétences. Il faut également noter que les étudiants universitaires semblent plus sûrs d'eux que les élèves du secondaire.

Nous avons également réalisé des tests de Wilcoxon appariés pour analyser des éventuelles corrélations entre thèmes (tableaux 5 et 7). Les résultats sont assez différents pour les étudiants universitaires et les élèves de l'enseignement secondaire. Le seul point commun est la corrélation possible entre les résultats de prédiction de propriétés physico-chimiques et ceux des tâches associées à la symétrie. Cette corrélation n'est pas surprenante comme nous l'avons déjà illustré sur l'exemple de la polarité. Nous ne disposons malheureusement pas d'informations suffisantes pour proposer une interprétation des différences observées. Il faudrait tout d'abord mieux identifier les raisonnements détaillés des étudiants et élèves grâce à des interviews semi-dirigées. Il n'est pas non plus exclu, comme nous l'avons déjà souligné, que les similitudes de distributions reflètent simplement des niveaux de difficulté similaires des questions des thèmes concernés. Il est possible qu'une analyse de nos résultats en composantes principales, que nous n'avons pu aborder dans le cadre de ce mémoire, permette d'identifier les dimensions pertinentes de l'enseignement de la tridimensionnalité en chimie et révèle ainsi quels thèmes sont interdépendants.

3.4) Analyse des méthodes utilisées par les professeurs pour développer les compétences de visualisation tridimensionnelle de leurs élèves

3.4.1) Construction du questionnaire

Ce questionnaire a pour but d'identifier les outils utilisés pour aider les élèves dans la tâche de visualisation des molécules dans l'espace. Avant de s'attarder sur les différents outils, nous posons différentes questions afin de déterminer depuis combien de temps les répondants donnent cours, les types de représentations utilisées, leur avis par rapport aux difficultés des élèves et par rapport à l'utilité d'outils supplémentaires. Nous avons vu que la traduction était un thème provoquant de nombreuses difficultés. Par conséquent, nous demandons également aux professeurs participant à ce questionnaire s'ils réalisent de tels exercices et si oui, si les exercices impliquent un caractère tridimensionnel.

Ensuite, nous nous sommes intéressés à différents outils d'aide. Par exemple, pour le premier outil d'aide, nous demandons aux professeurs s'ils utilisent des modèles moléculaires. S'ils répondent oui, nous leur demandons le type de modèles moléculaires utilisé, qui les utilise, dans quel cadre (dans les cours théoriques, dans les exercices ou pendant des séances de laboratoire) et avec quelles classes. Par contre, si leur réponse est négative, nous leur demandons les causes, qu'elles soient logistiques, technologiques ou temporelles ainsi que leur intention d'utilisation s'ils en avaient la possibilité. Il en est de même pour les modèles informatiques, les applications de visualisation sur smartphone et les images ou photographies de modèles moléculaires.

Ce questionnaire est donc composé de onze questions principales dont quatre possèdent des sous-questions suivant la réponse donnée. Nous calculons les pourcentages de réponses à ces sous-questions par rapport au nombre de professeurs ayant répondu oui ou non à la question principale. Ce questionnaire a été mis sous forme numérique. Les différentes questions n'étaient pas obligatoires.

3.4.2) Echantillon

Ce questionnaire a été soumis à une liste de professeurs de chimie de l'enseignement secondaire supérieur que ce soit dans le réseau libre ou dans le réseau officiel. Pour les trois premières questions, 21 professeurs ont accepté de participer tandis que pour les autres questions, le nombre de répondants n'était plus que de 20. Tous les professeurs ayant répondu sont en activité et enseignent actuellement en Fédération Wallonie-Bruxelles. Les réponses au questionnaire ont été récoltées entre début octobre et mi-novembre 2021. Les répondants sont constitués à 76% de professeurs ayant une carrière de plus de 10 ans, un peu moins de 20% ont une carrière entre 5 et 10 ans et environ 4% ont moins de 5 ans de carrière. La majorité des répondants sont donc des professeurs confirmés. 76% d'entre eux donnent cours en 5^{ème} et 6^{ème} secondaire en sciences générales, ce qui est important étant donné que c'est durant ces années que les thèmes qui nous intéressent sont abordés. Ensuite, un peu plus de 40% enseignent en 4^{ème} secondaire en sciences générales et en sciences de base. Les seules années non représentées par notre échantillon sont les sections de 3^{ème} année, excepté celle de sciences générales et la 4^{ème} année en technique de qualification (Annexe 10).

3.4.3) Résultats

Comme nous nous en doutions après l'analyse des manuels scolaires, de nombreux enseignants utilisent les représentations planes (2D) dans leurs cours. Par contre, 85% des professeurs interrogés utilisent également des représentations de Cram, ce qui est positif étant donné que les indices de profondeur permettent aux élèves de visualiser une structure tridimensionnelle. De plus, 95% font des exercices de traduction dont 45% avec des représentations illustrant le caractère tridimensionnel des molécules. Ce résultat est très différent de l'analyse quantitative des livres de référence. En effet, dans ceux-ci, nous ne retrouvons des représentations de Cram que dans les deux livres les plus anciens à hauteur de 3% et 1%. On peut donc voir que les livres de référence ne rencontrent pas nécessairement tous les besoins des enseignants.

Au niveau de leurs impressions concernant les difficultés des élèves, environ 90% sont d'accord avec le fait que les élèves ont des difficultés à visualiser dans l'espace et 80% pensent que les élèves ont des difficultés à réaliser des liens entre la structure tridimensionnelle des molécules et leurs propriétés macroscopiques. Par conséquent, nous pouvons dire que les professeurs ont conscience des difficultés rencontrées par les élèves et qui ont été mises en évidence dans la littérature et dans les résultats des questionnaires précédemment présentés. De plus, 85% des professeurs ont indiqué être d'accord avec le fait que des outils supplémentaires comme les modèles moléculaires, les modèles informatiques ou des outils technologiques peuvent aider leurs élèves.

Considérons les différents types d'aide en commençant par les modèles moléculaires. Il semble que l'entièreté des professeurs les utilisent comme outil d'aide. Le type de modèle moléculaire le plus utilisé est le modèle en sphères et tiges. Au niveau de l'utilisation, il semble que pour 70% des professeurs, les modèles sont utilisés par eux-mêmes et par les élèves. Lorsque cela n'est pas le cas, ils sont uniquement utilisés par l'enseignant. Il est tout de même important de noter que tous les répondants les utilisent dans le cadre de cours théoriques mais seuls 55% les utilisent pour des exercices et 30% pour des séances de laboratoire. Or, il est également important que les élèves s'entraînent à utiliser les modèles moléculaires pour résoudre des exercices. Pour déterminer le pourcentage de professeurs utilisant les modèles moléculaires dans chaque section,

nous calculons les pourcentages par rapport aux professeurs donnant cours dans chaque section et ayant répondu par la positive à la question sur l'utilisation (Q8). Nous remarquons que pour chaque section, plus de 70% des professeurs utilisent les modèles moléculaires dans leurs classes. Nous pouvons cependant remarquer que c'est avec les classes de sciences générales qu'ils utilisent le plus souvent ceux-ci (>90%).

Dans le cas des modèles informatiques, seuls 15% des professeurs les utilisent. Étant donné que cela représente peu de répondants, nous ne pouvons pas utiliser les sous-questions des professeurs ayant répondu par la positive. La majorité des professeurs ne les utilisent pas (85%) pour diverses raisons. Tout d'abord, 35% d'entre eux indiquent que malgré les moyens technologiques de l'école, ils n'ont pas le temps de les utiliser. De plus, 23% des professeurs ont indiqué ne pas voir l'utilité par rapport au programme. En effet, avec 2 périodes de chimie par semaine pour les sciences générales et 1 période par semaine pour les sciences de base, les professeurs n'ont pas toujours le temps d'enseigner l'entièreté de la matière et de préparer des activités qui ne sont pas prévues au programme même si c'est pour aider les élèves à mieux voir dans l'espace. Par contre, 17% des professeurs indiquent que c'est plutôt les moyens technologiques qui les empêchent d'utiliser ce type d'outil d'aide. Environ 30% de ceux n'utilisant pas les modèles informatiques ont invoqué d'autres raisons. Parmi celles-ci, nous trouvons plusieurs fois le fait qu'ils n'effectuent pas de recherche pour trouver des modèles informatiques ou bien qu'ils aient des difficultés à les utiliser. Nous pouvons donc dire qu'il existe un manque d'information à ce sujet. D'autres préfèrent utiliser les modèles moléculaires pour que les élèves puissent les manipuler et les faire tourner. C'est effectivement la plus grande différence entre les modèles moléculaires et les modèles informatiques. Il est très important de noter que 65% des professeurs n'utilisant pas les modèles informatiques ont déclaré vouloir les utiliser s'ils en avaient l'occasion. Cela montre que les problèmes de temps, les contraintes du programme, les manques de moyens technologiques ou le manque d'information sur le sujet freinent les professeurs dans l'utilisation de ces outils d'aide dans la visualisation tridimensionnelle des molécules.

Seuls 10% des professeurs interrogés utilisent des applications sur smartphone donc, comme cela représente peu de répondants, nous ne pouvons pas utiliser les sous-questions des professeurs ayant répondu par la positive. Contrairement aux modèles informatiques, le temps n'est pas la principale cause pour laquelle les professeurs (90%) ne les utilisent pas. 33% de ceux n'utilisant pas les applications smartphones ne voient pas l'utilité dans le cadre des programmes tandis que 27% ne possèdent pas les moyens technologiques. 27% ont également indiqué d'autres raisons comme le manque d'information sur les applications existantes, l'utilisation excessive du téléphone dans le quotidien et le fait que le gain didactique n'est pas assez important par rapport au temps investi. De plus, 44% des professeurs n'utilisant pas les applications ont indiqué qu'ils ne comptaient pas utiliser les applications même s'ils en avaient l'occasion. Il est intéressant de remarquer que les professeurs ont l'air moins intéressés par les applications smartphone que par les modèles informatiques.

La dernière catégorie d'outil d'aide est l'utilisation de photographies de modèles moléculaires dans les documents de cours. Cet outil est utilisé par 80% des professeurs interrogés. Nous trouvons les mêmes tendances que pour les modèles moléculaires, c'est-à-dire l'utilisation majoritaire de représentations de modèles en sphères et bâtonnets. 93% l'utilisent dans les cours théoriques, 50% dans le cadre d'exercices et 12,5% pendant les séances de laboratoire. De plus, tous les professeurs indiquant utiliser des photographies de modèles moléculaires les utilisent dans

l'entièreté de leurs classes, contrairement aux modèles moléculaires. Étant donné que le pourcentage de professeurs ayant répondu par la négative représente peu de répondants, nous ne pouvons pas utiliser les résultats de ces sous-questions.

Nous pouvons constater, à partir des résultats de ce questionnaire, que les professeurs se rendent compte de la difficulté que les élèves éprouvent à visualiser les molécules dans l'espace et de la nécessité d'utiliser des outils d'aide. Au niveau des types d'outil d'aide, nous remarquons que les modèles moléculaires et les représentations des modèles moléculaires sont déjà particulièrement bien utilisés. En effet, cela fait déjà de nombreuses années que ces outils existent ou apparaissent dans les livres de référence. Nous pouvons tout de même noter que les représentations de modèles moléculaires sont utilisées dans l'entièreté des classes des professeurs qui les utilisent tandis que les modèles moléculaires ne sont pas systématiquement utilisés dans toutes leurs classes. En outre, ces deux outils d'aide sont beaucoup plus utilisés dans le cadre de cours théoriques plutôt que lors de séances d'exercices. Cette constatation est mise en relation avec le fait qu'une minorité des professeurs font faire des exercices de traduction entre représentations tridimensionnelles. Cependant, il est important que les élèves apprennent à utiliser ces outils pour résoudre des exercices au lieu de simplement les utiliser pour illustrer les concepts théoriques. Il faudrait donc que plus de professeurs les utilisent dans des séances d'exercices. Par contre, les outils d'aide impliquant les nouvelles technologies sont nettement moins utilisés. Généralement, lorsque les professeurs n'utilisent pas les outils d'aide, c'est parce que l'école ne possède pas les moyens technologiques, qu'ils ne voient pas l'utilité dans le cadre du programme, qu'ils n'ont pas le temps ou qu'ils ne connaissent pas de logiciels informatiques et d'applications smartphone. S'ils en avaient l'occasion, les professeurs seraient favorables à l'utilisation des modèles informatiques durant leurs cours. Néanmoins, ils le sont moins à propos de l'utilisation d'applications smartphone.

Chapitre 4 :

Développement d'une ingénierie didactique visant à promouvoir les compétences de visualisation tridimensionnelle

4.1) Introduction

Dans la section 1.3 du chapitre 1, nous avons examiné des obstacles didactiques qui sont régulièrement identifiés dans la littérature. Ensuite, nous avons réalisé des questionnaires sur la base de cette recherche bibliographique afin de déterminer si les étudiants d'université et de l'enseignement secondaire de la région liégeoise y sont également confrontés et si oui, dans quelle mesure. Dans ces questionnaires, les questions font partie de six thèmes distincts : la symétrie, le lien entre structure et propriétés macroscopiques, la traduction entre représentations, la perception, la combinaison perception/rotation ainsi que la combinaison perception/rotation/réflexion. En raison des limitations de temps et parce que nous avons observé au chapitre 3 qu'il s'agissait des tâches les moins bien maîtrisées, nous nous limiterons au développement d'une activité se référant principalement à un seul type de difficulté : la combinaison perception/rotation/réflexion. Pour cela, nous nous sommes focalisés sur les énantiomères qui sont des molécules images-miroirs l'une de l'autre et non superposables. L'objectif est de déterminer si l'utilisation des modèles moléculaires ou d'une application smartphone, ainsi qu'une activité sur les énantiomères aident les élèves à surmonter leurs difficultés à propos de ce thème. De plus, nous aimerions savoir pour quel outil (application ou modèles moléculaires) l'amélioration est la plus importante, s'il y a amélioration. Dans ce cadre, nous avons réalisé un pré-test pour estimer le niveau initial des élèves, suivi de l'activité en question et, enfin, d'un post-test pour évaluer le niveau final des élèves.

4.2) Préparation de l'activité

Cette activité a été construite pour se dérouler sur trois périodes de cours de 50 minutes et est destinée à des élèves de dernière année de l'enseignement secondaire général en sciences générales (6 ou 7 périodes de sciences par semaine dont 2 de chimie). Elle se compose de cinq grandes parties, deux d'entre elles se font durant la première période de cours et les trois autres durant les deux autres périodes. L'activité proposée est décrite dans l'annexe 11.

Durant la première période de cours, nous commençons par expliquer ce que signifie le concept « images-miroirs ». En effet, avant de réaliser le pré-test, il est nécessaire que tous les élèves comprennent ce que nous leur demandons. Afin d'expliquer la notion d'images-miroirs, nous demandons aux élèves de construire une molécule possédant un carbone chiral à l'aide de modèles moléculaires. Pour construire cette molécule, ils ont tous reçu un sachet contenant le même nombre d'atomes. Ensuite, une fois cela fait, nous trions les modèles moléculaires en deux ensembles (un pour chaque énantiomère) et nous leur demandons comment ce tri a été réalisé. Afin de les aider à visualiser qu'il s'agit d'images-miroirs, nous construisons une des deux molécules avec des modèles de grande taille et nous la plaçons devant le miroir. Les élèves doivent ensuite orienter la seconde molécule de façon à ce qu'elle soit alignée avec l'image vue dans le miroir. Nous pouvons donc observer que la molécule orientée par les élèves et l'image vue dans le miroir sont identiques et images-miroirs de la première molécule. Il est ensuite nécessaire de rappeler les conventions de la représentation de Cram car ils n'ont pas tous vu de quoi il s'agit. Pour cela, nous leur donnons les conventions et nous réalisons trois exercices. Nous montrons les molécules à l'aide de modèles moléculaires et nous utilisons une plaque en frigolite pour illustrer les trois atomes contenus dans le plan et ainsi mettre en évidence les atomes se trouvant de part et d'autre de ce plan.

Les élèves réalisent ensuite le pré-test (Annexe 11, point 2) durant lequel ils peuvent utiliser des modèles moléculaires. Ce dernier consiste en cinq questions demandant toutes d'identifier des molécules qui sont images-miroirs l'une de l'autre. Il y a deux questions faisant intervenir les images de modèles moléculaires, deux qui font intervenir la représentation de Cram et une question est composée des deux types de représentation. Avant cela, nous faisons un rappel des conventions et nous leur demandons de créer un identifiant (question 1) afin de pouvoir analyser leur amélioration individuelle tout en assurant leur anonymat. Les questions sont sous forme de QCM où il y a à chaque fois quatre propositions de réponses et une seule réponse correcte. La dernière question permet d'estimer l'importance de leur utilisation des modèles moléculaires durant le test. Ce dernier est prévu pour durer environ 20 minutes.

La troisième étape est un cours théorique sur les énantiomères. Il y a tout d'abord une mise en situation avec le limonène pour illustrer l'intérêt d'étudier des énantiomères. Nous avons donc réalisé deux hydrodistillations : une pour extraire le limonène R des oranges et l'autre pour récupérer le limonène S des citrons. Cela permet de faire sentir la différence entre les deux substances aux élèves pour qu'ils se rendent compte que la configuration spatiale est importante et déterminante également pour des propriétés macroscopiques. Nous présentons ensuite la notion de chiralité en utilisant des modèles moléculaires pour les aider à visualiser, la définition des configurations absolues et des exemples concrets : la thalidomide et la cétirizine. Le fait de leur présenter les configurations absolues permet de fournir une stratégie spatiale-analytique aux élèves, comme nous l'avons vu dans la section 1.4.4 du chapitre 1.

Afin de laisser les élèves s'entraîner et manipuler leur outil d'aide, une partie manipulation a été développée. Les élèves travaillaient en binômes et chaque binôme a pioché l'outil d'aide qu'ils utiliseraient. La moitié des groupes devait utiliser une application smartphone (ModelAR) et l'autre moitié devait utiliser les modèles moléculaires. Les caractéristiques de cette application sont données dans l'annexe 1. Les modèles moléculaires sont des modèles en sphères et bâtonnets. Ceux-ci sont tous identiques. Les élèves doivent construire la molécule à l'aide de l'application ou des modèles à partir de la représentation de Cram. Ensuite, ils doivent déterminer la configuration absolue, construire l'énantiomère à l'aide de leur outil d'aide, le représenter en

représentation de Cram et déterminer la configuration absolue de l'énantiomère. Ils doivent réaliser cet exercice avec une molécule simple possédant un centre de chiralité, une molécule plus complexe avec un centre de chiralité et une molécule possédant deux centres de chiralité s'ils ont le temps. Durant cette activité, nous avons photographié les constructions des différents groupes. Pour cette manipulation, les élèves disposaient de 40 minutes.

Pour terminer, les élèves réalisent le post-test durant lequel ils peuvent également utiliser des modèles moléculaires. Dans ce post-test, nous avons repris les cinq questions du pré-test de manière identique. En effet, l'objectif est d'analyser l'évolution des élèves grâce à l'activité. Il est donc nécessaire que les questions du pré-test et du post-test possèdent exactement le même niveau de difficulté. Or, en fonction de la molécule choisie, du nombre d'atomes et du nombre de rotations, la difficulté peut varier. C'est pourquoi nous reprenons les mêmes questions mais en mélangeant les représentations et donc en modifiant l'ordre des propositions. Comme dans le cas du pré-test, nous leur demandons leur identifiant personnel et leur pourcentage d'utilisation des modèles moléculaires. De nouveau, ce test dure 20 minutes.

Différents points abordés dans ce travail justifient le développement de l'activité telle qu'elle est décrite. Comme mentionné ci-dessus, nous donnons aux élèves une stratégie spatiale-analytique. Cela permet de pallier leurs difficultés éventuelles à visualiser les molécules dans l'espace. Ensuite, nous avons fourni aux élèves un outil d'aide, que ce soit les modèles moléculaires (Figure 47) ou l'application ModelAR (Figure 48) dont nous avons discuté l'utilité dans le chapitre 1 (section 1.4). Cette activité permet également d'aborder une autre difficulté éprouvée par les élèves qui est la capacité de passer d'une représentation à une autre. Ici, les élèves doivent passer de la représentation de Cram aux modèles et inversement. Nous avons également vu qu'il existait trois facteurs pouvant influencer la création de modèles mentaux et ceux-ci sont utilisés dans le cadre de cette activité. Le premier facteur est l'engagement cognitif car nous leur demandons de participer au cours afin de rester concentrés. En effet, afin de comprendre l'explication sur les énantiomères, il est nécessaire qu'ils se concentrent sur chaque partie du cours théorique. Le deuxième facteur, le plus appliqué, est l'interactivité. Dans les différentes explications théoriques, nous leur demandons de superposer des molécules par exemple, de sentir des odeurs, de construire des molécules, ... En outre, il est évident que dans la partie manipulation, les élèves ont l'occasion de construire des molécules et d'utiliser des outils d'aide. Le dernier facteur intervenant dans l'activité est l'apprentissage multimédia car la théorie du double codage de Paivio est respectée. En effet, ce qui est illustré dans les différentes représentations est énoncé dans le texte et les deux sont correctement reliées grâce à des numéros de figure, des légendes et une position correcte dans le texte. Nous permettons également aux élèves de réaliser des liens entre les trois niveaux de représentation (Johnstone, 2000). En effet, nous faisons des liens entre la représentation de Cram et les images de modèles moléculaires qui font respectivement partie

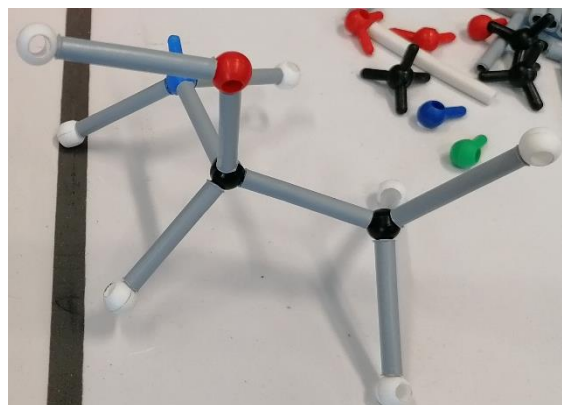


Figure 47 : Construction de la première molécule grâce aux modèles moléculaires

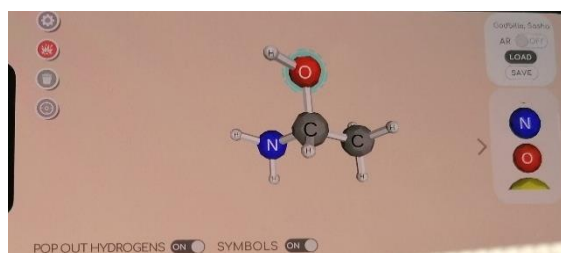


Figure 48 : Construction de la première molécule grâce à l'application ModelAR

du niveau symbolique et submicroscopique. De plus, nous réalisons des liens avec des propriétés macroscopiques avec les exemples concrets comme le limonène, la cétirizine et la thalidomide, dont les propriétés macroscopiques sont évoquées et illustrées.

4.3) Phase de validation

Nous avons réalisé une phase de validation permettant de déterminer si le niveau de difficulté des questions est adéquat ainsi que le temps que le questionnaire devrait prendre. Pour cela, les explications sur la représentation de Cram, sur la notion d'images miroirs et sur la chimie organique ont été fournies à deux classes de dernière année du secondaire d'une assistante pédagogique du Département de Chimie de l'ULiège. L'échantillon servant à la validation est composé de 15 élèves de rhétorique. Ensuite, des modèles moléculaires leur ont été fournis pour qu'ils réalisent le même questionnaire que dans l'activité. Dans le tableau 8, nous pouvons voir la moyenne des résultats aux cinq questions, leur écart-type ainsi que le temps moyen mis par l'échantillon pour le réaliser sans imposer de contrainte de temps.

Tableau 8: Résultats de l'échantillon (n = 15) pour la phase de validation

	Moyenne	Écart-type
Question 1 (représentation de Cram)	0,47	0,52
Question 2 (illustration de modèles moléculaires)	0,73	0,46
Question 3 (les deux types de représentations)	0,13	0,35
Question 4 (représentation de Cram)	0,33	0,49
Question 5 (illustration des modèles moléculaires)	0,33	0,49
Résultat total des étudiants (/5)	2	1,36
Temps mis pour réaliser le questionnaire (minutes)	21,27	5,11

Nous pouvons remarquer qu'aucune question n'a été ratée par l'ensemble des élèves. La question la moins bien réalisée est la question 3, ce qui n'a rien d'étonnant étant donné que les élèves n'ont pas l'habitude de trouver des molécules qui sont images-miroirs et encore moins de comparer des représentations de Cram avec des illustrations de modèles moléculaires. Aucune question n'a semblé trop simple. Par conséquent, nous pouvons considérer que les cinq questions sont adaptées pour déterminer le niveau de maîtrise des élèves dans des tâches de visualisation spatiale nécessitant de combiner la perception, la rotation et la réflexion. De plus, le temps moyen mis par les élèves pour réaliser le questionnaire est de 21 minutes environ. Les élèves ont pris le temps de résoudre le questionnaire, d'utiliser les modèles moléculaires s'ils le souhaitent et de relire leurs réponses. Nous pouvons donc estimer que leur laisser 20 minutes est suffisant.

4.4) Echantillon

L'activité a été menée avec une classe de rhétorique en sciences générales (7h de sciences par semaine) dans le cadre des stages d'enseignement de la finalité didactique du master en sciences chimiques. Cela correspond à 20 élèves. Par conséquent, il est possible de faire dix binômes et de demander à cinq d'entre eux d'utiliser l'application ModelAR et cinq d'utiliser les modèles moléculaires. Cependant, il y a eu un absent lors de la deuxième et troisième heure. Par conséquent, notre échantillon est constitué de 19 élèves, ce qui correspond à huit binômes et un trinôme. Après distribution des outils d'aide de manière aléatoire, nous obtenons 4 binômes utilisant l'application smartphone ainsi que 4 binômes et un trinôme utilisant les modèles moléculaires. Huit élèves utilisent donc l'application et 11 élèves utilisent les modèles moléculaires.

4.5) Résultats

Nous allons d'abord analyser les résultats de manière quantitative. Cependant, il faut faire attention aux conclusions que nous obtenons car le groupe échantillon est petit (n=19). Cela se constate dans les résultats des élèves durant le pré-test (tableau 9). En effet, pour le prétest la moyenne des élèves qui utilisent l'application lors de l'activité est différente de celle des élèves qui utilisent les modèles moléculaires durant celle-ci. Or, les moyennes sont censées être semblables étant donné que, lors du pré-test, l'activité n'a pas encore eu lieu. Cela signifie donc que les populations initiales ne sont pas comparables. Nous réaliserons ensuite une analyse qualitative de ces résultats.

Tableau 9: Résultats obtenus lors de l'activité destinée aux élèves de rhétorique

	Pré-test		Post-test	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Question 2 (représentation de Cram)	0,16	0,37	0,37	0,50
Question 3 (illustration de modèles moléculaires)	0,63	0,50	0,58	0,51
Question 4 (les deux types de représentations)	0,21	0,42	0,21	0,42
Question 5 (représentation de Cram)	0,26	0,45	0,42	0,51
Question 6 (illustration des modèles moléculaires)	0,21	0,42	0,37	0,50
Résultat total des étudiants (/5)	1,47	1,17	1,95	1,51
Utilisation des modèles moléculaires	0,44	0,29	0,43	0,41
Résultats des élèves utilisant les modèles durant le questionnaire	2	1,41	2,29	1,51
Résultats des élèves n'utilisant pas les modèles durant le questionnaire	1	0,67	1,8	1,62
Résultats des élèves qui utilisent l'application smartphone durant l'activité	2	1,51	2,75	1,39
Résultats des élèves qui utilisent les modèles moléculaires durant l'activité	1,09	0,70	1,36	1,36

4.5.1) Résultats quantitatifs

Dans cette partie, nous allons commencer par comparer les résultats du pré-test et du post-test sur la population globale puis nous faisons de même avec les élèves ayant utilisé l'application smartphone et ceux qui ont utilisé les modèles moléculaires durant la partie « manipulation ». En effet, un objectif principal de cette activité est de voir si l'utilisation d'une application permet aux élèves de mieux visualiser les molécules en trois dimensions. Pour tous ces tests, le risque de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est acceptable est fixé à 5% ($\alpha = 0,05$). De plus, étant donné que les échantillons du pré-test et du post-test sont non indépendants, nous utilisons des tests appariés. Pour l'analyse de ces trois cas, nous commençons par analyser la normalité puis l'homogénéité des variances et nous terminons par les tests permettant de déterminer si la différence entre les tests est significative.

Tout d'abord, nous analysons les résultats de la population globale. Le test de Shapiro-Wilk nous montre que la distribution des résultats dans le pré-test n'est pas normale ($p = 0,0034$) tandis que celle du post-test l'est ($p = 0,173$). Le test de Levene confirme que nous avons une

homogénéité des variances ($t=1,848 < t_c=4,1132$). Nous utilisons ensuite le test de Wilcoxon unilatéral pour déterminer si les résultats du post-test sont significativement supérieurs à ceux du pré-test. Nous obtenons $p(\text{uppertail}) = 0,0496$, ce qui est légèrement inférieur à 0,05. Par conséquent, l'hypothèse nulle est rejetée mais c'est à la limite et les résultats du post-test sont supérieurs à ceux du pré-test. Cependant, lorsque nous analysons les questions une à une grâce au test de McNemar, nous ne trouvons pas de différence entre les deux tests (tableau 10).

Tableau 10: Résultats du test McNemar servant à comparer les résultats obtenus pour chaque question dans le pré-test et le post-test

Questions	Test de McNemar
Question 2 (représentation de Cram)	$p = 0,2888$
Question 3 (illustration de modèles moléculaires)	$p = 1$
Question 4 (les deux types de représentations)	$p = 1$
Question 5 (représentation de Cram)	$p = 0,4497$
Question 6 (illustration des modèles moléculaires)	$p = 0,4497$

Nous effectuons les mêmes tests (excepté celui de McNemar) pour la population ayant utilisé l'application durant l'activité. Dans ce cas, les deux échantillons à comparer possèdent des distributions normales (test de Shapiro-Wilk ; pré-test : $p = 0,415$ et post-test : $p = 0,520$) et les variances sont homogènes (test de Levene ; $t=0,00175 < t_c=4,6001$). Nous réalisons deux tests pour voir si les résultats du post-test sont significativement supérieurs à ceux de pré-test pour les élèves ayant utilisés l'application. Comme les autres comparaisons sont réalisées avec le test de Wilcoxon unilatéral, nous allons commencer par utiliser ce test. Nous obtenons ainsi que les résultats du post-test ne sont pas significativement supérieurs ($p(\text{uppertail})=0,0625 > 0,05$). Ensuite, nous pouvons également utiliser le test t de Student étant donné que les deux distributions sont normales et que les variances sont homogènes. Celui-ci montre que les résultats du post-test sont significativement supérieurs à ceux du pré-test ($p(\text{uppertail})=0,0240 < 0,05$). Les deux tests donnent donc deux résultats différents, ce qui signifie que nous nous trouvons à la limite d'une différence significative avec un risque $\alpha = 0,05$. Par conséquent, nous pouvons dire que l'activité dans laquelle les élèves utilisent une application smartphone est intéressante et que les résultats sont encourageants. Cependant, comme nous l'avons dit, la taille de l'échantillon est assez petite donc nous avons fait un test à petite échelle. Afin de vérifier l'utilité de l'utilisation d'une application smartphone, il faudrait tester l'activité sur un échantillon plus grand, ce qui sortait du cadre de ce travail de fin d'études.

Pour terminer, nous procédons de la même manière avec les élèves ayant utilisés les modèles moléculaires dans la partie « manipulation ». En réalisant le test de Shapiro-Wilk, nous constatons que la distribution du pré-test n'est pas normale ($p = 0,0183$) tandis que celle du post-test l'est ($p = 0,1096$). Par contre, cette fois-ci, les variances ne sont pas homogènes ($t=6,332 > t_c=4,3512$). Nous réalisons de nouveau un test de Wilcoxon unilatéral et nous ne constatons pas de différence significative entre les résultats ($p(\text{uppertail}) = 0,258$). L'utilisation de modèles moléculaires durant la séance d'exercices ne semble pas avoir aidé les élèves.

Nous nous demandons également s'il y a une différence dans les résultats du pré-test et du post-test en fonction de l'utilisation ou non des modèles moléculaires comme outils d'aide à la visualisation 3D durant les questionnaires. Pour cela, nous divisons les élèves en deux catégories :

ceux qui affirment avoir utilisé les modèles de manière significative (coefficient d'utilisation de 0,6 ; 0,8 et 1) et ceux qui les ont peu utilisés (coefficient d'utilisation de 0 ; 0,2 et 0,4). Ensuite, nous regardons la différence entre ces catégories dans le pré-test et nous faisons de même pour le post-test. D'après le test de Shapiro-Wilk, la distribution des élèves dans le pré-test n'est pas normale ($p = 0,0035$) tandis que celle du post-test l'est ($p = 0,167$). Nous tirons comme information du test de Wilcoxon que les résultats avec et sans outil d'aide à la visualisation ne sont pas significativement différents que ce soit dans le pré-test ($p = 0,0631$) ou le post-test ($p = 0,821$). Nous n'avons donc pas pu mettre en évidence un impact significatif de l'utilisation des modèles pendant la résolution du questionnaire. Pour vérifier ce résultat, il faudrait réaliser l'activité avec un échantillon plus large car la limitation est que l'échantillon est petit ($n = 19$).

4.5.2) Résultats qualitatifs

Discutons à présent qualitativement les résultats obtenus. Nous commençons par comparer les résultats des élèves en fonction de leur utilisation soit d'un modèle moléculaire soit d'une application smartphone durant l'activité. Ensuite, nous les comparons également en fonction de leur degré d'utilisation d'un outil d'aide à la visualisation 3D (modèles moléculaires) durant les questionnaires. Par après, nous allons évaluer l'impact de leurs performances dans l'activité sur leurs résultats dans le questionnaire. Nous terminons par analyser qualitativement le score des étudiants pour chacune des questions.

Nous constatons que la moyenne a augmenté avec l'utilisation des deux outils mais nous ne pouvons pas tirer de conclusion de manière qualitative quant à l'apport de l'application par rapport aux modèles moléculaires durant l'activité. En effet, quatre élèves sur huit progressent dans le cas de l'application et les quatre autres stagnent tandis que pour le cas des modèles moléculaires, trois élèves régressent, deux stagnent et six s'améliorent. Nous pouvons donc voir que la distribution des scores est plus large pour les élèves utilisant les modèles moléculaires durant l'activité. Les analyses statistiques (section 4.5.1) ont d'ailleurs montré que les différences sont non significatives (utilisation des modèles) ou à la limite du caractère significatif (utilisation de l'application).

Nous pouvons essayer d'analyser qualitativement l'évolution des élèves en fonction de leur utilisation d'aide à la visualisation 3D, c'est-à-dire en fonction de leur degré d'utilisation de modèles moléculaire durant les questionnaires. Cependant, pour chaque classification d'étudiants, c'est-à-dire ceux qui s'améliorent, stagnent ou régressent, certains utilisent plus les modèles moléculaires, d'autres moins et d'autres les utilisent avec la même fréquence. Il n'est donc pas possible de tirer de conclusion sur l'évolution des élèves via leur fréquence d'utilisation des modèles moléculaires durant les questionnaires.

Il semble tout de même que l'activité, que ce soit avec l'application ou les modèles et avec ou sans aide d'outil à la visualisation tridimensionnelle pendant les questionnaires, a permis d'améliorer les moyennes entre le pré-test et le post-test même si ce n'est pas de manière significative. Nous avons donc analysé les résultats des élèves en fonction de leur performance durant la partie manipulation de l'activité. Dans cette partie, les élèves ont dû construire des molécules, déterminer des configurations absolues et dessiner des énantiomères en représentation de Cram. L'hypothèse est donc que les élèves s'étant améliorés entre les questionnaires sont ceux ayant fait le moins de fautes ou ayant compris leurs erreurs durant la partie manipulation. Pour rappel, nous avons huit groupes de deux élèves et un groupe de trois. Nous allons nous concentrer sur les performances pour les deux premières molécules, la troisième étant surtout un exercice de

dépassement pour ceux qui avaient le temps. De plus, tous les groupes ayant eu le temps de traiter cette molécule se sont trompés car la difficulté était nettement supérieure en raison des deux carbones chiraux. Étant donné que les énantiomères ne sont pas matière d'enseignement secondaire, les élèves commencent tous avec la même base si ce n'est leur capacité intrinsèque de visualisation spatiale qui diffère. À partir de ces observations, nous constatons que les groupes dans lesquels les étudiants stagnent et/ou progressent sont ceux qui ont correctement répondu à la partie manipulation, peu importe leur état d'avancement (une ou deux molécules). Il y a une exception à cette conclusion : dans le trinôme, deux élèves s'améliorent et un élève empire son résultat malgré leurs réponses correctes pour les deux premières molécules. Une hypothèse est qu'il est possible qu'un élève du groupe n'ait pas compris ou ne visualise pas bien mais qu'il ait simplement recopié ce que son ou ses partenaire(s) pensai(en)t. Lorsqu'il y avait des erreurs, les résultats étaient beaucoup plus variables. Parmi les trois groupes ayant fait des erreurs, les élèves de deux d'entre eux ont stagné ou se sont améliorés tandis que les élèves du troisième ont stagné ou ont empiré. La principale erreur trouvée concerne la détermination de la configuration absolue. Comme leurs dessins et constructions sont corrects, nous pouvons dire que les élèves comprennent ce que signifient les énantiomères mais n'arrivent pas à utiliser une stratégie analytique pour s'aider. Cela peut venir d'une difficulté à visualiser le groupement de plus faible priorité vers l'arrière.

Nous pouvons ensuite examiner les cinq questions une à une. Les résultats des élèves pour les deux questions faisant intervenir les représentations de Cram sont cohérents avec les résultats des étudiants d'université et de l'enseignement secondaire (chapitre 3). Les moyennes de ces derniers varient entre 0,2 et 0,4. Il semble que la question 2 ait été moins bien faite que la question 5 alors qu'il y avait des groupements différents entre les molécules à comparer. Par conséquent, il ne fallait comparer que deux paires de molécules. Nous nous attendions donc à ce que la question 2 soit mieux réalisée. Une explication possible est que les groupements liés au carbone chiral sont plus « simples » dans la question 5 que ceux de la question 2. Si nous nous intéressons aux questions faisant intervenir les représentations de modèles moléculaires, nous remarquons que la question 3 a été particulièrement réussie contrairement aux autres questions. Cela peut être expliqué par le fait qu'il y avait seulement deux paires à comparer ce qui était beaucoup plus visible pour les étudiants grâce aux couleurs attribuées aux atomes. Les résultats de la question 6 ressemblent à ceux des étudiants d'université pour ce même type de tâche. Cependant, les représentations dans la question 6 sont dans des configurations fort comparables. Par conséquent, nous pensions que cette question serait mieux réalisée. La question 4 consiste en un mélange de représentations de Cram et de modèles moléculaires, ce type de tâche nécessite donc une étape de traduction en plus. Nous pensions donc que cette question serait la plus mal faite mais nous avons constaté que dans le pré-test, les résultats étaient semblables aux autres questions.

Conclusion, limitations et perspectives

L'objectif de ce travail était d'étudier les compétences d'étudiants de 1^{er} cycle universitaire et d'élèves de dernière année d'enseignement secondaire général en visualisation tridimensionnelle (3D) des molécules en chimie organique. Pour faire cela, nous avons réalisé une recherche bibliographique sur la capacité spatiale et les compétences représentationnelles en chimie. Ensuite, nous avons poursuivi la recherche afin de déterminer les difficultés déjà observées dans ce domaine. Ce travail préliminaire nous a permis de développer des questionnaires que nous utilisons comme instruments de mesure de la capacité spatiale des apprenants en chimie et, plus spécifiquement en chimie organique : un instrument a été développé pour les étudiants d'université et un deuxième pour les élèves du secondaire. Six thèmes ont été abordés pour couvrir différents types d'opérations mentales dans l'espace tridimensionnel : la traduction d'une représentation à l'autre, la symétrie et l'identification de plans de symétrie, l'établissement de liens entre propriétés et structure, la perception de l'agencement spatial des groupes dans une molécule, la combinaison perception-opération de rotation et la combinaison perception-rotation-réflexion au travers d'un plan-miroir. L'instrument destiné aux élèves de l'enseignement secondaire a été adapté en tenant compte des référentiels et programmes en Fédération Wallonie-Bruxelles.

Les tâches de traduction ont été bien réussies par les étudiants universitaires (score moyen de 0,83) mais nettement moins par les élèves d'enseignement secondaire (score moyen de 0,52). Etant donné que les exercices impliquant diverses représentations d'une molécule sont beaucoup plus implémentés dans les cours universitaires, il n'est pas étonnant de constater que les étudiants d'université les ont mieux réussis. Dans le secondaire, seuls 45% des professeurs demandent aux élèves de réaliser des exercices impliquant des représentations tridimensionnelles des molécules.

Le deuxième thème se rapporte à la symétrie. Les résultats sont moyens à faibles pour les deux niveaux d'enseignement (score moyen de 0,69 pour les étudiants universitaires et de 0,36 pour les élèves d'enseignement secondaire). Il semble que les étudiants aient des difficultés avec la géométrie plane tandis que pour les élèves, les difficultés apparaissent avec la géométrie tétraédrique. De plus, les étudiants identifient bien la présence de plans de symétrie mais ont plus de difficultés à déterminer le nombre d'atomes contenus dans un tel plan. Il y a peut-être une incompréhension de la notion de plan de symétrie et des difficultés à déterminer la géométrie des molécules.

Les liens entre les propriétés et la structure tridimensionnelle sont abordés dans le troisième thème. Les résultats de ces tâches sont relativement moyens (0,52 pour les étudiants universitaires, 0,46 pour les élèves d'enseignement secondaire) et peu différents pour les deux niveaux d'enseignement, ce qui montre qu'il est difficile de réaliser ces liens. Les répondants ont tendance à se sous-estimer parce qu'ils se rendent compte qu'ils ont des problèmes dans la résolution de ce type de tâches. Par exemple, ils n'arrivent pas à lier la structure de Lewis aux propriétés que l'on peut déterminer ou comparer qualitativement à partir de celle-ci : c'est particulièrement le cas pour les propriétés auxquelles on accède indirectement comme la polarité ou les températures de

fusion ou d'ébullition. Au niveau de la polarité, les apprenants n'arrivent pas à attribuer des moments dipolaires ou à comparer la polarité d'une molécule par rapport à d'autres. La difficulté peut résulter de deux causes : (i) les apprenants déterminent mal la géométrie des molécules ; (ii) une préconception possible est que la polarité est déterminée par la polarité des liaisons sans tenir compte de la géométrie moléculaire.

Les questions abordant le thème de la perception étaient aussi bien réussies par les étudiants (score moyen = 0,94) que par les élèves (score moyen = 0,85). Cependant, il est important de noter que nous avons fait un rappel des conventions de la représentation de Cram et des modèles moléculaires dans le cas des élèves du secondaire. Les degrés de certitude des étudiants et des élèves étaient également assez élevés. Nous remarquons cependant que si nous ajoutons des opérations mentales dans les exercices comme une rotation et/ou une réflexion, le pourcentage de réussite chute. Pour les questions se rapportant aux combinaisons perception-rotation, les scores moyens des étudiants et élèves deviennent respectivement de 0,59 et 0,57. Si on inclut en plus une réflexion à travers un plan-miroir, ces scores chutent à, respectivement, 0,28 et 0,08. Dans ce dernier cas, il faut toutefois noter que, même si la connaissance du concept d'énantiométrie n'était pas spécifiquement requise, les élèves du secondaire étaient défavorisés par rapport aux étudiants qui y avaient déjà été confrontés. On constate donc que l'augmentation du nombre d'opérations mentales conduit à une dégradation des performances des apprenants, en accord avec différents auteurs (Carlisle et al., 2015; Ferk et al., 2003).

