

Partie 1 :  
Objet et cadre de la recherche

---



# Chapitre I : Histoire et épistémologie de la chimie organique

Notre travail se focalise sur l'enseignement d'un thème bien particulier de la chimie que constitue la chimie organique, autrement dit la chimie du carbone et de ses composés<sup>1</sup>. Cette chimie occupe une place particulière dans l'enseignement, tant au niveau de l'enseignement secondaire que de l'enseignement supérieur. Son approche semble souvent délicate, malgré les nombreuses tentatives effectuées pour l'enseigner au mieux. Du côté des enseignants, la chimie organique constitue une matière difficile à transmettre, et du côté des apprenants, elle semble tout aussi difficile à comprendre.[1]

Lorsqu'on aborde le thème de la chimie organique avec une personne ayant dû l'étudier au cours de son cursus, les réactions sont en général très fortes : la chimie organique, on l'adore, ou on la déteste. Ceux qui l'ont comprise et adoptée ne jurent que par elle, tandis que les autres, qui constituent malheureusement la grande majorité, ne veulent surtout plus en entendre parler, et des mots comme « très difficile », « par cœur », « compliqué » arrivent rapidement dans la conversation.[2]–[5]

Afin d'aborder ce travail en partant sur des bases communes concernant la chimie organique, nous avons choisi de commencer en remontant le temps afin de mieux appréhender les réels enjeux de la chimie organique, tels qu'ils l'ont été par le passé et, surtout, tels qu'ils le sont aujourd'hui. Nous sommes ainsi arrivés à l'étude du cœur même de la chimie organique, à savoir son épistémologie. Nous nous sommes ensuite penchés sur les différentes recherches qui ont déjà été menées en didactique de la chimie organique afin d'explorer les potentielles voies pour en améliorer l'enseignement.

## Une histoire de chimie

Des centaines d'années avant l'émergence du terme « chimie », les civilisations les plus anciennes de notre monde pratiquaient déjà des réactions de chimie organique, telles que l'hydrolyse des graisses lors de la fabrication de savons, la fermentation du sucre afin d'obtenir du vin, l'utilisation de différentes molécules organiques issues des plantes pour se soigner (extrait de saule contenant le précurseur de l'aspirine ou feuilles de coca contenant de la cocaïne) ou au contraire pour tuer (flèches au curare ou à l'épipatidine). La chimie organique telle que nous la connaissons n'existe que depuis deux siècles et n'est pas née du jour au lendemain, mais nous constatons que l'utilisation de molécules organiques et même de réactions organiques remonte à bien plus loin que le 18<sup>ème</sup> siècle.

C'est à partir des années 1830 qu'émerge la chimie organique, qui se fonde alors principalement sur l'analyse chimique, comme nous allons le détailler ci-après. L'opposition première qui existait depuis des siècles entre chimie du monde vivant et chimie minérale, basée sur la théorie du vitalisme selon laquelle la synthèse de molécules issues du monde vivant nécessiterait une « force vitale » et serait donc inaccessible à l'homme, ne s'est pas subitement écroulée suite à la célèbre synthèse de l'urée par Wöhler (1800-1882) en 1828, comme on l'enseigne souvent aujourd'hui. [6]–[9] Il a au contraire

---

<sup>1</sup> Nous verrons plus loin dans ce chapitre qu'il est fort simpliste de résumer la chimie organique à la chimie du carbone.

fallu une lente et calme révolution au sein de la communauté des chimistes de l'époque pour accepter l'idée que cette théorie était erronée.[10]–[12] D'autre part, la théorie du vitalisme n'était pas aussi généralisée que la majorité des livres le laissent à penser. Certains scientifiques de l'époque croyaient que la synthèse organique était possible et essayaient d'expliquer l'échec de celle-ci par des raisons scientifiques.[9]

Il est donc nécessaire de déconstruire le mythe fondateur d'une chimie organique née brusquement de la disparition du vitalisme et de revenir sur les différentes avancées qui ont permis d'arriver à la chimie organique actuelle. La première voie qui fut suivie par les savants est liée à la grande variété de molécules organiques mises à jour par les pharmaciens, ce qui va mener à une nécessaire classification de ces composés, comme nous allons le voir.

## **Tentatives de classification des molécules organiques**

### **Analyse immédiate**

Dès le 16<sup>ème</sup> siècle, les chimistes, médecins, apothicaires et autres pharmaciens se lancent à la recherche des différents « principes actifs » qui composent la matière. La recherche de ces principes repose sur la mise au point d'un outil, l'analyse immédiate, qui permet d'explorer un stock quasi inépuisable de matières premières issues du règne végétal. La chimie du règne végétal est alors séparée de celle concernant le règne animal. La technique principalement utilisée à l'époque est l'extraction. Elle permettra aux pharmaciens-chimistes de l'époque d'isoler de nombreux « principes immédiats » plus ou moins actifs. Ces principes sont ce que nous nommons aujourd'hui molécules organiques, mais ce terme n'est pas encore utilisé à l'époque.[10], [11]

C'est en 1770 que Scheele (1742-1786) isole la première série de composés organiques, les acides végétaux (acide malique, citrique, oxalique, etc...).[13] En 1817, une deuxième série de composés organiques est isolée par Sertürner (1783-1841) : les alcaloïdes.[11] Cette seconde découverte est significativement plus importante que la première car les savants de l'époque avaient l'habitude de rechercher des composés acides ou neutres, mais ne soupçonnaient pas l'existence de composés basiques. Cette découverte capitale ouvre la voie vers l'exploration de nouvelles fonctions chimiques.[10], [14]

Petit à petit, les différentes techniques d'extraction des principes immédiats commencent à se baser sur l'analogie de composition chimique afin de prévoir le choix d'un solvant le plus adéquat possible.[15] Le lien entre composition chimique et propriété commence à émerger, ce qui aboutira plus tard à l'adage « les semblables dissolvent les semblables ».[16]

### **Analyse élémentaire**

L'analyse immédiate est alors l'outil des pharmaciens. À partir de la fin du 18<sup>ème</sup> siècle, les chimistes préfèrent se concentrer sur un second type d'investigation : l'analyse élémentaire. Celle-ci vise à rechercher les « principes ultimes » qui composent la matière (nos éléments). L'analyse immédiate pratiquée par les pharmaciens-chimistes permet aux chimistes d'avoir à leur disposition une très grande quantité de substances pures qu'ils peuvent soumettre à leur analyse élémentaire.

C'est Lavoisier (1743-1794) qui, le premier, développe une méthode d'analyse efficace, basée sur la combustion d'une masse donnée de « principe immédiat », qu'il présente dans son « Traité élémentaire de chimie » en 1789. Cette combustion produit des gaz de composition connue, dont la mesure des différents volumes permet de déterminer la composition du principe.[17] De nombreux savants perfectionnent ensuite sa méthode par la mise au point de nouveaux appareillages, permettant ainsi d'établir la composition de nombreux principes immédiats.[11]

L'analyse élémentaire permet de démontrer que la matière organique est composée d'un très petit nombre d'éléments : le carbone et l'hydrogène pour les matières les plus simples, auxquels on ajoute l'oxygène et l'azote pour former des composés ternaires ou quaternaires.[18]

C'est au début du 19<sup>ème</sup> siècle qu'apparaissent les premières formules « empiriques » (brutes), puis « rationnelles » (censées représenter la répartition des atomes au sein de la molécule), aboutissant aux premières théories sur la constitution et les transformations des composés organiques.[11]

### **Clarifications du vocabulaire**

Chevreul (1786-1889) joue le rôle important de clarificateur en publiant deux ouvrages importants en 1823 et 1824; au milieu de la diversité des pratiques de l'époque et des notions flottantes utilisées alors, il redéfinit la notion de « principes immédiats » comme étant des espèces chimiques « organiques ». Il enseigne sa méthode d'analyse immédiate, consistant en une application systématique d'analyse aux différentes espèces qu'il isole, en suivant des règles définies rigoureusement. Il est le premier à imposer aux chimistes une « discipline inflexible, inconnue jusque-là dans les études de chimie végétale et animale. »[19] C'est également Chevreul qui, au début des années 1820, élimine la distinction depuis longtemps établie entre les substances provenant du règne animal et celles du règne végétal, ou encore entre des substances d'origine naturelle ou artificielle.[20], [21]

Les notions d'atome et de molécule revêtent une importance capitale en chimie. C'est en 1827 que Dumas (1800-1884) distingue clairement ces deux notions, en utilisant le terme d'atome physique pour parler de molécule, et d'atome chimique pour parler de l'atome élémentaire. C'est également cette année-là qu'il remplace la notion d'équivalence, principalement utilisée jusqu'alors, par la notion de valence, ou capacité atomique pour l'hydrogène.[22] Il faut attendre Gaudin (1804-1880) pour enfin avoir une définition tangible des termes « atome » et « molécule ». C'est en 1833 qu'il définit clairement les termes atome et molécule comme suit : « Un atome sera pour nous un petit corps sphéroïde homogène, un point matériel essentiellement indivisible ; tandis que la molécule sera un groupe isolé d'atomes en nombre quelconque. »[23]

La notion de fonction chimique est quant à elle clairement établie en 1835 par Dumas et Péligot (1811-1890).[24] L'alcool, par exemple, perd son statut de simple corps isolé et devient un type, caractérisé par un ensemble de propriétés qu'il partage avec toute une série d'autres composés qui lui sont analogues, et qui déterminent un caractère fonctionnel.[19]

## **Premières classifications**

L'énorme quantité de molécules organiques pousse les savants de l'époque à vouloir les organiser, les classer selon certains critères qui ont évolué au cours des siècles. Les premières classifications des composés organiques se basent naturellement sur leurs caractères extérieurs, tels que leurs propriétés physiques et organoleptiques.[18]

Les analystes se sont intéressés à la classification des principes immédiats dès que leur composition élémentaire a été connue. Encore une fois, le premier à se lancer dans cette tentative de classification est Lavoisier, toujours dans son Traité de 1789. Il transpose la notion de radical alors utilisée en chimie minérale aux substances végétales et animales. Selon lui, la chimie est « une et indivisible », il ne fait donc aucune différence entre chimie organique et minérale.[26]

Fourcroy (1755-1809) propose en 1806 un classement des matières végétales et animales, en déclarant que les végétaux renferment 20 substances particulières (la sève, le muqueux, le sucre, l'albumine végétale, les acides végétaux, l'extractif, le tannin, l'amidon, le glutineux, la matière colorante, l'huile fixe, la cire végétale, l'huile volatile, le camphre, la résine, la gomme résine, le baume, le caoutchouc, le ligneux et le suber), tandis que les tissus des animaux ne contiennent que trois genres principaux (l'albumine, la gélatine et la fibrine).[25] Ce type de classification en substances végétales et animales est antérieur à toute notion d'espèce chimique. Il faudra attendre l'apparition de différentes techniques d'analyse pour espérer classer les substances organiques en fonction de leur composition, et plus seulement sur base de caractéristiques extérieures.

En 1810, Thenard (1777-1857) et Gay-Lussac (1778-1850) mettent au point un classement des substances végétales qui se base sur les fonctions chimiques connues en chimie minérale. Ils distinguent trois classes : les composés acides (O domine) qui ont les mêmes caractères que les acides minéraux, les bases végétales, ou composés huileux et résineux (H domine) et les corps neutres ou indifférents (H et O dans les proportions de l'eau). Cette classification repose toujours sur les idées de Lavoisier, qui faisait reposer l'acidité d'un composé sur l'oxygène.[11], [18]

En 1832, Liebig (1803-1873) et Wöhler travaillent sur l'essence d'amande amère. Ils en arrivent à la conclusion que l'huile d'amande amère doit être composée d'hydrogène et du radical de l'acide benzoïque, posant ainsi les germes de la théorie des radicaux. Ce radical, qu'ils nomment benzoyle, peut donner naissance à toute une série de composés en fonction de la molécule avec laquelle on le fait réagir. Liebig définit alors la chimie organique comme étant la science des radicaux composés.[27]

Dumas adopte également une classification basée sur la sériation des corps d'après leur fonction chimique. Il est à la base de la théorie des substitutions, qui renferme en germe la théorie des types que Gerhardt développera ultérieurement.[14]

Berthollet (1748-1822) distingue la chimie animale de la chimie végétale en fonction de la présence ou non d'un atome d'azote.[11] Il faut attendre 1830 pour faire définitivement tomber la barrière qui existe alors entre chimie végétale et animale. De nouvelles découvertes forcent les chimistes à classer certaines substances, telles que le gluten, dans une catégorie intermédiaire entre substances végétales et animales (les substances « végéto-animales » ou « animalisées »). Cette catégorie permet aux analystes de remettre en cause le critère artificiel de l'azote comme distinction entre chimie animale et végétale. C'est en 1835 que Thenard finit par fusionner définitivement les deux règnes organiques

dans la dernière édition de son traité, en considérant tous les composés organiques sous une seule et même catégorie, quelle que soit leur origine.[28]

En 1837, Dumas et Liebig énoncent, au contraire de Lavoisier, une distinction entre chimie minérale et organique, en se basant sur la composition du radical : les principes immédiats de chimie minérale sont composés de radicaux simples tandis que ceux appartenant à la chimie organique sont composés de radicaux composés (binaires, ternaires ou quaternaires).[11]

Jusqu'en 1840, les différents principes de classification utilisés par les chimistes reposent principalement sur les propriétés physiques et organoleptiques des corps ou sur les fonctions chimiques analogues à celles déjà connues et étudiées en chimie minérale, comme les acides et les bases. Cependant, suite à la découverte et à la caractérisation d'une grande quantité de nouveaux principes immédiats, et donc de nouvelles fonctions encore inconnues jusque-là, il faut déterminer une nouvelle méthode de classification de ces nouveaux composés. C'est Gerhardt (1816-1856) qui entreprend une telle œuvre, avec sa théorie des types, qui sera décrite plus loin. Nous allons tout d'abord aborder la théorie des radicaux qui a développé les prémices de la théorie des types de Gerhardt.

### **Théorie des radicaux**

Liebig et Wöhler sont à l'origine de la théorie qui proclame l'importance des radicaux en chimie organique.[27] Dumas les rejoint sur ce point et publie avec Liebig, en 1837, un Mémoire proclamant que « la chimie organique présente des radicaux qui jouent le même rôle que les métaux ou les métalloïdes. Ces radicaux se combinant entre eux ou avec les corps simples donnent naissance à toutes les combinaisons organiques. La chimie organique se résume donc dans la recherche de ces radicaux et de leurs propriétés. »[29]

Ces radicaux peuvent être réels ou hypothétiques, cela n'a pas réellement d'importance, bien que cette question soit au cœur d'un débat opposant plusieurs chimistes de l'époque. Dumas pense que l'on doit se restreindre aux limites de l'expérience et que les radicaux doivent être bien réels, tandis que Liebig accumule des radicaux hydrocarbonés et acides totalement hypothétiques.[19]

Ce sont Laurent (1807-1853) et Gerhardt qui apportent une solution à ce différend en professant une définition des radicaux suffisamment large pour contenter les deux parties. Gerhardt montre également qu'il est possible de retrouver plusieurs radicaux au sein d'une même substance.[13] C'est en 1839 qu'il fournit la définition utilisée par la suite : « Si dans une molécule on isole un atome d'hydrogène, le résidu qui lui fait équilibre est équivalent à cet atome ; c'est donc un radical monovalent. [...] De plus, le résidu qui fait équilibre à deux atomes d'hydrogène est un radical bivalent. »[19]

Cette théorie des radicaux veut donc classer les différentes molécules organiques en fonction de leur composition chimique. Mais Gerhardt va bien vite proposer sa nouvelle vision de la classification des composés organiques basée sur leur réactivité plutôt que sur leur structure.