En comparant les thèmes pour les élèves du secondaire, nous constatons que les résultats pour la prédiction de propriétés physico-chimiques sont semblables à ceux relatifs à la traduction et à la symétrie. Comme nous l'avons déjà mentionné, il est nécessaire de pouvoir passer d'une représentation à une autre pour déterminer certaines propriétés macroscopiques comme la polarité par exemple. De plus, dans cet exemple, il est également nécessaire de pouvoir déterminer des éléments de symétrie pour déterminer si la molécule est polaire ou non. En plus de ces liens, nous trouvons, pour les étudiants, des corrélations entre ces deux thèmes et celui de la rotation. L'application de rotations mentales est utile pour déterminer les axes de symétrie qui servent ensuite à prédire des propriétés. Les étudiants universitaires ont des enseignements de cristallographie et de théorie des groupes qui les exercent à ce type d'opérations, contrairement aux élèves de l'enseignement secondaire. Les autres différences sont peut-être dues à des différences de raisonnement. Pour vérifier cela, il faudrait réaliser des interviews semi-dirigées. Que ce soit pour les étudiants d'université ou pour les élèves, nous ne trouvons pas de différence significative entre les genres, entre les sections (2^{ème} année ou 3^{ème} année de bachelier) et entre les répondants qui utilisent ou non les modèles moléculaires durant le questionnaire.

Les différentes difficultés peuvent provenir de diverses sources comme les livres et manuels de référence par exemple. Nous en avons donc analysé plusieurs qualitativement et quantitativement. Une des conclusions principales est que les livres de l'enseignement secondaire utilisent majoritairement des représentations planes (topologique, semi-développée ou développée). Afin de représenter le caractère tridimensionnel des molécules, les auteurs utilisent des images de modèles moléculaires. Nous pouvons noter que ce type de représentation est davantage utilisé à l'heure actuelle. Par contre, nous ne trouvons pratiquement pas de représentation de Cram dans les livres les plus récents alors que 85% des professeurs ayant participé à notre étude disent les utiliser dans leurs cours. Il y a donc un décalage entre ce que les professeurs font et le support que les livres fournissent. En outre, l'utilisation des différentes représentations peut varier d'un manuel à l'autre ou même d'un chapitre à un autre. Les relations

structure – propriétés physicochimiques sont présentées de façon très variable d'un ouvrage à l'autre. En fonction du livre ou manuel utilisé, les propriétés présentées ne sont pas nécessairement les mêmes. C'est un aspect qui mérite réflexion tenant compte des résultats assez faibles obtenus par les apprenants pour ce thème lors des tests que nous avons réalisés. Une piste d'amélioration serait de veiller à écrire ou utiliser des manuels dans lesquels des représentations multiples sont utilisées. De plus, il faut veiller à ce qu'elles soient correctement liées entre elles et liées au texte. Il faut également faire attention à ce que les différentes propriétés soient abordées et que l'explication sur la procédure à suivre pour faire des liens avec les structures tridimensionnelles soit explicite.

Nous avons également réalisé une enquête en ligne auprès des professeurs de l'enseignement secondaire pour identifier leurs approches pédagogiques privilégiées dans le domaine de la structure tridimensionnelle des molécules. Grâce à celle-ci, nous savons que les professeurs sont conscients des difficultés qu'éprouvent leurs élèves. De plus, ils sont d'accord avec le fait que des outils d'aide sont indispensables. Néanmoins et assez étonnamment, nous n'avons pas trouvé de corrélation entre la réussite des étudiants et des élèves et l'utilisation de modèles moléculaires comme outil d'aide (Figures 38 et 44). La première hypothèse est que les modèles moléculaires peuvent jouer le rôle d'outil d'aide mais pas de manière cruciale. De plus, il est important de noter que dans le questionnaire des professeurs, la question portait sur les outils d'aide de façon générale, pas uniquement sur les modèles moléculaires. Il est également possible que les élèves et les étudiants évaluent mal leur utilisation des modèles ou qu'ils ne profitent pas de manière optimale de ces outils. Les modèles moléculaires ainsi que leurs représentations sont particulièrement utilisés par les professeurs. Cependant, ces aides sont surtout employés durant les cours théoriques mais très peu pendant des séances d'exercices. Il faudrait que les professeurs demandent à leurs élèves de résoudre des exercices avec ces outils d'aide pour s'entraîner à visualiser dans l'espace. En effet, n'oublions pas que la capacité spatiale n'est pas immuable (Harle & Towns, 2011). De plus, les professeurs n'utilisent presque pas les modèles informatiques ni les applications smartphone pour des raisons de temps ou de moyens logistiques par exemple. Ils ne voient pas non plus l'intérêt par rapport aux programmes ou ne connaissent pas de sites ou de logiciels. S'ils en avaient l'occasion, les professeurs accepteraient d'utiliser les modèles informatiques mais pas les applications smartphone même s'il s'agit d'une piste intéressante comme nous l'avons montré en développant une ingénierie didactique sur les énantiomères.

Cette activité a été développée dans le but de voir si une séquence de trois heures de cours durant laquelle les élèves peuvent utiliser une application sur smartphone permet de les aider à surmonter leurs difficultés pour le thème de la réflexion par un plan-miroir. Le point de matière qui illustre le mieux ce thème concerne les énantiomères. Lors de l'analyse des résultats, nous avons trouvé que les scores au post-test étaient supérieurs à ceux du pré-test. Donc l'activité semble avoir aidé les élèves. Il faut tout de même être prudent avec cette conclusion car la valeur-p était très proche de la limite de 0,05 choisie pour le risque d'erreur (significance level). Lorsque nous avons fait la même analyse pour les élèves ayant utilisé les modèles moléculaires, nous n'avons pas trouvé de différence significative. Néanmoins, pour les élèves ayant manipulé une application smartphone, la conclusion est moins claire car, en fonction du test utilisé, le résultat n'est pas le même. Nous nous trouvons donc à la limite, ce qui signifie qu'il est possible que l'application améliore les résultats des élèves mais il faudrait étudier cette hypothèse à plus grande échelle. Nous ne trouvons pas de différence significative entre les élèves utilisant les modèles moléculaires pendant les questionnaires et ceux qui ne les utilisent pas.

La limitation majeure pour l'ensemble des questionnaires ou activités réalisés dans ce mémoire est la petite taille des échantillons (excepté pour le questionnaire destiné aux élèves du secondaire). En effet, nous avons à chaque fois une vingtaine de participants, ce qui est peu pour réaliser des tests statistiques. De plus, les questionnaires de l'activité sur les énantiomères ne possèdent que cinq questions. Il faudrait donc reproduire ces questionnaires et activités à plus grande échelle pour confirmer ou infirmer nos observations et conclusions. Il y a également d'autres pistes pour les prochaines études sur le sujet. Premièrement, nous pouvons nous concentrer sur l'utilisation des modèles moléculaires durant les questionnaires en demandant aux étudiants ou élèves d'indiquer pour chaque question s'ils les ont utilisés ou non. Ainsi il serait possible de savoir pour quels thèmes ils sont particulièrement utilisés. Ensuite, nous avons pensé analyser d'autres sections comme les étudiants de deuxième année de bachelier en pharmacie. Cependant, cela n'a pas été possible car nous n'avons pratiquement eu aucun répondant. Il serait donc intéressant de faire passer ce questionnaire à d'autres sections et de l'étendre aux étudiants de Hautes Ecoles également. Troisièmement, nous pouvons analyser de manière plus poussée les résultats que nous avons obtenus grâce à une analyse par composantes principales par exemple. En effet, il est possible que le plus grand effet sur la réussite des étudiants soit une combinaison de différents facteurs (genre, section, thème, utilisation ou non du modèles moléculaires comme aide ou encore la représentation utilisée dans les questions). Pour terminer, nous avons vu que l'utilisation de l'application smartphone durant l'activité est encourageante pour aider les élèves. Il faudrait la tester à grande échelle, c'est-à-dire en augmentant le nombre de participants et le nombre de questions. Pour cela, il faut éventuellement préparer une activité s'étalant sur plus de trois périodes de cours afin de développer des tests plus importants et la proposer à des classes provenant de plusieurs écoles.

Il reste donc beaucoup de pistes à explorer sur ce sujet et nous espérons que ce travail a permis d'en dégager quelques-unes en mettant en évidence les difficultés principales éprouvées par les étudiants et élèves lors de la visualisation des molécules organiques en trois dimensions et de l'utilisation de telles aptitudes dans des démarches réflexives.

Bibliographie :

- Abdinejad, M., Talaie, B., Qorbani, H. S., & Dalili, S. (2021). Student Perceptions Using Augmented Reality and 3D Visualization Technologies in Chemistry Education. *Journal of Science Education and Technology*, 30(1), 87–96. <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09880-2>
- AGERS. (2001). *Humanités générales et technologiques Enseignement générale et technique de transition Programme d'études du cours de chimie*.
- Agnello, A., Leyh, B., Nihant, B., Quinton, L., & Xhrouet, C. (2021). *Chimie 1350 cm³ d'exercices corrigés pour la licence 1*. Dunod.
- Akkuzu, N., & Uyulgan, M. A. (2016). An epistemological inquiry into organic chemistry education: Exploration of undergraduate students' conceptual understanding of functional groups. *Chemistry Education Research and Practice*, 17(1), 36–57. <https://doi.org/10.1039/c5rp00128e>
- Al-Balushi, S. M., & Al-Hajri, S. H. (2014). Associating animations with concrete models to enhance students' comprehension of different visual representations in organic chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 15(1), 47–58. <https://doi.org/10.1039/c3rp00074e>
- Appling, J. R., & Peake, L. C. (2004). Instructional Technology and Molecular Visualization. *Journal of Science Education and Technology*, 13(3), 361–365. <https://doi.org/10.1023/b:jost.0000045463.40297.0f>
- Barde, N., Barde, M., Besnard, V., Caillet, D., & Jackel, L. (2001). *Physique chimie Ire S*. Hachette Education.
- Barnea, N. (2000). Teaching and Learning about Chemistry and Modelling with a Computer managed Modelling System. In J.K. Gilbert & C. J. Boulter (Eds.), *Developing Models in Science Education* (Issue April, pp. 307–323). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0876-1>
- Bellier, J.-P., Calafell, J., & Nicolas, L. (2019). *physique chimie Ire spécialité programme 2019*. Hachette Education.
- Bodner, G. M., & Guay, R. B. (1997). The Purdue Visualization of Rotations Test. *The Chemical Educator*, 2(4), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00897970138a>
- Bodner, M. G., & Domin, D. S. (2000). Mental Models: The Role of Representations in Problem Solving in Chemistry. *University Chemistry Education*, 4(1), 24–30.
- Boukhechem, M.-S., & Dumon, A. (2016). To what degree does handling concrete molecular models promote the ability to translate and coordinate between 2D and 3D molecular structure representations? A case study with Algerian students. *Chemistry Education Research and Practice*, 17(4), 862–877. <https://doi.org/10.1039/c5rp00180c>
- Bouyrie, G., Bessy, G., Dulaurans, T., Grossetête, C., & Marsan, D. (1997). *Chimie Ire S* (Belin (ed.)).
- Bucat, B., & Mocerino, M. (2009). Learning at the Sub-micro level: structural representations. In John K. Gilbert & D. Treagust (Eds.), *Multiple representations in chemical education* (pp. 11–29). Springer sciences+business media.
- Carlisle, D., Tyson, J., & Nieswandt, M. (2015). Fostering spatial skill acquisition by general

- chemistry students. *Chemistry Education Research and Practice*, 16(3), 478–517. <https://doi.org/10.1039/c4rp00228h>
- Chaffard, P., Le Tressoler, E., Cédric, M., Michel, V., Philippini, V., Servant, S., & Vigneron, I. (2020). *Physique chimie enseignement de spécialité Première*. Hachette Education.
- Clavel-Monin, C., Garcia, G., Hild, N., Martel, L., Miguët, A.-M., & Thorat, J. (2011). *Chimie Ire S*. Hatier.
- Cona, G., & Scarpazza, C. (2019). Where is the “where” in the brain? A meta-analysis of neuroimaging studies on spatial cognition. *Human Brain Mapping*, 40(6), 1867–1886. <https://doi.org/10.1002/hbm.24496>
- Cooper, M. M., Corley, L. M., & Underwood, S. M. (2013). An investigation of college chemistry students’ understanding of structure-property relationships. *Journal of Research in Science Teaching*, 50(6), 699–721. <https://doi.org/10.1002/tea.21093>
- Cooper, M. M., Underwood, S. M., & Hilley, C. Z. (2012). Development and validation of the implicit information from Lewis structures instrument (IILSI): Do students connect structures with properties? *Chemistry Education Research and Practice*, 13(3), 195–200. <https://doi.org/10.1039/c2rp00010e>
- Decroix, S., Cariat, T., Lozé, G., Mora, V., Riahi, I., Serrano, S., Vassiaux, W., & Toussaint, G. (2011). *Chimie IreS programme 2011* (Bordas (ed.)).
- Dickmann, T., Opfermann, M., Dammann, E., Lang, M., & Rumann, S. (2019). What you see is what you learn? The role of visual model comprehension for academic success in chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 20(4), 804–820. <https://doi.org/10.1039/c9rp00016j>
- Dulaurans, T., Calafell, J., & Giacino, M. (2015). *Physique Chimie IreS* (2015th ed.). Hachette Education.
- Durupthy, A., & Durupthy, O. (2001). *Chimie IreS*. Hachette Education.
- Ferk, V., Vrtacnik, M., & Blejec, A. (2003). Student’s understanding of molecular structure representations. *International Journal of Science Education*, 25(10), 1227–1245. <https://doi.org/10.1080/0950069022000038231>
- Ferk, V., Vrtacnik, M., & Gilbert, J. K. (2005). Evaluating the educational value of molecular structure representations. In John K. Gilbert (Ed.), *Visualization in science education* (pp. 269–300). Springer.
- Furht, B. (2006). Augmented Reality. In *Encyclopedia of Multimedia* (Borko Furh, pp. 29–30). Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/0-387-30038-4_10
- Gandhi, H. A., Jakymiw, S., Barrett, R., Mahaseth, H., & White, A. D. (2020). Real-Time Interactive Simulation and Visualization of Organic Molecules. *Journal of Chemical Education*. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b01161>
- Gilbert, John K. (2005). Visualization: a metacognitive skill in science and science education. In John K. Gilbert (Ed.), *Visualization in science education* (pp. 9–27). Springer.
- Gkitzia, V., Salta, K., & Tzougraki, C. (2011). Development and application of suitable criteria for the evaluation of chemical representations in school textbooks. *Chemistry Education Research and Practice*, 12(1), 5–14. <https://doi.org/10.1039/c1rp90003j>
- Graulich, N. (2015). The tip of the iceberg in organic chemistry classes: How do students deal with the invisible? *Chemistry Education Research and Practice*, 16(1), 9–21.

<https://doi.org/10.1039/c4rp00165f>

- Harle, M., & Towns, M. (2011). A review of spatial ability literature, its connection to chemistry, and implications for instruction. *Journal of Chemical Education*, 88(3), 351–360. <https://doi.org/10.1021/ed900003n>
- Head, J., & Bucat, R. (2002). Visualisation and Mental Manipulation of Molecular Structures. *Australian Journal of Education in Chemistry*, 59.
- Hegarty, M., Kozhevnikov, M., & Waller, D. (2008). Perspective taking / spatial orientation test. *Intelligence*, January.
- Hegarty, M., Montello, D. R., Richardson, A. E., Ishikawa, T., & Lovelace, K. (2006). Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence*, 34(2), 151–176. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2005.09.005>
- Hegarty, M., Stieff, M., & Dixon, B. L. (2013). Cognitive change in mental models with experience in the domain of organic chemistry. *Journal of Cognitive Psychology*, 25(2), 220–228. <https://doi.org/10.1080/20445911.2012.725044>
- Hegarty, M., & Waller, D. (2004). A dissociation between mental rotation and perspective-taking spatial abilities. *Intelligence*, 32(2), 175–191. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2003.12.001>
- IRDp. (n.d.). *Coefficient alpha de Cronbach*. IRDP: Institut de Recherche et de Documentation Pédagogique. Retrieved April 20, 2021, from <https://www.irdp.ch/institut/coefficient-alpha-cronbach-2030.html>
- Jamart, B., Bodiguel, J., & Brosse, N. (2009). *Chimie organique (les cours de Paul Arnaud)* (18e ed.). Dunod.
- Johnstone, A. H. (2000). Teaching of Chemistry - Logical or Psychological? *Chem. Educ. Res. Pract.*, 1(1), 9–15. <https://doi.org/10.1039/a9rp90001b>
- Kozma, R., & Russel, J. (2005). Modelling students becoming chemists: Developing representational competence. In J. K. GILBERT (Ed.), *Visualization in Science Education* (pp. 121–145). https://doi.org/10.1007/1-4020-3613-2_4
- Kumi, B. C., Olimpo, J. T., Bartlett, F., & Dixon, B. L. (2013). Evaluating the effectiveness of organic chemistry textbooks in promoting representational fluency and understanding of 2D-3D diagrammatic relationships. *Chemistry Education Research and Practice*, 14(2), 177–187. <https://doi.org/10.1039/c3rp20166j>
- Leyh, B. (2020). De l'aube des lumières au tournant du 20e siècle 1642-1900. In *Cours de l'Université de Liège: CHIM0735-1 "Histoire des sciences et de la chimie."*
- Lohman, D. F. (1979). Spatial ability: A review and reanalysis of the correlation literature. In *Aptitude research project* (pp. 126–127).
- Lowood, H. E. (2021). *Virtual reality*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/technology/virtual-reality>
- McMurry, J., & Simanek, E. (2007). *Chimie organique: les grands principes* (Dunod (ed.); 2e French).
- Ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse. (2019a). Programme de physique-chimie de première générale. *Le Bulletin Officiel de l'éducation Nationale*.
- Ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse. (2019b). Programme de physique-chimie et mathématiques de première STI2D. *Le Bulletin Officiel de l'éducation Nationale*. https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special1/MENE1901591A.htm?cid_bo=138197

- Olimpo, J. T., Kumi, B. C., Wroblewski, R., & Dixon, B. L. (2015). Examining the relationship between 2D diagrammatic conventions and students' success on representational translation tasks in organic chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 16(1), 143–153. <https://doi.org/10.1039/c4rp00169a>
- Paivio, A. (1986). *Mental representations: a dual coding approach* (New York : Oxford University Press ; Oxford [Oxfordshire] : Clarendon Press (ed.)).
- Pirson, P., Bribosia, A., Snauwaert, P., Tadino, A., & Van Elsuwé, R. (2017). *Chimie 5e 6e sciences de base* (VAN IN (ed.); 3e ed.). de boeck.
- Pirson, P., Bribosia, A., Snauwaert, P., Tadino, A., & Van Elsuwé, R. (2018). *Chimie 6e sciences générales* (VAN IN (ed.); 3e ed.). de boeck.
- Prosperi, O. (2016). Le réalisme avec degrés de certitude. *Mesure et Évaluation En Éducation*, 38(1), 121–140. <https://doi.org/10.7202/1036553ar>
- Rapp, D. N. (2005). Mental models: theoretical issues for visualizations in science education. In John K. Gilbert (Ed.), *Visualization in science education* (pp. 43–60). Springer.
- SMART — Système Méthodologique d'Aide à la Réalisation de tests. (n.d.). *Consignes concernant les degrés de certitude* . 1.
- Statistica. (n.d.). *Ajustement de Bonferroni*. Retrieved December 17, 2021, from <https://www.statsoft.fr/concepts-statistiques/glossaire/a/bonferroni.html>
- Stieff, M. (2011). When is a molecule three dimensional? A task-specific role for imagistic reasoning in advanced chemistry. *Science Education*, 95(2), 310–336. <https://doi.org/10.1002/sce.20427>
- Stieff, M., Bateman, R., & Uttal, D. (2005). Teaching and learning with three-dimensional representations. In John K. Gilbert (Ed.), *Visualization in science education* (pp. 93–118). Springer.
- Stieff, M., Ryu, M., Dixon, B., & Hegarty, M. (2012). The role of spatial ability and strategy preference for spatial problem solving in organic chemistry. *Journal of Chemical Education*, 89(7), 854–859. <https://doi.org/10.1021/ed200071d>
- Stull, A. T., Barrett, T., & Hegarty, M. (2013). Usability of concrete and virtual models in chemistry instruction. *Computers in Human Behavior*, 29(6), 2546–2556. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2013.06.012>
- Stull, A. T., Hegarty, M., Dixon, B., & Stieff, M. (2012). Representational Translation With Concrete Models in Organic Chemistry. *Cognition and Instruction*, 30(4), 404–434. <https://doi.org/10.1080/07370008.2012.719956>
- Taber, K. S. (2018). The Use of Cronbach's Alpha When Developing and Reporting Research Instruments in Science Education. *Research in Science Education*, 48(6), 1273–1296. <https://doi.org/10.1007/s11165-016-9602-2>
- Taskin, V., Bernholt, S., & Parchmann, I. (2015). An inventory for measuring student teachers' knowledge of chemical representations: design, validation, and psychometric analysis. *Chemistry Education Research and Practice*, 16(3), 460–477. <https://doi.org/10.1039/c4rp00214h>
- Tsaparlis, G., Pappa, E. T., & Byers, B. (2018). Teaching and learning chemical bonding: Research-based evidence for misconceptions and conceptual difficulties experienced by students in upper secondary schools and the effect of an enriched text. *Chemistry Education Research and Practice*, 19(4), 1253–1269. <https://doi.org/10.1039/c8rp00035b>

- Tuckey, H., Selvaratnam, M., & Bradley, J. (1990). Identification and rectification of student difficulties concerning three-dimensional structures, rotation, and reflection. *Journal of Chemical Education*, 67(6), 460–464. <https://doi.org/10.1021/ed068p460>
- Underwood, S. M., Reyes-Gastelum, D., & Cooper, M. M. (2016). When do students recognize relationships between molecular structure and properties? A longitudinal comparison of the impact of traditional and transformed curricula. *Chemistry Education Research and Practice*, 17(2), 365–380. <https://doi.org/10.1039/c5rp00217f>
- Upahi, J. E., & Ramnarain, U. (2019). Representations of chemical phenomena in secondary school chemistry textbooks. *Chemistry Education Research and Practice*, 20(1), 146–159. <https://doi.org/10.1039/c8rp00191j>
- van't Hoff, J. . (1875). *La chimie dans l'espace* (P.M. Bazendijk (ed.)).
- Wang, L., Cohen, A. S., & Carr, M. (2014). Spatial ability at two scales of representation: A meta-analysis. *Learning and Individual Differences*, 36, 140–144. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2014.10.006>
- Wu, H. K., Krajcik, J. S., & Soloway, E. (2001). Promoting understanding of chemical representations: Students' use of a visualization tool in the classroom. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(7), 821–842. <https://doi.org/10.1002/tea.1033>
- Yuan, L., Kong, F., Luo, Y., Zeng, S., Lan, J., & You, X. (2019). Gender differences in large-scale and small-scale spatial ability: A systematic review based on behavioral and neuroimaging research. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 13(June), 1–23. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2019.00128>
- Zacks, J. M. (2008). Neuroimaging studies of mental rotation: A meta-analysis and review. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(1), 1–19. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20013>

Annexes

1) Annexe 1 : Comparaison de six applications pour smartphone

	WebMO	ModelAR	Molecule 3D	Mirage : Molécules simples	Mirage : Molecular geometry	3D VSEPR
Type d'outils (animations, modèles statiques, AR, ...)	Modèles statiques	Modèles statiques et réalité augmentée	Modèles statiques	Réalité augmentée	Réalité augmentée	Modèles statiques
Construction des molécules	Manuelle	Manuelle	Choix dans une liste	Choix parmi les huit cartes possibles (CH ₄ , CO ₂ , H ₂ O, éthane, propane, NH ₃ , O ₂ , éthyne)	Choix parmi les douze cartes possibles (6 molécules : paracétamol, méthane, ammoniac, eau, dioxyde de carbone et méthanimine)	Non, l'application sert uniquement à visualiser les différentes géométries moléculaires possibles
Type de représentations (sphères et tiges, squelette, ...)	Sphères et tiges	Sphères et tiges	Sphères et tiges, squelette ou avec les sphères de Van der Waals (photos 1)	Sphères et tiges	Sphères et tiges	Sphères et tiges
Illustration des symboles chimiques sur les sphères	/	Oui	/	/	/	/
Rotation	Oui	Oui	Oui	Non mais changement de perspective en fonction de la manipulation de la carte ou du téléphone (photos 2)	Non mais changement de perspective en fonction de la manipulation de la carte ou du téléphone	/
Etape avant d'obtenir d'autres informations	Oui, il est nécessaire de nettoyer la géométrie, l'hybridation, ... avant de pouvoir obtenir d'autres informations	/	/	/	/	/
Ajout des hydrogènes	Il est possible d'ajouter de façon automatique tous les hydrogènes	Il est possible d'ajouter les hydrogènes de façon automatique	/	/	/	/
Orbitales	- Calcul des orbitales moléculaires - Illustration de la densité d'électrons - Illustration du potentiel électrostatique	/	/	/	/	/

Eléments de symétrie	L'application nous donne le groupe ponctuel. Il est possible de visualiser l'entièreté des éléments de symétrie ou bien un seul ou deux. (Photos 3)	/	/	/	/	/
Vibrations	Calcul des modes de vibrations	/	/	/	/	/
Autres informations	/	/	- Calcul du poids moléculaire - Formule brute	/	/	/
Limitations	Il est possible de construire toutes les molécules car nous avons accès à presque l'entièreté du tableau périodique mais au niveau du reste, nous sommes limités à 9 atomes (sinon il faut acheter la version premium).	- Nous sommes limités aux atomes de carbone, azote, oxygène, soufre, chlore et brome. - Il est possible de représenter la molécule dans l'environnement réel mais attention, la molécule ne tourne pas en fonction de notre position, il faut effectuer les rotations manuellement	Nous sommes limités aux molécules de la liste mais celle-ci contient des molécules relativement grosses comme des vitamines ou la chlorophylle	Nous sommes limités aux huit cartes	Nous sommes limités aux 12 cartes	Pas de possibilité de construire
Remarques	Lien avec des bases de données	/	Lien avec des bases de données Il est possible de modifier les couleurs des sphères comme nous le souhaitons	- Il faut imprimer les 8 cartes - Lien avec des documents annexes (légende des couleurs et exemple sur la molécule d'eau) - Proposition d'activité de 30 minutes : par groupes de 2 à 4, il faut compléter un tableau demandant le nom de la molécule, la composition et la formule chimique pour les différentes cartes.	- Il faut imprimer les 12 cartes - Proposition d'activité dans laquelle les étudiants doivent expliquer la géométrie des molécules par groupes de 2 à 4 à l'aide de la structure de Lewis, ... - Pour chaque molécule, il y a une carte avec la molécule en réalité augmentée et une carte de réponse qui permet de visualiser les doublets liants et les doublets non-liants en réalité augmentée (photos 4)	L'application illustre les paires non-liantes

Photos 1 :

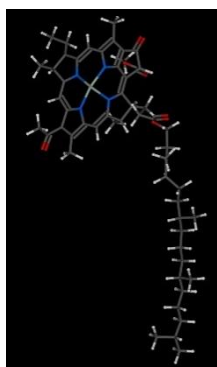


Figure 49 : Représentation de la chlorophylle en sphères et tiges dans l'application "molecule 3D"

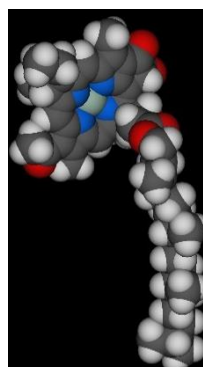


Figure 50 : Représentation de la chlorophylle avec les sphères de Van der Waals "molecule 3D"

Photos 2 :

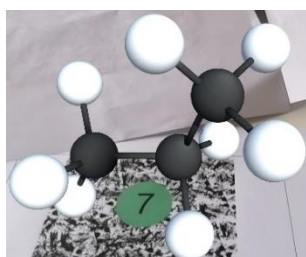


Figure 51 : Orientation de face de la molécule de propane en réalité augmentée de l'application "mirage : molécules simples"



Figure 52 : Orientation de profil de la molécule de propane en réalité augmentée de l'application "mirage : molécules simples"

Photos 3 :

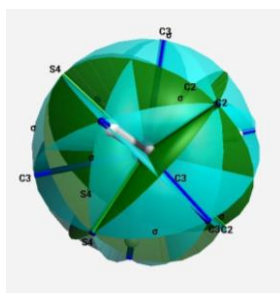


Figure 53 : Ensemble des éléments de symétrie de la molécule de méthane dans l'application WebMO

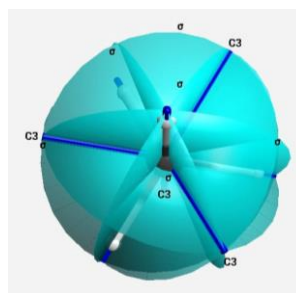


Figure 54 : Deux des éléments de symétrie de la molécule de méthane dans l'application WebMO

Photos 4 :

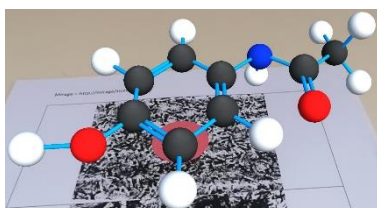
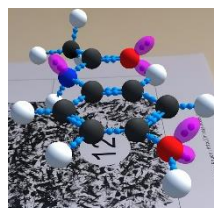


Figure 55 : Molécule de paracétamol dans la fiche de travail de l'application "mirage : molecular geometry"



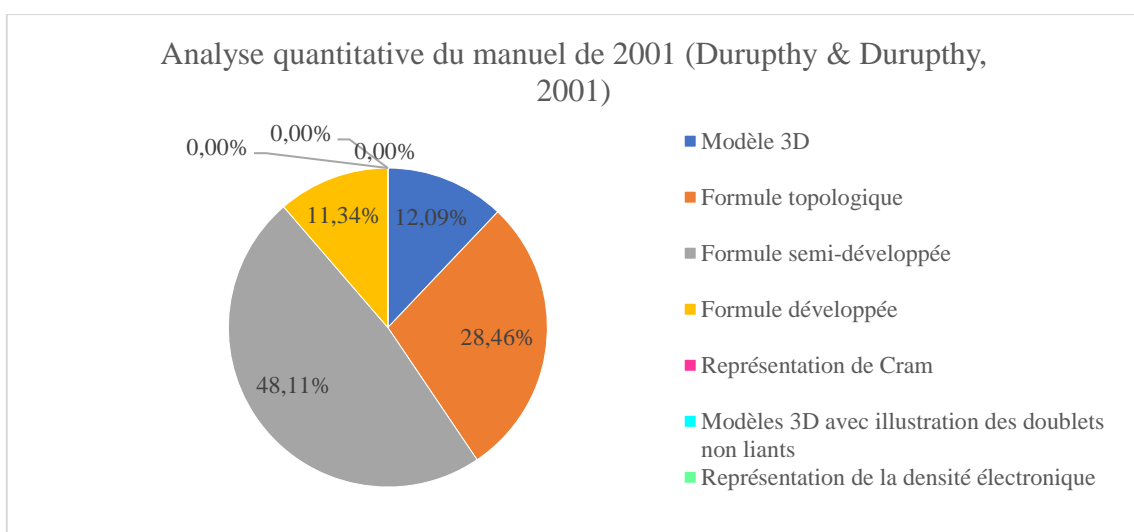
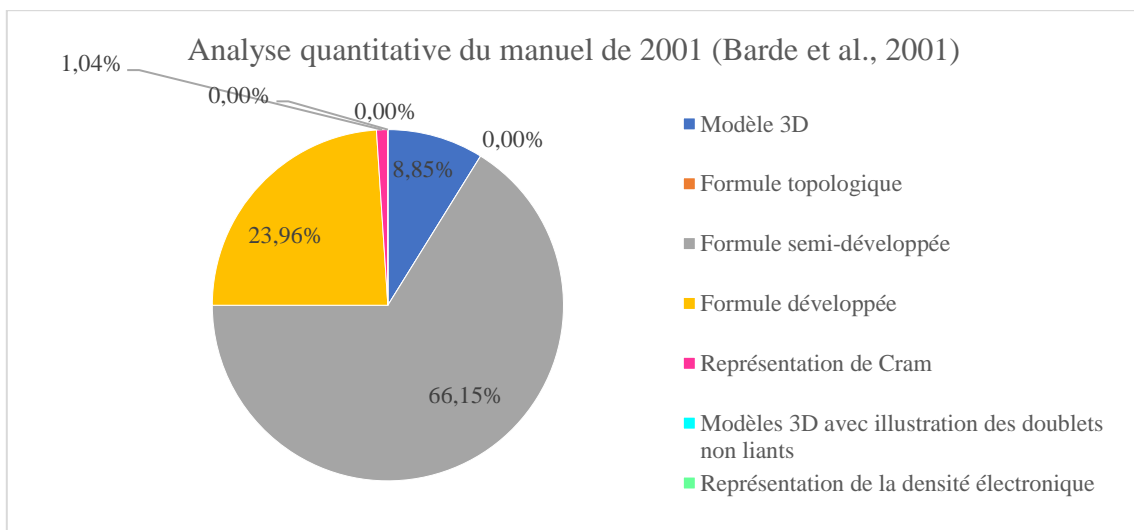
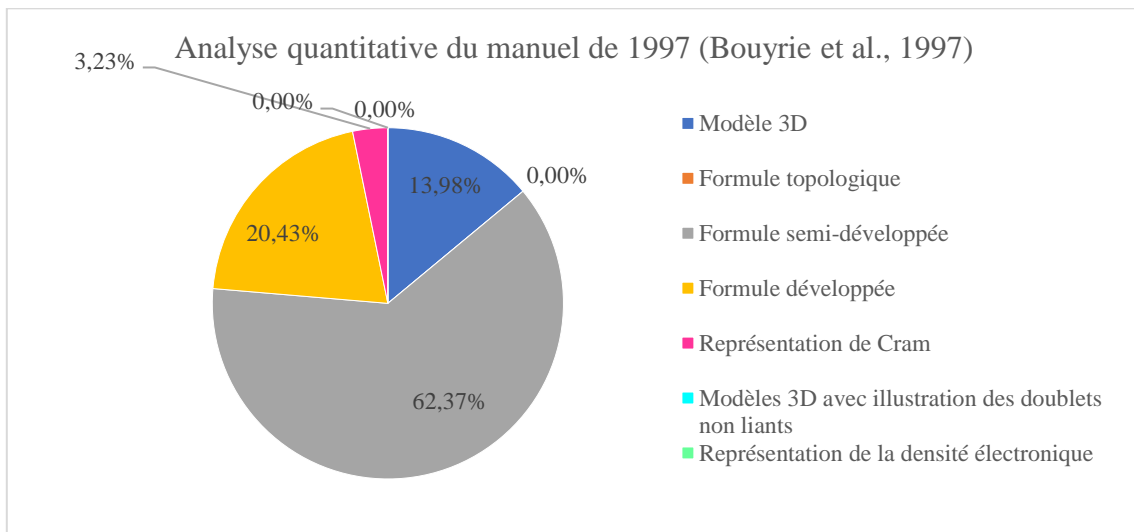
	Doublets liants
	Doublets non liants

Figure 56 : Molécule de paracétamol dans la fiche de réponse de l'application "mirage : molecular geometry"

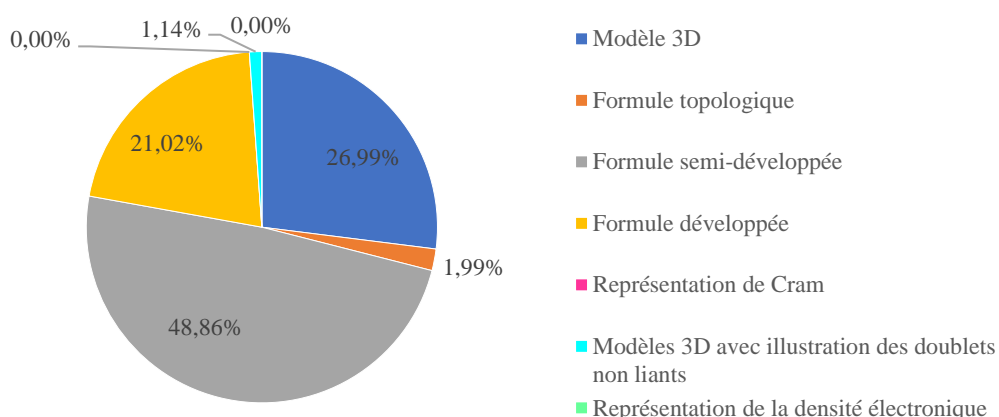
2) Annexe 2 : Critères d'analyse des ouvrages didactiques de chimie organique

<u>Critères</u>	<u>Typologie pour chaque critère</u>
C1 : Type de représentation	<ul style="list-style-type: none"> i. Formule développée ii. Formule semi-développée iii. Formule topologique iv. Photos de modèles 3D v. Animations 3D vi. Représentation de Cram vii. Projection de Newman viii. Projection de Fischer ix. Représentation multiple (Cram et Newman par exemple)
C2 : Interprétation des caractéristiques des représentations	<ul style="list-style-type: none"> i. Explicite ii. Implicite iii. Ambigüe
C3 : Lien entre la figure et le texte (que ce soit au niveau de la légende ou indiqué dans le texte)	<ul style="list-style-type: none"> i. Complètement en relation et lié au texte ii. Complètement en relation mais non lié au texte iii. Partiellement en relation et lié au texte iv. Partiellement en relation mais non lié au texte v. Pas en relation
C4 : Degré de corrélation entre 2D et 3D dans les représentations multiples	<ul style="list-style-type: none"> i. Suffisamment lié ii. Insuffisamment lié iii. Non lié
C5 : Relation aux propriétés	<ul style="list-style-type: none"> i. Polarité ii. Solubilité iii. Interactions inter- ou intramoléculaire iv. Réactivité v. Autres vi. Non

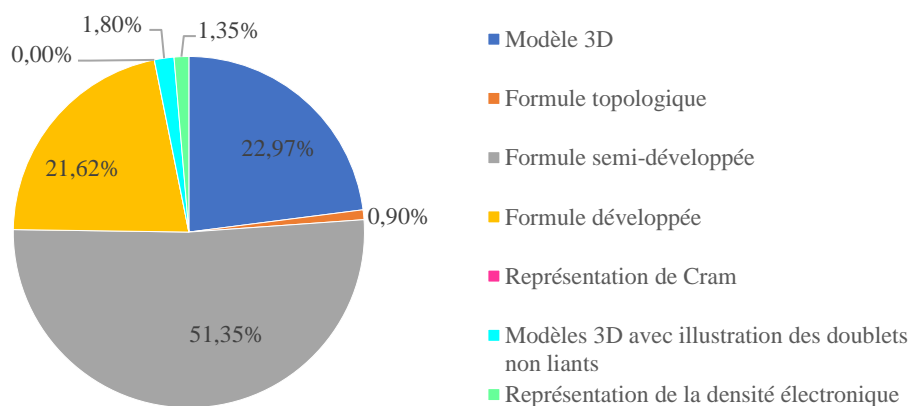
3) Annexe 3 : Analyse quantitative des manuels de l'enseignement secondaire supérieur



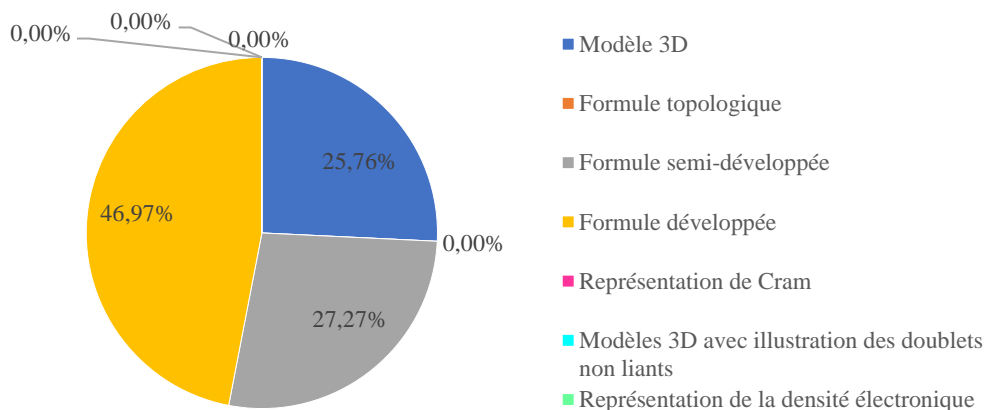
Analyse quantitative du manuel de 2015 (Dulaurans et al., 2015)



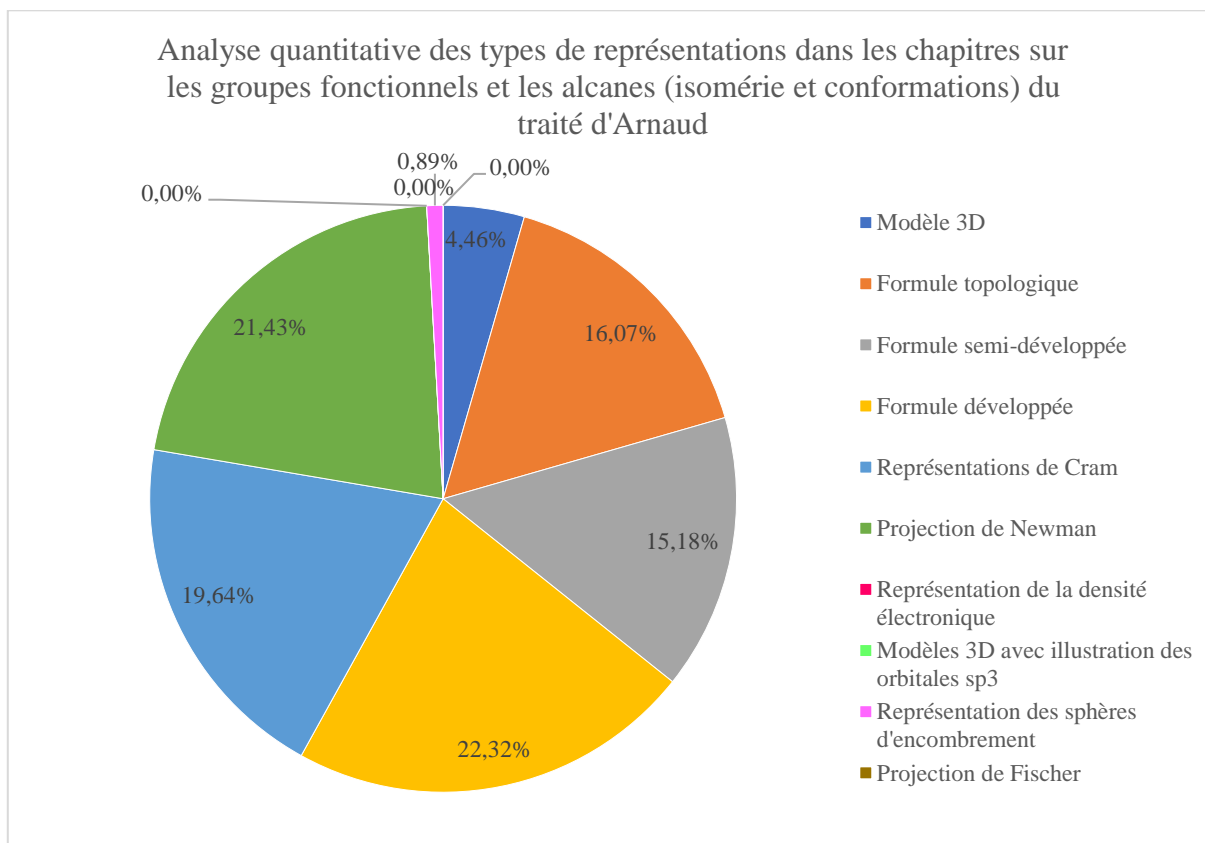
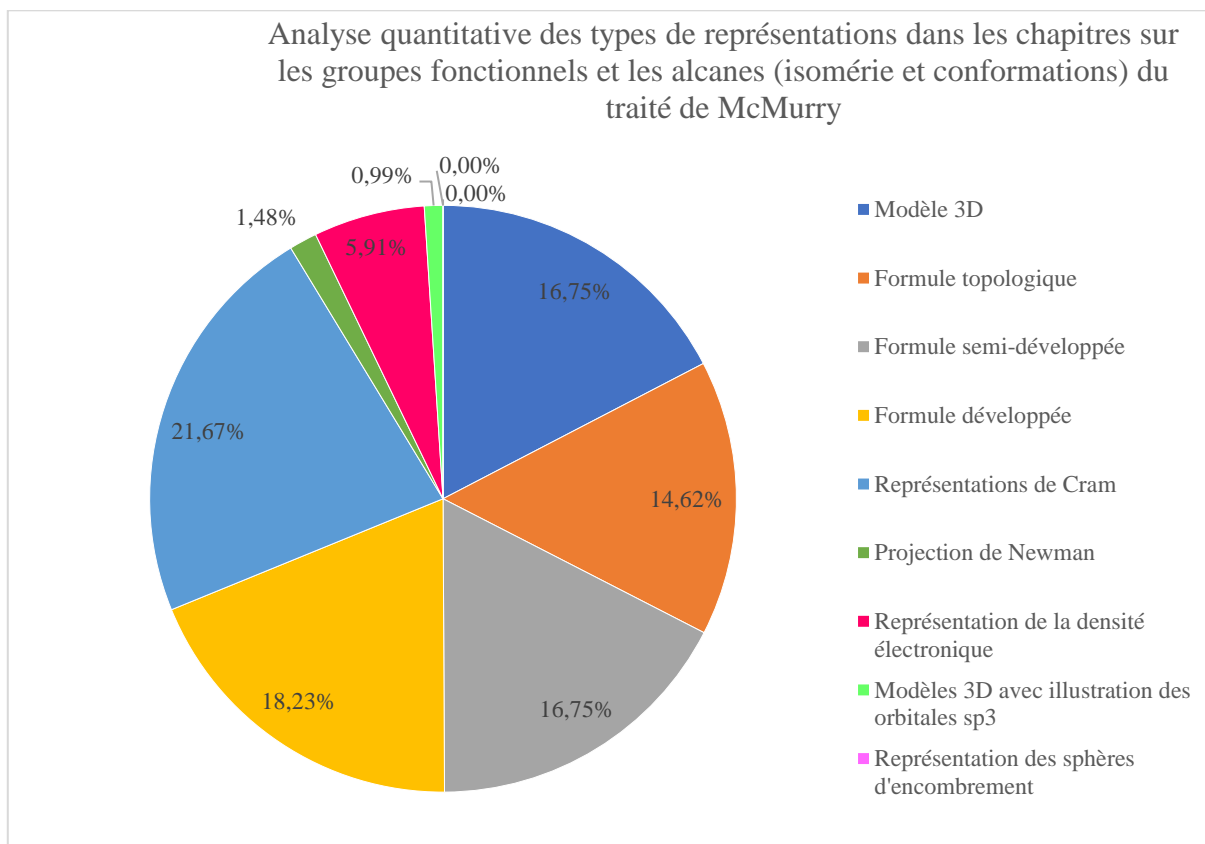
Analyse quantitative du manuel de 2019 (Bellier et al., 2019)