### **Théorie des types de Gerhardt**

Gerhardt croit encore en l'existence d'une force vitale, et fait justement reposer sa méthode de classification sur l'opposition entre le chimiste, qui « brûle, détruit, opère par analyse », au contraire de la nature dont « la force vitale seule opère par synthèse ; qu'elle reconstruit l'édifice abattu par les forces chimiques ».[19] Il estime ainsi qu'une bonne classification ne peut qu'être basée sur les produits de décomposition des corps.[30] Selon Gerhardt, « tout corps dérive d'un carbure [*un alcane*] par substitution de radicaux fonctionnels à l'hydrogène ».[19]

Gerhardt propose, dans un mémoire de 1842, son nouveau système de classification des substances organiques basée sur les analogies qui existent entre différents composés non pas du point de vue de leurs caractères physiques ou même de leurs fonctions chimiques, mais bien du point de vue de leur réactivité. Il classe ainsi les corps en différentes séries, chaque série obéissant aux mêmes lois de transformation. Les corps composant une même série sont dits homologues et ne diffèrent entre eux que par un nombre entier de  $\text{CH}_2$ . Une série contient donc des substances réagissant de la même façon, et comprenant un nombre croissant d'atomes de carbone et d'hydrogène.[31]

Étant donné la similitude d'un point de vue de la réactivité au sein d'une même série, il en ressort que chaque substance appartenant à une série peut servir de point de référence, de chef de famille pour définir le « type » de cette série. Gerhardt ramène ainsi tous les composés organiques à quatre types principaux :

- Type métalhydrogène :  $\text{C}^n\text{H}^{2n+2}$
- Type chlorure :  $\text{C}^n\text{H}^{2n+1}\text{Cl}$
- Type eau :  $\text{C}^n\text{H}^{2n+2}\text{O}$
- Type ammoniaque :  $\text{C}^n\text{H}^{2n+1}\text{AzH}^2$  (avec « Az » comme notation pour l'azote)

L'appartenance à un type ne dépend donc pas uniquement de la présence ou non d'un élément, mais également de la proportion relative des différents éléments ainsi que de la manière dont ils sont agencés dans la molécule. Il distingue ainsi, dans l'acide acétique, l'hydrogène remplaçable par des métaux des autres hydrogènes, qui ne sont remplaçables que par des éléments électro-négatifs.[18]

Ce tableau d'homologie rattache chaque composé organique aux composés minéraux. Lorsqu'on applique  $n=0$ , on retrouve les différentes molécules minérales se rattachant à chacune des séries, à savoir l'hydrogène, l'acide chlorhydrique, l'eau et l'ammoniac.

### **Théorie de l'atomicité de Wurtz**

Certaines substances ne trouvant pas leur place dans la théorie des types de Gerhardt, une autre théorie vient la supplanter : celle de l'atomicité des éléments, qui est plus large que la théorie des types, et qui est développée par Wurtz (1817-1884) dans les années 1860. Il existe un type « eau » parce que l'élément principal de ce type, l'oxygène, est diatomique. Il existe un type « ammoniaque » parce que l'élément principal de ce type, l'azote, est triatomique. L'atomicité est donc un principe supérieur aux types de Gerhardt.[32]

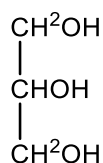
Cette notion d'atomicité est un équivalent de notre valence actuelle, elle donne une nouvelle classification des molécules, en fonction du nombre d'hydrogènes qui peuvent se lier à un élément.[32]



Cette théorie mène aux premières représentations des molécules, à la manière dont les éléments sont agencés les uns par rapport aux autres. Les molécules sont dessinées en essayant de satisfaire toutes les « atomicités » des différents éléments. Les problèmes arrivent lorsqu'un même élément peut avoir plusieurs atomicités. En effet, l'atomicité d'un élément peut varier en fonction de la substance dans laquelle il se trouve. Cette propriété n'étant pas aussi nettement définie que d'autres, comme le poids atomique, certains chimistes pensent que ce n'est pas une bonne base pour établir un principe de classification.[18]

Le terme atomicité est également utilisé dans un autre sens qui représente la « valeur relative » des molécules entre elles. Cette seconde interprétation du mot atomicité donne quant à elle une nouvelle classification des molécules : « un alcool est monoatomique lorsqu'il renferme les éléments d'une seule molécule d'eau remplaçable par une quantité équivalente d'un acide quelconque ». Si deux de nos alcools actuels sont présents dans une même substance, on le dirait alors diatomique. Il s'agit donc de classer les alcools en fonction du nombre de « fonctions alcool » présentes au sein d'une molécule.[18]

Le langage propre à la représentation des molécules organiques commence ici à émerger. Jusqu'alors, la nomenclature utilisée pour représenter les molécules n'était pas semblable à celle que nous utilisons aujourd'hui. La molécule de glycérine est notée  $C^3H^8O^3$ . Afin de se rendre compte qu'elle est un « alcool triatomique », c'est-à-dire qu'elle contient les éléments de trois molécules d'eau, la notation utilisée est alors la suivante :  $C^3H^2 (H^2O) (H^2O) (H^2O)$ . Cette notation ne veut pas dire qu'il y a effectivement trois molécules d'eau dans la glycérine, elle ne montre en aucun cas la répartition des atomes les uns par rapport aux autres. L'atomicité des éléments permet aux chimistes de proposer une nouvelle façon de représenter la glycérine, en supposant les places relatives des atomes les uns par rapport aux autres :



Cette notation permet également de faire la distinction entre les différents alcools au sein de la glycérine : c'est un corps qui contient ce qu'on appellerait aujourd'hui deux alcools primaires et un alcool secondaire.[18]

Dès la mise en place de ce nouveau langage, les chimistes insistent sur le fait que ce n'est qu'un langage. Lavoisier s'exprime ainsi : « Toute science physique est nécessairement formée de trois choses : la série de faits qui constituent la science, les idées qui les rappellent ; les mots qui les expriment. Le mot doit faire naître l'idée, l'idée doit peindre le fait : ce sont trois empreintes d'un même cachet ».[26] Il est clair pour les savants de l'époque que le langage est secondaire, ce n'est qu'un moyen d'exposer une idée.[18]

### Les fonctions chimiques de Berthelot

Les difficultés que doit surmonter la notion d'atomicité, qui varie de manière aléatoire en fonction du composé auquel on a affaire, poussent Berthelot (1827-1907) à revenir à la notion de fonction chimique pour établir sa classification des substances organiques qu'il publie dans son ouvrage de 1876.[18], [33]

En chimie minérale, il suffit d'un petit nombre de fonctions pour classer tous les composés. On peut aisément les répartir en corps simples, acides, oxydes, sels, etc... La multitude de substances existant en chimie organique oblige les chimistes à étendre ces différentes classes et à en définir de nouvelles. En effet, certains corps organiques ne trouvent pas d'équivalent en chimie minérale. Il faut donc établir de nouvelles fonctions chimiques. Ce nouveau challenge fournit les méthodes, le cadre et les classifications utilisés depuis lors en chimie organique, et permet à Berthelot d'aborder le problème de la synthèse organique, en définissant les propriétés des différentes fonctions organiques.

La classification générale se base sur le nombre de fonctions présentes au sein d'une même substance. On distingue ainsi les fonctions simples (une seule fonction organique est présente au sein de la molécule), les fonctions répétées (plusieurs fonctions identiques sont présentes) et les fonctions mixtes (la molécule contient plusieurs fonctions différentes). Cette distinction est mise en évidence par le nombre de réactions que peut entreprendre une molécule ainsi que par la quantité de produits résultant de ces réactions. On cite par exemple, comme fonctions mixtes, les alcools-éthers, les alcools-acides, les acides-éthers ou encore les acides-phénols. Il existe évidemment une multitude de fonctions mixtes.[18]

Berthelot classe les substances organiques selon huit catégories, au sein desquelles on retrouve cette subdivision entre molécule simple, répétée ou mixte [33] :

- Les carbures d'hydrogène, qui sont nos hydrocarbures actuels et qu'il considère comme étant les composés fondamentaux de la chimie organique. Il distingue les carbures d'hydrogène saturés et les carbures incomplets (nos actuels insaturés). Il établit la formule générale de ce qu'il appelle les carbures forméniques (nos alcanes), et arrive aux carbures incomplets par la perte régulière d'un nombre entier de  $H^2$  à chaque carbure forménique, pour ainsi former les carbures éthyléniques (nos alcènes), les carbures acétyléniques (nos alcynes) ou encore les carbures benzéniques (nos aromatiques).
- Les alcools, qu'il divise en plusieurs classes, soit en fonction de la méthode d'obtention de l'alcool, soit en fonction de sa structure. On retrouve par exemple une classe de phénols, mais aussi une classe « d'alcools d'hydratation » obtenus par addition d'eau sur un carbure d'hydrogène incomplet. Les alcools secondaires et tertiaires sont définis selon leur mode de fabrication, à savoir la fixation d'un hydrogène sur un aldéhyde ou sur un aldéhyde secondaire (nos cétones).
- Les aldéhydes ou alcools hydrogénés dérivent des alcools par déshydrogénation et sont une nouvelle fois divisés en aldéhydes proprement dits, en aldéhydes secondaires (cétones) et en quinons.
- Les acides organiques possèdent les mêmes propriétés fondamentales que les acides minéraux, à savoir qu'ils s'unissent aux bases pour former des sels.
- Les éthers sont divisés en trois groupes en fonction de la nature de leurs générateurs : les éthers composés, formés par réaction d'un alcool et d'un acide (nos esters) ; les éthers mixtes

formés par réaction de deux alcools (nos éthers) ; les éthers formés par réaction d'un alcool avec un aldéhyde (nos cétals et acétals)

- Les alcalis organiques sont nos actuelles amines et sont caractérisés par la réaction de l'ammoniaque (ou de l'un de ses dérivés) avec un alcool ou un aldéhyde, ils sont donc les premiers à contenir de l'azote. Ils ont une classification similaire à celle des alcools.
- Les amides résultent de la réaction de l'ammoniaque avec un acide, avec élimination des éléments de l'eau. À l'instar des alcalis organiques, ils contiennent donc également de l'azote. Leur classification est similaire à celle des acides organiques.
- Les radicaux métalliques composés ont pour caractéristique fondamentale de jouer le même rôle que celui des métaux qui font partie de leur molécule.

Au contraire des types de Gerhardt qui reposent sur l'analyse et la décomposition des substances, la classification en fonctions chimiques de Berthelot se construit grâce au chemin inverse. Il est désormais admis qu'une force vitale n'est pas nécessaire pour synthétiser une molécule organique. Berthelot prend ainsi les éléments comme point de départ pour créer des composés binaires (les carbures d'hydrogène), qu'il transforme ensuite en composés ternaires et quaternaires afin d'obtenir des molécules identiques ou isomères aux composés naturels.[18]

La classification actuelle des molécules organiques en différentes fonctions organiques est dérivée de la classification que Berthelot a mise en place au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle. Il est également le premier chimiste qui cherche à reproduire par synthèse les molécules organiques observées dans le monde du vivant, en partant d'éléments purement minéraux.[19] La synthèse fortuite de l'urée par Wöhler ne fut qu'un heureux hasard, alors que Berthelot s'est attaqué de manière consciente au nouveau défi de la synthèse organique. C'est la synthèse de Berthelot de la benzine (notre benzène) qui permettra à Kékulé (1829-1896) d'exprimer sa théorie sur la structure de ce composé.

## **Structure des molécules organiques**

Nous avons vu au cours de l'évolution des différentes théories permettant la classification des molécules organiques l'apparition de la notion de structure des composés, et petit à petit la part importante que cette structure a prise dans l'élaboration d'un critère de classification. C'est avec la théorie de l'atomicité que les premières représentations d'une ébauche de structure moléculaire apparaissent. De cette notion d'atomicité va découler la notion de valence, qui sera à la base d'une nouvelle évolution dans l'histoire de la chimie organique. La découverte des isomères va également lancer les chimistes dans la quête de la structure précise des composés.

### **Vers la notion de valence**

Les chimistes ont dû se défaire de la théorie des types pour permettre à la notion de valence de voir le jour. Pendant longtemps, on parle d'équivalence entre les différents éléments. Williamson (1824-1904) et son élève Odling (1829-1921) parlent ainsi en 1858 de la relation entre différents éléments : « nous disons que les atomes de sodium, potassium, zinc, cadmium s'équivalent et équivalent à un atome d'hydrogène. [...] le chlore, le brome, l'iode sont équivalents entre eux et relativement à l'hydrogène. »[34] Il est également précisé dans ce mémoire « qu'un atome d'un élément peut, dans des conditions différentes, avoir différentes valeurs représentatives », ou encore « Il arrive

fréquemment que le même élément peut avoir plus d'un équivalent ». On voit ici apparaître pour la première fois l'idée de « valences multiples » pour un même élément, idée déjà sous-jacente à la théorie de l'atmicité de Wurtz mais qui posait problème comme critère de classification à son époque.[35]

Deux courants s'opposaient lors de l'émergence de la notion de valence : les partisans de la variabilité de la valence, tels Frankland (1825-1899), Couper (1831-1892) ou Wurtz, et ceux qui, dans la lignée de Kékulé, voyaient la valence comme une notion constante. On retrouve ici une opposition entre expérimentateurs, confrontés à la réalité de composés dans lesquels certains éléments peuvent prendre différentes valeurs, et théoriciens voyant en la valence une notion plutôt philosophique, une simple abstraction.[35]

C'est en 1858 qu'est pour la première fois mentionné, dans une note du chimiste anglais Couper, que le carbone peut se lier avec lui-même. « Dans les composés où 2, 3, 4, 5, 6 etc. "molécules" de carbone sont liées ensemble, c'est le carbone qui sert de lien au carbone. Ce n'est pas l'hydrogène qui peut lier ensemble les éléments des corps organiques. Si, comme le carbone, il avait le pouvoir de se combiner à lui-même, on devrait pouvoir former les composés  $H^1Cl^1$ ,  $H^2Cl^2$ ,  $H^8Cl^8$ . »[36] On constate ici que Couper dissèque les molécules qu'il étudie et qu'il s'éloigne totalement de la théorie des types. C'est pourquoi sa contribution à établir la notion de valence est importante. Kékulé, qui est probablement le plus connu des chimistes ayant établi la tétravalence du carbone, persiste au contraire dans l'idée d'utiliser la théorie des types pendant encore une dizaine d'années.[35]

La tétravalence du carbone n'est pas indispensable à la connaissance de la constitution de certains composés dont parle Gerhardt dans sa théorie des types. Il y est par exemple fait mention de résidus «  $CH^{2''}$  » ou «  $CH^{3''}$  », faisant référence à ce que nous nommerions actuellement une double ou une triple liaison, mais qui sont à l'époque considérés comme des résidus ayant des atomicités différentes.[19] La tétravalence du carbone fut utilisée pendant de nombreuses années par les chimistes organiciens, car la valence fixe du carbone est un outil merveilleux pour la chimie organique, mais la tétravalence du carbone était à l'époque une simple hypothèse. La communauté des chimistes a décidé d'en faire un principe sur lequel se baser pour développer d'autres théories. C'est ainsi, en accumulant de plus en plus de résultats cohérents avec l'hypothèse de départ, que celle-ci a petit à petit trouvé sa place. Elle a par exemple permis d'expliquer la constitution d'un grand nombre de substances organiques, ou encore de mener Pasteur (1822-1895) aux notions d'isoméries optiques et géométriques.[35]

### **Les isoméries optiques et géométriques**

La notion d'isomérisie apparait pour la première fois en 1823, lorsque Chevreul donne une définition précise d'un composé organique.[21] Il prévoit alors la possibilité de l'existence de molécules isomères : « On sait qu'il y a des substances qui donnent à l'analyse les mêmes éléments unis dans la même proportion et qui sont loin d'avoir les mêmes propriétés. [...] Si l'on s'arrête aux limites de l'expérience, on ne voit pas d'autre manière de concevoir ce cas qu'en recourant à des arrangements divers d'atomes ou de particules. »[20] Le terme d'isomérisie sera quant à lui introduit par Berzélius (1779-1848) en 1830.[35], [37]