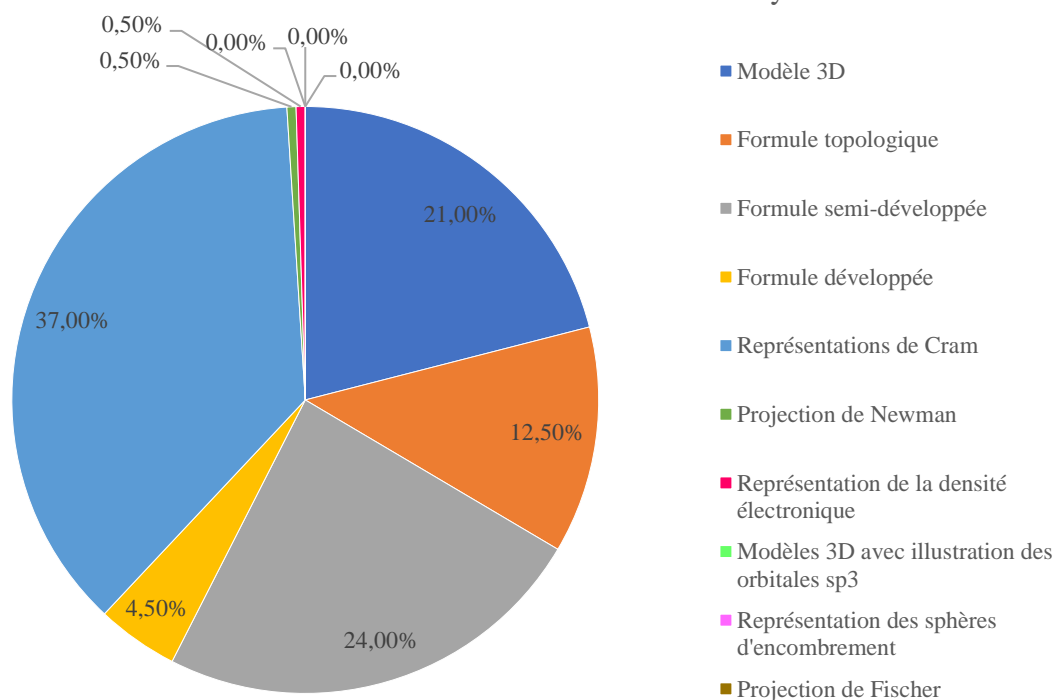
Analyse quantitative du manuel de 2020 (Chaffard et al., 2020)



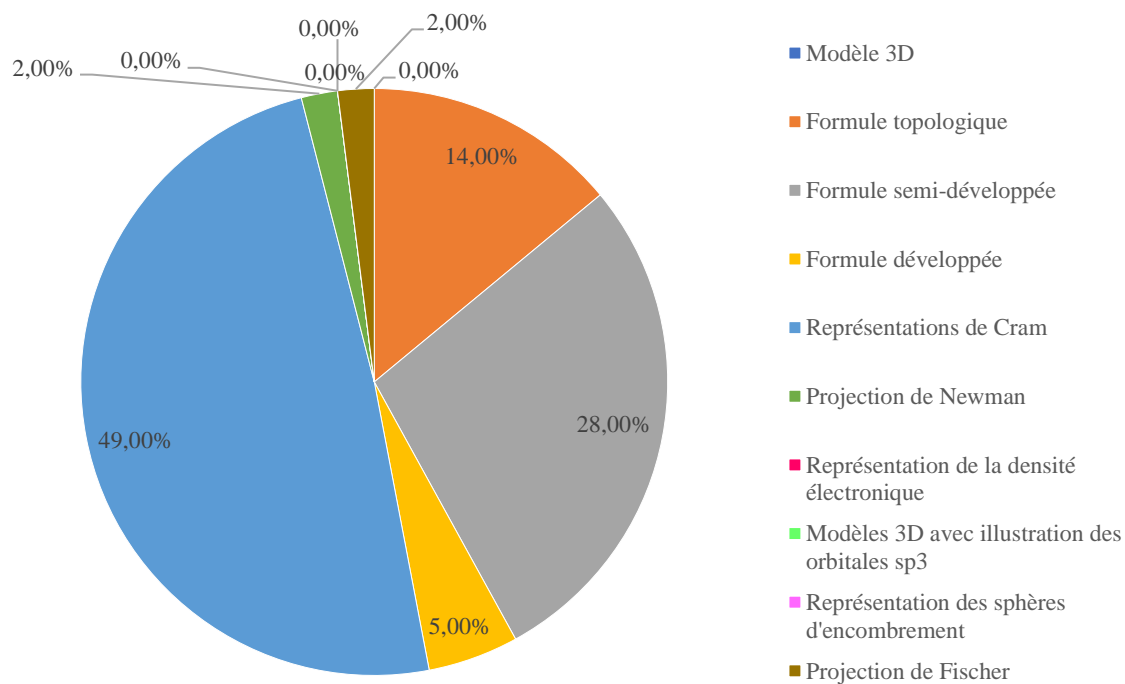
4) Annexe 4 : Analyse quantitative des traités utilisés dans les études supérieures



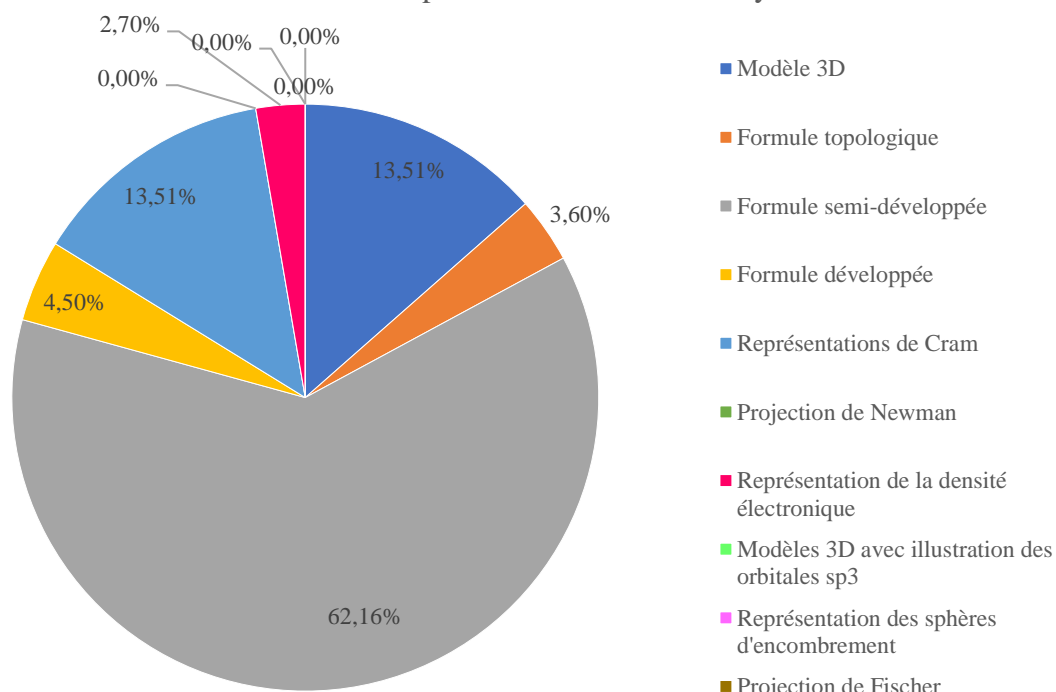
Analyse quantitative des types de représentations dans les chapitres sur la stéréochimie et la chiralité du traité de McMurry



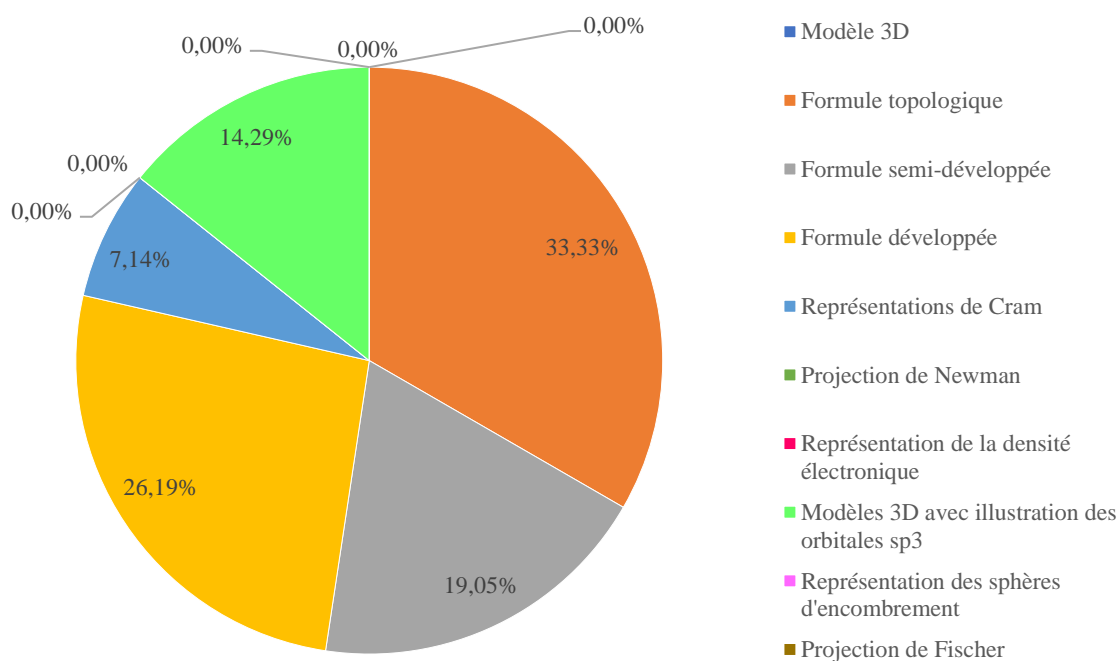
Analyse quantitative des types de représentations dans les chapitres sur la stéréochimie et la chiralité du traité d'Arnaud



Analyse quantitative des types de représentations dans les chapitres sur la substitution nucléophile du traité de McMurry



Analyse quantitative des types de représentations dans les chapitres sur la substitution nucléophile du traité d'Arnaud



5) Annexe 5 : Questionnaire sur la visualisation tridimensionnelle en chimie organique pour les étudiants d'université (version initiale)

Ce test s'inscrit dans le cadre d'un mémoire de fin d'études en didactique de la chimie et a pour but de diagnostiquer les forces et les faiblesses des étudiant·e·s dans les problèmes où la visualisation dans l'espace des molécules organiques est importante.

Ce test consiste en la réalisation de différents exercices relatifs à 6 thèmes différents : les liens entre structure et propriétés, la traduction entre différents types de représentations, la symétrie dans les molécules, la perception dans l'espace de structures tridimensionnelles, la perception des opérations de rotation des molécules et enfin des exercices de perception des opérations de rotation et de réflexion au travers de plans miroirs. Ce questionnaire est composé de 20 questions sous forme de QCM avec des coefficients de certitude et devrait prendre maximum 45 minutes. Ce test n'interviendra absolument pas dans l'évaluation de votre cursus. Par conséquent, vous n'avez pas besoin de réaliser une quelconque stratégie par rapport à ces coefficients de certitude. Entourez donc le coefficient qui correspond au mieux à votre degré de certitude sachant qu'ils vont de 0 (pas du tout sûr de vous) à 5 (vous êtes totalement certain que votre réponse est correcte).

Si vous considérez que la réponse a une probabilité d'être correcte comprise entre...	Entourez le coefficient de certitude :
... 0% et 25%	0
... 25% et 50%	1
... 50% et 70%	2
... 70% et 85%	3
... 85% et 95%	4
... 95% et 100%	5

1. Quel est votre genre ?

- Femme
- Homme
- Autre

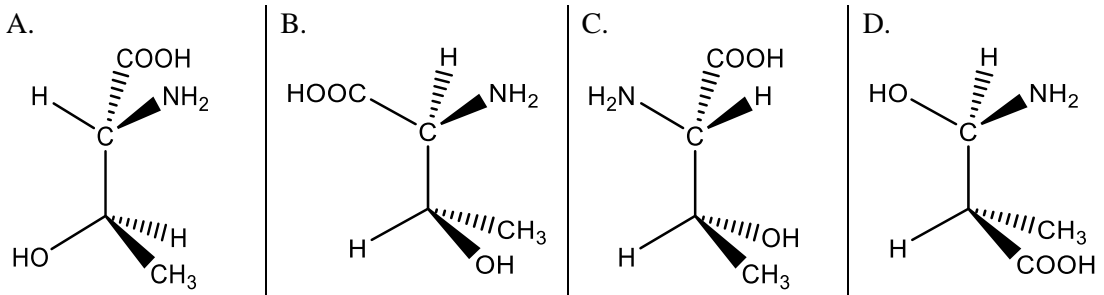
2. Quelle est votre filière d'études ?

.....

3. Pensez-vous qu'il est important de pouvoir visualiser les molécules en trois dimensions ?

- Tout à fait d'accord
- D'accord
- Plutôt d'accord
- Plutôt pas d'accord
- Pas d'accord
- Pas du tout d'accord

4. Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont énantiomères l'un de l'autre (images dans un miroir non superposables) ?



- A/B
- A/C
- A/D
- B/C
- B/D
- C/D
- Aucune

Coefficient de certitude :

0 1 2 3 4 5

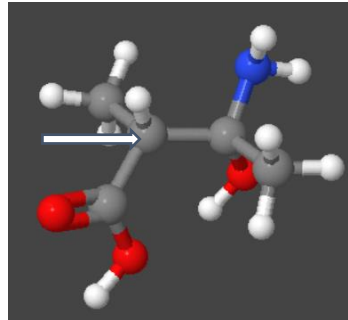
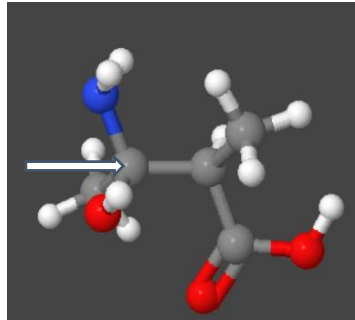
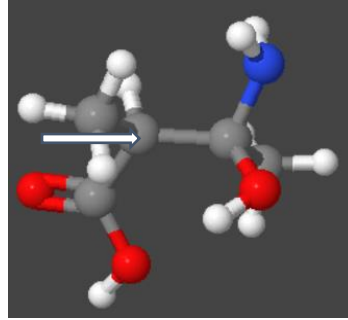
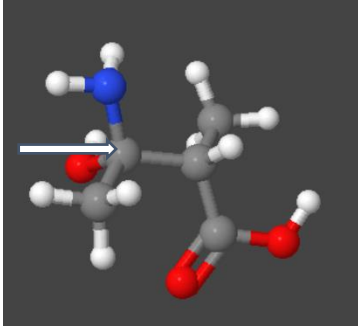
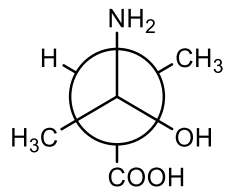
5. Si nous considérons une molécule de BF_3 , combien d'atomes au maximum sont contenus dans un plan de symétrie donné ?

- 1
- 2
- 3
- 4

Coefficient de certitude :

0 1 2 3 4 5

6. Quel modèle 3D correspond à la projection de Newman suivante lorsque nous regardons dans la direction indiquée par la flèche ?



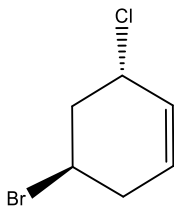
Aucune

Coefficient de certitude :

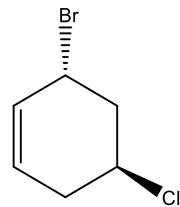
0 1 2 3 4 5

7. Quelles molécules sont identiques ?

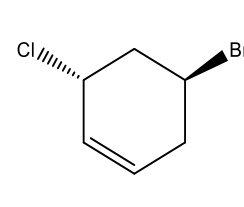
A.



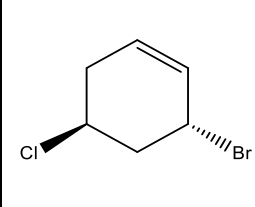
B.



C.



D.

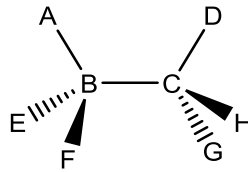


- A/C
- B/C
- A/D
- B/D
- Toutes ces molécules sont différentes.

Coefficient de certitude :

0 1 2 3 4 5

8. Dans la représentation suivante, quels atomes (représentés par les symboles E, F, G et H) sont les plus proches et les plus éloignés de l'observateur (c'est-à-dire de vous) ?



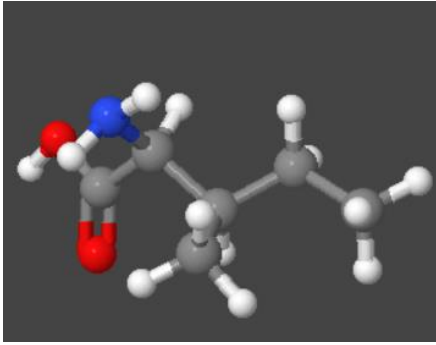
- F et H sont les plus éloignés et E et G sont les plus proches
- F et H sont les plus proches et E et G sont les plus éloignés
- F et G sont les plus proches et E et H sont les plus éloignés
- F et G sont les plus éloignés et E et H sont les plus proches

Coefficient de certitude :

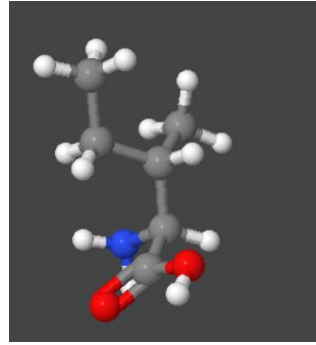
0 1 2 3 4 5

9. Quelles molécules sont images l'une de l'autre dans un miroir ?

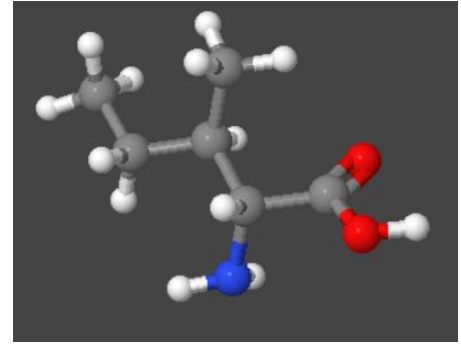
A.



B.



C.

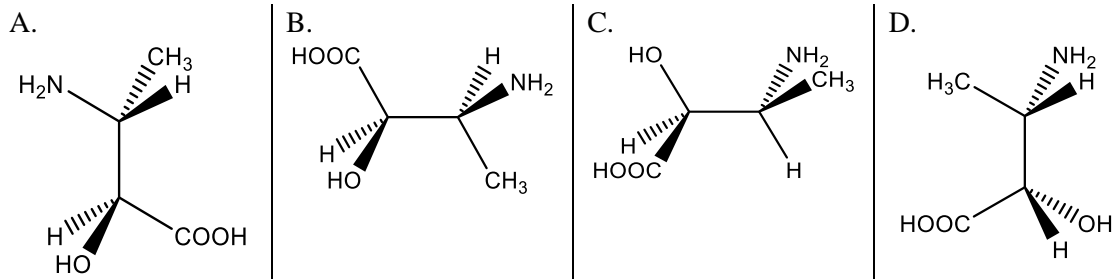


- A/B
- A/C
- B/C
- Aucune

Coefficient de certitude :

0 1 2 3 4 5

10. Quelles molécules sont identiques ?

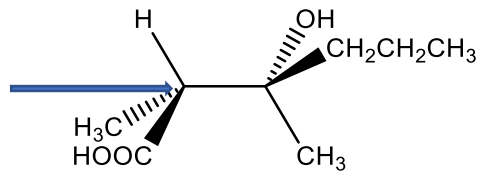


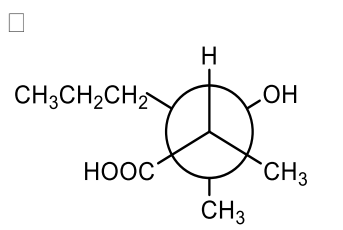
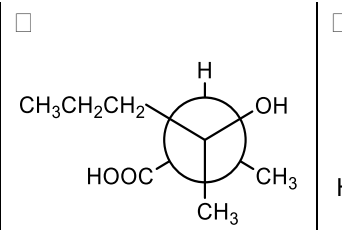
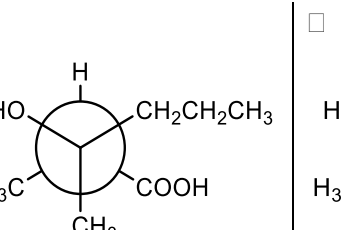
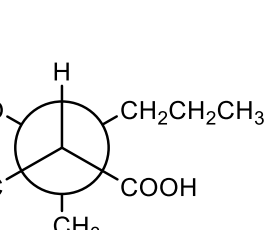
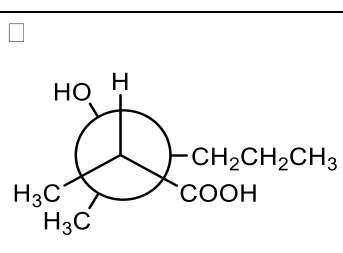
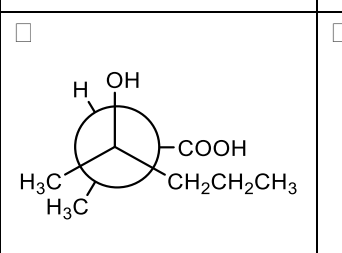
- A/B
 B/C
 C/A
 C/D
 Aucune, elles sont toutes différentes

Coefficient de certitude :

0 1 2 3 4 5

11. Quelle projection de Newman correspond à la molécule suivante lorsqu'on la regarde dans la direction indiquée par la flèche ?

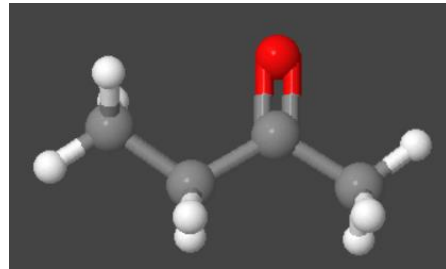
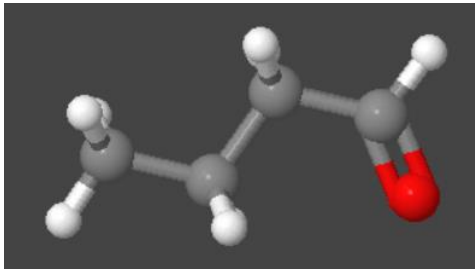
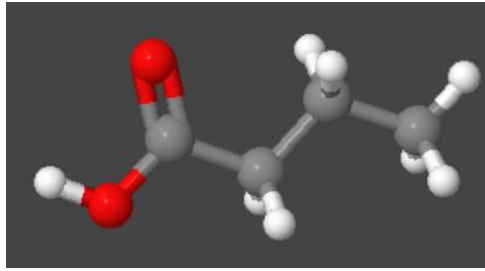
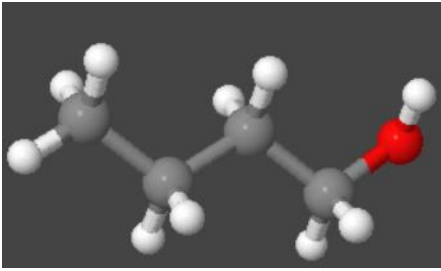


<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	Aucune		

Coefficient de certitude :

0 1 2 3 4 5

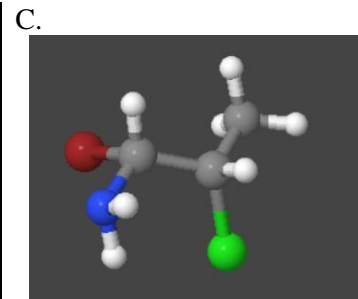
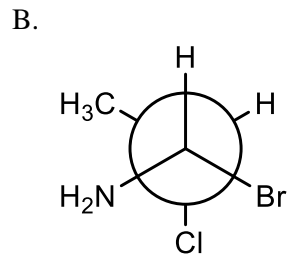
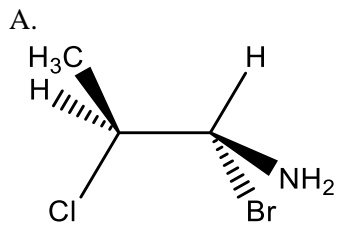
12. Quel composé parmi les suivants possède la plus haute température d'ébullition ?



Coefficient de certitude :

0 1 2 3 4 5

13. Quelles représentations illustrent la même molécule ?



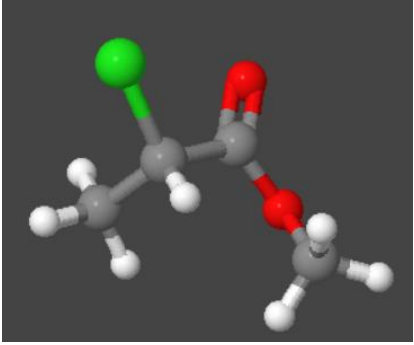
- A/B
 A/C
 B/C
 Aucune, elles sont toutes différentes

Coefficient de certitude :

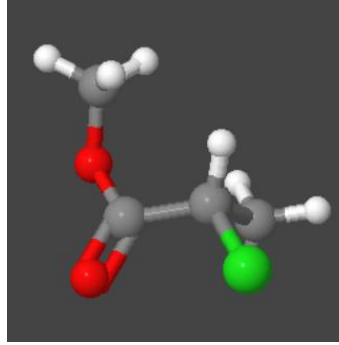
0 1 2 3 4 5

14. Lesquelles de ces structures sont identiques ?

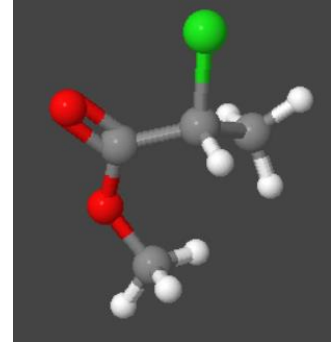
A.



B.



C.



- A/B
- A/C
- B/C
- Aucune, elles sont toutes différentes

Coefficient de certitude :

0 1 2 3 4 5

15. Si nous considérons une molécule de CH_2Cl_2 , combien d'atomes au maximum sont contenus dans un plan de symétrie donné ?

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

Coefficient de certitude :

0 1 2 3 4 5

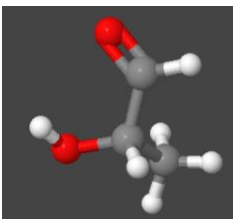
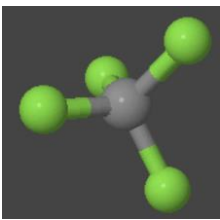
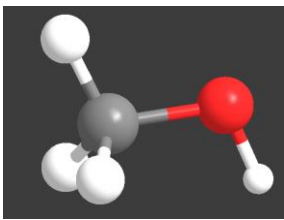
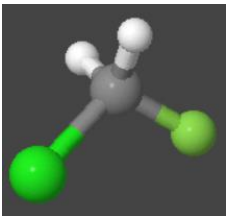
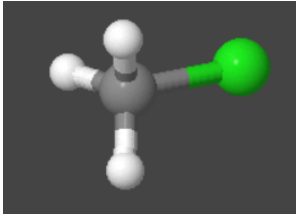
16. Quelle(s) information(s) peut-on déterminer directement et indirectement à partir de la structure de Lewis d'une molécule en utilisant toutes les connaissances que vous possédez ? Cochez la ou les information(s) que vous pensez pouvoir déterminer et dans ce cas-là, cochez si vous pensez qu'elle est directe ou indirecte.

<input type="checkbox"/> Polarité	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement
<input type="checkbox"/> Eléments chimiques présents	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement
<input type="checkbox"/> Réactivité	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement
<input type="checkbox"/> Types de liaison	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement
<input type="checkbox"/> Température d'ébullition relative	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement
<input type="checkbox"/> Nombre de liaisons entre des atomes particuliers	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement
<input type="checkbox"/> Angles de liaison	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement
<input type="checkbox"/> Forces intermoléculaires	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement
<input type="checkbox"/> Charges formelles	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement
<input type="checkbox"/> Température de fusion relative	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement
<input type="checkbox"/> Géométrie moléculaire	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement
<input type="checkbox"/> Nombre d'électrons de valence	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement
<input type="checkbox"/> Résonance potentielle	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement
<input type="checkbox"/> Acidité/basicité	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement
<input type="checkbox"/> Aucune information		

Coefficient de certitude :

0 1 2 3 4 5

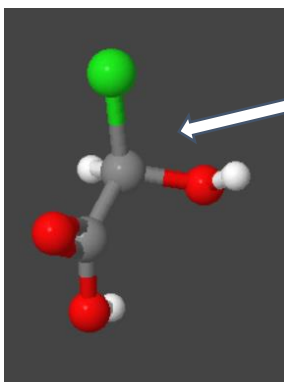
17. Quelle molécule parmi les suivantes ne possède pas de plan de symétrie ?

<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>			

Coefficient de certitude :

0 1 2 3 4 5

18. Comment dessineriez-vous la molécule suivante en regardant dans la direction indiquée par la flèche ?

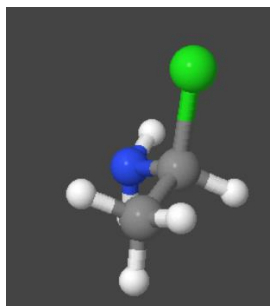


Aucune

Coefficient de certitude :

0 1 2 3 4 5

19. Dans le modèle 3D suivant, quel atome ou groupe d'atomes est le plus proche et le plus éloigné de l'observateur (c'est-à-dire vous) ?



- CH₃ le plus éloigné et NH₂ le plus proche
- CH₃ le plus éloigné et Cl le plus proche
- NH₂ le plus éloigné et CH₃ le plus proche
- NH₂ le plus éloigné et Cl le plus proche

Coefficient de certitude :

0 1 2 3 4 5

20. Reliez par des flèches ces différents composés avec leur valeur de moment dipolaire. Un même moment dipolaire peut être associé à plusieurs composés.

- | | | |
|--|--------------------------|-------------|
| DMSO <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 3,96 Debye |
| CCl ₄ <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 1,18 Debye |
| Ether diéthylique <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 0,363 Debye |
| BCl ₃ <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 0,08 Debye |
| n-hexane <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 0 Debye |
| Ethylène (éthène) <input type="checkbox"/> | | |
| Propène <input type="checkbox"/> | | |

Coefficient de certitude :

0 1 2 3 4 5

Fin

Merci beaucoup pour votre participation

6) Annexe 6 : Questionnaire sur la visualisation tridimensionnelle en chimie organique pour les étudiants d'université (version finale)

Questionnaire sur la visualisation tridimensionnelle en chimie organique

Ce test s'inscrit dans le cadre d'un mémoire de fin d'études en didactique de la chimie et a pour but de diagnostiquer les forces et les faiblesses des étudiant-e-s dans les problèmes où la visualisation dans l'espace des molécules organiques est importante.

Ce test consiste en la réalisation de différents exercices relatifs à **6 thèmes différents** : les liens entre structure et propriétés, la traduction entre différents types de représentations, la symétrie dans les molécules, la perception dans l'espace de structures tridimensionnelles, la perception des opérations de rotation des molécules et enfin des exercices de perception des opérations de rotation et de réflexion au travers de plans miroirs. Ce questionnaire est composé de 21 questions sous forme de **QCM avec des degrés de certitude** et devrait prendre **maximum 45 minutes**. **Ce test n'interviendra absolument pas dans l'évaluation de votre cursus**. Par conséquent, vous n'avez pas besoin de réaliser une quelconque stratégie par rapport à ces coefficients de certitude. Entourez donc le coefficient qui correspond au mieux à votre degré de certitude. **Une seule réponse possible sauf s'il est indiqué le contraire dans l'énoncé. L'utilisation de modèles moléculaires est autorisée.**

1. Quel est votre genre ?

- Femme
- Homme
- Autre

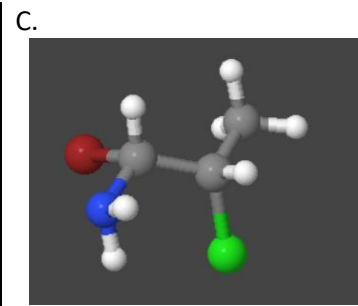
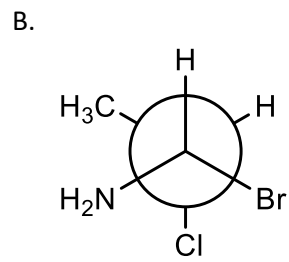
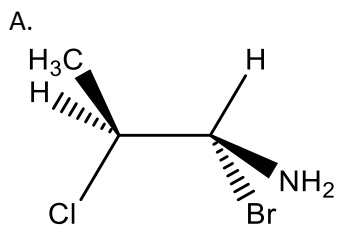
2. Quelle est votre filière d'études ?

.....

3. Pensez-vous qu'il est important de pouvoir visualiser les molécules en trois dimensions ?

- Tout à fait d'accord
- D'accord
- Plutôt d'accord
- Plutôt pas d'accord
- Pas d'accord
- Pas du tout d'accord

4. Quelles représentations illustrent la même molécule ?



- A/B
- A/C
- B/C
- Aucune, elles sont toutes différentes

Votre degré de certitude :

0% 20% 40% 60% 80% 100%

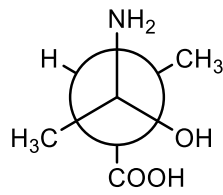
5. Si nous considérons une molécule de BF_3 , combien d'atomes au maximum sont contenus dans un plan de symétrie donné ?

- 1
- 2
- 3
- 4

Votre degré de certitude :

0% 20% 40% 60% 80% 100%

6. Quel modèle 3D correspond à la projection de Newman suivante lorsque nous regardons dans la direction indiquée par la flèche ?

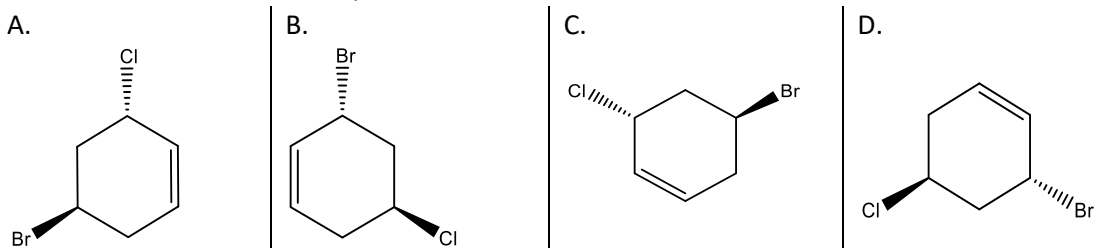


<input type="checkbox"/> 	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> 	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Aucune	

Votre degré de certitude :

0% 20% 40% 60% 80% 100%

7. Quelles molécules sont identiques ?

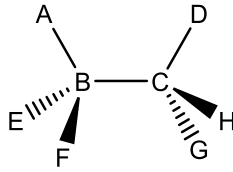


- A/C
- B/C
- A/D
- B/D
- Toutes ces molécules sont différentes.

Votre degré de certitude :

0% 20% 40% 60% 80% 100%

8. Dans la représentation suivante, quels atomes (représentés par les symboles E, F, G et H) sont les plus proches et les plus éloignés de l'observateur (c'est-à-dire de vous) ?



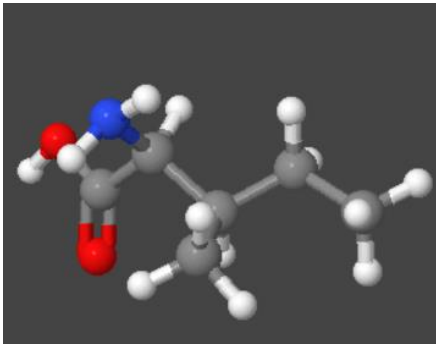
- F et H sont les plus éloignés et E et G sont les plus proches
- F et H sont les plus proches et E et G sont les plus éloignés
- F et G sont les plus proches et E et H sont les plus éloignés
- F et G sont les plus éloignés et E et H sont les plus proches

Votre degré de certitude :

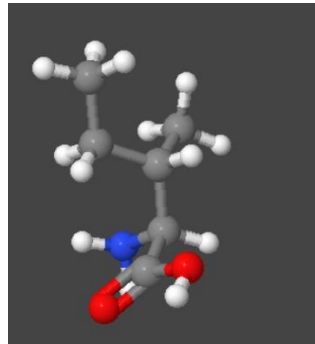
0% 20% 40% 60% 80% 100%

9. Quelles molécules sont images l'une de l'autre dans un miroir ?

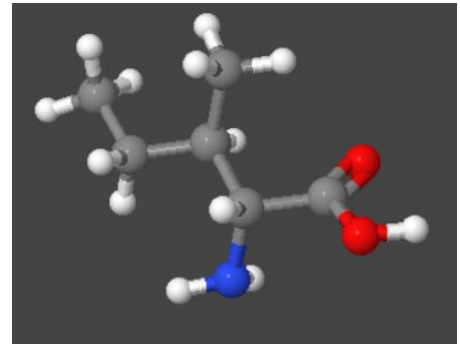
A.



B.



C.

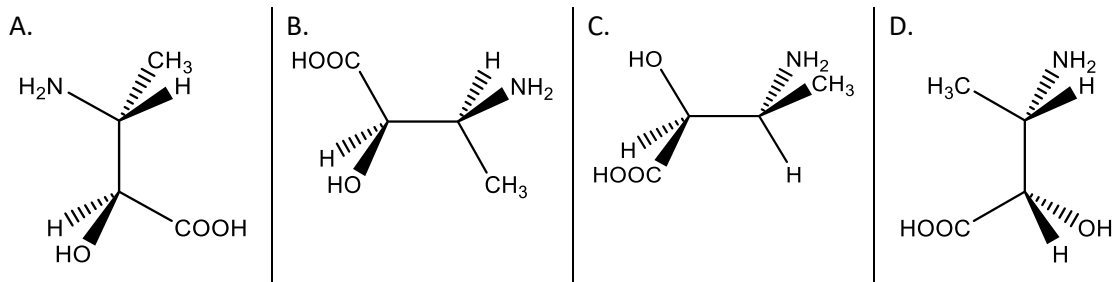


- A/B
- A/C
- B/C
- Aucune

Votre degré de certitude :

0% 20% 40% 60% 80% 100%

10. Quelles molécules sont identiques ?

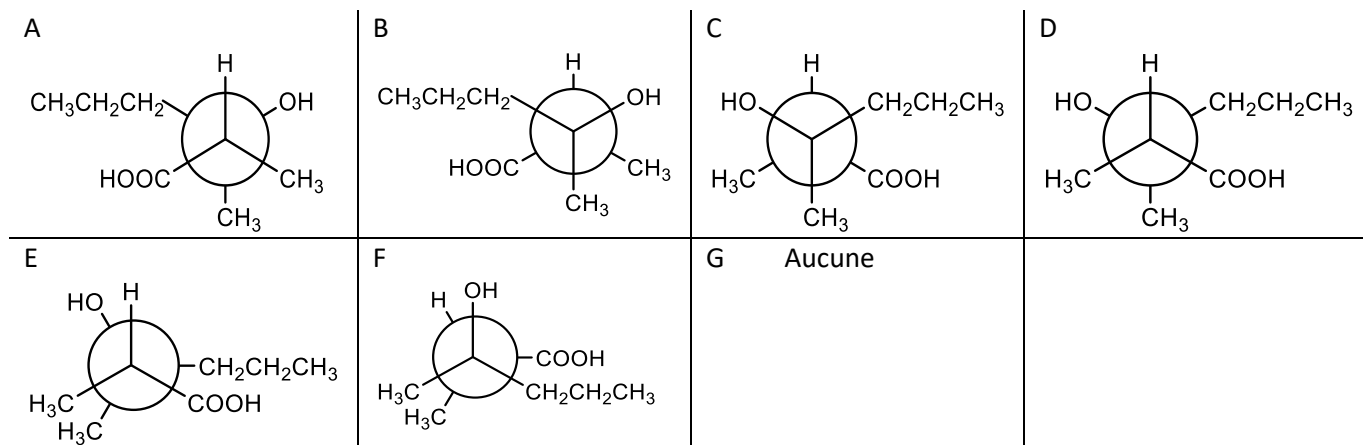
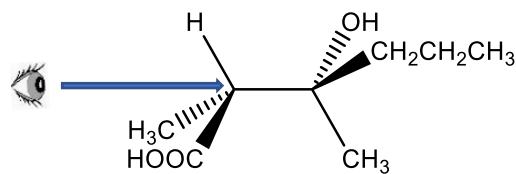


- A/B
 B/C
 C/A
 C/D
 Aucune, elles sont toutes différentes

Votre degré de certitude :

0% 20% 40% 60% 80% 100%

11. Quelle projection de Newman correspond à la molécule suivante lorsqu'on la regarde dans la direction indiquée par la flèche ?

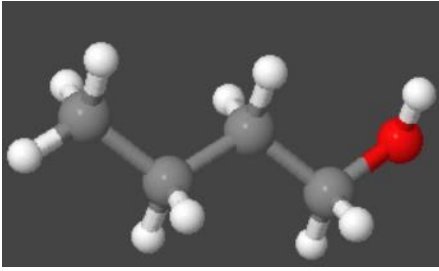


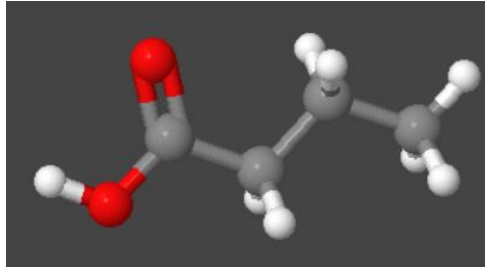
- A
 B
 C
 D
 E
 F
 G, Aucune

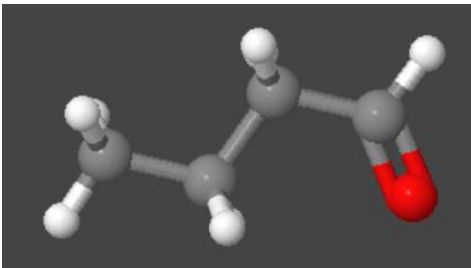
Votre degré de certitude :

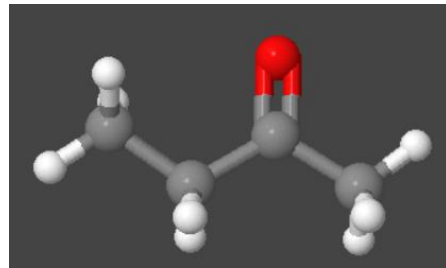
0% 20% 40% 60% 80% 100%

12. Quel composé parmi les suivants possède la plus haute température d'ébullition ?









Votre degré de certitude :

0%

20%

40%

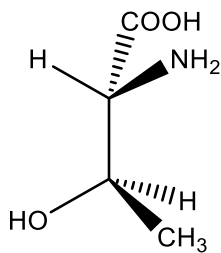
60%

80%

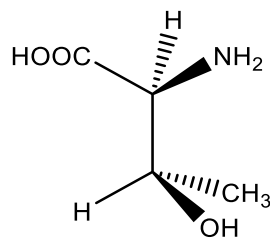
100%

13. Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont énantiomères l'un de l'autre (images dans un miroir non superposables) ?

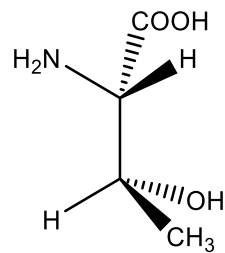
A.



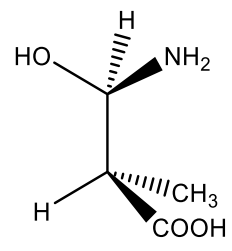
B.



C.



D.



A/B

A/C

B/C

B/D

Aucune

Votre degré de certitude :

0%

20%

40%

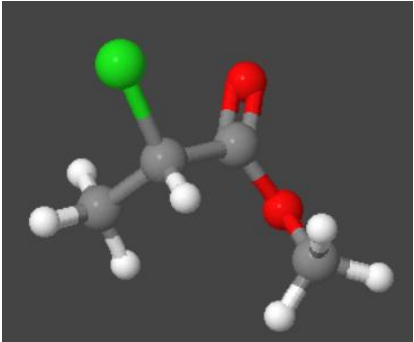
60%

80%

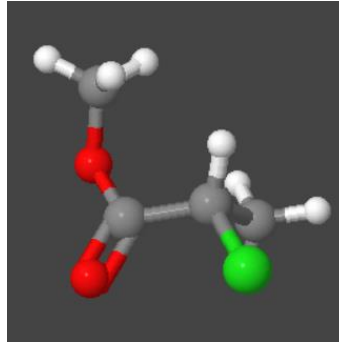
100%

14. Lesquelles de ces structures sont identiques ?

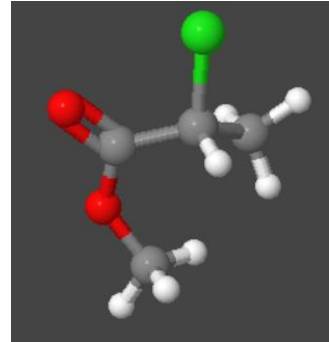
A.



B.



C.



- A/B
- A/C
- B/C
- Aucune, elles sont toutes différentes

Votre degré de certitude :

0% 20% 40% 60% 80% 100%

15. Si nous considérons une molécule de CH_2Cl_2 , combien d'atomes au maximum sont contenus dans un plan de symétrie donné ?

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

Votre degré de certitude :

0% 20% 40% 60% 80% 100%

16. Quelle(s) information(s) peut-on déterminer directement¹ et indirectement² à partir de la structure de Lewis d'une molécule en utilisant toutes les connaissances que vous possédez ? Si vous pensez que la propriété dans la colonne de gauche est déterminable à partir de la structure de Lewis, cochez si elle l'est directement ou indirectement. Si non, cochez la case "sans réponse".

1 : Directement = par simple visualisation de la structure de Lewis

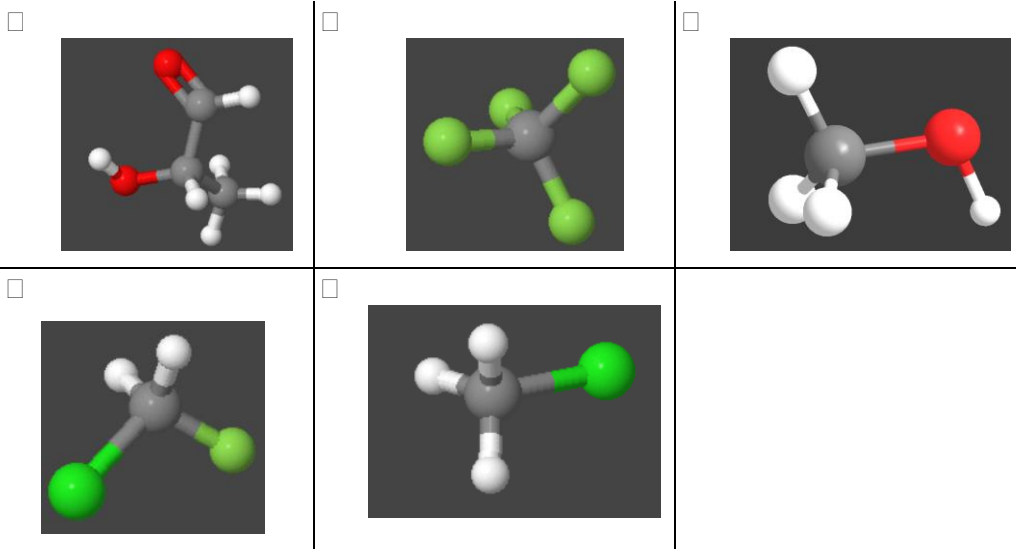
2 : Indirectement= en utilisant une réflexion supplémentaire basée sur la structure

<input type="checkbox"/> Polarité	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement	<input type="checkbox"/> Sans réponse
<input type="checkbox"/> Eléments chimiques présents	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement	<input type="checkbox"/> Sans réponse
<input type="checkbox"/> Ordre (ou indice) de liaison	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement	<input type="checkbox"/> Sans réponse
<input type="checkbox"/> Température d'ébullition relative	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement	<input type="checkbox"/> Sans réponse
<input type="checkbox"/> Angles de liaison	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement	<input type="checkbox"/> Sans réponse
<input type="checkbox"/> Forces intermoléculaires	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement	<input type="checkbox"/> Sans réponse
<input type="checkbox"/> Charges formelles	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement	<input type="checkbox"/> Sans réponse
<input type="checkbox"/> Température de fusion relative	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement	<input type="checkbox"/> Sans réponse
<input type="checkbox"/> Géométrie moléculaire	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement	<input type="checkbox"/> Sans réponse
<input type="checkbox"/> Résonance potentielle	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement	<input type="checkbox"/> Sans réponse
<input type="checkbox"/> Acidité/basicité	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement	<input type="checkbox"/> Sans réponse
<input type="checkbox"/> Aucune information	<input type="checkbox"/> Directement	<input type="checkbox"/> Indirectement	<input type="checkbox"/> Sans réponse

Votre degré de certitude :

0% 20% 40% 60% 80% 100%

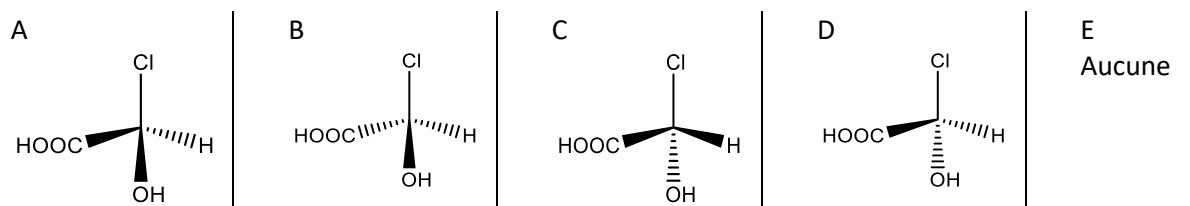
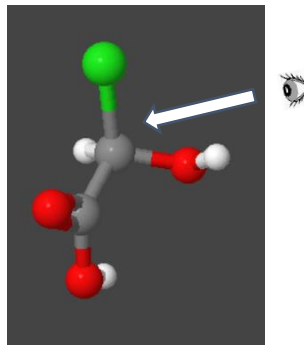
17. Quelle molécule parmi les suivantes ne possède pas de plan de symétrie ?



Votre degré de certitude :

0% 20% 40% 60% 80% 100%

18. Comment dessineriez-vous la molécule suivante en regardant dans la direction indiquée par la flèche ?

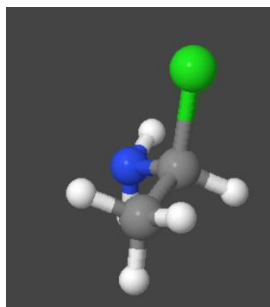


- A
- B
- C
- D
- E, Aucune

Votre degré de certitude :

0% 20% 40% 60% 80% 100%

19. Dans le modèle 3D suivant, quel atome ou groupe d'atomes est le plus proche et le plus éloigné de l'observateur (c'est-à-dire vous) ?



- CH₃ le plus éloigné et NH₂ le plus proche
- CH₃ le plus éloigné et Cl le plus proche
- NH₂ le plus éloigné et CH₃ le plus proche
- NH₂ le plus éloigné et Cl le plus proche

Votre degré de certitude :

0% 20% 40% 60% 80% 100%

20. Cochez le moment dipolaire qui correspond au composé. Un même moment dipolaire peut être associé à plusieurs composés.

DMSO	<input type="checkbox"/> 3,96 Debye	<input type="checkbox"/> 1,18 Debye	<input type="checkbox"/> 0,363 Debye	<input type="checkbox"/> 0,08 Debye	<input type="checkbox"/> 0 Debye
CCl ₄	<input type="checkbox"/> 3,96 Debye	<input type="checkbox"/> 1,18 Debye	<input type="checkbox"/> 0,363 Debye	<input type="checkbox"/> 0,08 Debye	<input type="checkbox"/> 0 Debye
Ether diéthylique	<input type="checkbox"/> 3,96 Debye	<input type="checkbox"/> 1,18 Debye	<input type="checkbox"/> 0,363 Debye	<input type="checkbox"/> 0,08 Debye	<input type="checkbox"/> 0 Debye
BCl ₃	<input type="checkbox"/> 3,96 Debye	<input type="checkbox"/> 1,18 Debye	<input type="checkbox"/> 0,363 Debye	<input type="checkbox"/> 0,08 Debye	<input type="checkbox"/> 0 Debye
n-hexane	<input type="checkbox"/> 3,96 Debye	<input type="checkbox"/> 1,18 Debye	<input type="checkbox"/> 0,363 Debye	<input type="checkbox"/> 0,08 Debye	<input type="checkbox"/> 0 Debye
Ethylène (éthène)	<input type="checkbox"/> 3,96 Debye	<input type="checkbox"/> 1,18 Debye	<input type="checkbox"/> 0,363 Debye	<input type="checkbox"/> 0,08 Debye	<input type="checkbox"/> 0 Debye
Propène	<input type="checkbox"/> 3,96 Debye	<input type="checkbox"/> 1,18 Debye	<input type="checkbox"/> 0,363 Debye	<input type="checkbox"/> 0,08 Debye	<input type="checkbox"/> 0 Debye

Votre degré de certitude :

0% 20% 40% 60% 80% 100%

21. Les modèles moléculaires vous ont-ils été utiles pour les questions relatives aux structures ?
Votre pourcentage d'utilisation :

0% 20% 40% 60% 80% 100%

Pas utilisés

Très utilisés

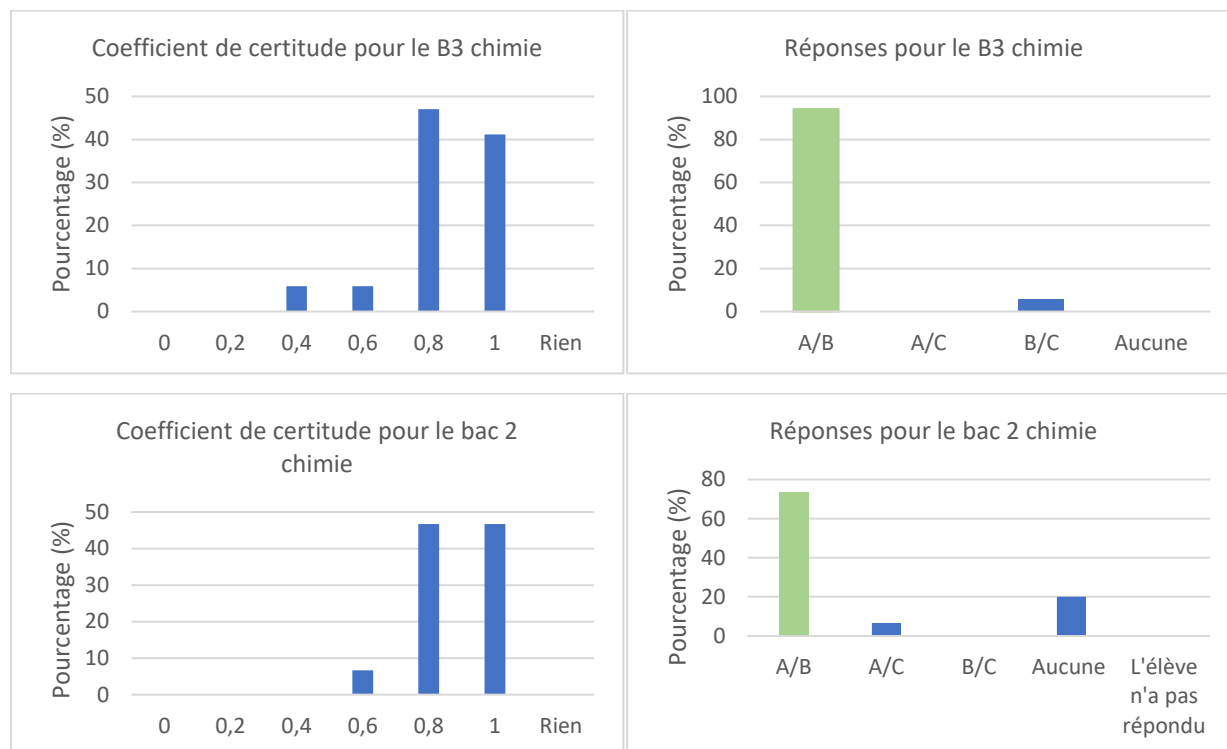
Fin

Merci beaucoup pour votre participation

7) Annexe 7 : Résultats des étudiants en chimie à l'Université de Liège

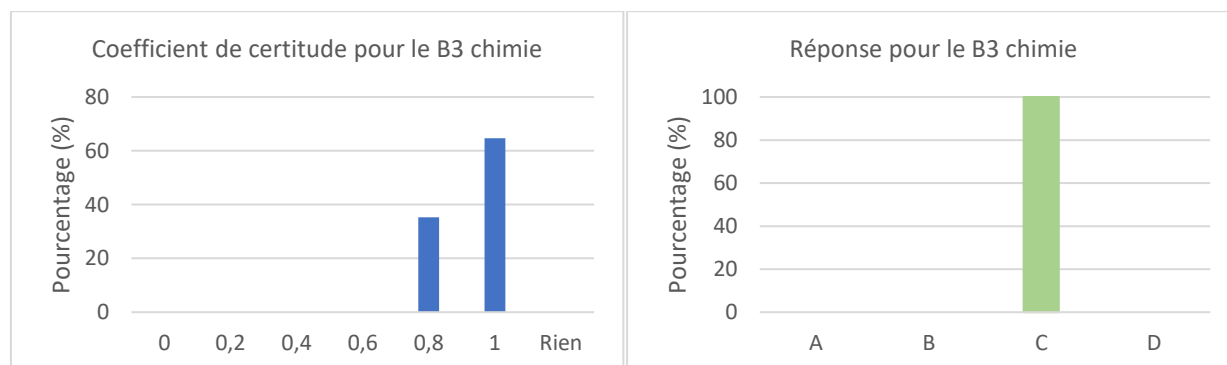
Questions se rapportant au thème de la traduction

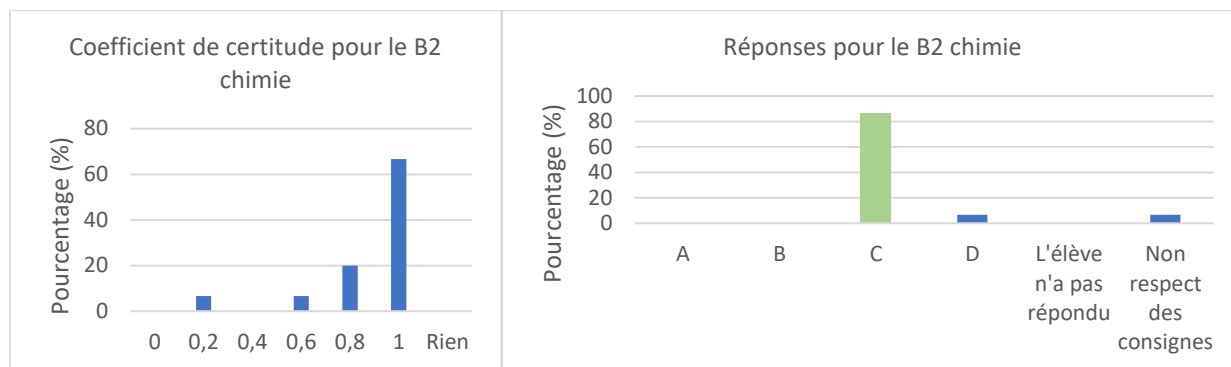
Question 4 : Quelles représentations illustrent la même molécule ? (traduction entre la projection de Newman, la représentation de Cram et la représentation d'un modèle moléculaire)



	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	0,9412	0,2425	0,8471	0,1663
B2 chimie	0,7333	0,4577	0,88	0,1265

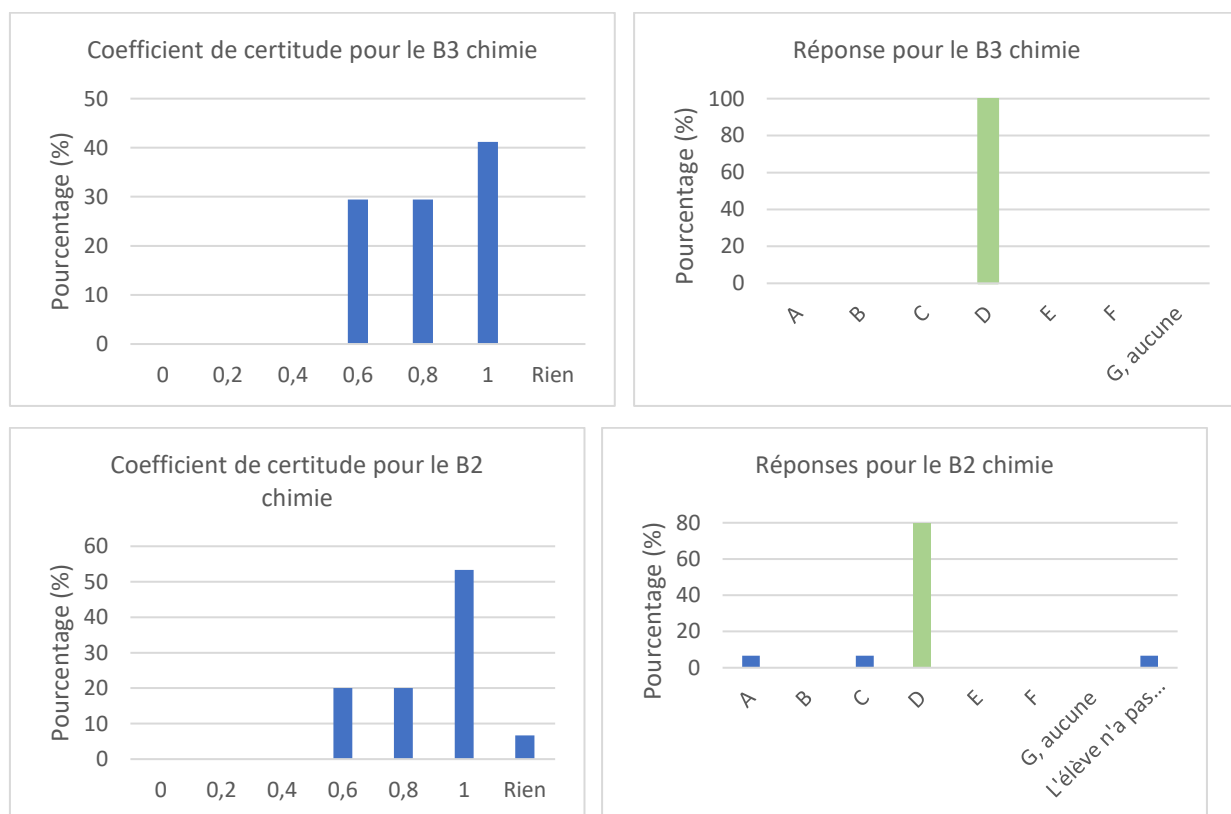
Question 6 : Quel modèle 3D correspond à la projection de Newman suivante lorsque nous regardons dans la direction indiquée par la flèche ? (traduction entre la projection de Newman et des représentations de modèles moléculaires)





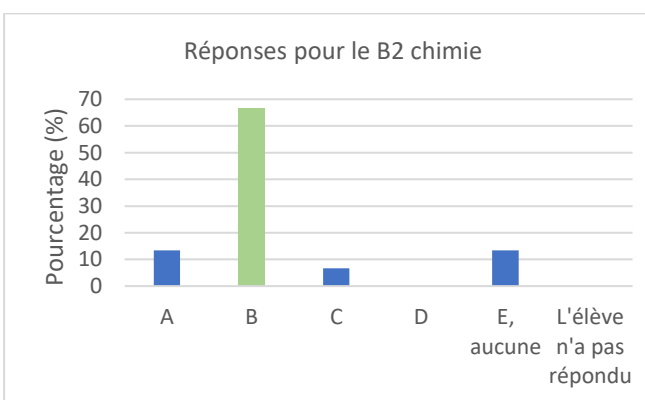
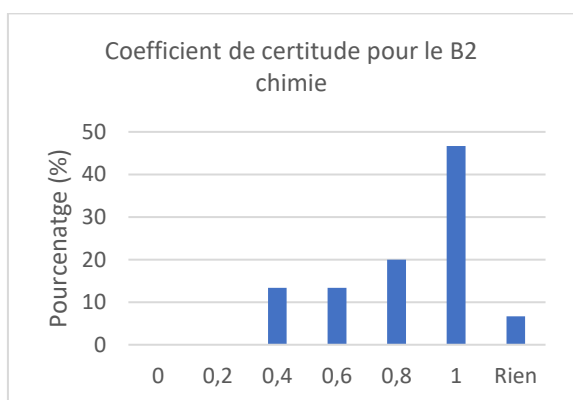
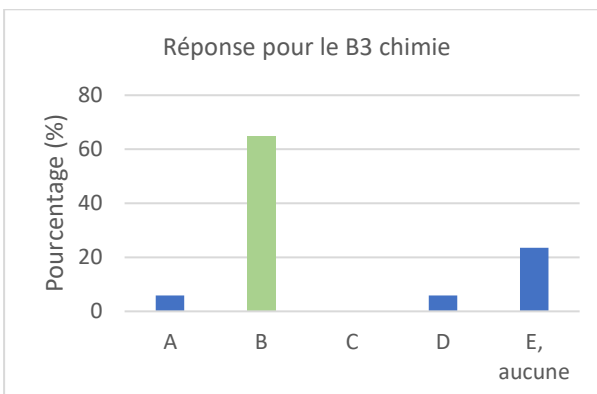
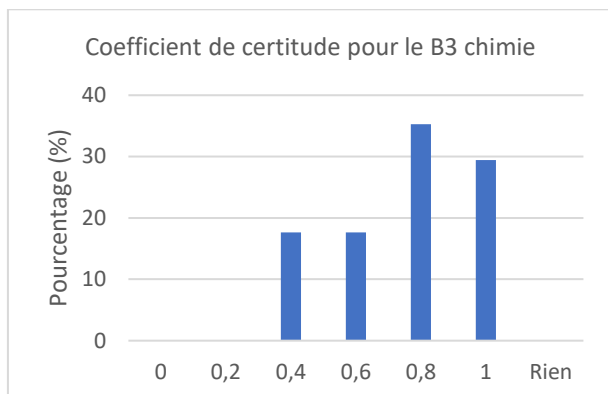
	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	1	0	0,9294	0,0985
B2 chimie	0,8667	0,3519	0,88	0,2242

Question 11 : Quelle projection de Newman correspond à la molécule suivante lorsqu'on la regarde dans la direction indiquée par la flèche ? (traduction entre la projection de Newman et la représentation de Cram)



	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	1	0	0,8235	0,1715
B2 chimie	0,8	0,414	0,8714	0,1684

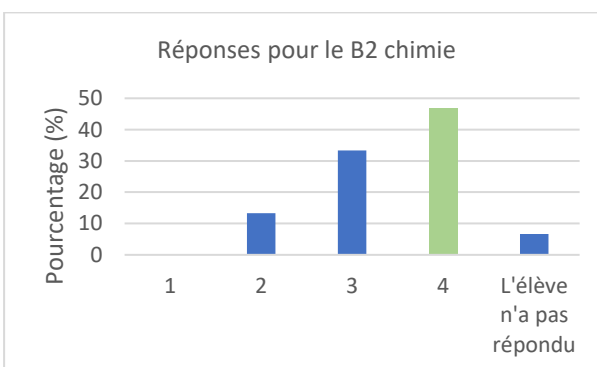
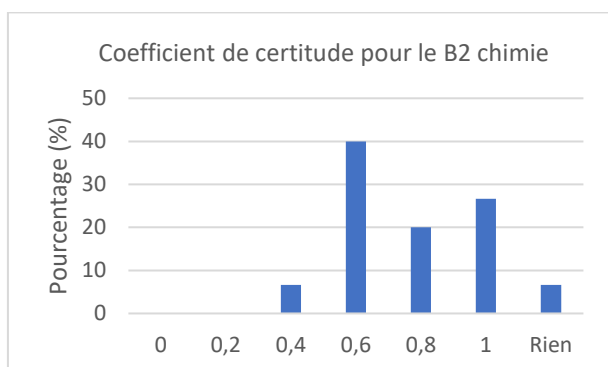
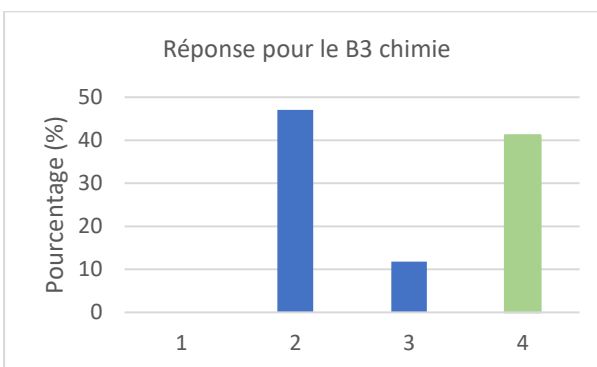
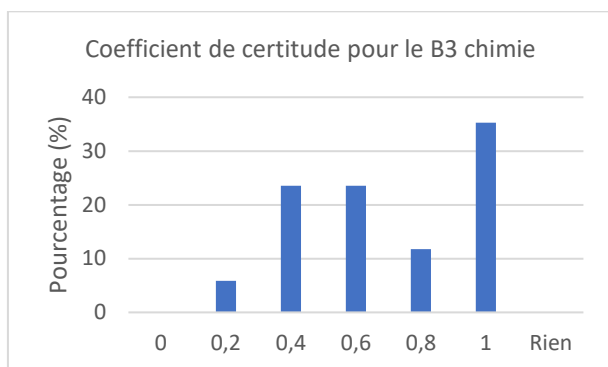
Question 18 : Comment dessineriez-vous la molécule suivante en regardant dans la direction indiquée par la flèche ? (traduction d'une image de modèles moléculaires en représentation de Cram)



	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	0,6471	0,4926	0,7529	0,2183
B2 chimie	0,6667	0,4879	0,8143	0,2282

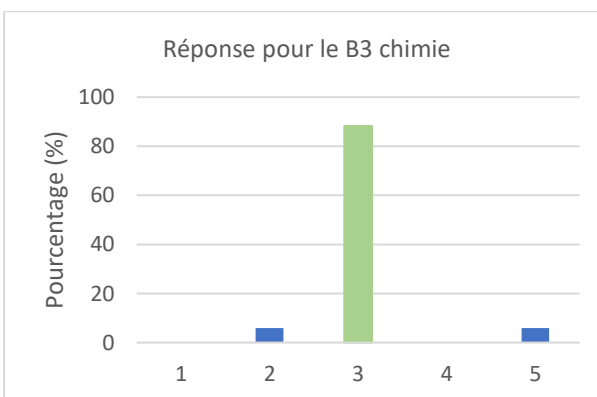
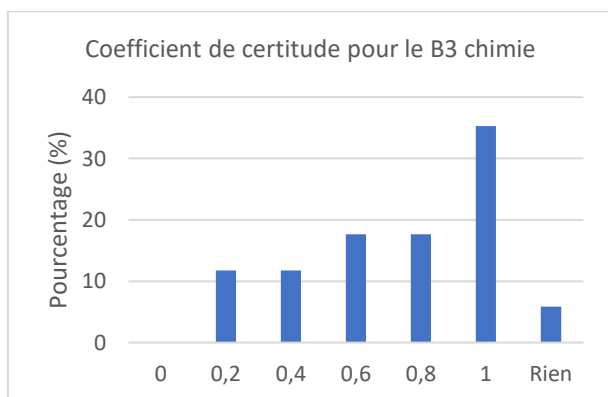
Questions se rapportant au thème de la symétrie

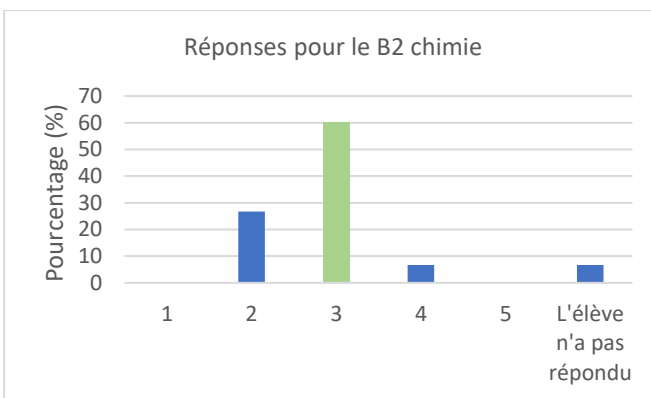
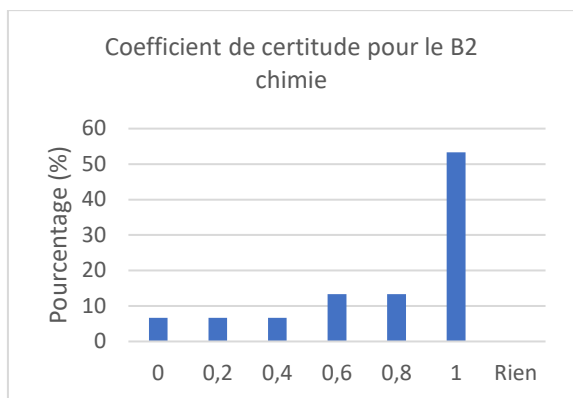
Question 5 : Si nous considérons une molécule de BF_3 , combien d'atomes au maximum sont contenus dans un plan de symétrie donné ?



	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	0,4118	0,5073	0,6941	0,2749
B2 chimie	0,4667	0,5164	0,7429	0,1989

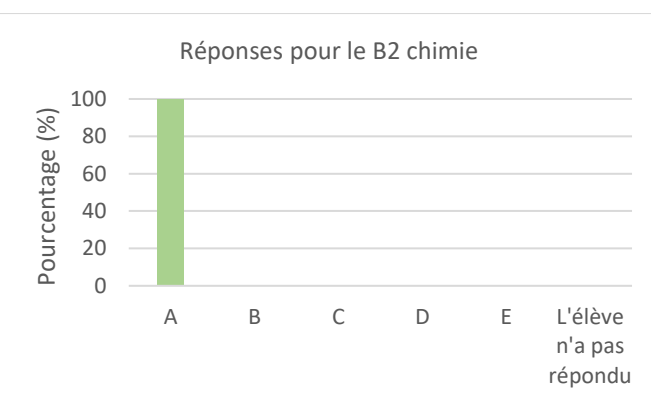
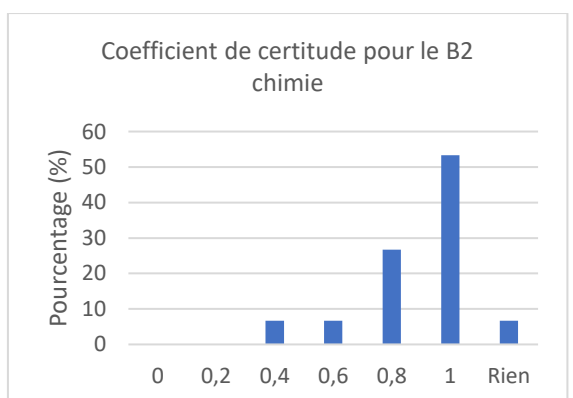
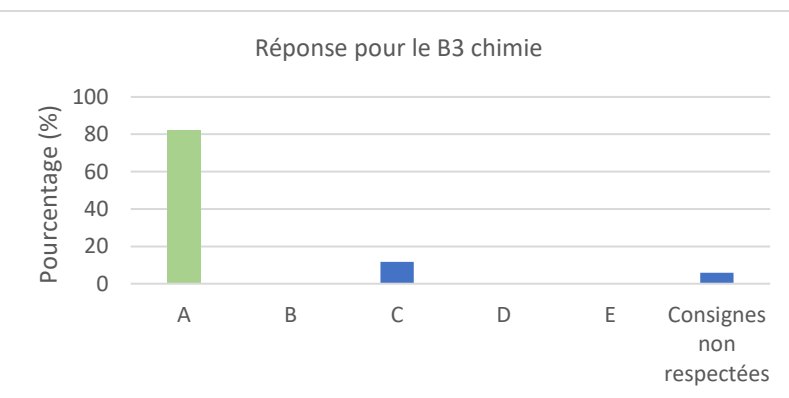
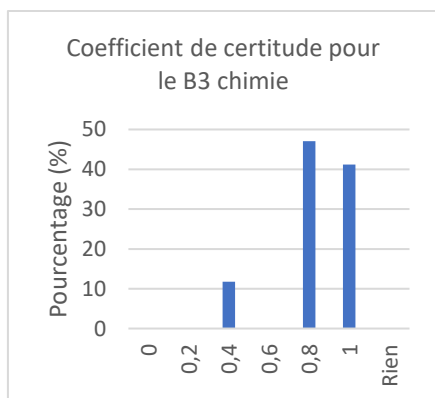
Question 15 : Si nous considérons une molécule de CH_2Cl_2 , combien d'atomes au maximum sont contenus dans un plan de symétrie donné ?





	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	0,8236	0,3929	0,7125	0,2918
B2 chimie	0,6	0,5071	0,76	0,3312

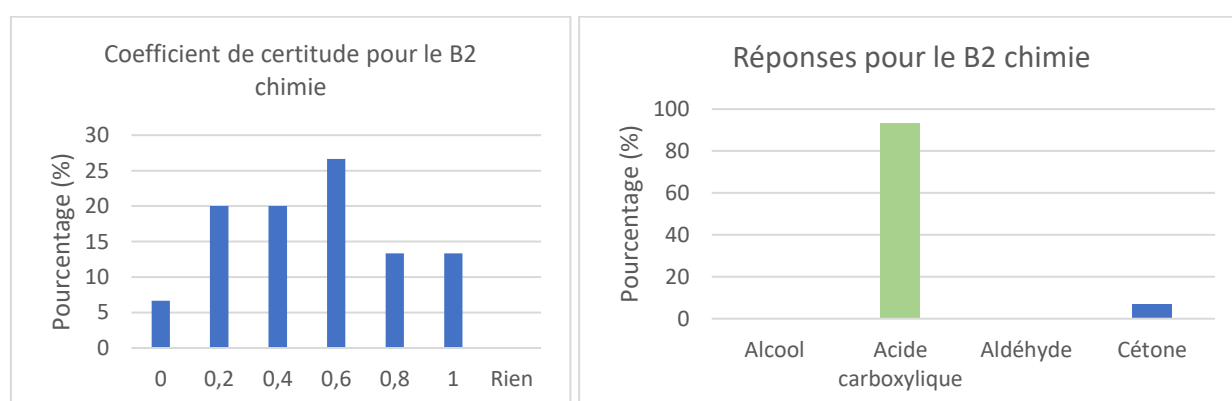
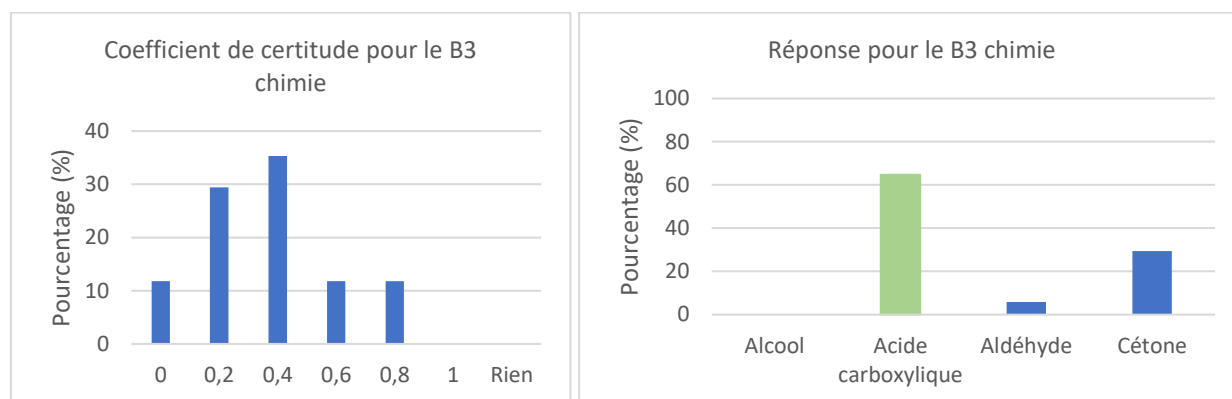
Question 17 : Quelle molécule parmi les suivantes ne possède pas de plan de symétrie ? (représentations de modèles moléculaires)



	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	0,8235	0,3929	0,8353	0,1902
B2 chimie	1	0	0,8714	0,1858

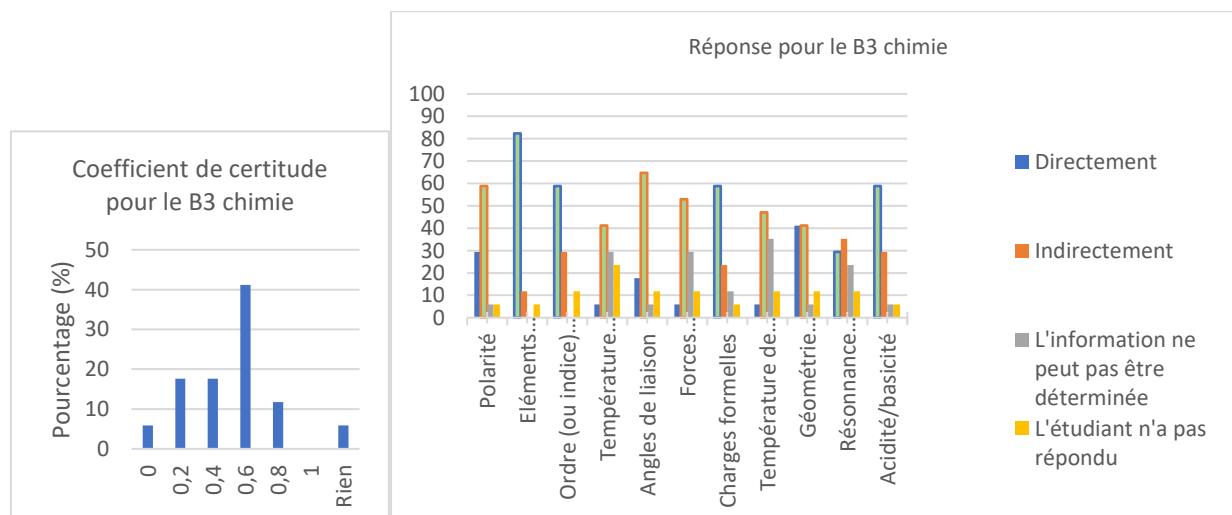
Questions se rapportant aux liens entre la structure et les propriétés

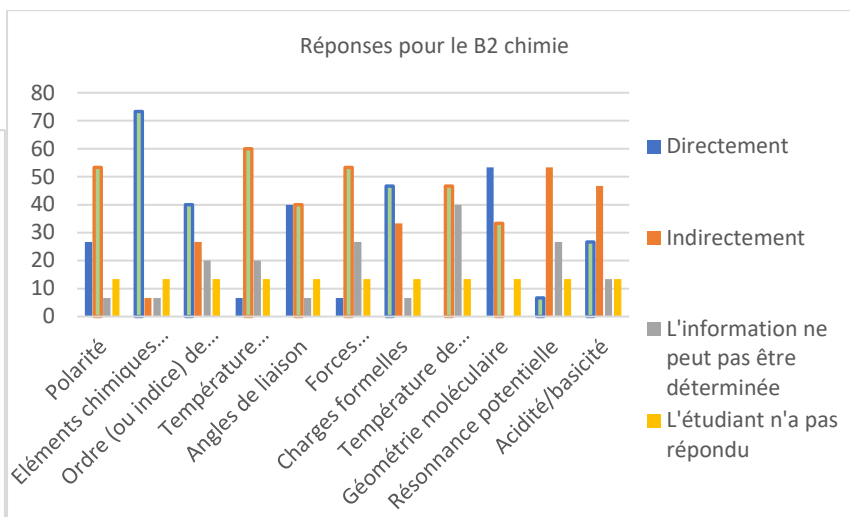
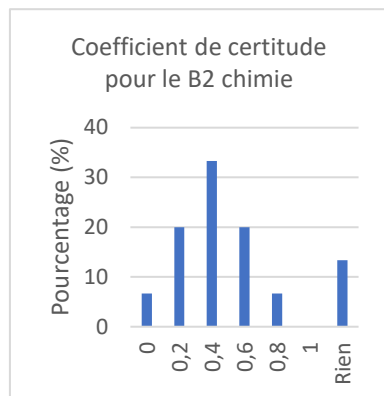
Question 12 : Quel composé parmi les suivants possède la plus haute température d'ébullition ?