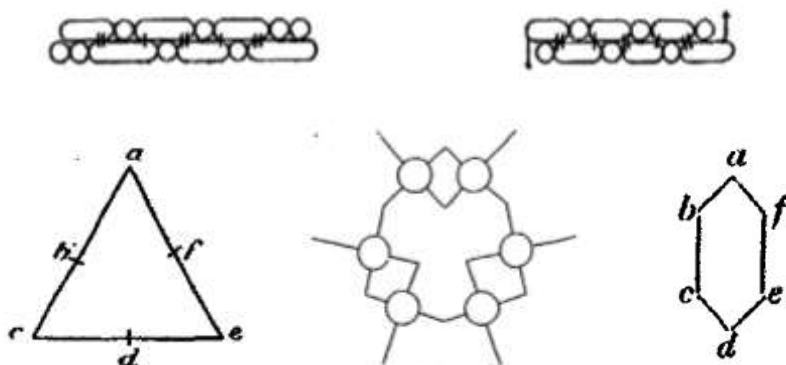
En 1860, Pasteur expose le fruit de dix années de recherches sur ce qu'il a appelé la dissymétrie moléculaire. Selon lui, tous les objets peuvent être rangés en deux classes : les superposables et les non superposables. Pour les objets dissymétriques, il y a lieu de distinguer la dissymétrie cristalline, qui est inhérente à un cristal d'un composé (et est donc une propriété macroscopique) et la dissymétrie moléculaire, qui est propre à la molécule elle-même (et est donc une propriété microscopique). On arrive ainsi à une propriété inhérente à la molécule qui présente une structure asymétrique, ce qui pose les premiers jalons de la stéréochimie.[38]

Ces travaux permettent à Le Bel (1847-1930) et Van't Hoff (1852-1911) d'élaborer une nouvelle théorie, quelques années plus tard, qui porte les principes fondateurs de la stéréochimie. Parmi les objets dissymétriques, le tétraèdre peut servir à représenter le carbone tétravalent. Un carbone tétrasubstitué différemment prendra le nom de carbone asymétrique. La présence d'un tel carbone au sein d'une molécule entraîne une isomérisation optique (sauf quelques exceptions).[39], [40]

En se basant sur cette même idée de tétraèdre pour représenter les différents substituants d'un carbone en trois dimensions, Van't Hoff explique également la notion d'isomérisation géométrique. En effet, lorsque deux atomes de carbone ne sont reliés que par une simple liaison, la libre rotation est permise autour de cette liaison. « Une seule valence réunit les deux atomes de carbone, par conséquent ils sont mobiles autour de cet axe. »[35] Cependant, lorsqu'une double liaison est présente entre deux atomes de carbone, cette rotation est impossible. Le pouvoir rotatoire ne peut donc pas être invoqué pour différencier les deux isomères. On parlera dès lors d'isomérisation géométrique.[19], [35], [40]

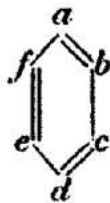
### La structure du benzène

La célèbre structure du benzène proposée par Kékulé en 1865[41] est l'œuvre de son imagination. Il raconte avoir trouvé son inspiration au cours d'une vision qu'il aurait eue d'un serpent se mordant la queue, ce qui lui a donné l'idée d'une structure cyclique pour le benzène. Cette première idée de cycle ne s'est pas directement traduite par la structure hexagonale qui nous est familière. L'hexagone ne lui est venu qu'un an plus tard. Il a proposé diverses représentations que voici :



Dans son second mémoire, publié en 1866, il se concentre sur les isomérisations que prévoit la forme hexagonale du benzène.[42] La prévision de ces isomères ne tarde pas à être vérifiée expérimentalement, procurant un argument soutenant l'idée de Kékulé. Körner (1839-1925) est à l'origine de la nomenclature des produits bisubstitués du benzène, en proposant les termes ortho, méta et para. En prenant comme point de départ l'atome a de l'hexagone, il montre que le benzène

possède deux dérivés ortho (b et f), deux dérivés méta (c et e) et un seul dérivé para (d).[35] On constate que sur ces premières représentations, les doubles liaisons n'apparaissent nulle part. C'est lorsqu'on a voulu donner plus de précisions aux formules que l'on a tenté d'y insérer des doubles liaisons pour représenter les dérivés non saturés. La formule du benzène devient donc celle-ci :



C'est à ce moment que les problèmes arrivent, car cette formule prévoit deux dérivés ortho-substitués, alors que l'expérience montre qu'il n'en existe qu'un. La réponse de Kékulé à cette problématique est sa théorie des oscillations, en 1872. Il postule que les liaisons simples et les liaisons doubles échangent leurs positions rapidement, ce qui implique que les six liaisons carbone-carbone sont équivalentes. Il faut attendre le début du 20<sup>ème</sup> siècle pour arriver à la notion de résonance que nous connaissons aujourd'hui, mais cette première pierre importante permet le développement d'une nouvelle branche de la chimie organique, à savoir la chimie des molécules aromatiques.[35]

### **La synthèse organique**

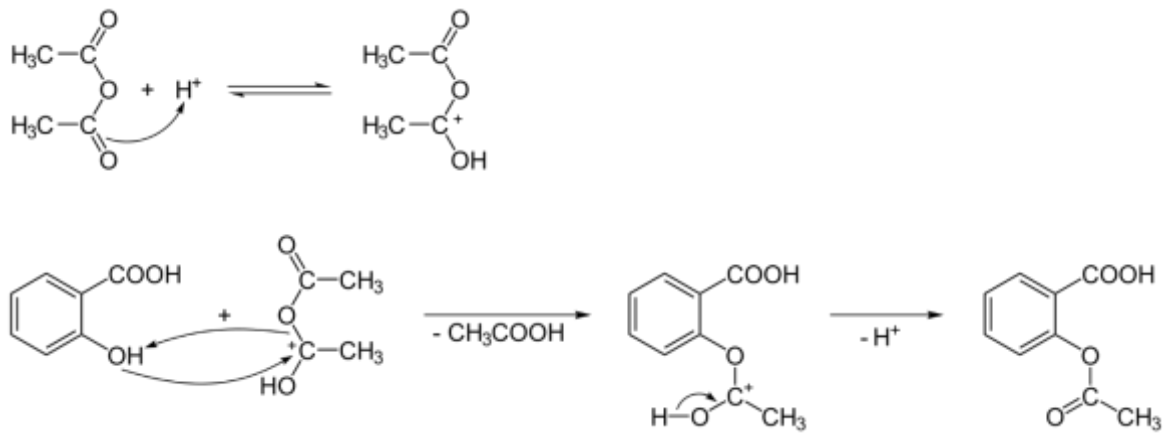
La synthèse organique à proprement parler ne se développe qu'à partir de la seconde moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, avec Berthelot, comme nous l'avons vu précédemment. Il est le premier à vouloir développer une méthode systématique de synthèse des composés organiques. Chaque composé organique peut être synthétisé au départ de ses éléments. L'union de carbone et d'hydrogène donne naissance à un carbure d'hydrogène. À partir de ce carbure d'hydrogène, Berthelot peut ensuite ajouter le réactif voulu pour le transformer en une autre fonction organique. Dès lors, il suffit de synthétiser le carbure correspondant au composé final que l'on désire obtenir.[18]

Avant ces travaux, les seules synthèses notables de composés organiques sont la synthèse de l'urée par Wöhler en 1828 et celle de l'acide acétique par Kolbe (1818-1884) en 1847. Ces deux premières synthèses organiques n'ont cependant pas pu être exploitées pour imaginer une méthode de synthèse plus générale des composés organiques. De 1850 à 1865, Berthelot met au point la synthèse du méthane, du méthanol, de l'éthyne ou encore du benzène à partir de leurs éléments. Il expose ses méthodes en détail dans son livre « Chimie organique fondée sur la synthèse » en 1860.[33], [43]

La synthèse organique permet à la chimie organique de franchir un grand pas économiquement parlant. Beaucoup de synthèses importantes ont vu le jour de manière totalement fortuite, mais la systématisation de la synthèse par Berthelot permet de mettre en place une méthode de synthèse pouvant être appliquée rigoureusement à une même famille de molécules. La synthèse organique est également à l'origine de l'industrie pharmaceutique.