	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	0,6471	0,4926	0,3647	0,237
B2 chimie	0,9333	0,2582	0,52	0,3005

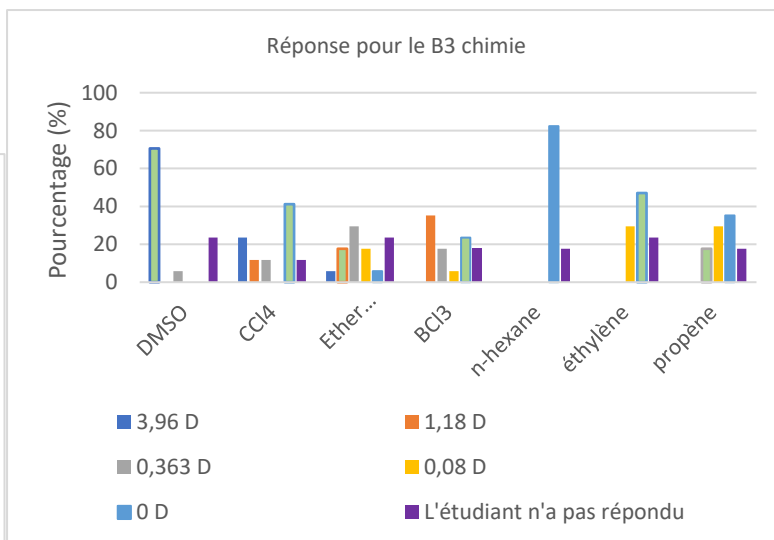
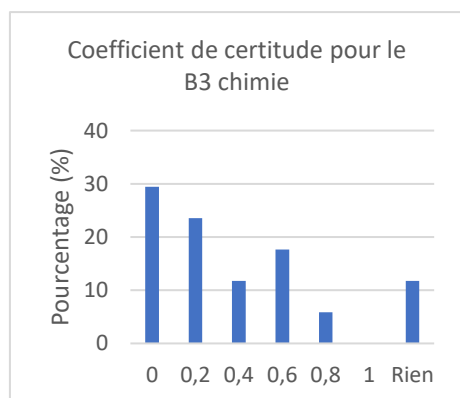
Question 16 : Quelle(s) information(s) peut-on déterminer directement¹ et indirectement² à partir de la structure de Lewis d'une molécule en utilisant toutes les connaissances que vous possédez ? Si vous pensez que la propriété dans la colonne de gauche est déterminable à partir de la structure de Lewis, cochez si elle l'est directement ou indirectement. Si non, cochez la case "sans réponse".

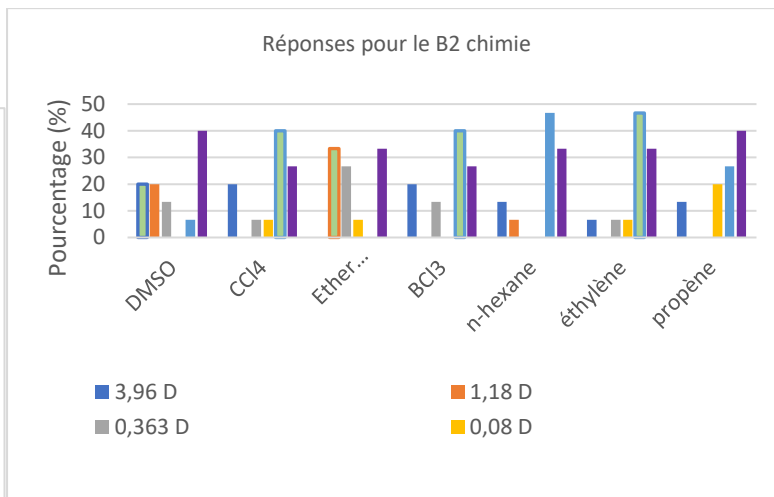
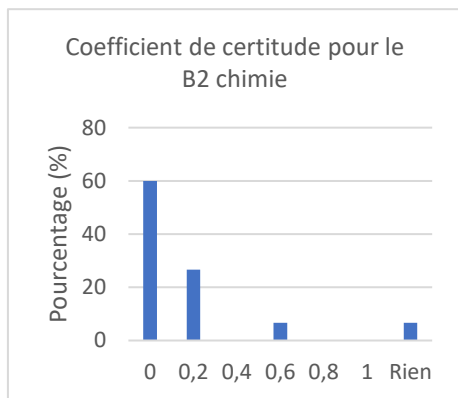




	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	0,5401	0,2306	0,475	0,2295
B2 chimie	0,4364	0,253	0,4	0,216

Question 20 : Cochez le moment dipolaire qui correspond au composé. Un même moment dipolaire peut être associé à plusieurs composés.

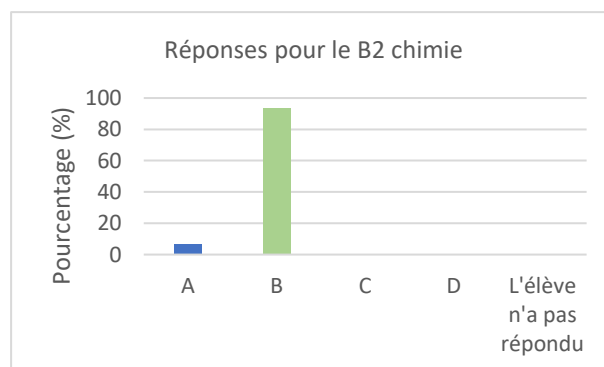
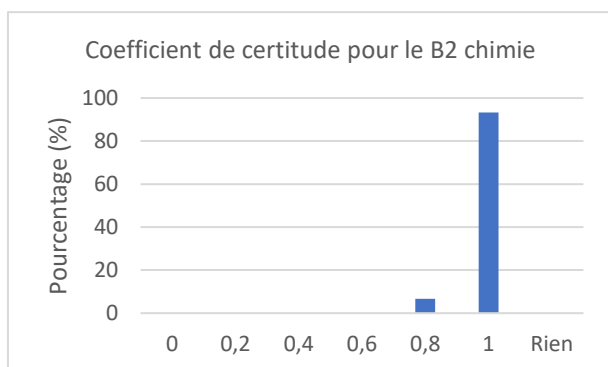
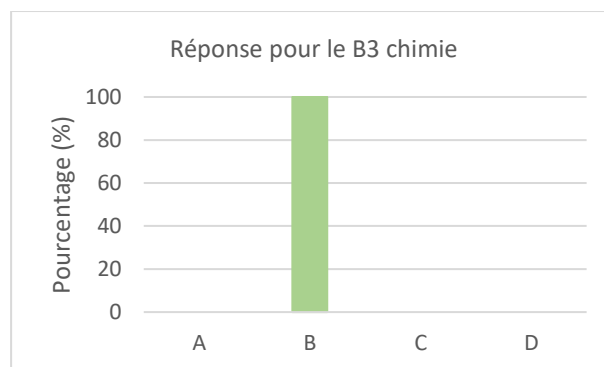
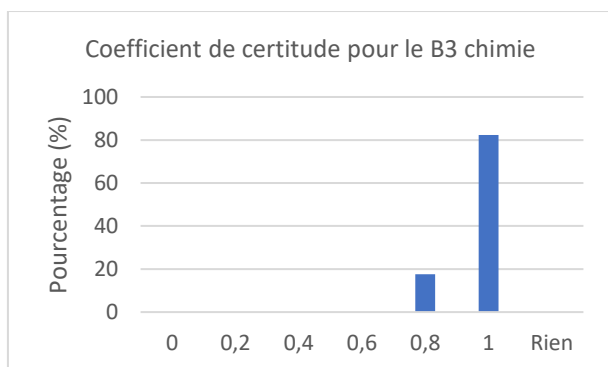




	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	0,3122	0,1893	0,28	0,2704
B2 chimie	0,2571	0,1886	0,1	0,171

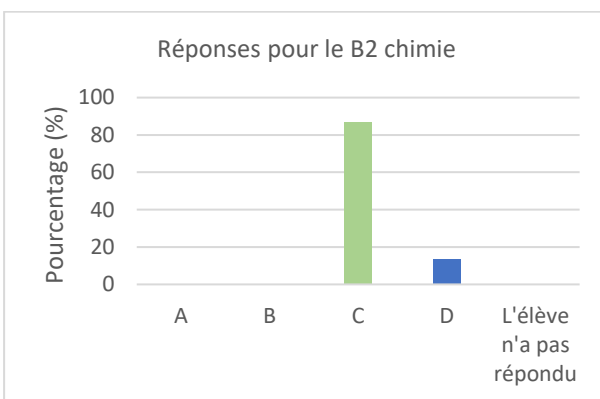
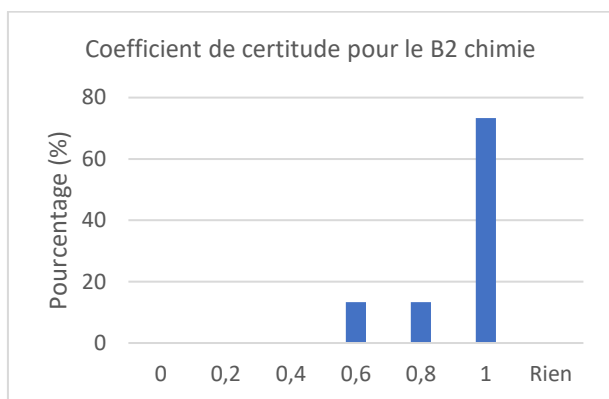
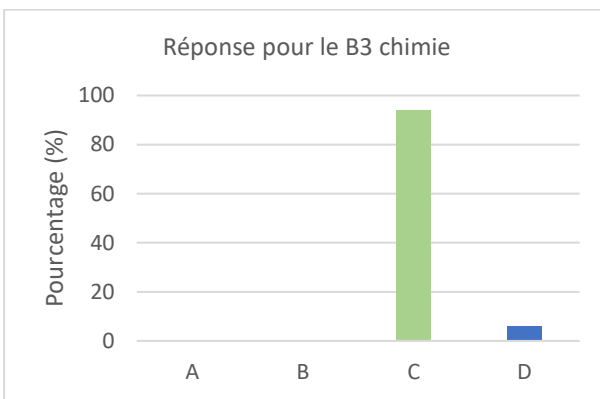
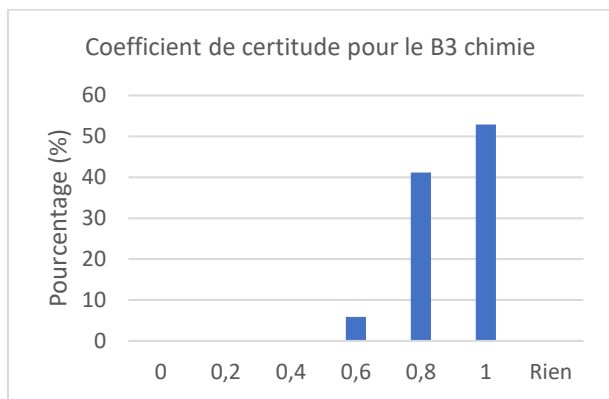
Questions se rapportant au thème de la perception

Question 8 : Dans la représentation suivante, quels atomes (représentés par les symboles E, F, G et H) sont les plus proches et les plus éloignés de l'observateur (c'est-à-dire de vous) ?



	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	1	0	0,9647	0,0786
B2 chimie	0,9333	0,2582	0,9867	0,0516

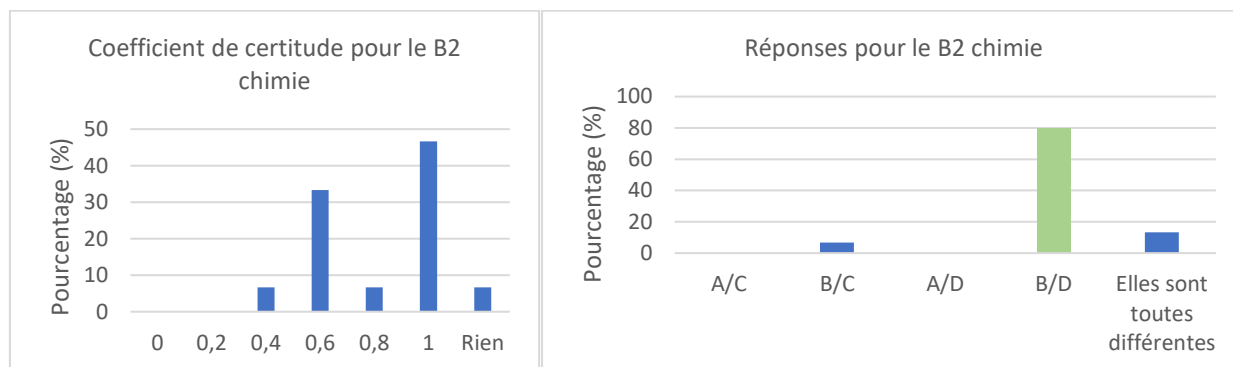
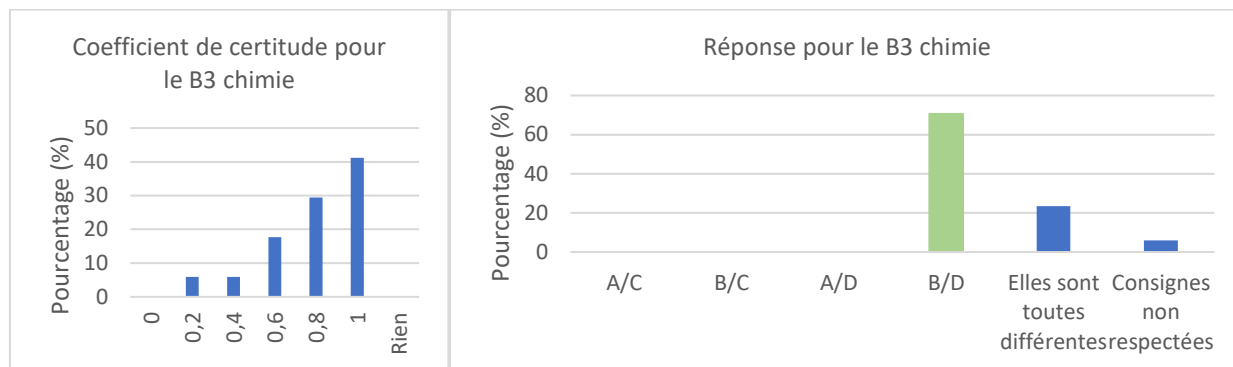
Question 19 : Dans le modèle 3D suivant, quel atome ou groupe d'atomes est le plus proche et le plus éloigné de l'observateur (c'est-à-dire vous) ?



	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	0,9412	0,2425	0,8941	0,1248
B2 chimie	0,8667	0,3519	0,92	0,1474

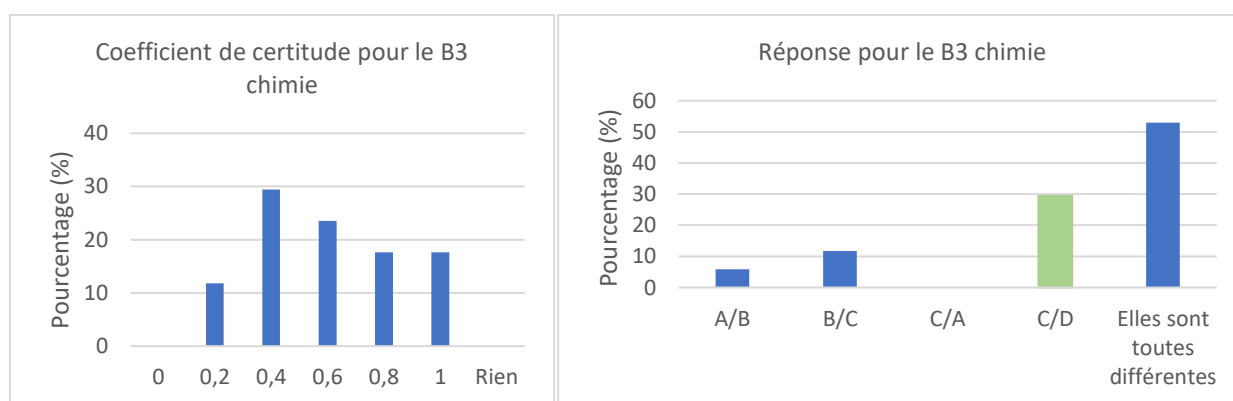
Questions se rapportant au thème de la perception et de la rotation

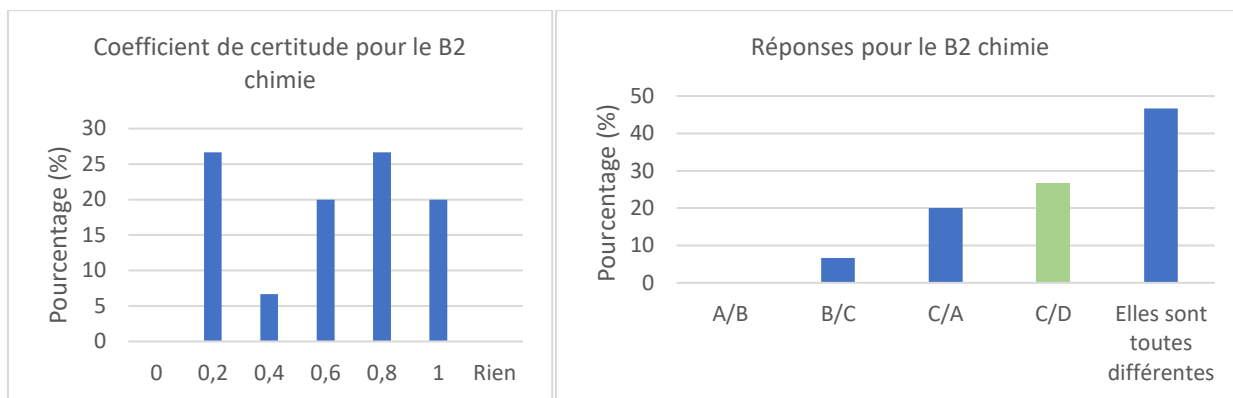
Question 7 : Quelles molécules sont identiques ? (une rotation en représentation de Cram)



	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	0,7059	0,4697	0,7882	0,2395
B2 chimie	0,8	0,414	0,8	0,2219

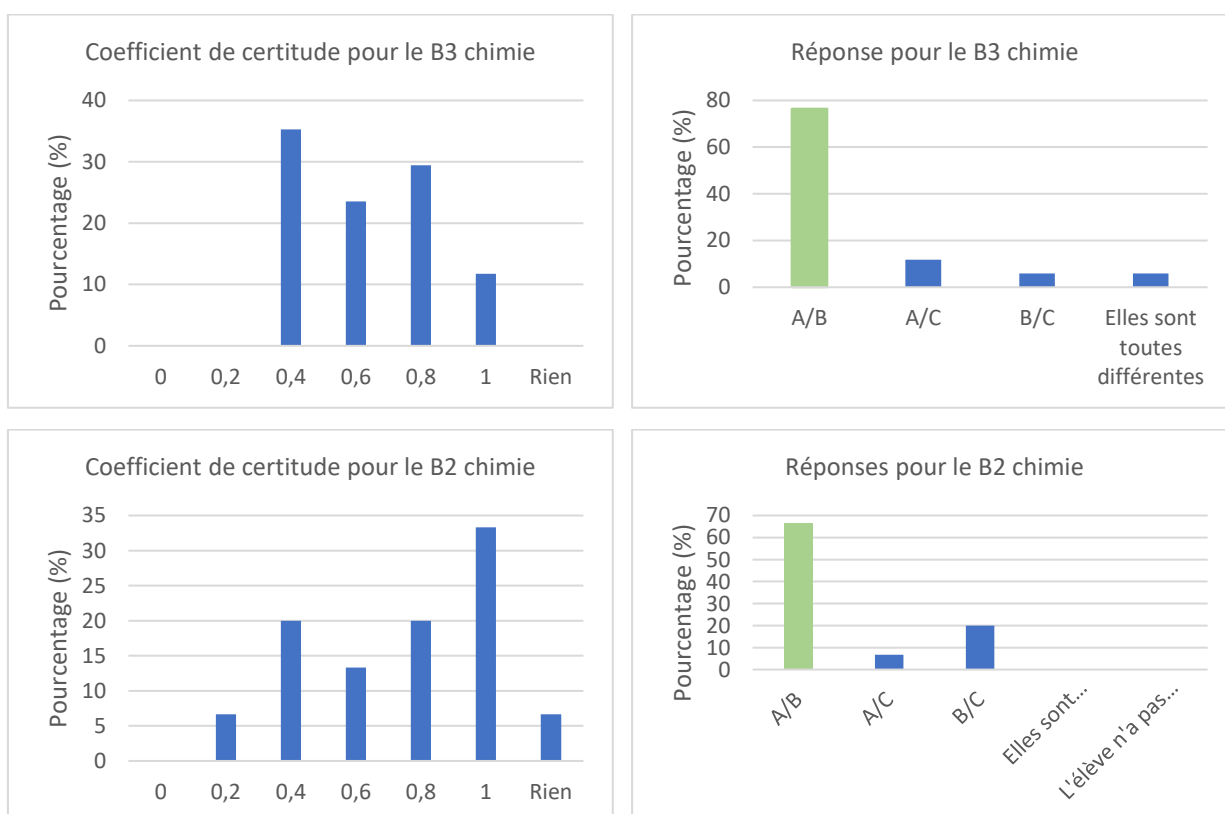
Question 10 : Quelles molécules sont identiques ? (plusieurs rotations en représentation de Cram)





	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	0,2941	0,4697	0,6	0,2646
B2 chimie	0,2667	0,4577	0,6133	0,3067

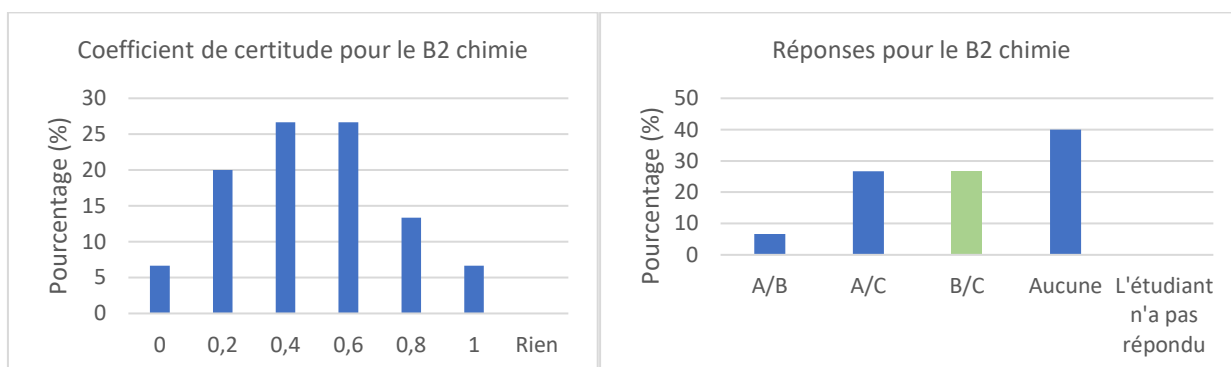
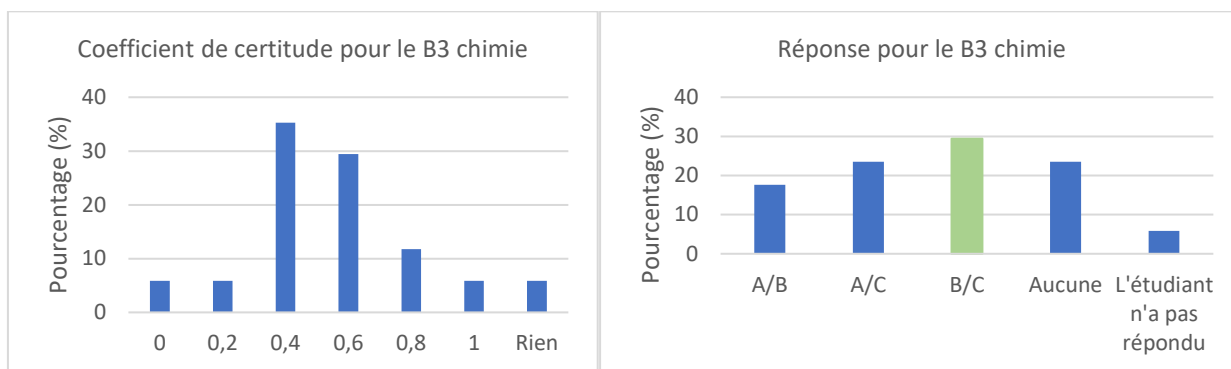
Question 14 : Lesquelles de ces structures sont identiques ? (plusieurs rotations avec images de modèles moléculaires)



	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	0,7647	0,4372	0,6353	0,2149
B2 chimie	0,7333	0,4577	0,7143	0,278

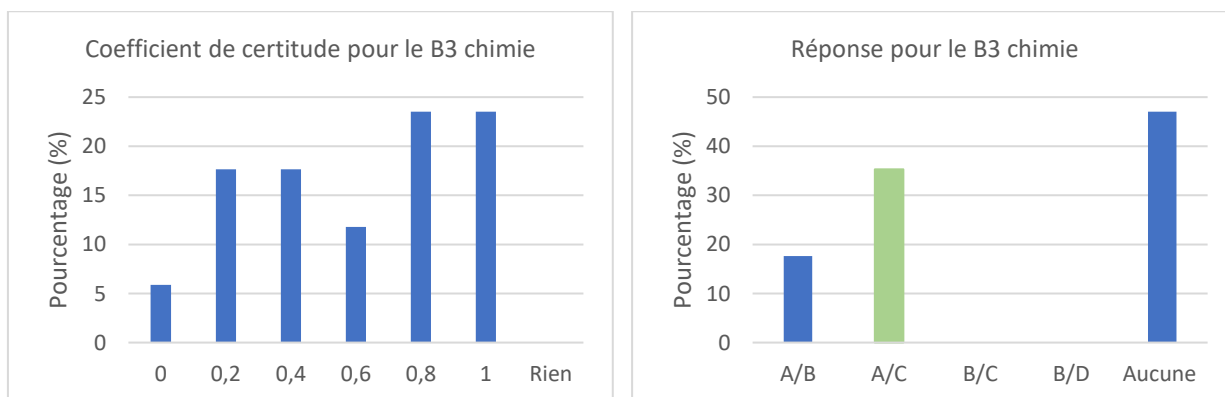
Questions se rapportant au thème de la perception, de la rotation et de la réflexion

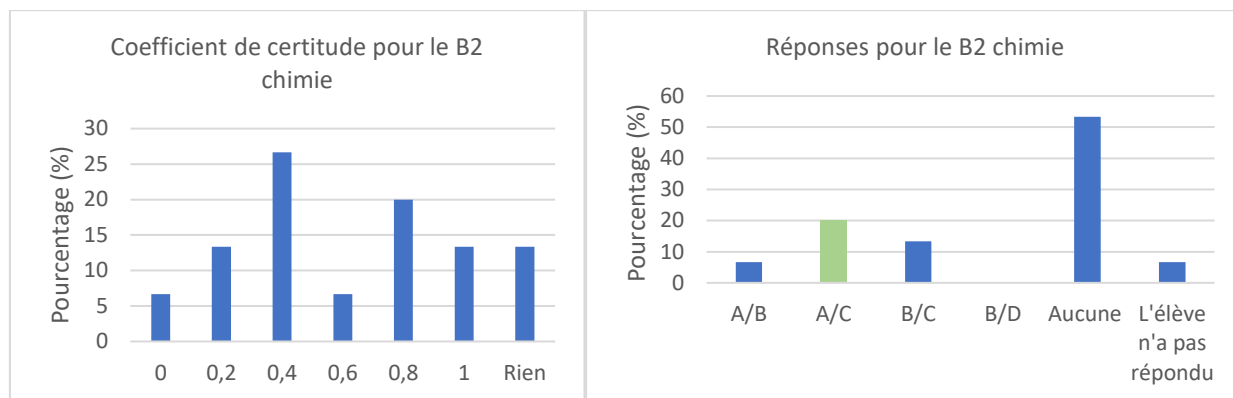
Question 9 : Quelles molécules sont images l'une de l'autre dans un miroir ? (représentations de modèles moléculaires)



	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	0,2941	0,4697	0,5125	0,2419
B2 chimie	0,2667	0,4577	0,48	0,2704

Question 13 : Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont énantiomères l'un de l'autre (images dans un miroir non superposables) ? (représentations de Cram)













	Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
B3 chimie	0,3529	0,4926	0,6	0,3317
B2 chimie	0,2	0,414	0,5385	0,3203

8) Annexe 8 : Questionnaire sur la visualisation tridimensionnelle en chimie organique pour les élèves de l'enseignement secondaire

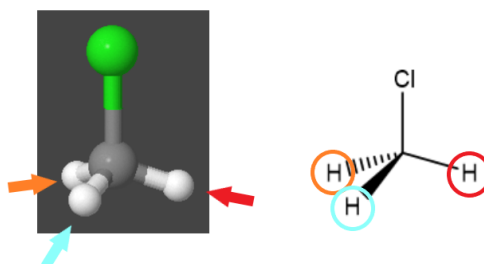
Ce test s'inscrit dans le cadre d'un mémoire de fin d'études en didactique de la chimie et a pour but de diagnostiquer les forces et les faiblesses des étudiant-e-s dans les problèmes où la visualisation dans l'espace des molécules organiques est importante.

Ce test consiste en la réalisation de différents exercices relatifs à **6 thèmes différents** : les liens entre structure et propriétés, la traduction entre différents types de représentations, la symétrie dans les molécules, la perception dans l'espace de structures tridimensionnelles, la perception des opérations de rotation des molécules et enfin des exercices de perception des opérations de rotation et de réflexion au travers de plans miroirs. Ce questionnaire est composé de 18 questions sous forme de **QCM avec des degrés de certitude** et devrait prendre **maximum 45 minutes**. **Ce test n'interviendra absolument pas dans l'évaluation de votre cursus**. Par conséquent, vous n'avez pas besoin de réaliser une quelconque stratégie par rapport à ces coefficients de certitude. Entourez donc le coefficient qui correspond au mieux à votre degré de certitude. **Une seule réponse possible sauf s'il est indiqué le contraire dans l'énoncé**. **L'utilisation de modèles moléculaires est autorisée**.

Information ou rappel concernant les conventions de la représentation de Cram (avec des traits en pointillés et en traits gras) et des couleurs des sphères des modèles moléculaires :

	Liaison se trouvant dans le plan de la feuille
	Liaison se trouvant derrière le plan de la feuille
	Liaison se trouvant devant le plan de la feuille
	Atome d'hydrogène
	Atome de carbone
	Atome d'oxygène
	Atome d'azote
	Atome de chlore

Exemple pour illustrer les conventions de la représentation de Cram :



1. Quel est votre genre ?

- Femme
- Homme
- Autre

2. Combien d'heure(s) de chimie avez-vous par semaine?

.....

3. Suivez-vous des séances de laboratoire ?

- Oui
- Non

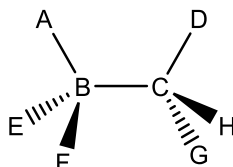
4. Si oui, à quelle fréquence suivez-vous ces séances de laboratoire ?

.....

5. Pensez-vous qu'il est important de pouvoir visualiser les molécules en trois dimensions ?

- Tout à fait d'accord
- D'accord
- Plutôt d'accord
- Plutôt pas d'accord
- Pas d'accord
- Pas du tout d'accord

6. Dans la représentation suivante, quels atomes (représentés par les symboles E, F, G et H) sont les plus proches et les plus éloignés de l'observateur (c'est-à-dire de vous) ?

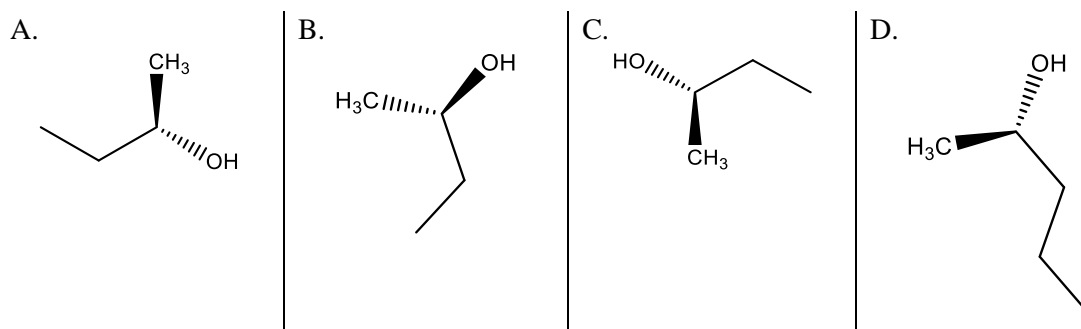


- F et H sont les plus éloignés et E et G sont les plus proches
- F et H sont les plus proches et E et G sont les plus éloignés
- F et G sont les plus proches et E et H sont les plus éloignés
- F et G sont les plus éloignés et E et H sont les plus proches

Votre degré de certitude :

0%	20%	40%	60%	80%	100%
Pas du tout sûr					Tout à fait sûr

7. Quelles molécules sont identiques ?



- A/C
- A/B
- C/D
- Aucune, elles sont toutes différentes

Votre degré de certitude :

0%	20%	40%	60%	80%	100%
Pas du tout sûr					Tout à fait sûr

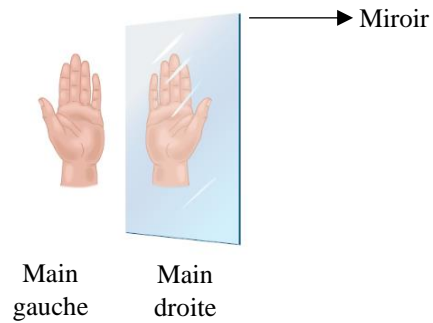
8. Si nous considérons une molécule de BF_3 , combien d'atomes au maximum sont contenus dans un plan de symétrie donné ?

- 1
- 2
- 3
- 4

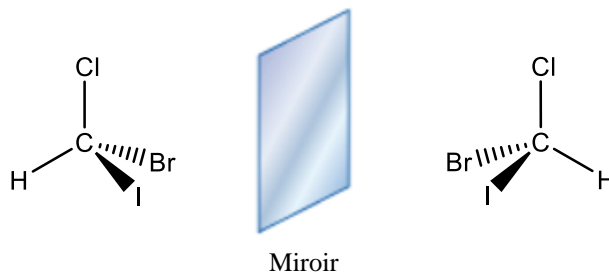
Votre degré de certitude :

0%	20%	40%	60%	80%	100%
Pas du tout sûr					Tout à fait sûr

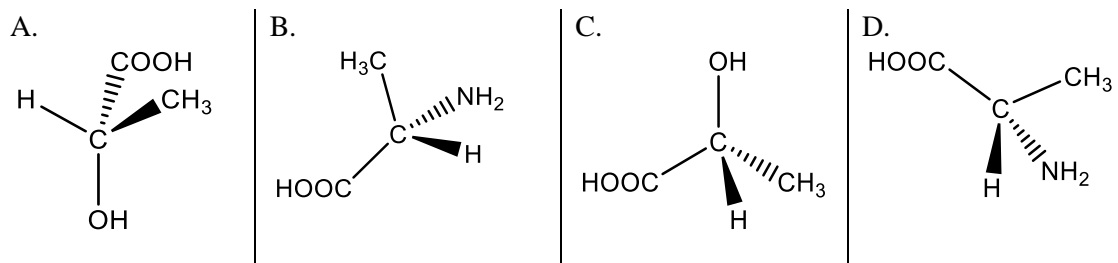
9. Votre main gauche et votre main droite peuvent être considérées comme images l'une de l'autre dans un miroir.



C'est aussi le cas des deux molécules représentées ci-dessous.



Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont images dans un miroir l'un de l'autre comme une main gauche et une main droite (exemple dans la figure suivante) ?

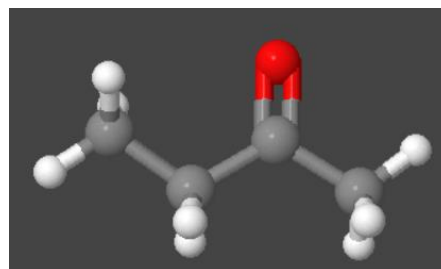
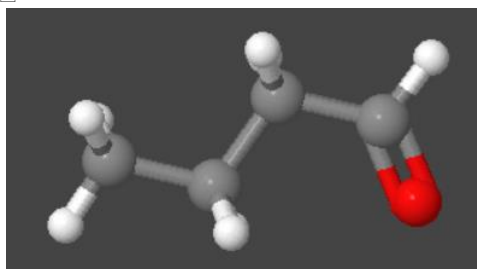
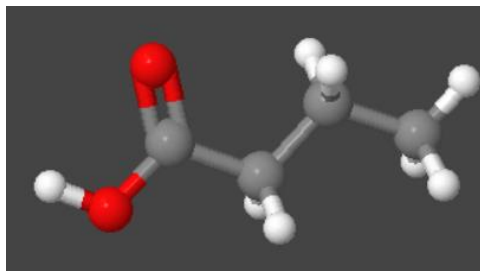
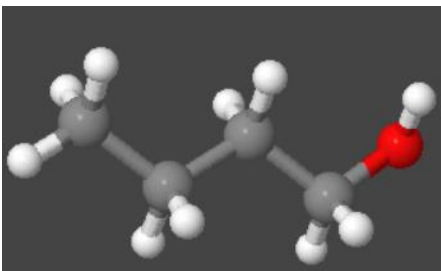


- A/B
- A/C
- B/D
- Aucune

Votre degré de certitude :

0%	20%	40%	60%	80%	100%
Pas du tout sûr					Tout à fait sûr

10. Quel composé parmi les suivants possède la plus haute température d'ébullition ?



Votre degré de certitude :

0%

20%

40%

60%

80%

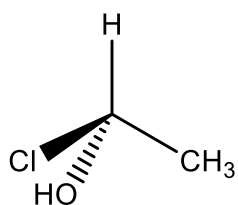
100%

Pas du
tout sûr

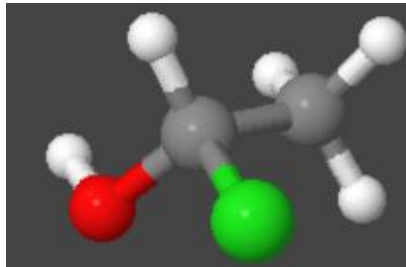
Tout à
fait sûr

11. Quelles représentations illustrent la même molécule ?

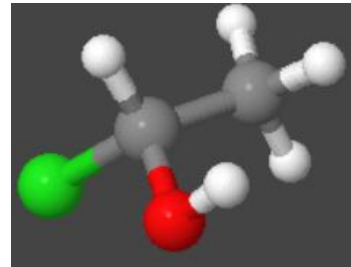
A.



B.



C.



A/B

A/C

B/C

Aucune, elles sont toutes différentes

Votre degré de certitude :

0%

20%

40%

60%

80%

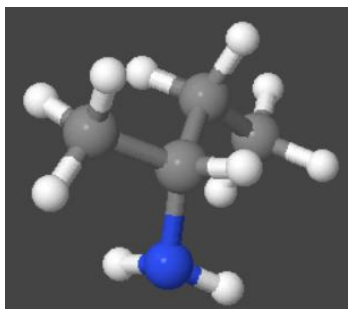
100%

Pas du
tout sûr

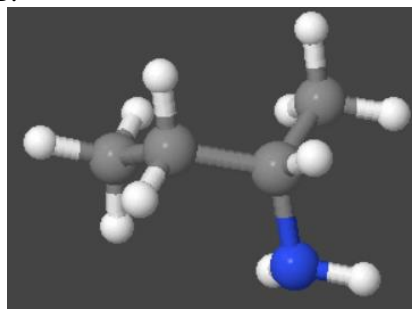
Tout à
fait sûr

16. Quelles molécules sont identiques ?

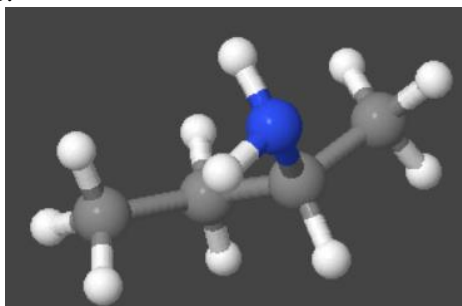
A.



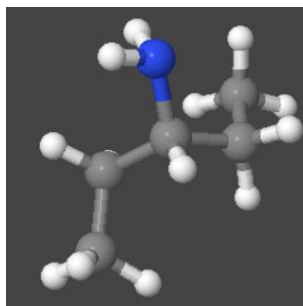
B.



C.



D.



- B/C
- A/C
- C/D
- Aucune, elles sont toutes différentes

Votre degré de certitude :

0%	20%	40%	60%	80%	100%
Pas du tout sûr					Tout à fait sûr

17. Voici quatre molécules (de A à D). Laquelle des classifications de ces molécules selon leur polarité est correcte ?

- A) BCl_3
- B) Ether diéthylique ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_3$)
- C) Ethylène (ou éthène) ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$)
- D) Propène (ou propylène) ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$)

- A = C < D < B
- A = B = C < D
- C < A < D < B
- C = D < B < A

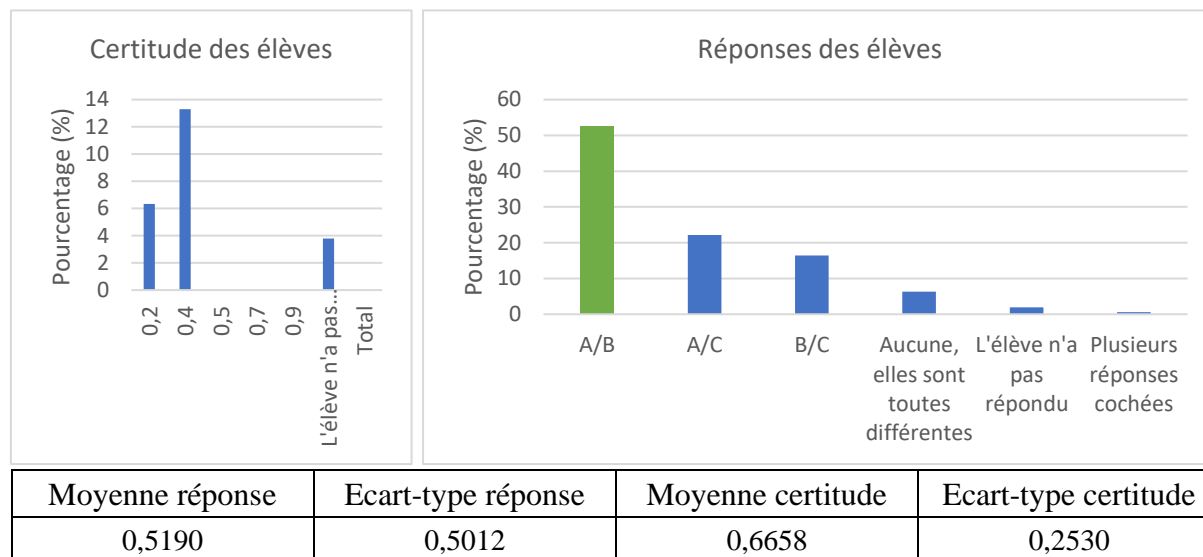
Votre degré de certitude :

0%	20%	40%	60%	80%	100%
Pas du tout sûr					Tout à fait sûr

9) Annexe 9 : Résultats des élèves de fin d'enseignement secondaire

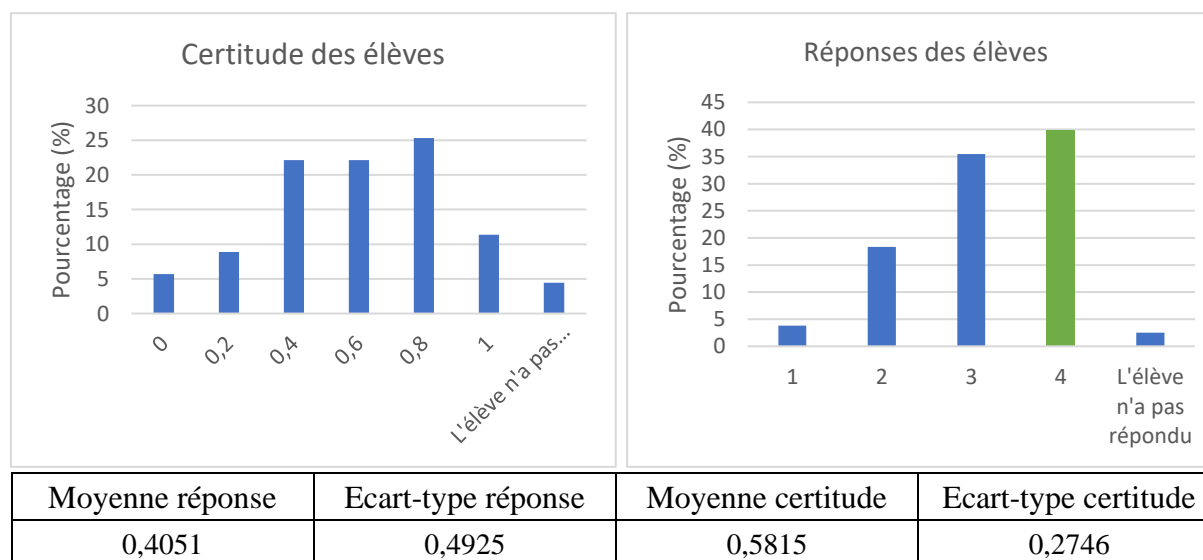
Questions se rapportant au thème de la traduction

Question 11 : Quelles représentations illustrent la même molécule ? (représentation de Cram et illustrations de modèles moléculaires)

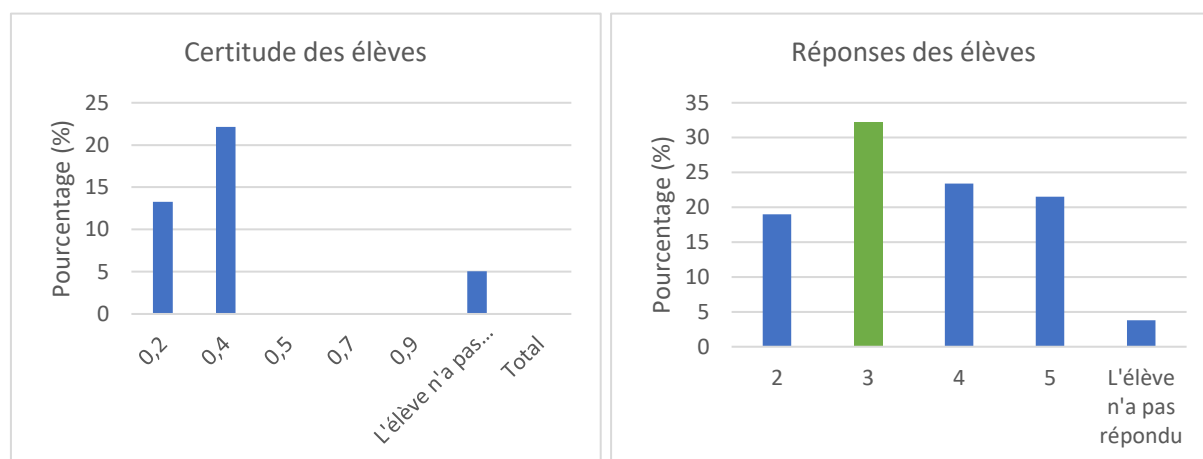


Questions se rapportant au thème de la symétrie

Question 8 : Si nous considérons une molécule de BF_3 , combien d'atomes au maximum sont contenus dans un plan de symétrie donné ?