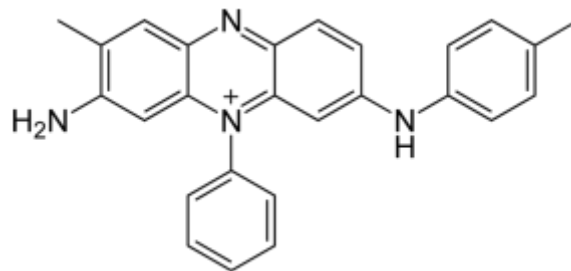
Les molécules organiques que l'on arrive à synthétiser voient leur nombre d'atomes augmenter et leur structure se complexifier rapidement. La première synthèse de l'acide acétylsalicylique est attribuée à Gerhardt en 1853, qui la synthétise en une étape à partir de l'acide salicylique et de chlorure

d'acyle.[44] Cette molécule comporte trois fonctions organiques et est composée de 21 atomes. Cependant, il faut attendre 1899 pour que l'acide acétylsalicylique soit commercialisé sous le nom d'Aspirine par Bayer.[45]



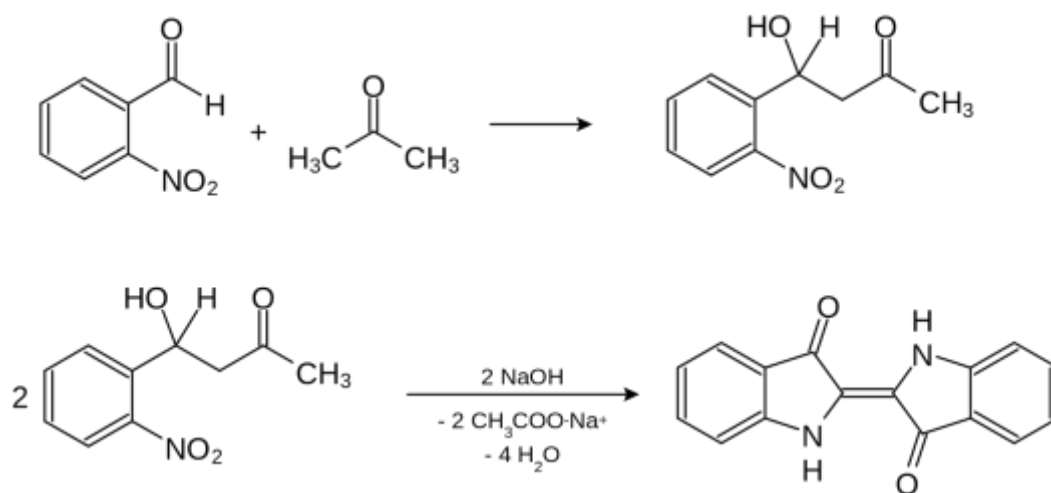
Synthèse de l'acide acétylsalicylique (version améliorée de 1975)

En 1856, Perkin (1838-1907) synthétise la mauvéine, le premier pigment synthétique. Il parvient à obtenir ce produit en essayant d'obtenir de la quinine synthétique en faisant réagir de l'aniline et du bichromate de potassium. On obtient ici une molécule composée de plus de 50 atomes.



Structure de la mauvéine

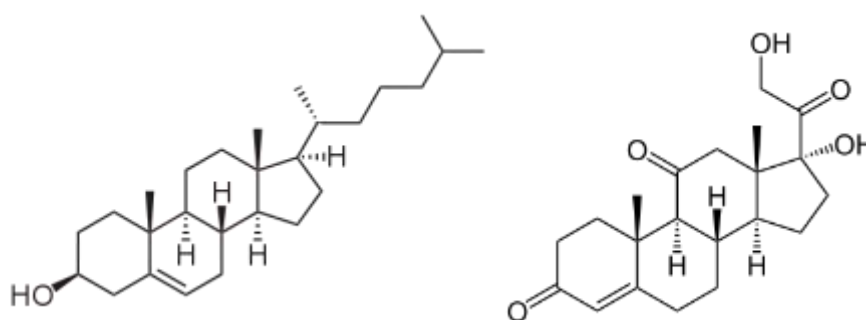
En 1882, une nouvelle avancée dans l'industrie des pigments est effectuée par Baeyer (1835-1917) lorsqu'il synthétise l'indigo en recourant à une synthèse en deux étapes au départ de 2-nitrobenzaldéhyde et d'acétone.



Synthèse de l'indigo

Peu à peu, de plus en plus de réactions sont découvertes, ce qui ouvre le champ vers des molécules de plus en plus complexes.

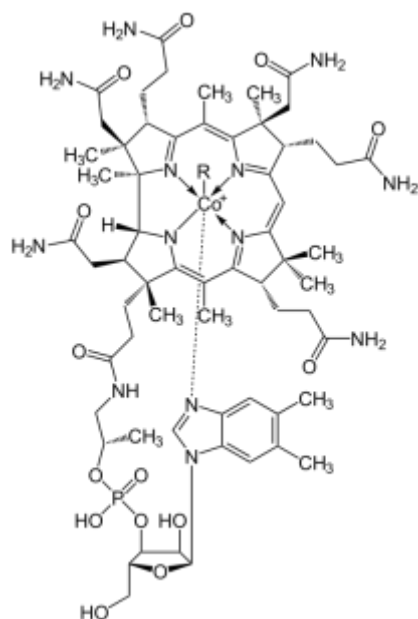
Un autre domaine qui prend un essor remarquable grâce à la synthèse organique est celui des médicaments. En 1951, Woodward (1917-1974) synthétise pour la première fois le cholestérol et la cortisone. Ces deux molécules comportent des centres stéréogéniques, leur synthèse doit donc être stéréocontrôlée. La synthèse complète développée par Woodward comporte 35 étapes.[46]



Structure du cholestérol et de la cortisone

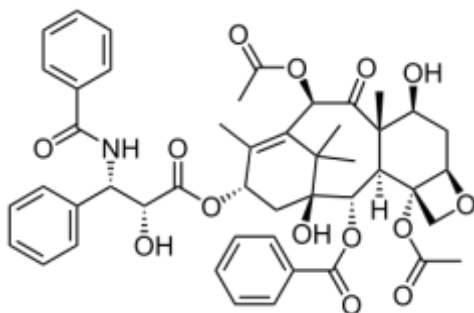
C'est encore Woodward qui réalise, en 1971, la première synthèse totale de la vitamine B12, qui comporte plus de 200 atomes et implique la création de 9 centres chiraux. [27] Cette synthèse marque les esprits dans l'histoire de la synthèse asymétrique. Elle nécessite plus de 70 étapes.[47], [48] Cette synthèse permet au mouvement vegan de voir le jour, la vitamine B12 étant la seule vitamine dont notre corps a besoin mais qui est introuvable dans une alimentation sans aucun apport animal.





Structure de la vitamine B12 (cyanocobalamine)

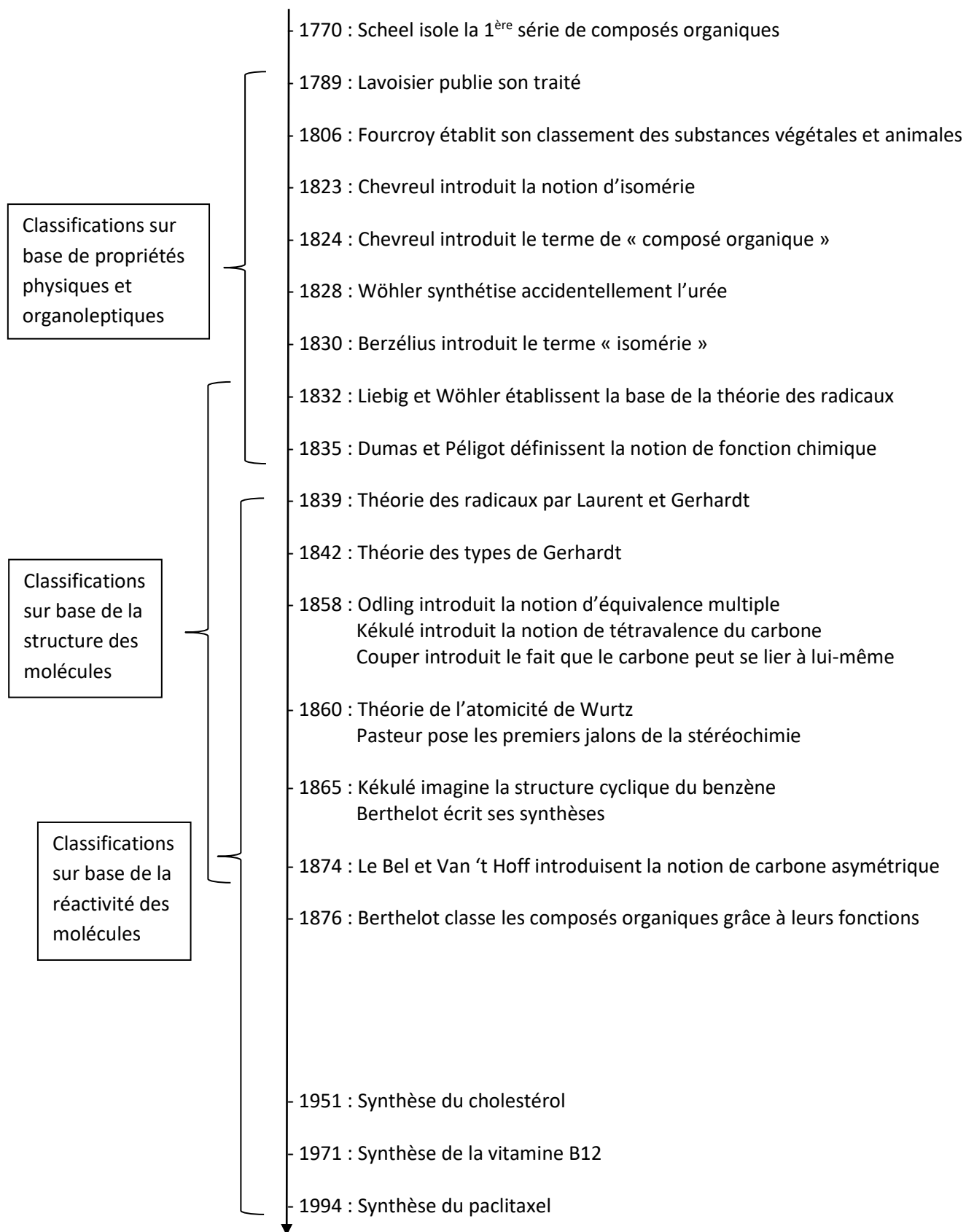
La plus belle réussite à ce jour en matière de synthèse totale reste sans conteste celle du paclitaxel, un agent anticancéreux isolé en 1962 au départ d'ifs du pacifique. La synthèse de cette molécule comportant 11 carbones asymétriques a été au centre de la recherche en synthèse organique pendant 40 ans. Deux groupes de chercheurs réussissent cette synthèse en parallèle en 1994 en suivant une méthode de synthèse différente et au départ de précurseurs différents.[49]–[51] Les deux méthodes comportent une quarantaine d'étapes.



Structure du paclitaxel (ou Taxol)

En parallèle à ces recherches consacrées à la synthèse organique, la découverte du pétrole et de sa séparation par distillation fractionnée au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle permet une autre avancée majeure dans le domaine de la chimie organique, menant à l'industrie pétrochimique dont nous connaissons aujourd'hui l'importance. La distillation fractionnée du pétrole fournit aux chimistes une grande quantité de précurseurs pour la synthèse de molécules plus complexes. On élabore alors des techniques de séparation et d'isolement de différents produits tels que les goudrons, les lubrifiants, le naphta, des solvants pour peinture et l'essence. L'utilisation du pétrole permet aussi le développement des plastiques, une matière présente quotidiennement autour de nous.

## Ligne du temps reprenant les principales dates de l'histoire de la chimie organique



## Vers une définition de la chimie organique

Cette brève histoire de la chimie organique nous éclaire sur les principales caractéristiques de celle-ci : la chimie organique vise en premier lieu à étudier la structure des composés organiques classés dans différentes catégories selon leurs fonctions organiques et leurs propriétés. Cet objectif, premier dans l'histoire de la chimie organique, est atteint de manière beaucoup plus rapide aujourd'hui grâce aux avancées technologiques qui permettent une analyse en profondeur de la structure des molécules organiques (outils d'analyse tels que la RMN, la spectrométrie de masse, la spectroscopie IR, UV ou visible, etc...). Un second objectif de la chimie organique consiste en la fabrication en laboratoire des dites molécules. De nos jours, le plus grand défi de la chimie organique réside dans la synthèse de molécules complexes, comportant de plus en plus d'atomes et de centres stéréospécifiques.

Cette tentative de définition de la chimie organique est loin de celle, simplifiée, que l'on peut retrouver dans un dictionnaire, et qui est donc la première définition qu'un citoyen risque d'enregistrer ;

*« Branche de la chimie consacrée à l'étude du carbone et de ses combinaisons »*  
Dictionnaire Larousse

La chimie organique hérite également d'une première définition historique erronée. Cette première définition repose sur la conception fautive que la chimie du monde vivant était bien distincte de la chimie du monde non vivant. Cette chimie du monde vivant fut alors nommée « chimie organique ». On retrouve effectivement dans le terme « organique » la notion de quelque chose de « *relatif aux organes, aux tissus vivants, aux êtres organisés* » (Dictionnaire Larousse). Cette « erreur » historique mènera à ce que nous appellerons par la suite une « conception alternative », c'est-à-dire une conception ancrée dans l'esprit de l'apprenant et qui se substitue au concept scientifique communément accepté. Dans notre cas, la conception alternative est que la chimie organique est la chimie du monde vivant, alors que la chimie organique concerne également une partie du monde non-vivant, et que certaines molécules impliquées dans la vie ne sont pas organiques. Cette première définition historique n'est donc pas correcte.

Nous voyons ici que ce qui pourrait sembler aussi simple que de donner une définition exacte et précise de la chimie organique est bien loin d'être une chose aisée, et que l'histoire de la chimie organique, plutôt que de nous aider dans cette tâche, pourrait bien au contraire nous mettre des bâtons dans les roues pour qui se limiterait à un examen rapide des premiers écrits concernant la chimie organique. Il nous faut nous plonger dans l'évolution de cette branche de la chimie et la parcourir jusqu'à ses plus récentes avancées pour nous rendre compte du large éventail de compétences et de connaissances qu'elle englobe. La chimie organique est bien plus que la simple étude du carbone et de ses composés. La chimie organique représente un monde à part entière avec ses codes, ses règles, ses normes, ses métiers et ses exigences. Rendre compte d'un monde aussi vaste lors de son enseignement est, comme nous allons le voir lors du chapitre suivant, loin d'être simple.



# Chapitre II : État de l'art des recherches en didactique de la chimie organique

## L'enseignement de la chimie organique

Les premières réflexions nous ayant amenés à ce travail de recherche proviennent directement d'observations menées sur le terrain au cours de l'enseignement de la chimie organique. Ces réflexions personnelles nous ont poussés à nous demander si notre expérience pouvait être généralisée à l'ensemble de l'enseignement de la chimie organique ou si nous étions dans un cas particulier. Une plongée dans la littérature concernant l'enseignement de la chimie organique, quel que soit le niveau d'enseignement et à travers le monde, nous montre que notre expérience est en effet généralisable, et que l'enseignement de la chimie organique est problématique quel que soit le niveau ou le lieu d'enseignement.

Le traumatisme causé par le cours d'introduction à la chimie organique est tellement profond et généralisé que plusieurs colloques autour de ce thème ont eu lieu aux États-Unis, dont un colloque au nom particulièrement évocateur, le « *Symposium on reducing trauma in the undergraduate organic chemistry course* », qui s'est tenu en 1978, à Miami Beach. Le problème de l'enseignement de la chimie organique n'est donc pas nouveau, et est malheureusement toujours d'actualité.

De nombreux travaux de recherche ont été entrepris afin de tenter d'apporter une nouvelle approche de l'enseignement de la chimie organique lors du premier ou du second cycle d'études supérieures, principalement aux États-Unis[2]–[4], [52]–[61], mais également en France[5], [62]–[67], au Royaume Uni[68] ou en Australie[69]. Certains groupes de recherche ont abordé le même problème au niveau des études préuniversitaires, en Europe[70]–[74] ou encore aux États-Unis[75]–[77]. La recherche en éducation sur le thème de la chimie organique est un domaine très récent dans lequel beaucoup de portes restent encore à ouvrir. Notre travail de recherche pousse celle de l'enseignement de la chimie organique au niveau de l'enseignement secondaire en Belgique francophone. Au moment où nous écrivons ces lignes, aucune étude n'a été menée à ce sujet à notre connaissance.

Nous allons donc parcourir la littérature concernant l'enseignement de la chimie organique en gardant à l'esprit que notre intérêt se portera uniquement sur l'enseignement secondaire en Belgique francophone, c'est-à-dire sur l'enseignement des prémices de la chimie organique.