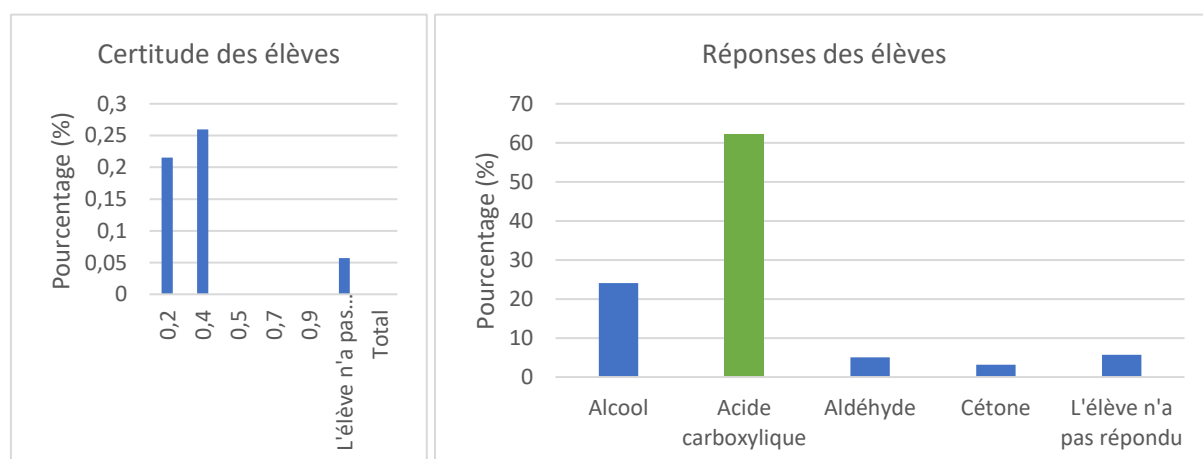
Question 13 : Si nous considérons une molécule de CH_2Cl_2 , combien d'atomes au maximum sont contenus dans un plan de symétrie donné



Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
0,3228	0,4690	0,5293	0,2960

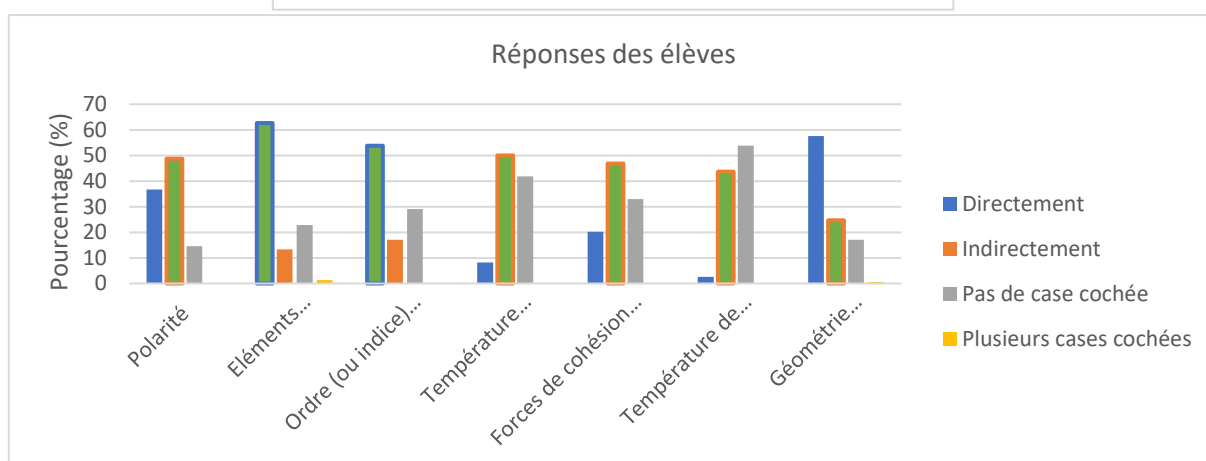
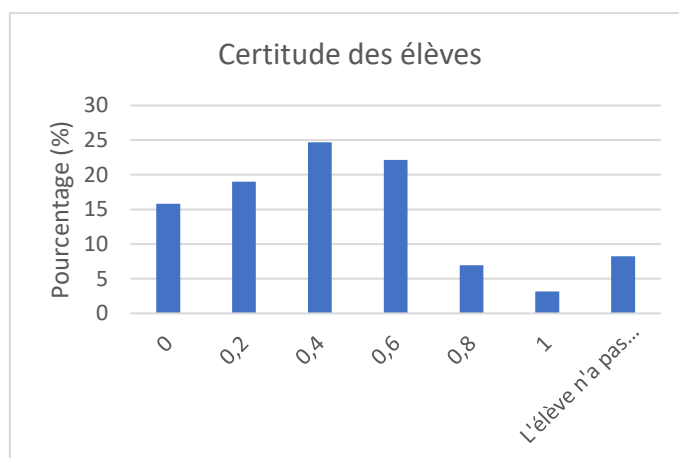
Questions se rapportant aux liens entre la structure et les propriétés

Question 10 : Quel composé parmi les suivants possède la plus haute température d'ébullition ?



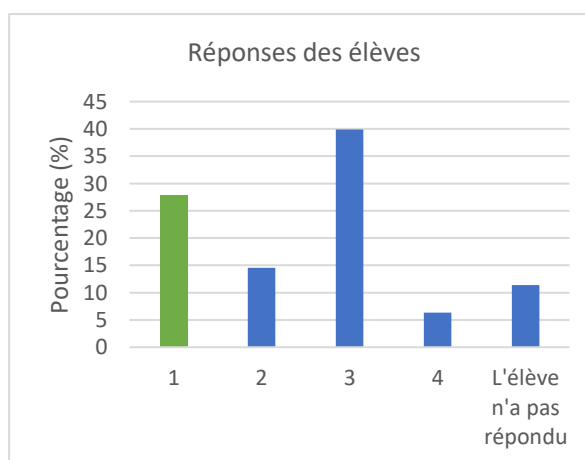
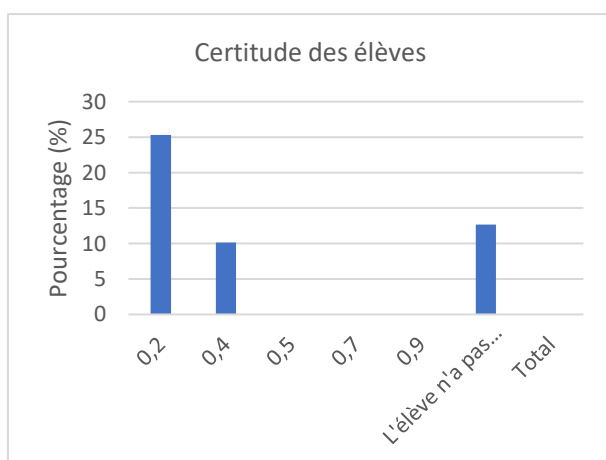
Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
0,6202	0,4869	0,4456	0,3094

Question 14 : Quelle(s) information(s) peut-on déterminer directement et indirectement à partir de la structure de Lewis d'une molécule en utilisant toutes les connaissances que vous possédez ? Cochez la ou les information(s) que vous pensez pouvoir déterminer et dans ce cas-là, cochez si vous pensez qu'elle est directe ou indirecte.



Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
0,4747	0,2651	0,3890	0,2654

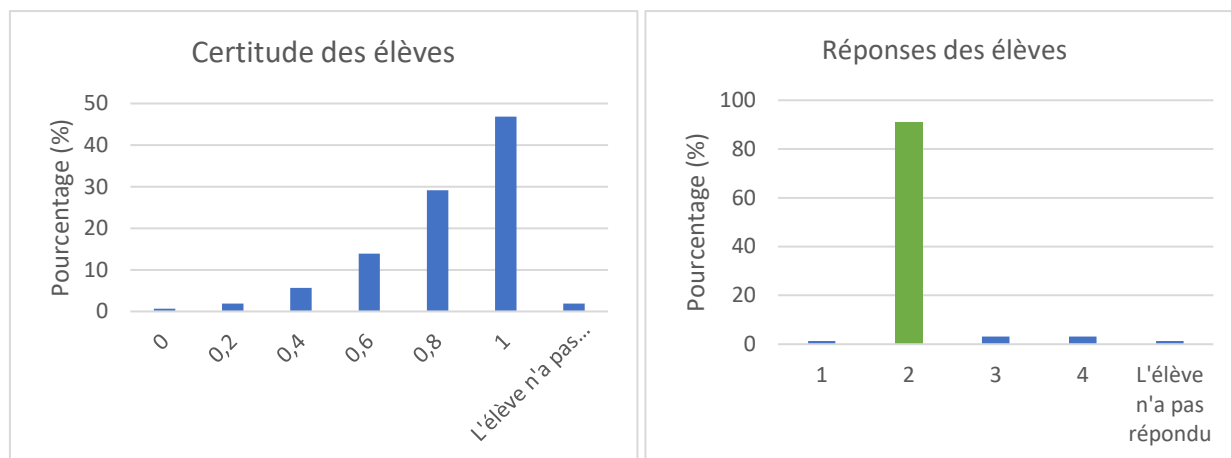
Question 17 : Voici quatre molécules (de A à D). Laquelle des classifications de ces molécules selon leur polarité est correcte ?



Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
0,2785	0,4497	0,2478	0,2813

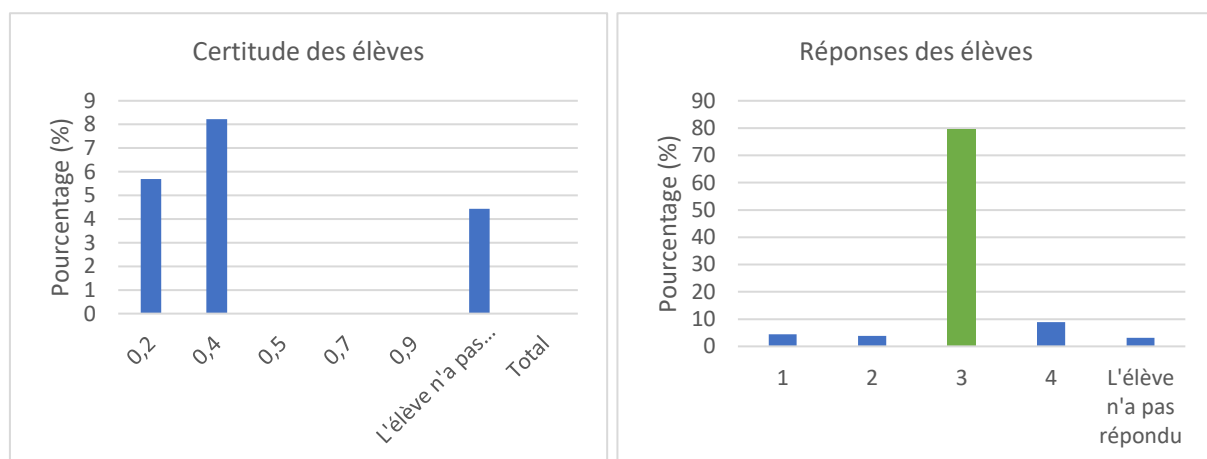
Questions se rapportant au thème de la perception

Question 6 : Dans la représentation suivante, quels atomes (représentés par les symboles E, F, G et H) sont les plus proches et les plus éloignés de l'observateur (c'est-à-dire de vous) ? (représentation de Cram)



Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
0,9114	0,2851	0,8271	0,2115

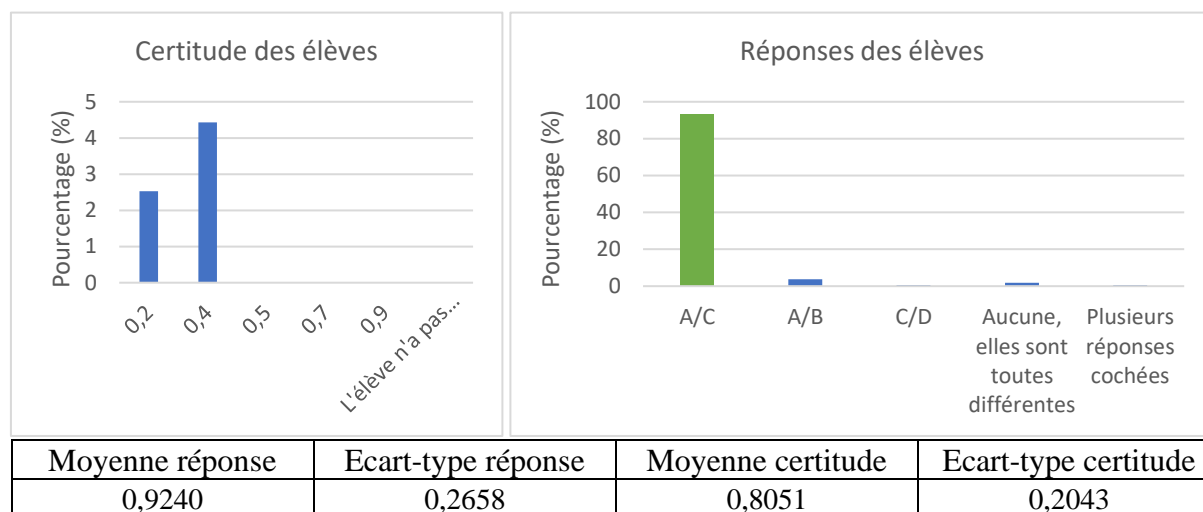
Question 15 : Dans le modèle 3D suivant, quel atome ou groupe d'atomes est le plus proche et le plus éloigné de l'observateur (c'est-à-dire vous) ? (illustration de modèles moléculaires)



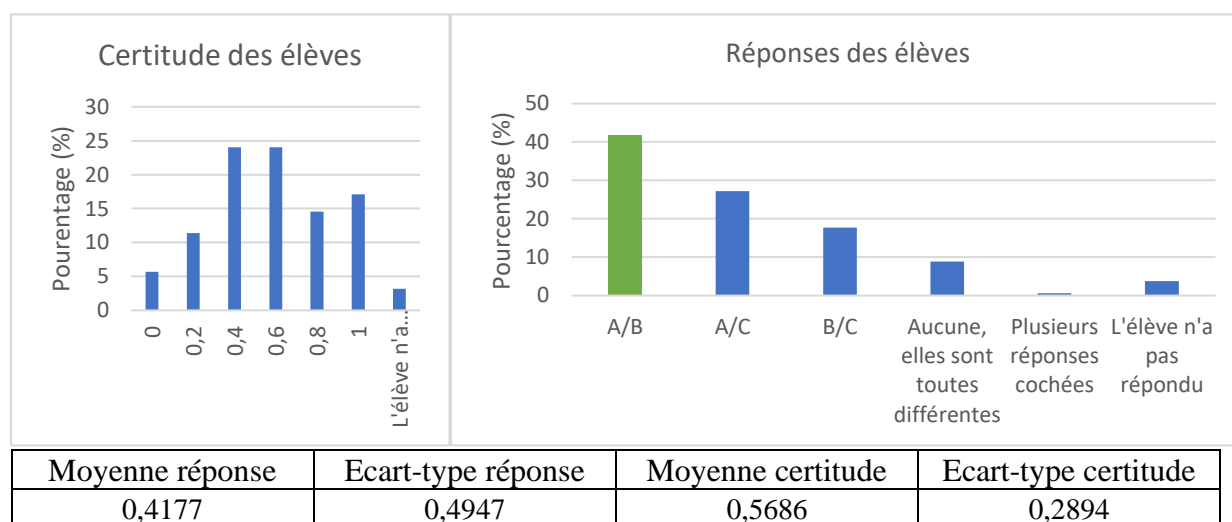
Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
0,7975	0,4032	0,6848	0,2961

Questions se rapportant au thème de la perception et de la rotation

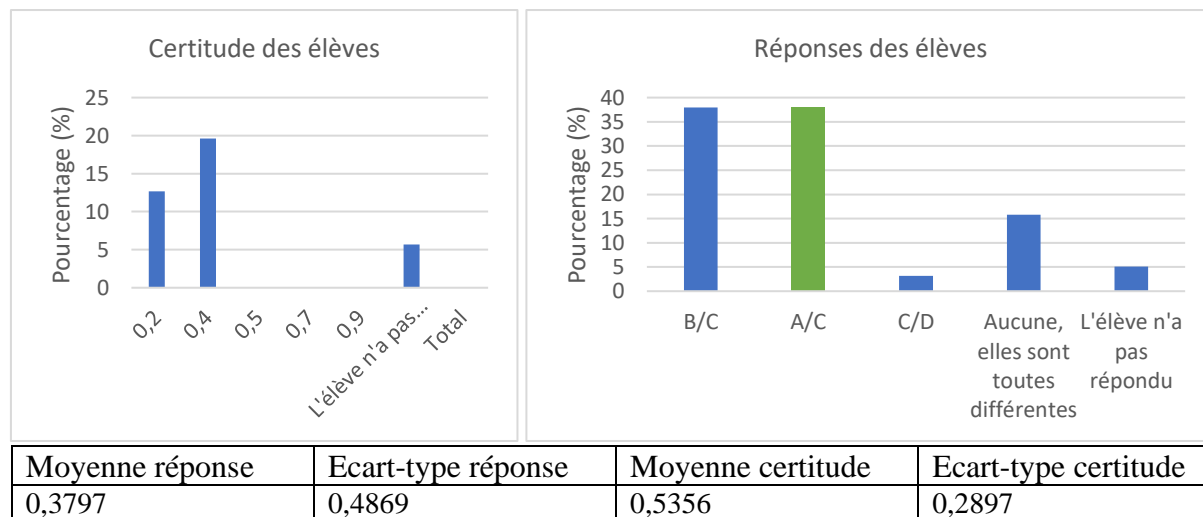
Question 7 : Quelles molécules sont identiques ? (une rotation en représentation de Cram)



Question 12 : Lesquelles de ces structures sont identiques ? (plusieurs rotations en illustrations de modèles moléculaires)

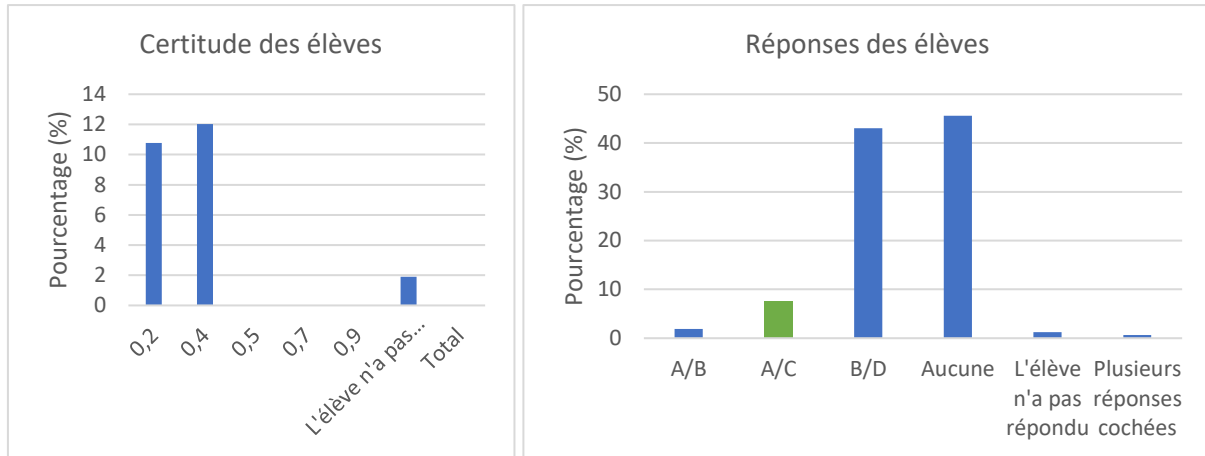


Question 16 : Quelles molécules sont identiques ? (plusieurs rotations en illustrations de modèles moléculaires)



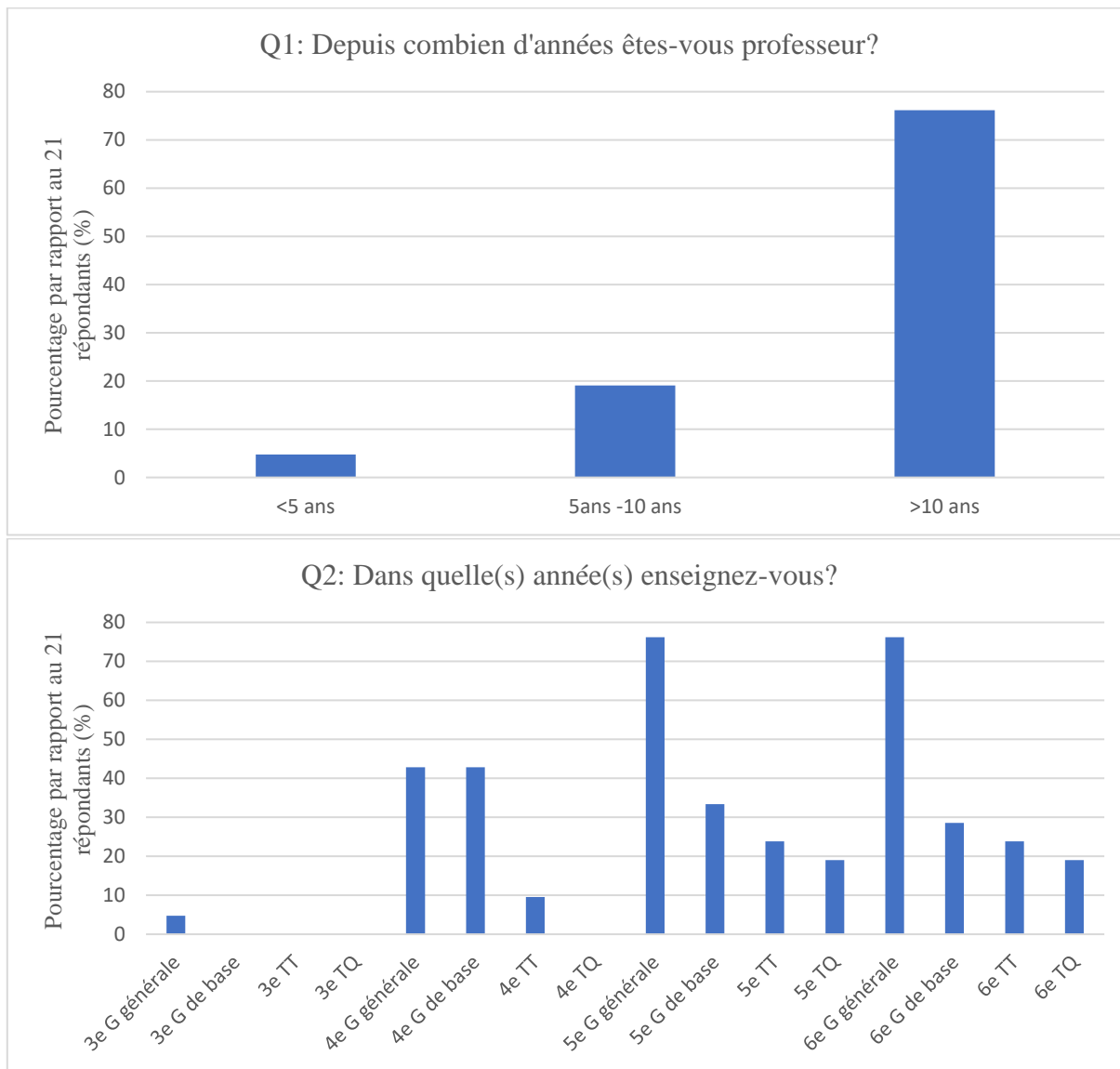
Questions se rapportant au thème de la perception, rotation et réflexion

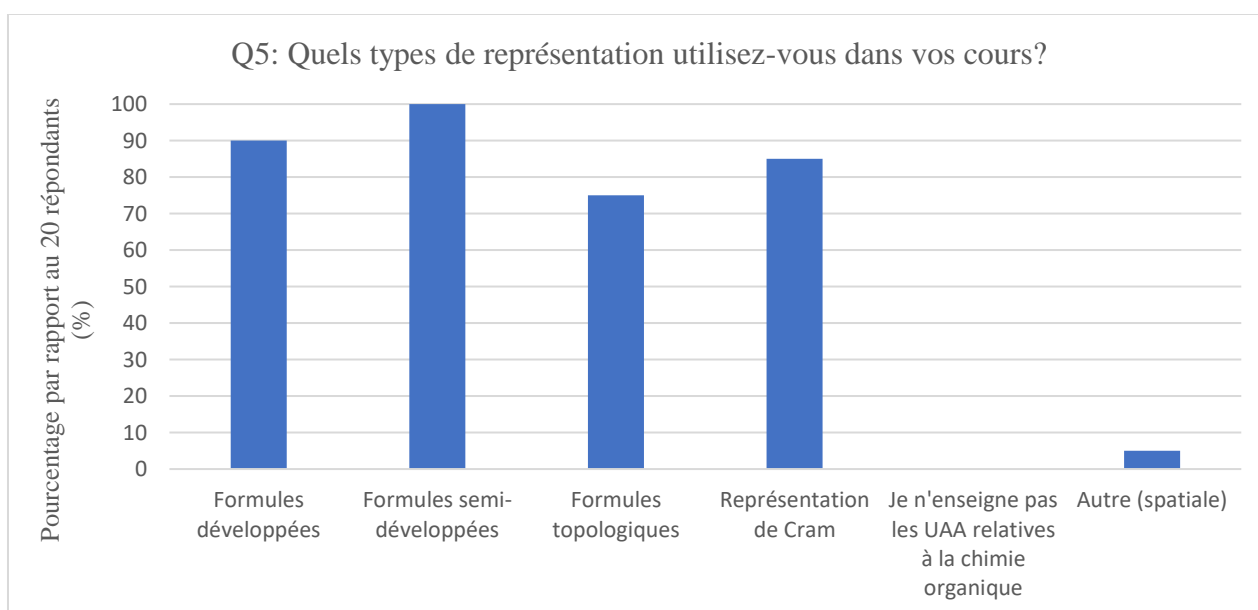
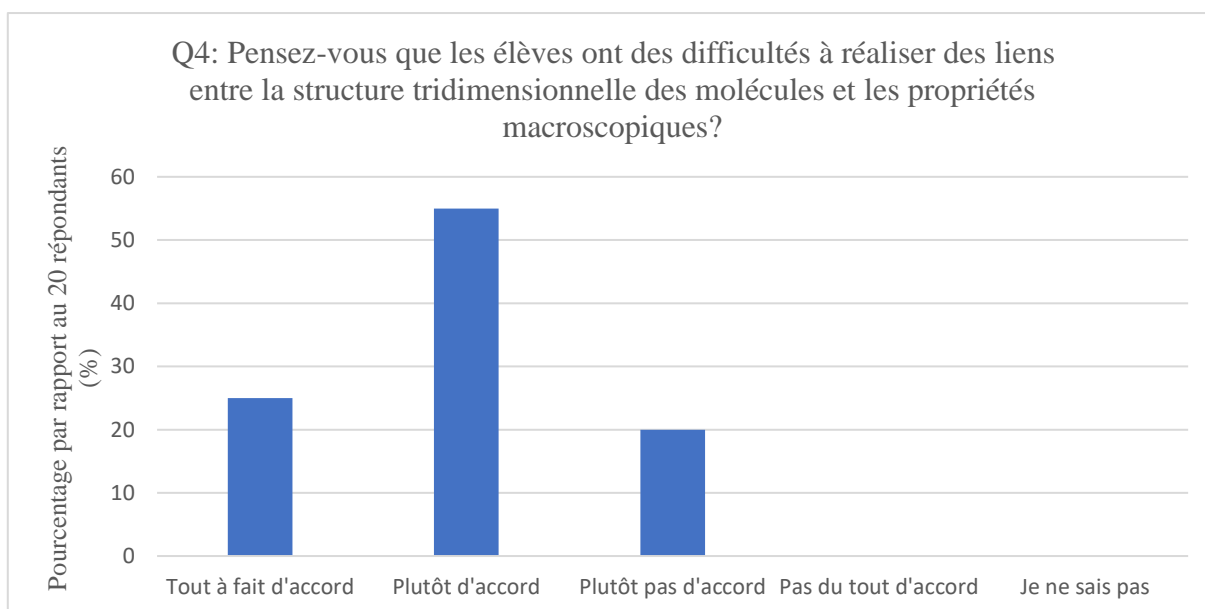
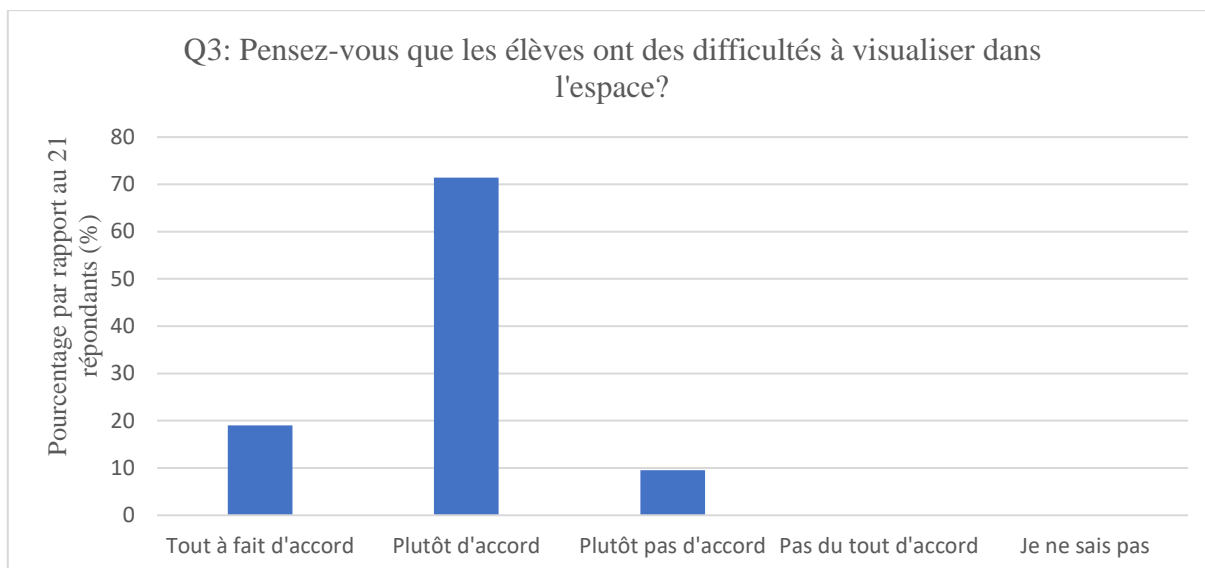
Question 9 : Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont images dans un miroir l'un de l'autre comme une main gauche et une main droite (exemple dans la figure suivante) ? (représentation de Cram)



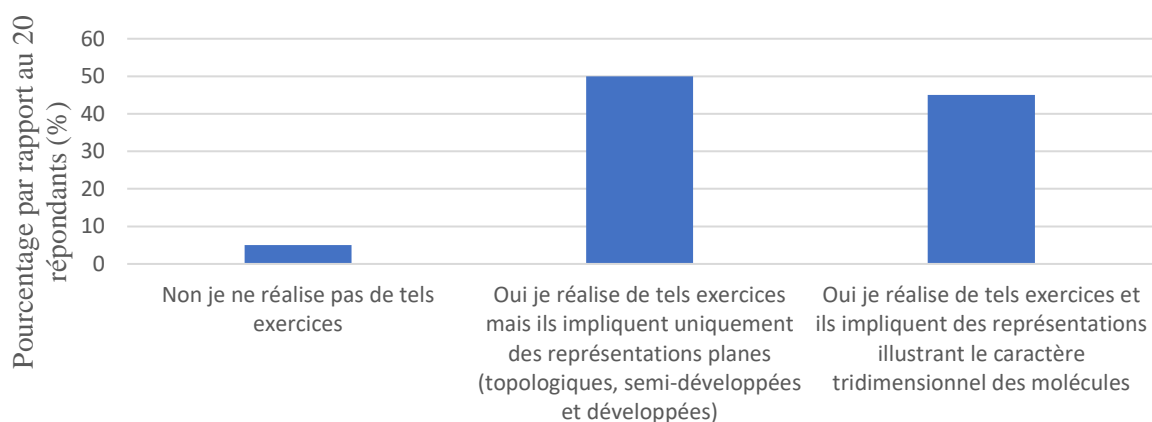
Moyenne réponse	Ecart-type réponse	Moyenne certitude	Ecart-type certitude
0,0759	0,2658	0,6658	0,2755

10) Annexe 10 : Réponses des professeurs au questionnaire permettant d'identifier les approches préférentiellement mises en place dans les écoles secondaires pour aider les élèves à visualiser les molécules dans l'espace

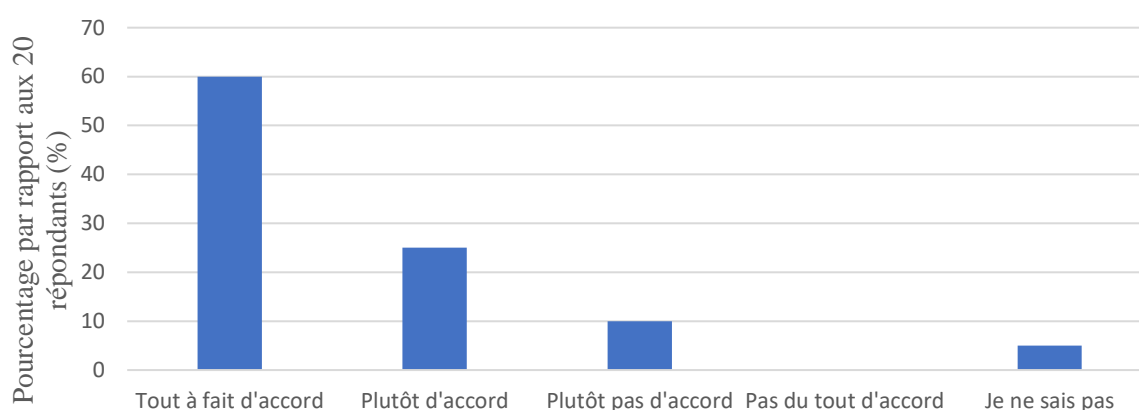




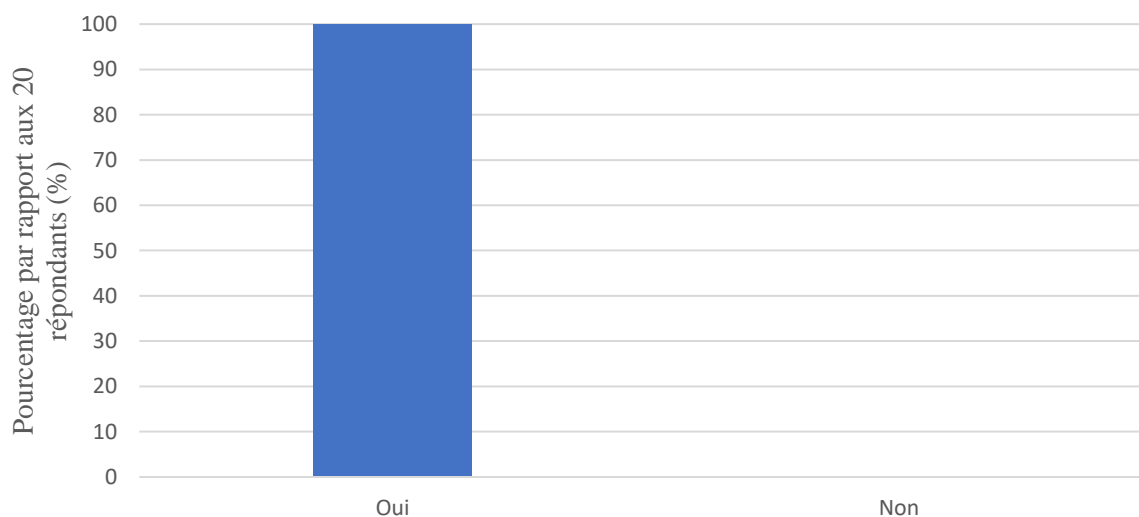
Q6: Réalisez-vous des exercices dans lesquels il est demandé aux élèves de passer d'une représentation à une autre? Si oui, ces traductions impliquent-elles des représentations illustrant le caractère tridimensionnel des molécules?

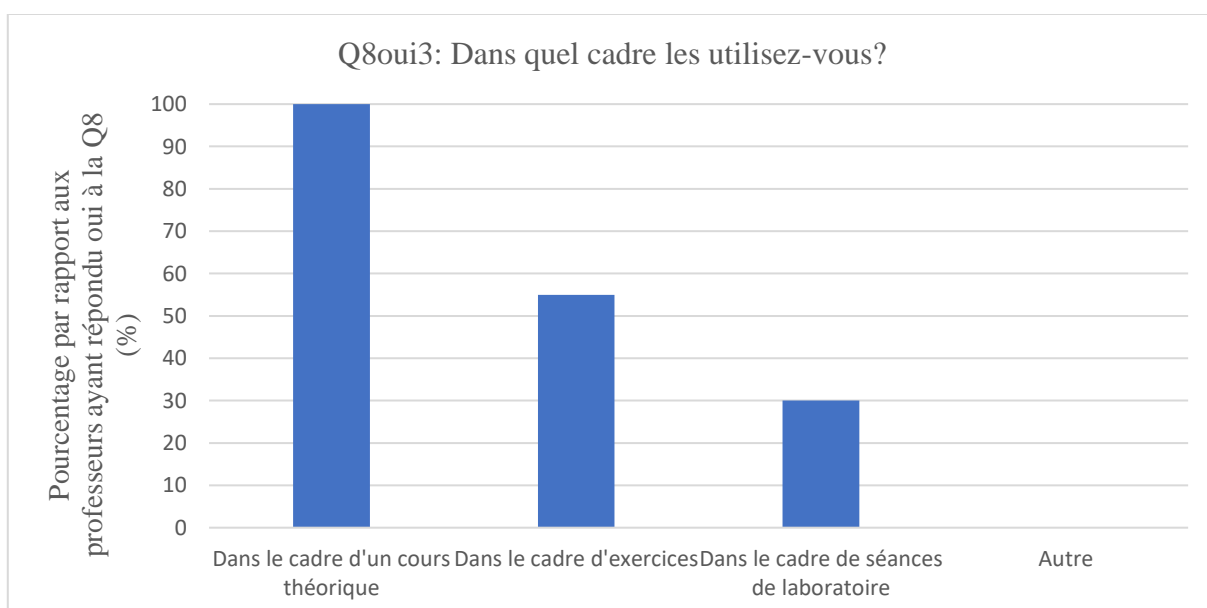
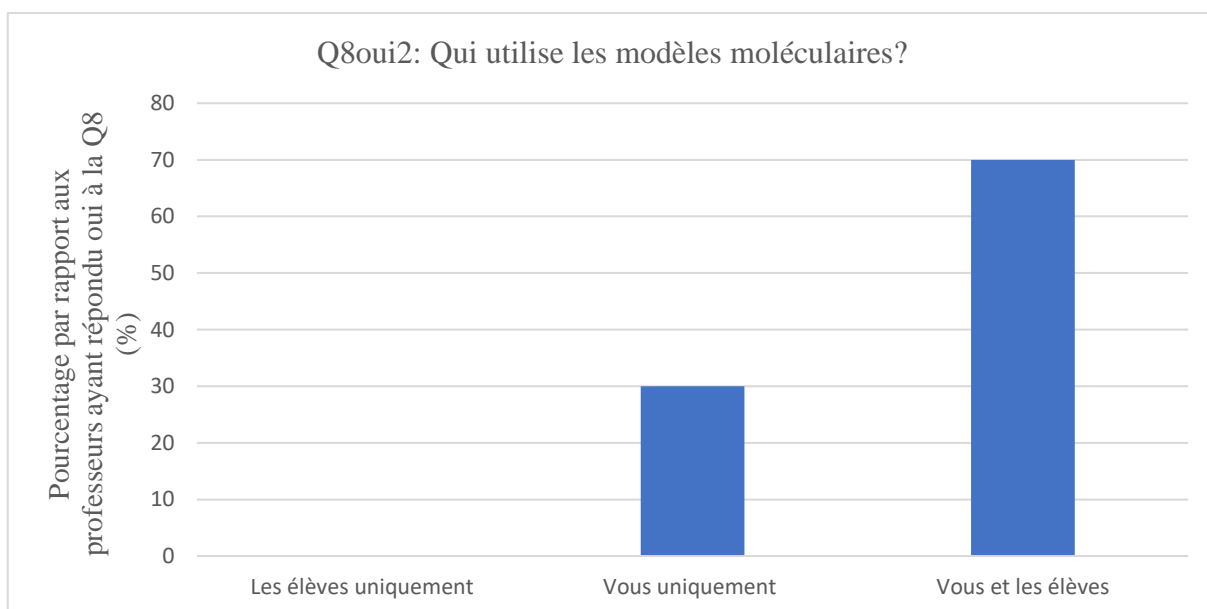
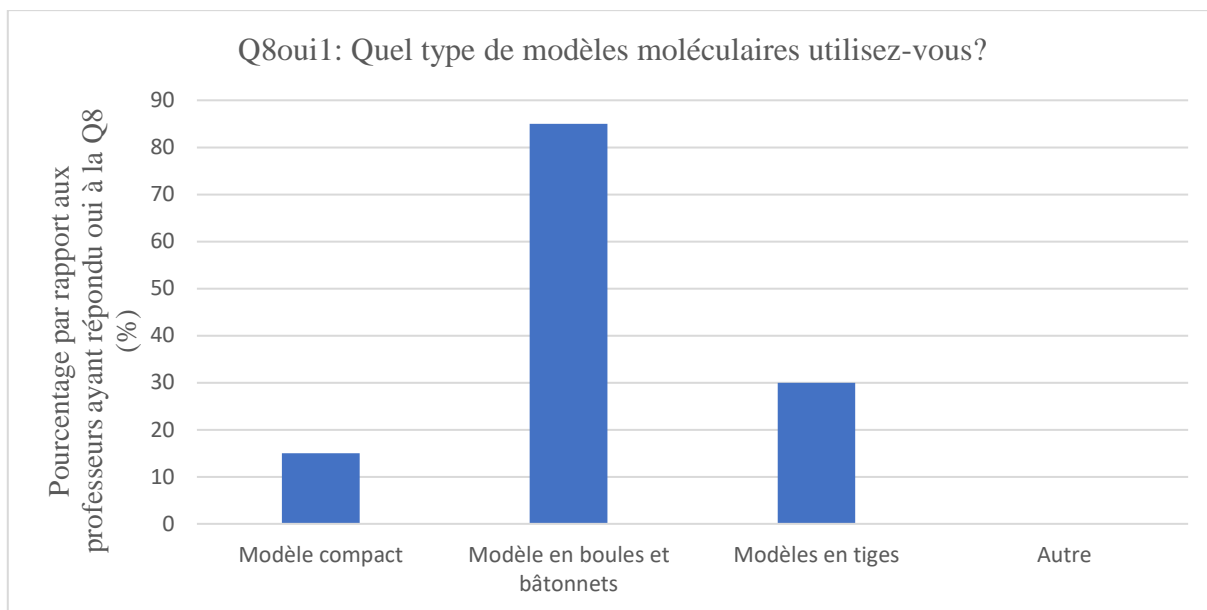


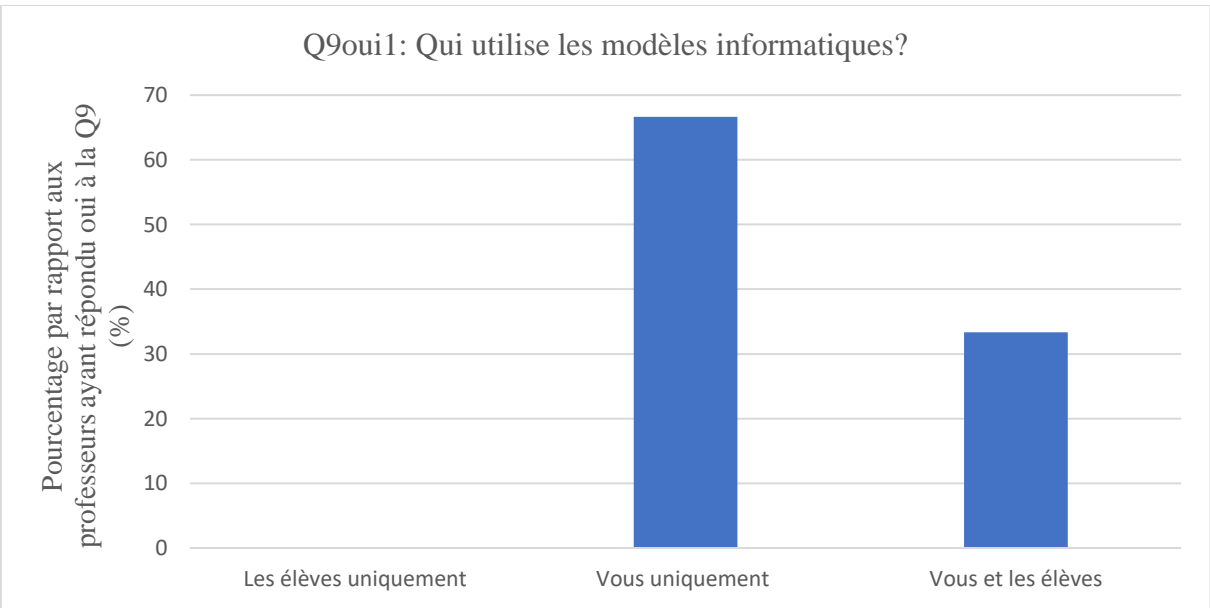
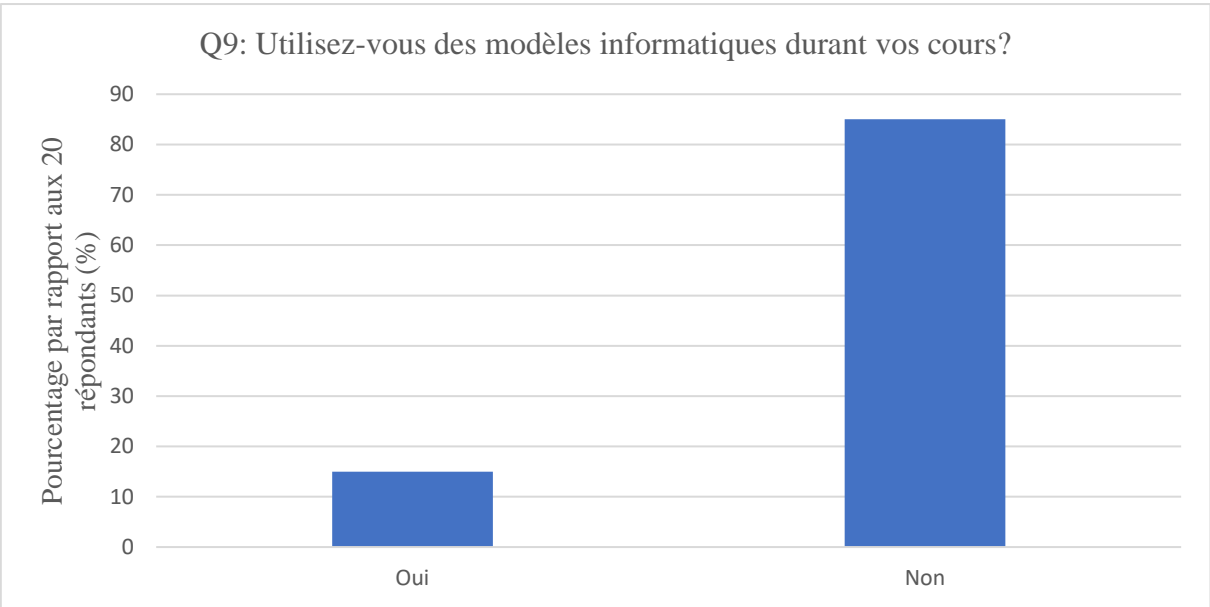
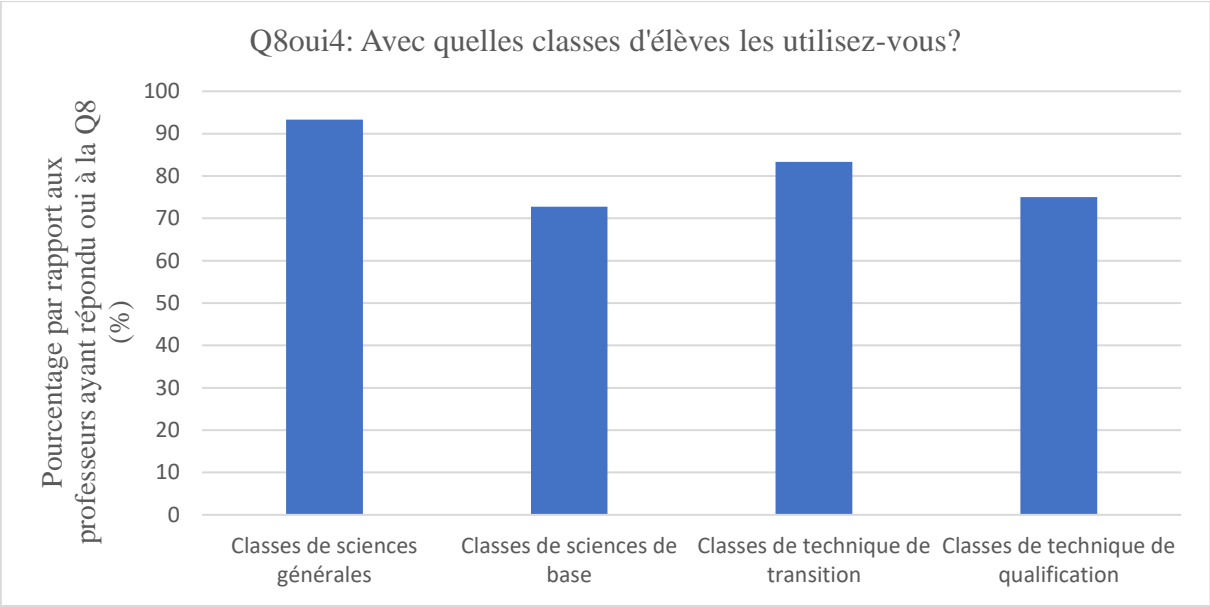
Q7: Pensez-vous que l'utilisation d'outils supplémentaires tels que les modèles moléculaires, l'utilisation de représentations informatiques ou d'outils technologiques (applications smartphone) peut aider les élèves à surmonter leurs difficultés avec la v

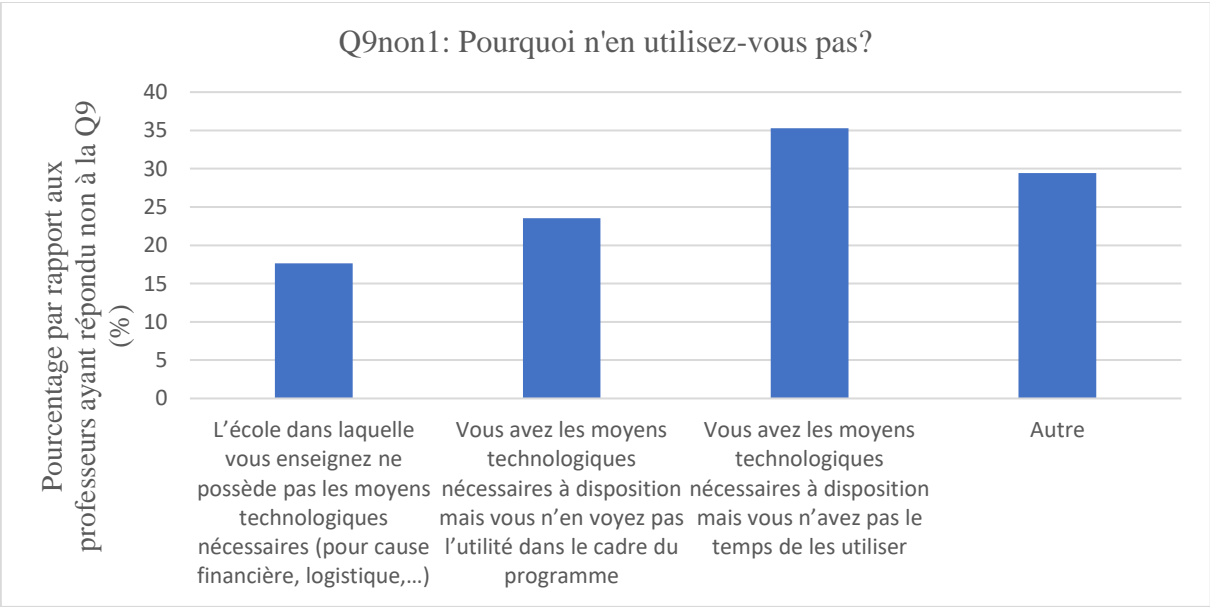
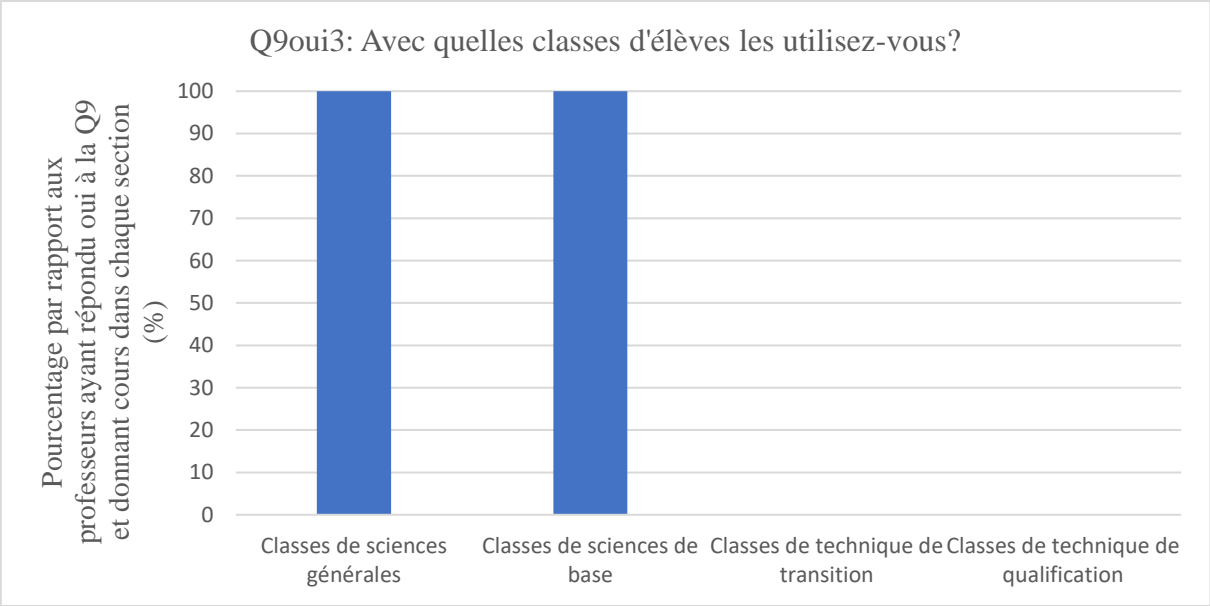
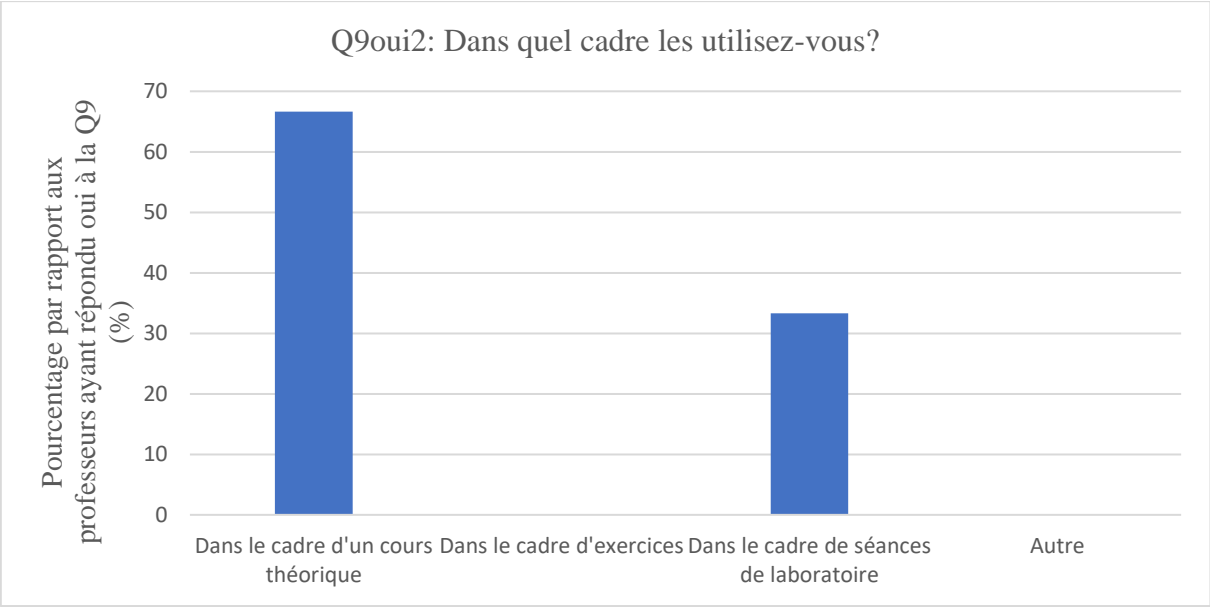


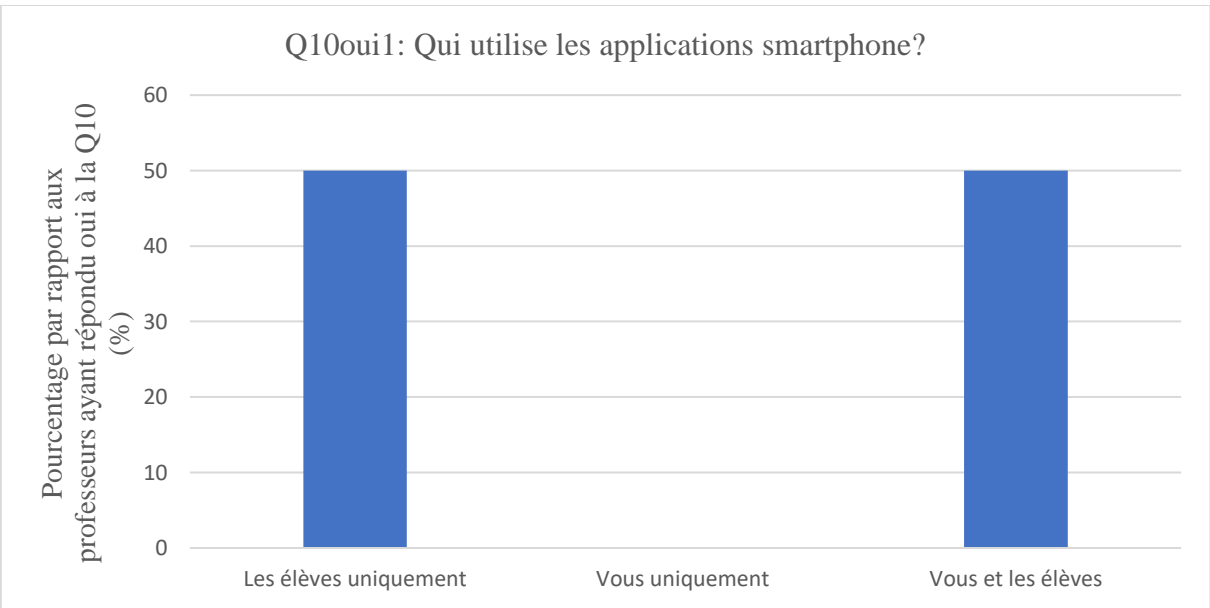
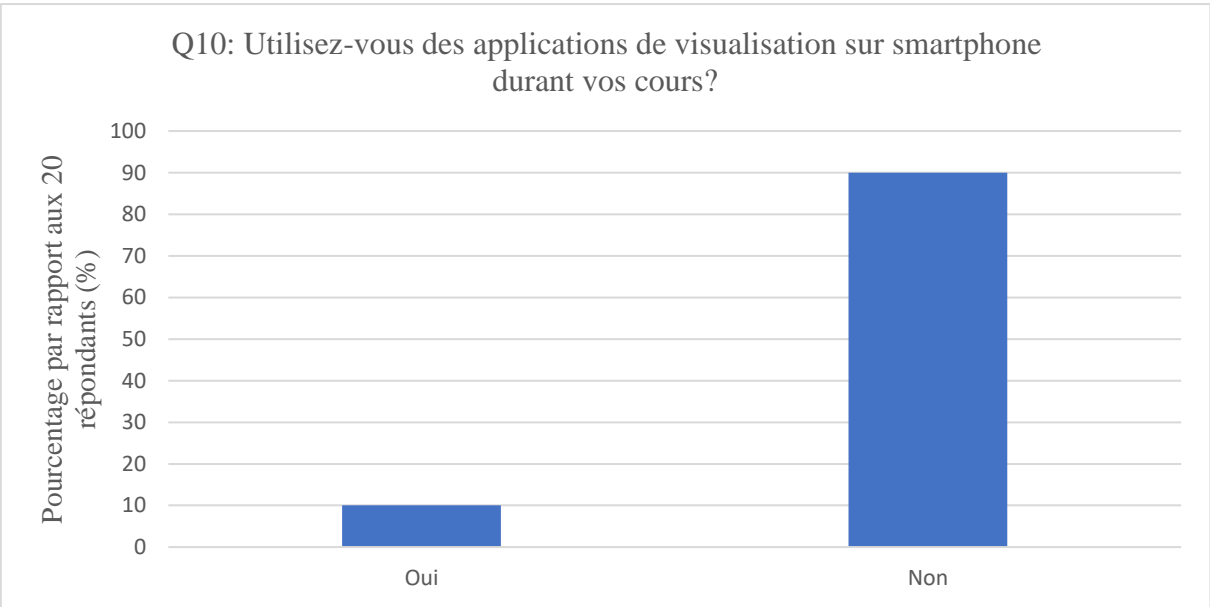
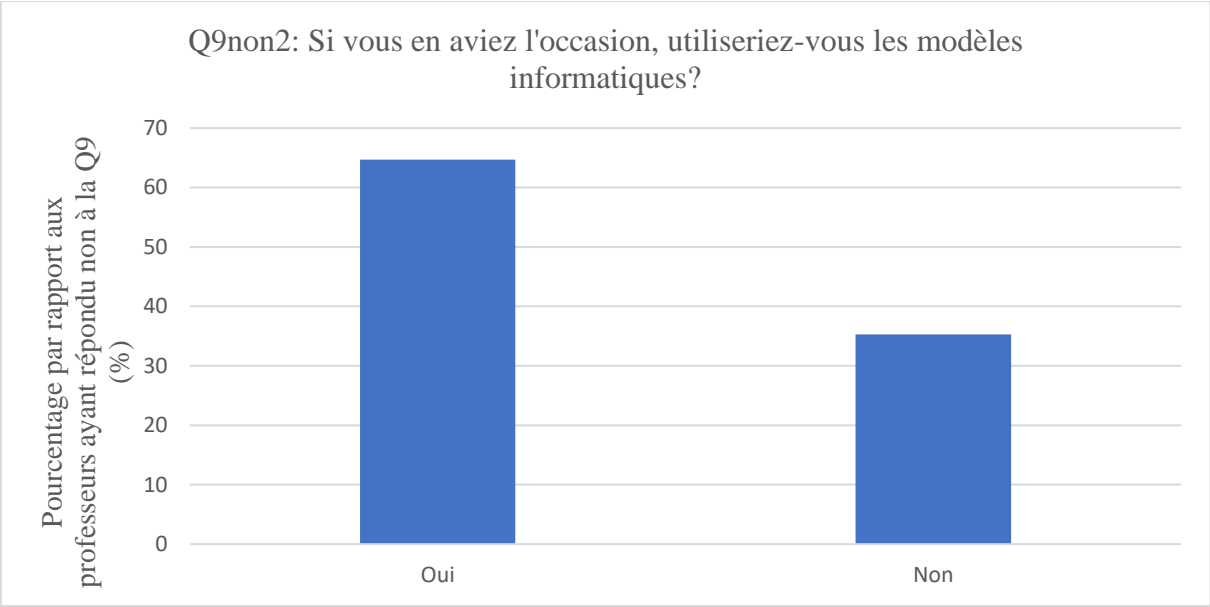
Q8: Utilisez-vous des modèles moléculaires durant vos cours?

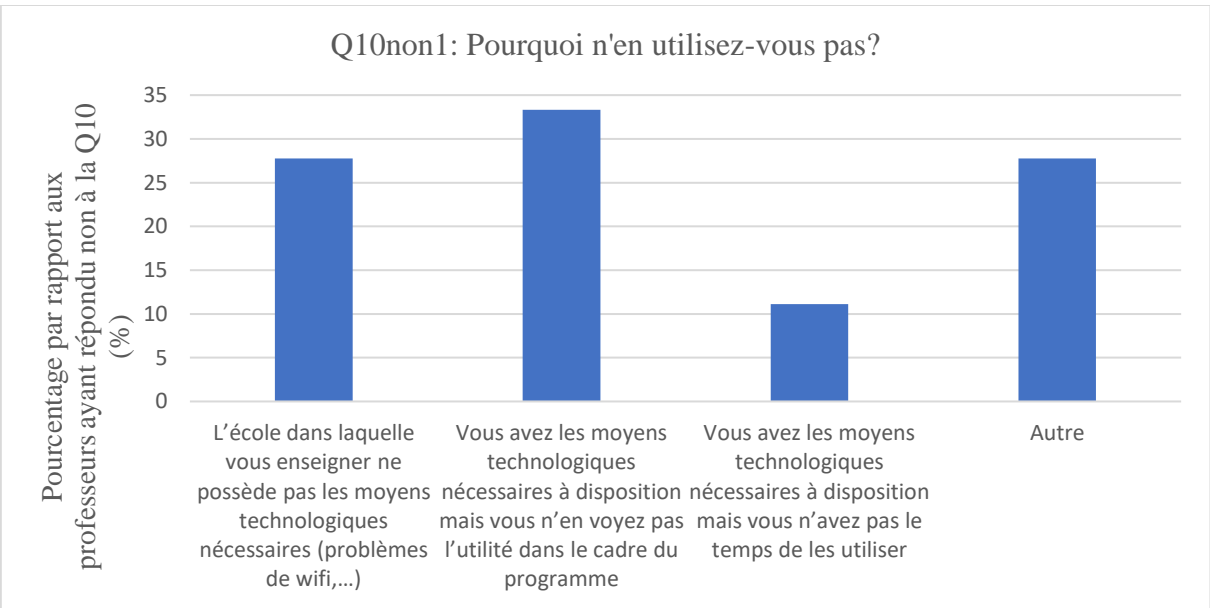
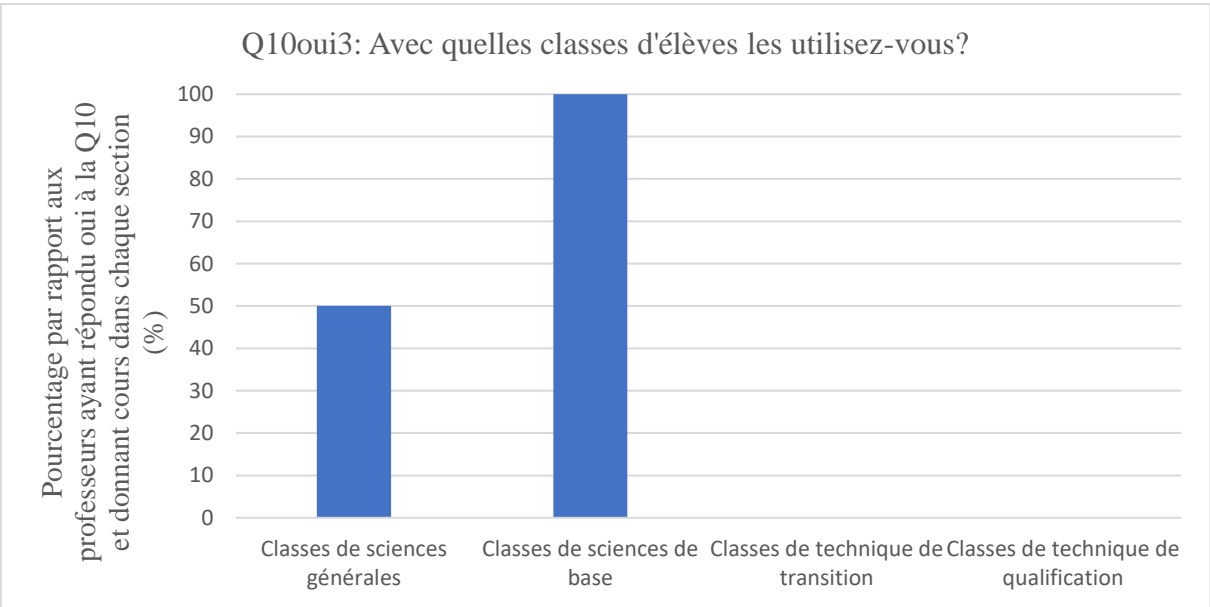
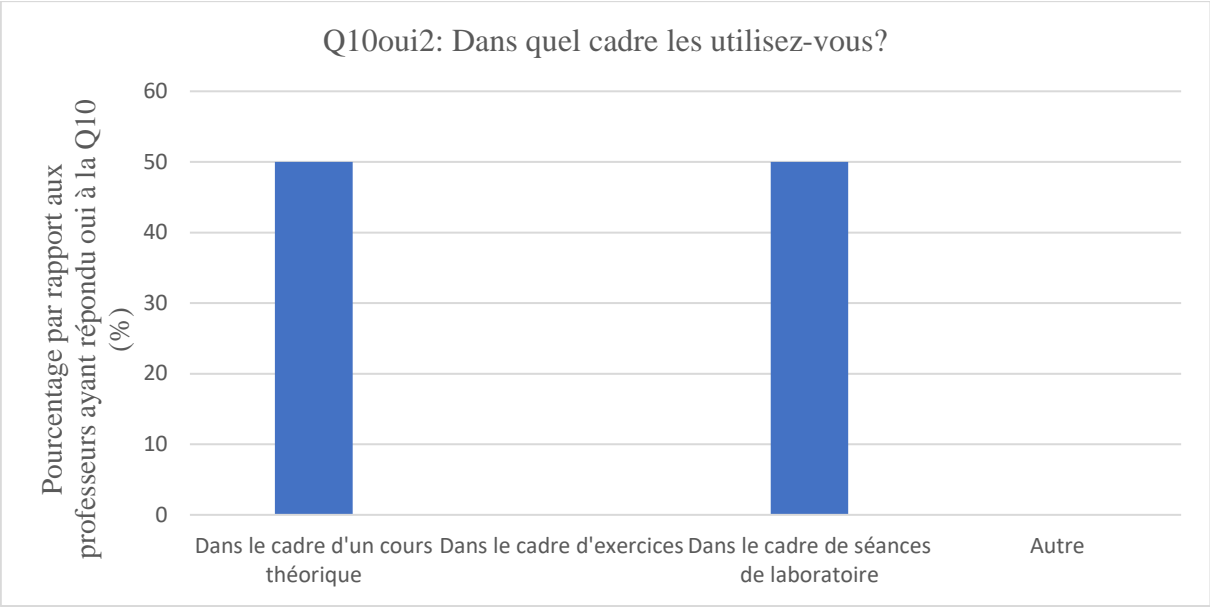


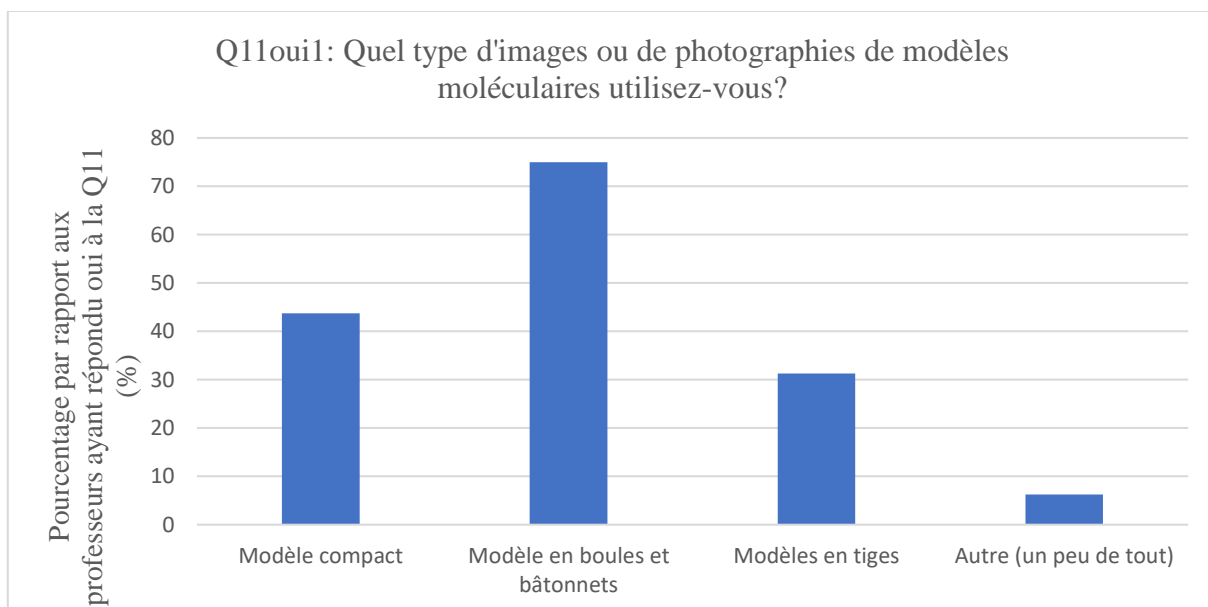
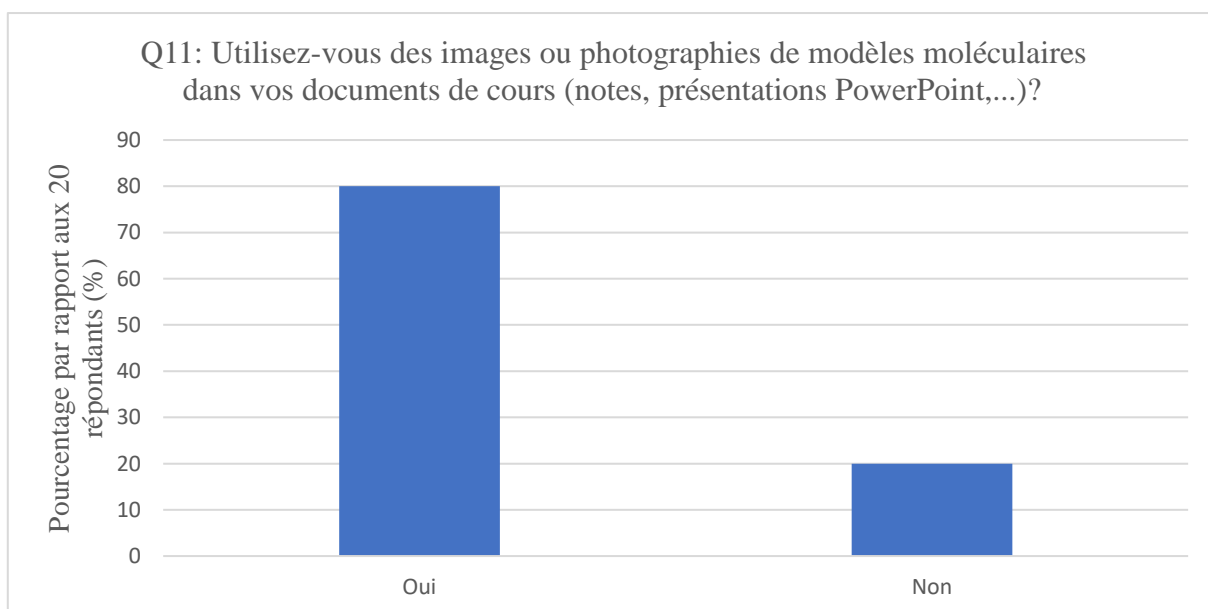
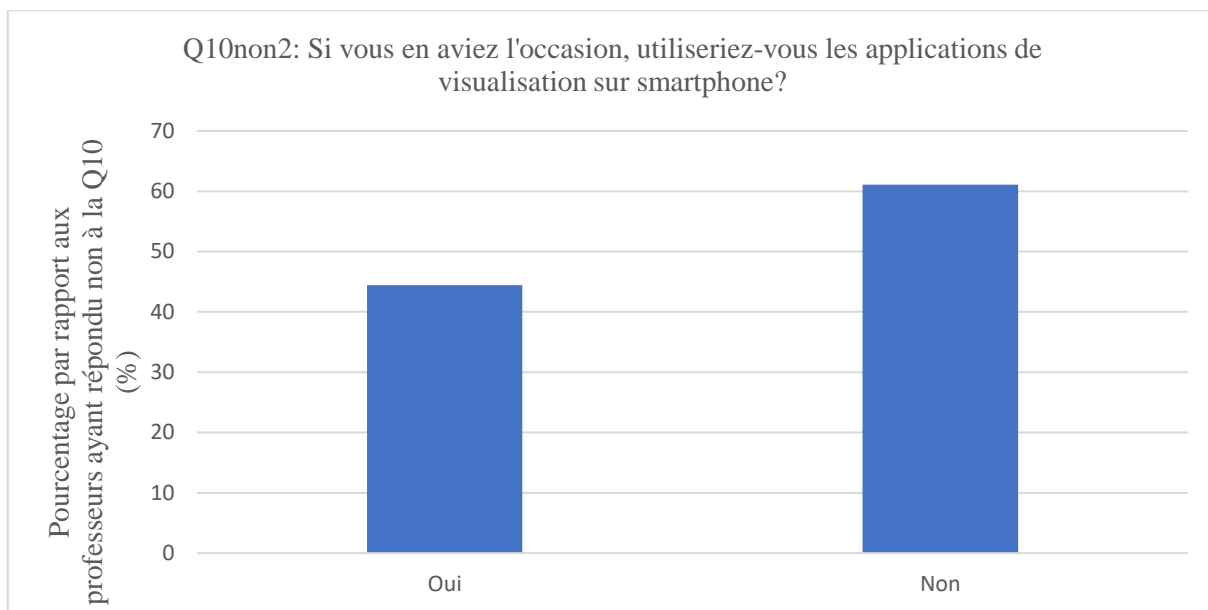


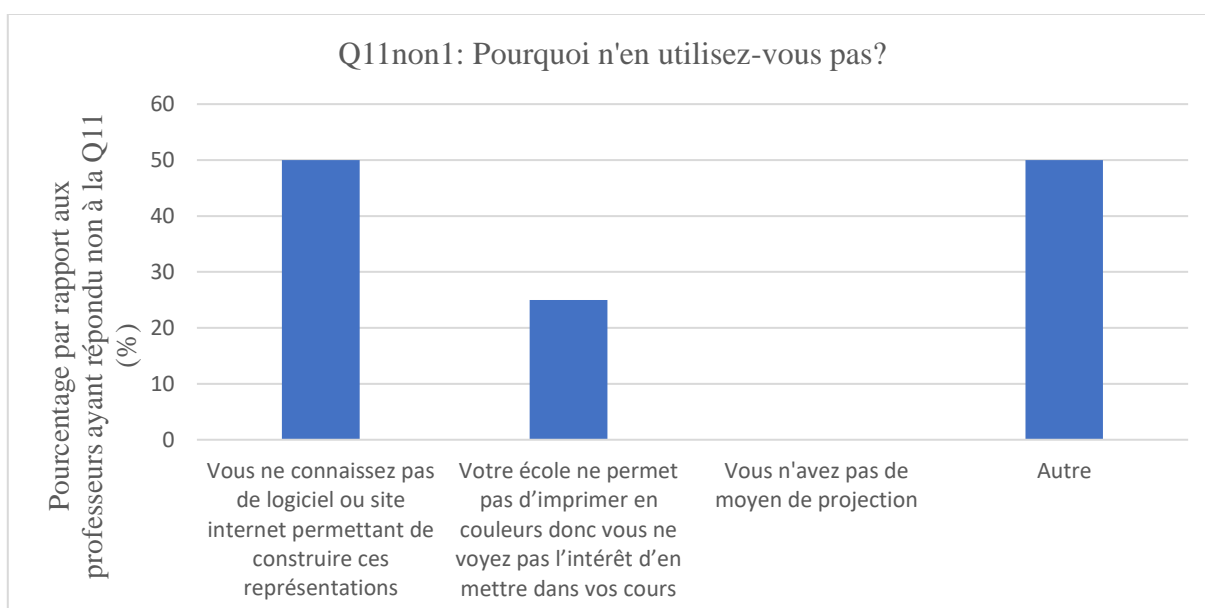
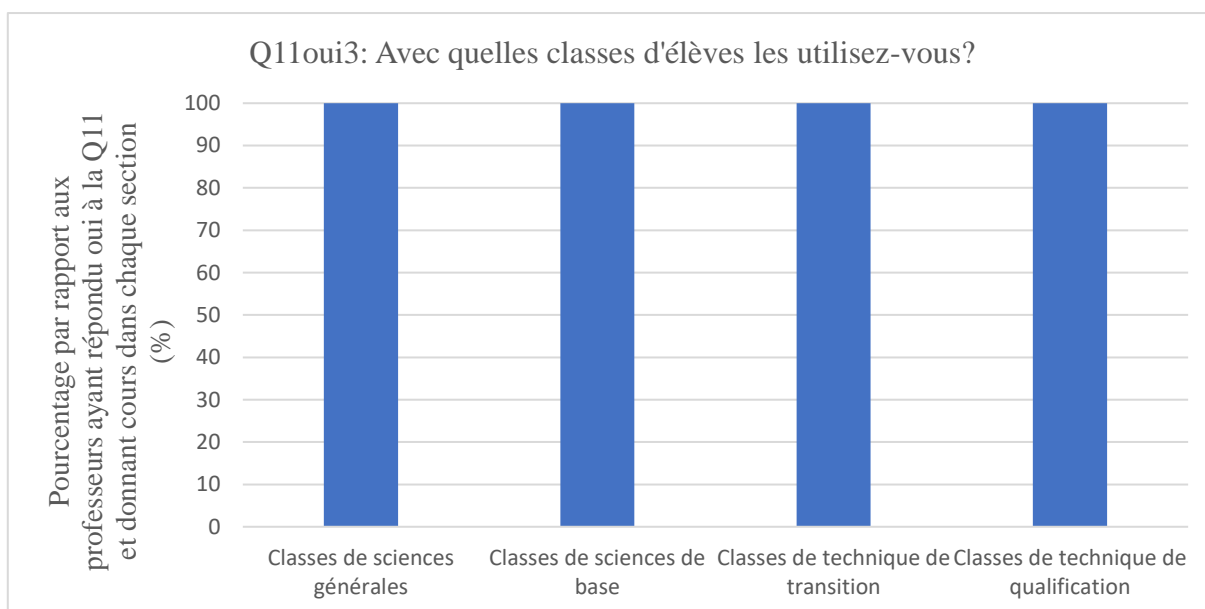
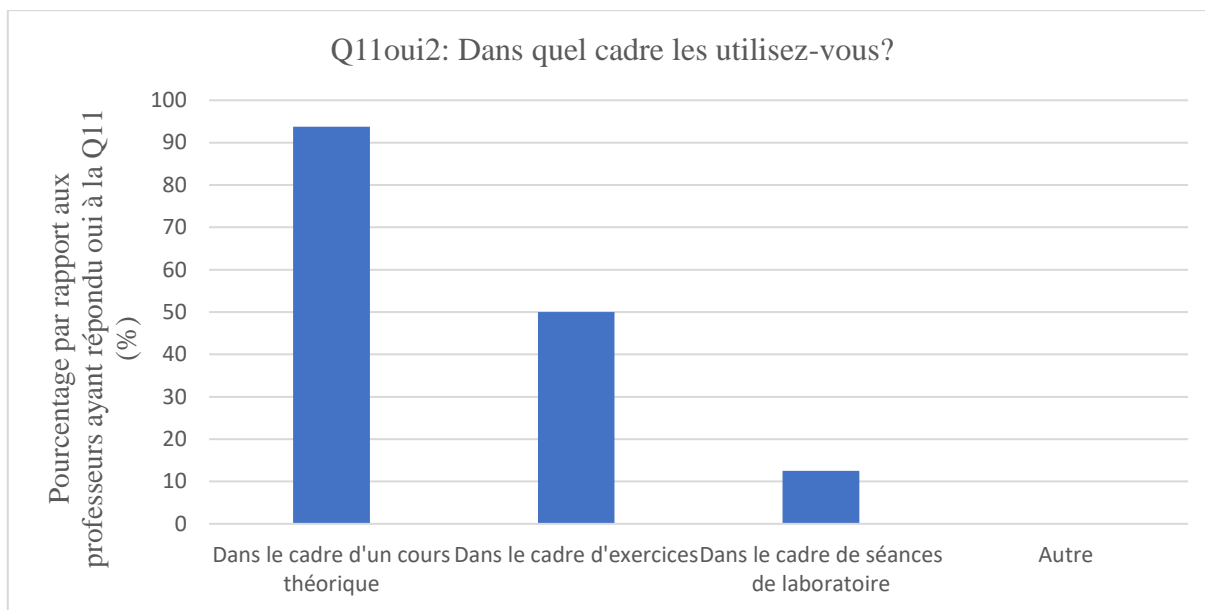


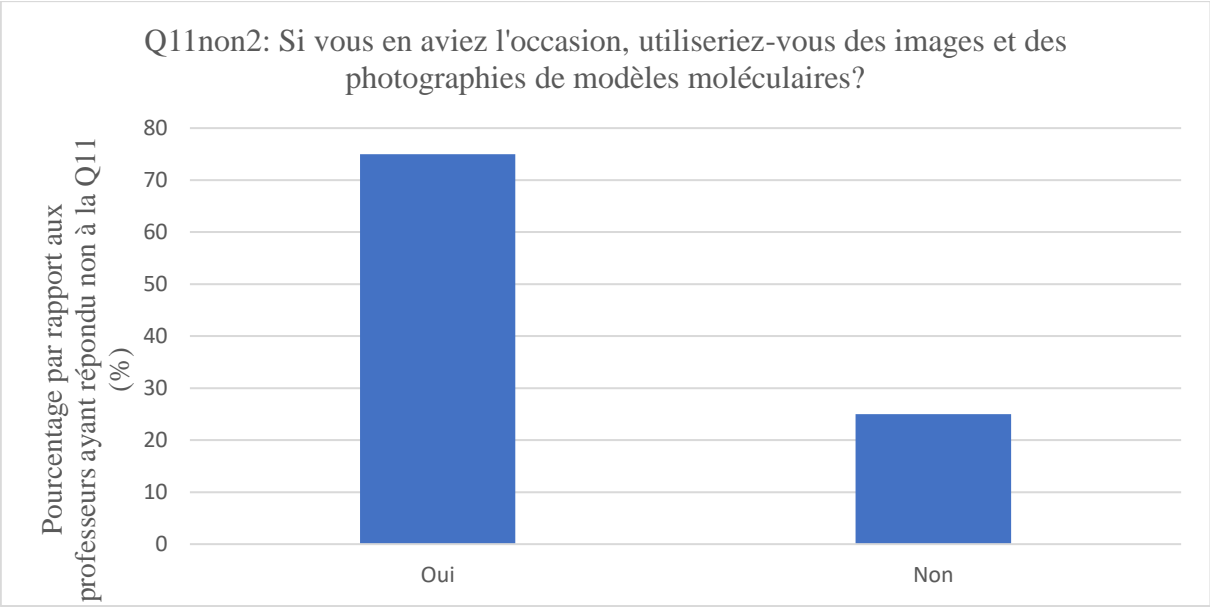












11) Annexe 11 : Ingénierie didactique sur les énantiomères

Activité sur les énantiomères

1) *Rappels de la représentation de Cram et de la signification « images miroirs »*

1.1) Introduction aux images miroirs

Durant ce cours, nous allons réaliser un test pour analyser votre capacité à voir dans l'espace et plus exactement votre capacité à reconnaître des molécules qui sont images miroirs l'une de l'autre. Avant cela, nous allons d'abord voir ce que cela signifie en pratique.

Devant vous, vous trouverez des modèles moléculaires. Il vous est demandé à chacun d'entre vous de construire un carbone tétraédrique portant quatre substituants. Après cela, vous me les donnerez et je les trierai.

Quelle(s) observation(s) pouvez-vous réaliser de ce tri ?

Avec les mêmes atomes, nous pouvons construire différents isomères de structure. Lorsque nous mettons un des isomères devant un miroir, le second isomère correspond parfaitement à l'image que l'on voit dans le miroir.

Afin de vérifier cette observation, nous allons vérifier nos résultats avec un miroir. Tel qu'illustré sur le schéma suivant, nous allons placer un modèle d'un des ensemble face à ce miroir et nous allons tenter de montrer que l'image miroir est identique aux modèles du second ensemble. Ces molécules sont des **isomères de structure**.

1.2) Introduction à la représentation de Cram

Mise en contexte :

Reprenons les modèles de tout à l'heure. Nous avons vu que ces isomères de structure ne possédaient pas le même arrangement spatial. Comment pouvons-nous représenter cet arrangement spatial qui est tridimensionnel sur une feuille de papier qui est, quant à elle, en deux

Idées ? Les élèves vont pouvoir donner leur avis. Je n'attends pas de réponse spécifique. Je leur demande simplement de réfléchir à la manière de faire.

dimensions ?

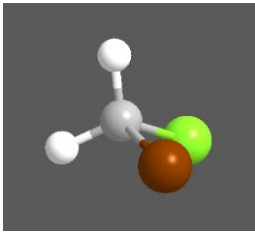
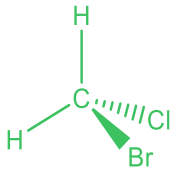
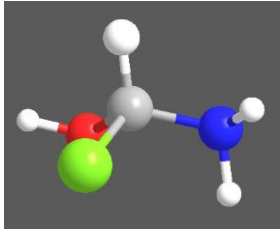
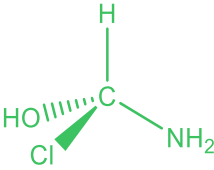
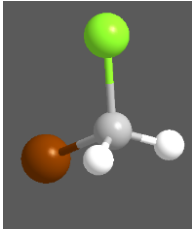
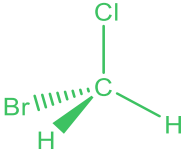
Théorie :

Nous utilisons la **représentation de Cram**. C'est un type de représentation qui, comme déjà indiqué précédemment, permet de mettre en évidence l'arrangement spatial des molécules grâce

à l'utilisation d'indices de profondeur. Les liaisons se trouvant dans le plan de la feuille sont représentées par des traits continus, les liaisons illustrant un atome ou groupe d'atomes se trouvant devant le plan de la feuille sont représentées en traits gras et les liaisons illustrant un atome ou un groupe d'atomes se trouvant derrière le plan de la feuille sont représentées en traits pointillés.










—	Liaison se trouvant dans le plan de la feuille
⋯⋯⋯⋯⋯	Liaison se trouvant derrière le plan de la feuille
▶	Liaison se trouvant devant le plan de la feuille

Réalisons quelques exemples ensemble :

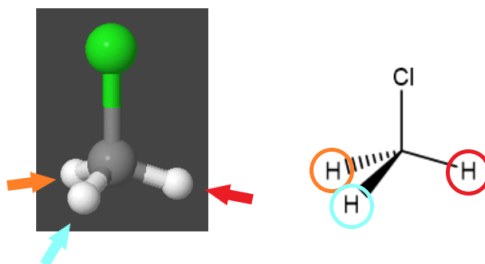
Formule semi-développée	Modèle moléculaire	Représentation de Cram
CH ₂ BrCl	 <p>Brun : atome de brome Vert : atome de chlore</p>	
CHClNH ₂ OH	 <p>Vert : atome de chlore Rouge : atome d'oxygène Bleu : atome d'azote</p>	
CH ₂ BrCl	 <p>Brun : atome de brome Vert : atome de chlore</p>	

2) Test pré-activité

Voici un rappel des conventions pour les différentes couleurs de sphères et pour dessiner une représentation de Cram.

	Liaison se trouvant dans le plan de la feuille
	Liaison se trouvant derrière le plan de la feuille
	Liaison se trouvant devant le plan de la feuille
	Atome d'hydrogène
	Atome de carbone
	Atome d'oxygène
	Atome d'azote
	Atome de chlore
	Atome de brome

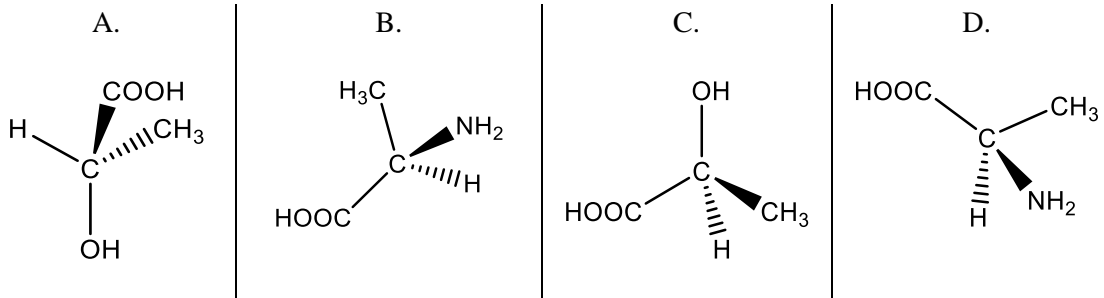
Exemple pour illustrer les conventions de la représentation de Cram :



- 1) Quel est votre identifiant ? Pour cela, prenez les deux premières lettres de votre nom, les deux premières lettres de votre prénom et les quatre chiffres composant votre code postal.

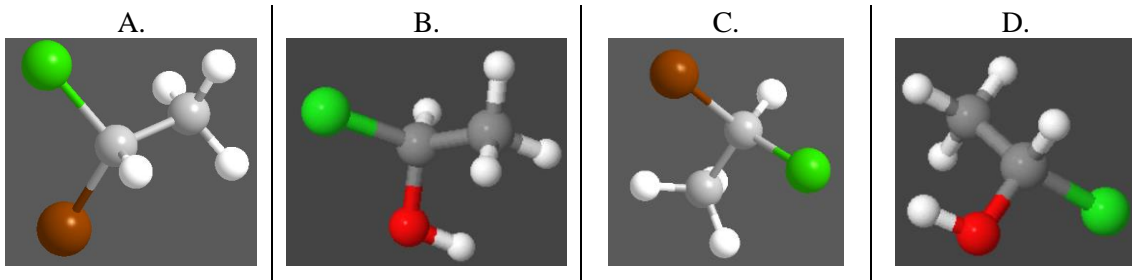
.....

2) Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont images l'un de l'autre à travers un miroir ?



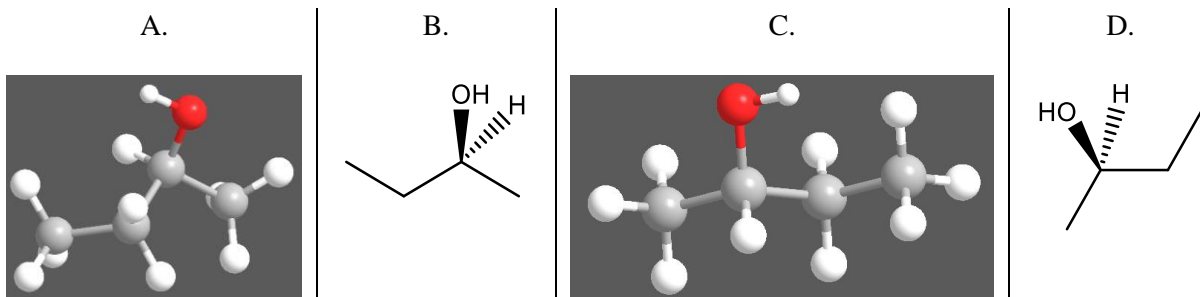
- A/C
- B/D
- C/D
- Aucune des possibilités ci-dessus

3) Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont images l'un de l'autre à travers un miroir ?



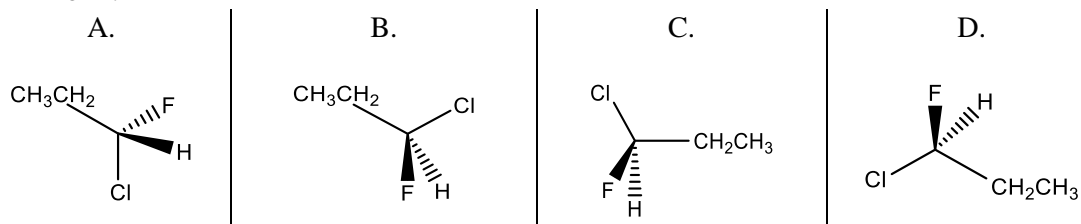
- A/C
- B/D
- C/D
- Aucune des possibilités ci-dessus

4) Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont images l'un de l'autre à travers un miroir ?



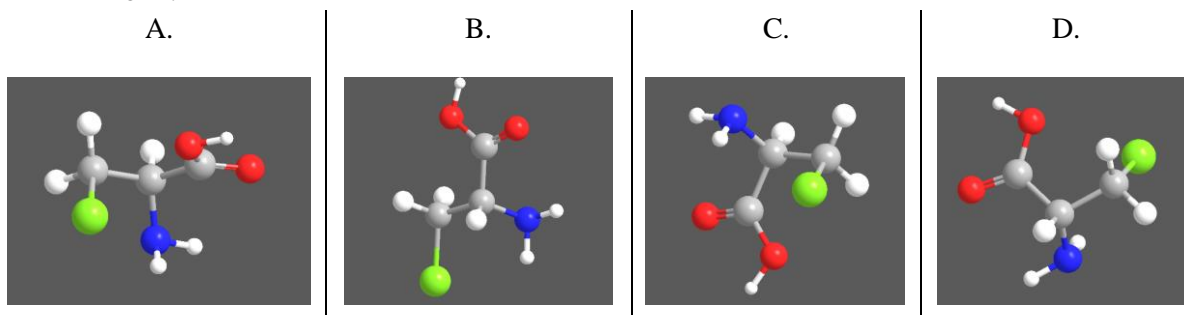
- A/B
- B/C
- C/D
- Aucune des possibilités ci-dessus

5) Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont images l'un de l'autre à travers un miroir ?



- A/C
- B/D
- A/B
- Aucune des possibilités ci-dessus

6) Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont images l'un de l'autre à travers un miroir ?



- A/C
- B/D
- C/D
- Aucune des possibilités ci-dessus

7) Les modèles moléculaires vous ont-ils été utiles ? Entourez votre pourcentage d'utilisation :

0%	20%	40%	60%	80%	100%
Pas très utilisé					Très utilisé

3) Les énantiomères

3.1) Mise en situation

Les exercices du test ont tous un point commun, il était demandé de trouver deux molécules qui sont des images miroir l'une de l'autre non superposables. Précédemment dans vos cours, vous avez entendu parler d'isomères (par exemple : isomères de position). Dans notre cas, les molécules images l'une de l'autre dans un miroir sont appelées des isomères de structure. Nous pourrions nous demander quel est l'intérêt de pouvoir reconnaître des molécules images l'une de l'autre dans un miroir. Pour comprendre cela, prenons un exemple : le limonène. Vous allez sentir ces deux extraits de fruits aux odeurs bien différentes. En effet, l'un a une odeur d'orange tandis que le second a une odeur de citron pourtant ces odeurs sont causées par la même molécule : le limonène. Dans le cas de l'extrait à l'orange, nous trouvons le limonène de configuration R et dans celui au citron, nous trouvons le limonène de configuration S. Nous pouvons voir les deux formes de ce composé dans la figure 1. **Je leur demanderai d'essayer de superposer les modèles moléculaires représentant les deux configurations du limonène.**

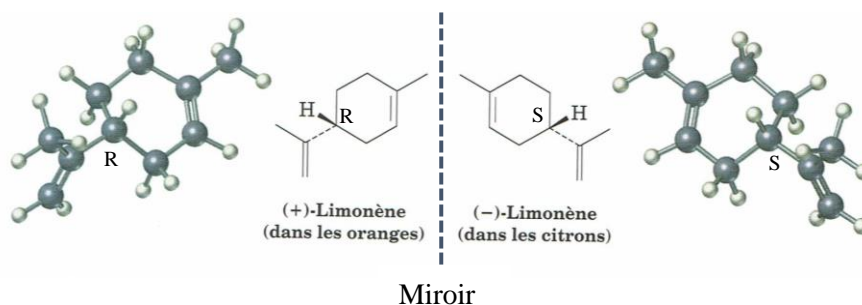


Figure 1: Représentations de Cram et modèles moléculaires de la paire d'énantiomères du limonène.

Durant cette séance de laboratoire, nous allons nous concentrer sur la structure tridimensionnelle des molécules. C'est ce que nous appelons la stéréochimie. Nous allons donc voir ce qu'est la chiralité, la configuration absolue et l'énantiomérisation. Nous commençons avec une partie théorique dans laquelle ces concepts seront abordés et illustrés avec un exemple particulier qui est l'acide lactique. Nous aborderons également différents exemples dans la vie quotidienne. Ces derniers nous permettront de nous entraîner à déterminer la configuration absolue. La seconde partie de cette séance consistera à manipuler des modèles moléculaires ou utiliser une application sur smartphone, selon le groupe dans lequel vous serez, pour analyser des structures tridimensionnelles.

3.2) Notion de chiralité et d'énantiomérisation

Pour introduire cette notion, prenons un exemple. Si nous observons nos mains, nous pouvons voir que notre main droite est l'image miroir de notre main gauche (Figure 2). Si nous essayons de superposer ces deux images, nous n'y arrivons pas. C'est ce que nous appelons la chiralité. D'ailleurs, le mot « Chiral » vient du mot grec χείρ, *kheír*, qui signifie « la main ». Par exemple, le mot chirurgien possède la même racine car un chirurgien est une personne travaillant avec ses mains. Il se passe la même chose dans le domaine de la chimie organique, de nombreuses molécules sont considérées comme chirales (acides aminés, glucides, acides nucléiques, ...).

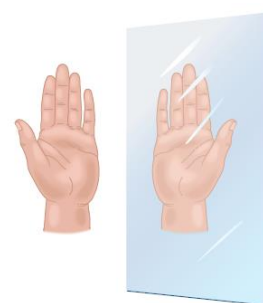


Figure 2: les images des mains ne sont pas superposables

La cause de la chiralité d'une molécule est qu'elle possède au moins un carbone tétraédrique (c'est-à-dire entouré uniquement de liaisons simples) entouré de quatre substituants (atomes ou groupes d'atomes) différents.

Pour prouver cette affirmation, observons la figure 3 et faisons l'expérience avec des modèles moléculaires. (Je donnerai un modèle à trois étudiants et ils essaieront de les superposer afin qu'ils observent ce phénomène par eux-mêmes).

Dans le cas A, le carbone est relié à un seul substituant nommé X. Nous pouvons remarquer que la molécule et son image miroir sont identiques et superposables. Par conséquent, ce carbone n'est pas chiral.

Il en est de même pour la molécule B. Le composé et son image miroir sont identiques et superposables. Cette molécule n'est donc pas chirale non plus.

Par contre, la molécule C et son image miroir ne sont pas identiques ni superposables. Par conséquent, il s'agit d'un composé chiral.

Cela prouve bien que pour avoir un composé chiral, il est nécessaire qu'un **carbone tétraédrique lié à quatre substituants différents** soit présent dans la molécule. Il est important de noter que le quatrième substituant n'est pas toujours un hydrogène. Dès qu'un carbone présente cette caractéristique, il est appelé « **centre de chiralité** » et la molécule contenant ce genre de carbone est qualifié d'énantiomère.

Examinons le cas concret d'une molécule existant sous la forme d'une paire d'énantiomères : l'acide lactique, comme illustré dans la figure 4. Nous pouvons voir que le centre de chiralité (le carbone en gris foncé) comporte quatre substituants différents : l'hydrogène, le groupement OH (en rouge), le groupement COOH (en vert) et le groupement CH₃ (en bleu).

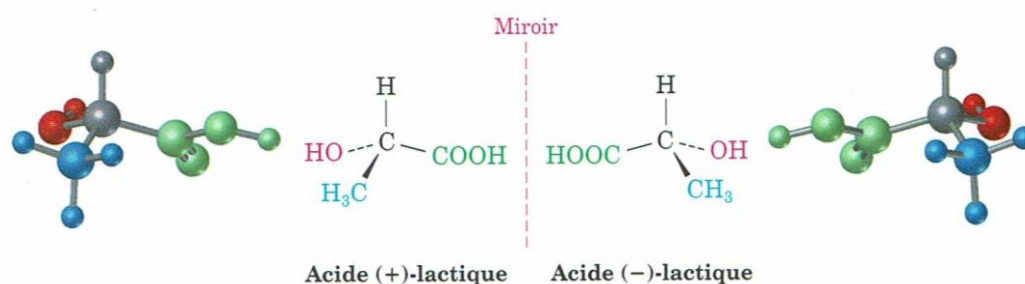


Figure 3: De gauche à droite nous trouvons une formule moléculaire, une représentation de Cram et des représentations de modèles 3D. A) La molécule et son image miroir sont superposables car trois substituants sont identiques. B) La molécule et son image miroir sont superposables car deux substituants sont identiques. C) la molécule et son image miroir ne sont pas superposables car les quatre substituants sont différents.

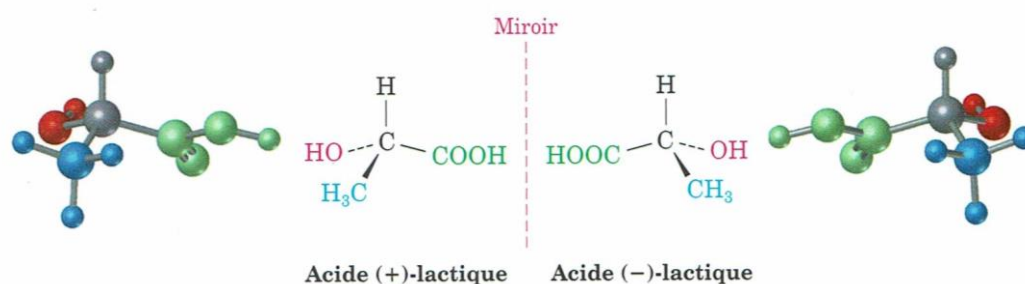


Figure 4: Représentation de l'acide lactique en modèle moléculaire et en représentation de Cram. Le carbone en gris foncé est le centre de chiralité car il est lié à quatre substituants différents: un hydrogène (gris); OH (rouge); COOH (vert) et CH₃ (bleu).

Si nous tentons de superposer les deux énantiomères, nous verrons que nous savons au maximum aligner correctement deux substituants mais que ce n'est pas possible pour les deux autres (Figure 5). En effet, dans la partie a, nous alignons l'hydrogène et le groupement OH des deux énantiomères. Nous pouvons voir que les groupements COOH et CH₃ ne s'alignent pas. De même, si nous alignons le COOH et le CH₃ (cas b), l'hydrogène et le groupement OH ne s'alignent pas.

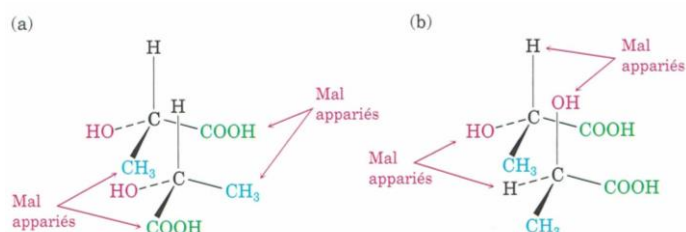


Figure 5: Tentatives pour superposer tous les substituants de l'acide lactique. Dans les deux cas, des substituants sont toujours mal appariés.

3.3) Configuration absolue et règles pour la définir

Afin de pouvoir identifier de quel énantiomère on parle, il est nécessaire d'introduire une nouvelle notion qui permet de décrire l'arrangement tridimensionnel des substituants autour des centres de chiralité : la configuration absolue. Cette description nécessite l'utilisation de quelques règles.

- Tout d'abord, il faut attribuer un ordre de priorité aux quatre substituants se trouvant autour du centre de chiralité d'intérêt. Pour cela, on utilise les numéros atomiques des atomes directement liés au carbone chiral. L'atome avec le numéro atomique le plus élevé sera considéré comme l'atome avec la plus grande priorité et l'atome avec le numéro atomique le plus petit sera quatrième.
- Si le premier atome de plusieurs substituants est le même alors il faut regarder les numéros atomiques des deuxièmes atomes. S'il n'est toujours pas possible de définir un ordre de priorité, il faut regarder le troisième atome et ainsi de suite.

Pour déterminer la configuration absolue, il faut orienter la molécule de manière à ce que le substituant avec la plus faible priorité soit dirigé vers l'arrière et il faut que nous regardions selon cet axe, comme nous pouvons le voir dans la figure 6. Les trois autres substituants ressemblent donc aux rayons d'un volant. Nous traçons une flèche pour aller du substituant possédant la plus grande priorité à celui qui possède la priorité numéro 3. Si elle tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, c'est-à-dire vers la droite, la configuration sera **R**. Un moyen mnémotechnique de retenir cela est de savoir que « droite » se dit « **R**ight » en anglais et « **R**echt » en néerlandais. Si la flèche tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, c'est-à-dire vers la gauche, la configuration sera **S**.

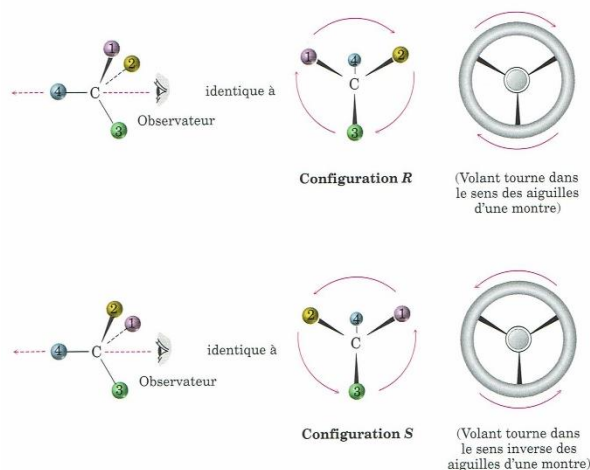


Figure 6: Représentations illustrant la configuration absolue d'un centre de chiralité. Lorsque le substituant avec la plus faible priorité est dirigé vers l'arrière, les autres substituants ressemblent à un volant. Lorsque la flèche reliant les trois autres substituants tourne vers la droite (sens horloger), la configuration absolue est **R**. Lorsqu'elle tourne vers la gauche (anti-horloger), la configuration absolue est **S**.

Reprenons l'acide lactique comme exemple (Figure 7). Dans ce cas, le groupement OH a la priorité 1 car l'atome d'oxygène possède un numéro atomique supérieur au carbone et à l'hydrogène. De plus, l'hydrogène possède la priorité 4 car c'est l'atome avec le plus petit numéro atomique. Par contre, le premier atome des deux autres substituants est un carbone. Il faut donc regarder le second atome de ces deux substituants. Dans le groupement COOH, le deuxième atome est un oxygène et dans le groupement CH₃, il s'agit d'un hydrogène. Par conséquent, le groupement COOH aura la priorité numéro 2 et le CH₃ aura la priorité 3. Nous mettons l'hydrogène vers l'arrière puis nous regardons dans quel sens la flèche reliant les autres substituants tourne. Dans le cas a, elle tourne dans le sens des aiguilles d'une montre donc la configuration absolue est R. Dans le cas b, elle tourne dans l'autre sens donc la configuration absolue est S.

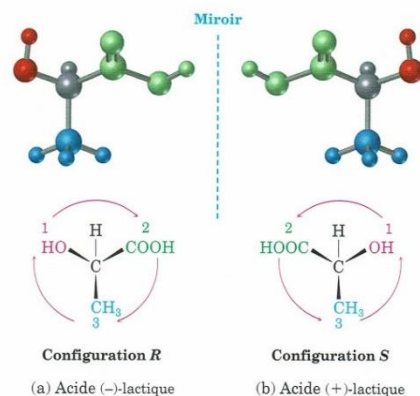


Figure 7: Détermination de la configuration absolue des deux énantiomères de l'acide lactique. A) Enantiomère de configuration absolue R. B) Enantiomère de configuration absolue S

Dans une paire d'énantiomères comportant un seul carbone chiral, un énantiomère possède la configuration absolue R et l'autre possède la configuration absolue S. Si une molécule contient plusieurs centres de chiralité, l'entière des centres de chiralité de son énantiomère possédera la configuration absolue opposée. Dans la figure 8, nous pouvons voir l'isoleucine (un acide aminé). Nous pouvons remarquer que les centres de chiralité ont une configuration absolue opposée dans les deux énantiomères.

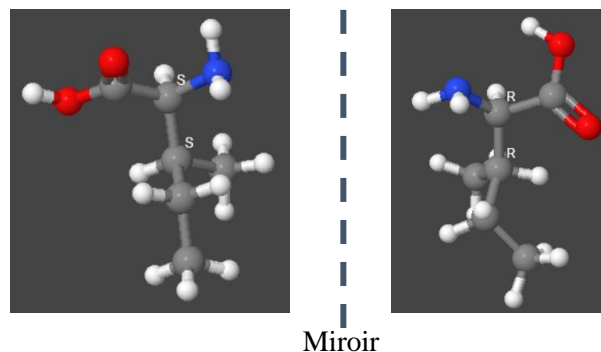


Figure 8: Représentation en modèle moléculaire d'une paire d'énantiomère de l'isoleucine. Si dans un énantiomère les deux centres de chiralité ont une configuration absolue S, alors les centres de chiralité de l'autre énantiomère auront une configuration absolue R.

3.4) Exemples concrets

Comme vu dans l'introduction, les énantiomères peuvent provoquer des odeurs différentes. Ils possèdent également des propriétés biologiques différentes. Ils peuvent avoir un effet différent sur le corps humain comme nous allons le voir avec la thalidomide ou encore avoir une odeur différente comme nous allons le voir avec le limonène.

Le premier exemple est le cas de la thalidomide (Figure 9). Il s'agit d'un médicament qui était utilisé durant les grossesses comme anti-nauséeux jusqu'au début des années 60. A cette période, on commença à remarquer que ce médicament présentait des risques tératogènes, c'est-à-dire que des malformations chez les embryons et donc chez les nouveau-nés étaient probables. En effet, le nombre de bébés nés avec des malformations est estimé à 15000. En fait, l'un des énantiomères permet de soulager les nausées matinales des femmes enceintes mais le second énantiomère est responsable de ces malformations.

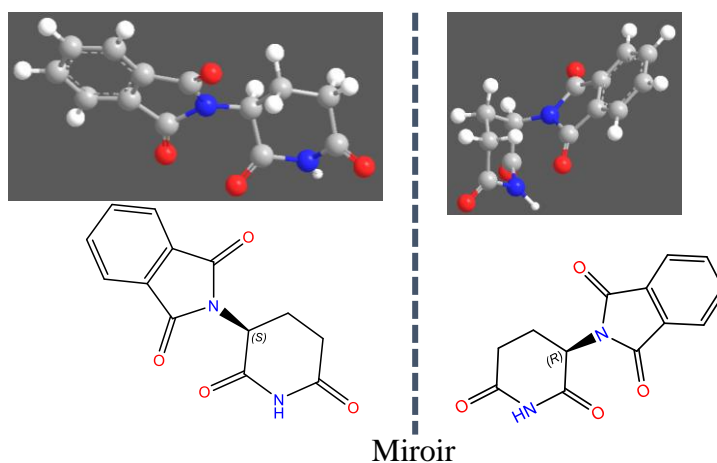


Figure 9: Représentations de Cram et modèles moléculaires de la paire d'énantiomères de la thalidomide.

Le second exemple est la cétirizine. Il s'agit d'une molécule chirale utilisée comme antihistaminique, c'est-à-dire pour traiter l'allergie ou le rhume des foins. L'énantiomère ayant la configuration absolue R, aussi appelé levocétirizine, est l'énantiomère actif tandis que celui possédant la configuration S, appelé dextrocétirizine, est beaucoup moins actif. Nous pouvons voir les deux formes de ce composé dans la figure 10.

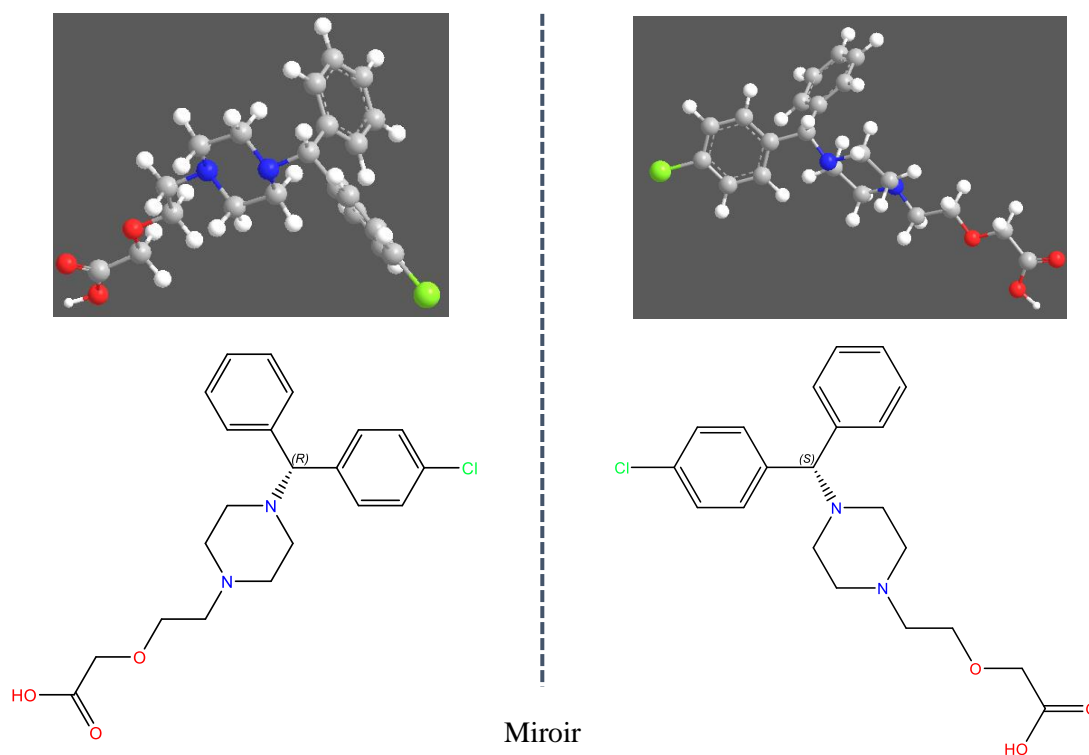


Figure 10: Représentations de Cram et modèles moléculaires de la paire d'énantiomères du cétirizine.









4) Partie exercices et manipulation

Dans cette partie, ce sera à vous de jouer.

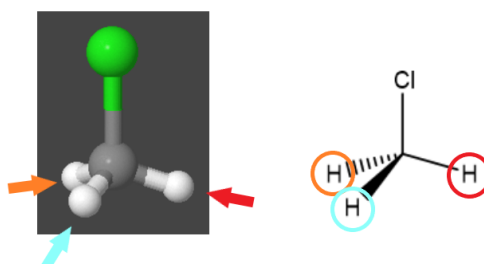
- Vous aurez une représentation de Cram d'une molécule.
- A partir de cette représentation, vous allez devoir construire la molécule soit à l'aide de modèles moléculaires soit à l'aide d'une application smartphone selon votre groupe (ModelAR). Une fois cela fait, appelez-moi.
- Une fois construite, vous allez devoir déterminer la configuration absolue des centres de chiralité de la molécule et la noter dans le tableau
- Ensuite, vous allez construire l'énantiomère de cette molécule avec les modèles moléculaires ou l'application smartphone (ModelAR) selon votre groupe. Une fois cela fait, appelez-moi.
- Pour finir, vous devez dessiner la représentation de Cram de l'énantiomère que vous venez de construire dans le tableau et y écrire la configuration absolue.

Vous aurez à réaliser l'exercice pour trois molécules différentes : une petite molécule avec un centre de chiralité (1-aminoéthan-1-ol), une molécule plus importante avec un centre de chiralité (2-chloro-2-méthylcyclohexan-1-one) et une molécule possédant deux centres de chiralité (3-aminobutan-2-ol).

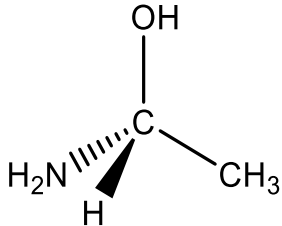
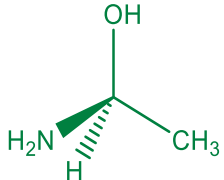
Voici un rappel des conventions pour les différentes couleurs de sphères et pour dessiner une représentation de Cram.

	Liaison se trouvant dans le plan de la feuille
	Liaison se trouvant derrière le plan de la feuille
	Liaison se trouvant devant le plan de la feuille
	Atome d'hydrogène
	Atome de carbone
	Atome d'oxygène
	Atome d'azote
	Atome de chlore

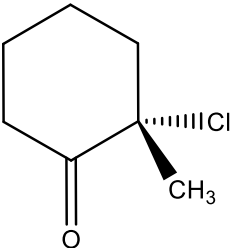
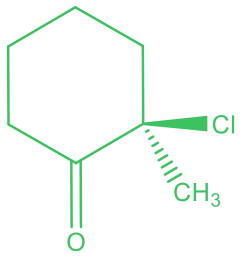
Exemple pour illustrer les conventions de la représentation de Cram :



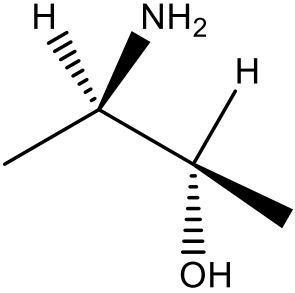
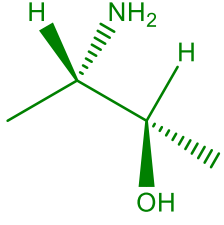
1) 1-aminoéthan-1-ol

Représentation de Cram	Configuration absolue	Représentation de Cram de l'énantiomère	Configuration absolue de l'énantiomère
	R		S

2) 2-chloro-2-méthylcyclohexan-1-one










Représentation de Cram	Configuration absolue	Représentation de Cram de l'énantiomère	Configuration absolue de l'énantiomère
	S		R

3) 3-aminobutan-2-ol

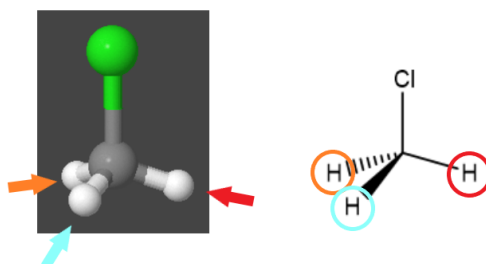
Représentation de Cram	Configuration absolue (R ; R)	Représentation de Cram de l'énantiomère	Configuration absolue de l'énantiomère (S ; S)
			

5) Test post-activité

Voici un rappel des conventions pour les différentes couleurs de sphères et pour dessiner une représentation de Cram.

	Liaison se trouvant dans le plan de la feuille
	Liaison se trouvant derrière le plan de la feuille
	Liaison se trouvant devant le plan de la feuille
	Atome d'hydrogène
	Atome de carbone
	Atome d'oxygène
	Atome d'azote
	Atome de chlore
	Atome de brome

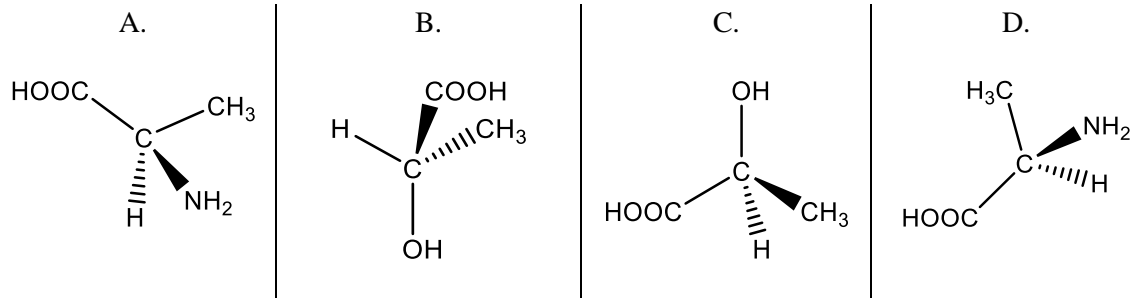
Exemple pour illustrer les conventions de la représentation de Cram :



- 1) Quel est votre identifiant ? Pour cela prenez les deux premières lettres de votre nom, les deux premières lettres de votre prénom et les quatre chiffres composant votre code postal.

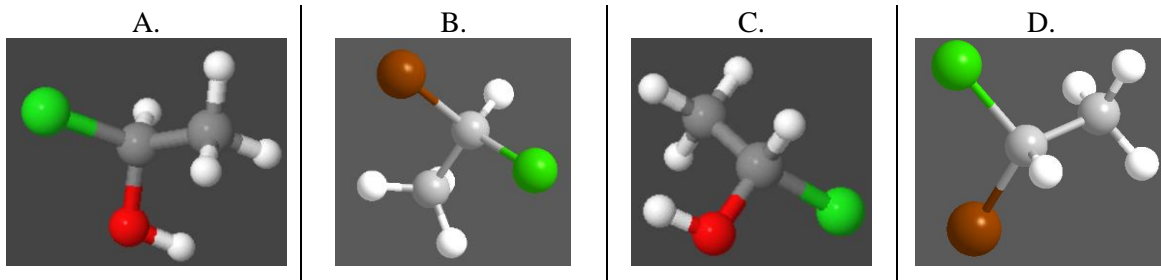
.....

2) Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont images l'un de l'autre à travers un miroir ?



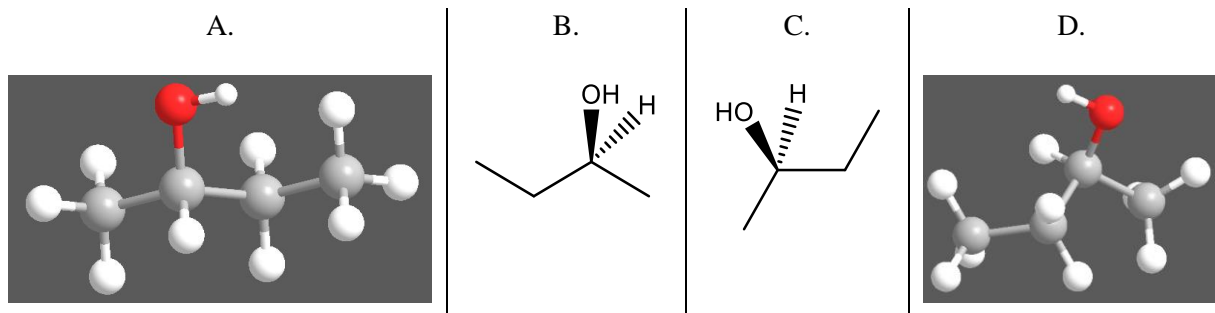
- A/D
- B/C
- C/D
- Aucune des possibilités ci-dessus

3) Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont images l'un de l'autre à travers un miroir ?



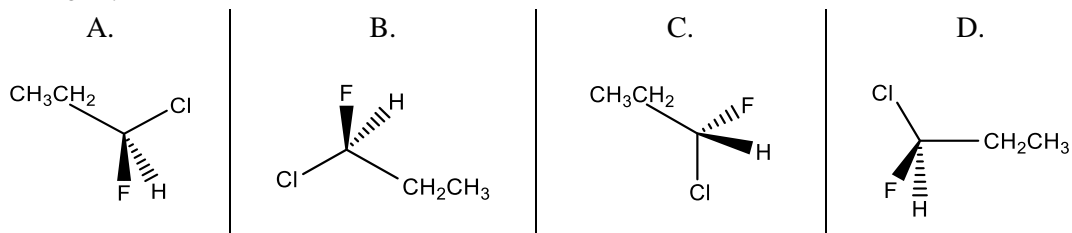
- A/C
- B/C
- B/D
- Aucune des possibilités ci-dessus

4) Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont images l'un de l'autre à travers un miroir ?



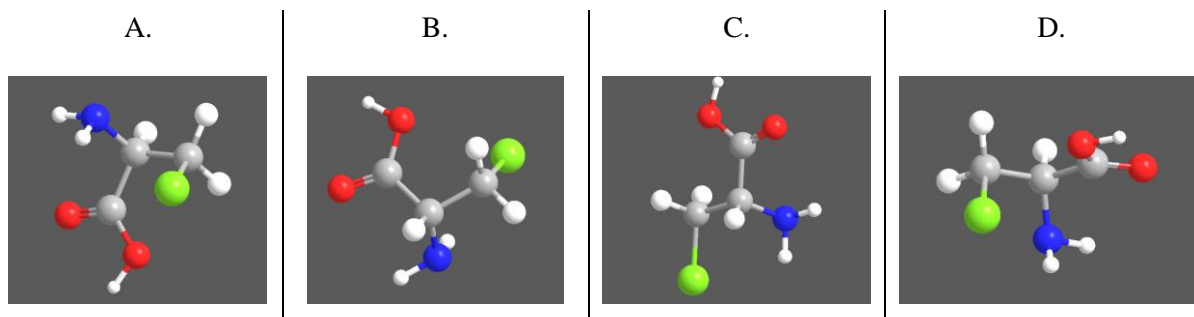
- A/C
- A/B
- B/D
- Aucune des possibilités ci-dessus

5) Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont images l'un de l'autre à travers un miroir ?



- A/B
- B/C
- C/D
- Aucune des possibilités ci-dessus

6) Parmi les composés suivants, quels sont ceux qui sont images l'un de l'autre à travers un miroir ?



- A/B
- A/C
- B/D
- Aucune des possibilités ci-dessus

7) Les modèles moléculaires vous ont-ils été utiles pour les questions relatives aux structures ? Votre pourcentage d'utilisation :

0%	20%	40%	60%	80%	100%
Pas très utilisé					Très utilisé