## Origine des problèmes d'apprentissage de la chimie organique

Il semble évident que l'enseignement et l'apprentissage de la chimie organique posent un grand nombre de problèmes aux apprenants et aux enseignants. Les recherches en didactique visent à comprendre quels sont ces problèmes, quelle en est l'origine, et enfin quelles solutions concrètes peuvent leur être apportées.

## Le choix de la méthode : mémorisation ou compréhension ?

Chez une majorité d'étudiants, les premières tentatives pour « comprendre » la chimie organique sont vouées à l'échec, et bien vite, l'examen approchant, l'étudiant préfère apprendre « par cœur » tout ce qui se trouve dans son cours, plutôt que de comprendre ce qui se cache derrière. Il semble ainsi qu'il

soit plus efficace pour les étudiants de se réfugier dans la mémorisation pour réussir un cours de chimie organique.[66]

Il existe dès lors un décalage entre cette approche de pure mémorisation et les attentes des enseignants, pour lesquels la chimie organique devrait avant tout être comprise, structurée, raisonnée, et non pas apprise par cœur, mémorisée. Cependant, pour les étudiants, la matière semble tellement énorme, et les principes tellement nombreux et « arbitraires » (comment savoir quand faire appel à tel principe plutôt qu'à tel autre ?) qu'ils choisissent la mémorisation plutôt que la compréhension. [1], [2], [66]

Une des explications les plus souvent mises en avant est l'importance du volume de connaissances à acquérir en très peu de temps.[78]–[81] Cependant, cette explication n'est valable que dans le cadre d'études supérieures. En effet, le programme des études secondaires en Belgique n'abordant pas une si grande variété de réactions et de fonctions, d'autres explications doivent être cherchées.

#### **Une base incertaine : concepts de chimie générale mal maîtrisés**

Une des principales difficultés dans la compréhension des concepts de la chimie organique repose sur le fait qu'elle nécessite la compréhension préalable de concepts de chimie générale, tels que l'acidité/basicité, les structures de Lewis et le nombre d'électrons de valence des éléments, l'électronégativité ou encore la notion de liaison chimique. Sans pouvoir s'appuyer sur ces concepts de base, il devient difficile, voire impossible, d'établir un lien quelconque entre la structure électronique d'un composé et sa réactivité. De plus, il a été montré que des conceptions incorrectes sont persistantes au fil des études, même après plusieurs années de cours de chimie organique.[58]

#### **Un symbolisme nouveau : des flèches et des barres**

La chimie organique possède son propre « langage écrit », qui peut sembler obscur au premier abord. Si le novice ouvre un cours de chimie organique, il risque fort d'être pris au dépourvu face aux représentations des molécules organiques qui se limitent souvent à des graphismes géométriques très dépouillés, où n'apparaissent que quelques rares symboles d'éléments chimiques particuliers. Entre cette pléiade de molécules se trouvent une série de flèches de toutes sortes, de la flèche courbe à la flèche droite et portant une ou deux pointes à ses extrémités. Au premier abord, maîtriser ce nouveau langage ne semble donc pas être évident.[82]

Pour les étudiants, l'appropriation de ce nouveau langage constitue donc une barrière supplémentaire à franchir lorsqu'ils abordent la chimie organique. Et, malheureusement, les enseignants ne prennent que rarement en compte cette difficulté, bien souvent parce qu'ils ne s'en rendent pas compte, ce langage étant tellement familier pour eux.[69], [83]–[85]

#### **Le décalage entre savoir savant et savoir enseigné en chimie organique**

Une problématique importante semble être la transposition didactique du savoir accumulé dans le domaine de la chimie organique. En 1998, une thèse a été consacrée à cette étude en France.[66] Elle expose l'évolution de la discipline, et en particulier l'existence de trois paradigmes successifs en chimie organique :

- Le « paradigme Lewis », qui a permis le développement brutal de la chimie organique grâce à la théorie des mécanismes réactionnels ;

- Le « paradigme milieu », qui prend en compte le milieu réactionnel afin d'expliquer certains résultats imprévisibles précédemment ;
- Le « paradigme quantique », qui intègre les découvertes de la chimie quantique et qui constitue aujourd'hui la référence parmi les chercheurs, mais ne diffuse encore que très légèrement dans le savoir enseigné.

L'écart entre le savoir savant et le savoir enseigné semble énorme. En effet, depuis la révolution didactique qui a eu lieu dans les années 1960-65, l'enseignement n'intègre plus aucune nouvelle notion établie depuis ce jour. Plusieurs exemples ont été étudiés en profondeur, comme les propriétés acido-basiques en chimie organique[62] ou encore la régiosélectivité de l'addition de HBr.[86]

L'explication proposée est que la transposition didactique est confrontée à deux obstacles importants : un obstacle épistémologique (la non prise en compte du milieu, sauf dans le cas des substitutions nucléophiles) et un obstacle didactique (l'explication du paradigme quantique avant d'aborder la chimie organique semble impossible).

Ces obstacles pourraient être la cause du choix des étudiants de se diriger vers une voie « économique », et ainsi d'étudier par cœur plutôt que d'essayer de comprendre. De plus, la transposition didactique choisie par les enseignants revient toujours à une simplification du schéma réactionnel et à l'isolation d'un seul paramètre directeur. Face à une situation nouvelle, les étudiants ont donc beaucoup de mal à déterminer quel serait cet unique paramètre directeur qui ferait « oublier » tous les autres.[1]

Une phrase résume bien l'idée générale : « Comment choisir des exemples significatifs et représentatifs, mais en même temps suffisamment simples pour être enseignables ? »[86] Le problème est donc bien connu, des solutions ont été proposées mais sans toutefois être satisfaisantes, la rigueur scientifique étant en opposition avec les contraintes didactiques de l'enseignement.[66]

Il semble donc d'une grande importance de débiter la chimie organique sur de bonnes bases et de favoriser au maximum la compréhension des élèves plutôt que la mémorisation systématique, tout en prenant le temps qu'il faut pour que le nouveau langage chimique leur devienne familier. La problématique de la transposition didactique du savoir à enseigner au niveau des études supérieures prend également une part importante dans les recherches, mais n'est probablement pas la plus pertinente en ce qui nous concerne, étant donné que le savoir à enseigner au niveau de l'enseignement secondaire de Belgique francophone est fortement limité.

### **La recherche dans l'enseignement secondaire**

Lorsque l'on se renseigne sur la recherche en didactique menée dans les établissements d'enseignement supérieur, on trouve rapidement une grande quantité d'articles évoquant le sujet dans toute une série de pays. L'enseignement supérieur de la chimie organique est très similaire : que l'on soit en Amérique ou en Europe, en passant par l'Asie ou encore l'Océanie, le savoir enseigné est sensiblement identique.

Cependant, lorsqu'il s'agit de l'enseignement secondaire, on constate rapidement qu'il va nous falloir être vigilant en fonction du pays dans lequel nous nous trouvons. De plus, le nombre de recherches est beaucoup plus réduit en ce qui concerne la chimie organique. Nous trouvons deux explications majeures à la pauvreté de la littérature abordant la didactique de la chimie organique dans le secondaire :

- Les différences importantes de programme d'un pays à l'autre ;
- L'intégration relativement récente de la chimie organique au programme d'enseignement.

### **Diversité de contenu en fonction du pays**

Contrairement aux recherches menées autour de l'enseignement de la chimie organique dans l'enseignement supérieur, qui portent toutes sur le même contenu, il n'y a pas un tel consensus mondial autour de l'enseignement de la chimie organique dans les écoles secondaires. La place de l'organique y est très variable d'un pays à l'autre. Il faut donc se montrer prudent face à une étude menée dans un établissement d'enseignement secondaire, le programme y étant enseigné en chimie organique pouvant différer grandement de celui dispensé dans notre pays d'intérêt.

Avant d'explorer la littérature, nous devons faire une mise au clair d'un point de vue du vocabulaire : nous avons l'habitude d'entendre parler de « collèves » en France comme étant des établissements d'enseignement secondaire. Or, aux États-Unis et au Canada, les « colleges » sont des établissements d'enseignement supérieur, préparant à l'université (équivalent des écoles préparatoires françaises) ou d'un niveau équivalent aux universités.

Un rapide état des lieux montre que la place accordée à la chimie organique dans l'enseignement secondaire général est très variable de pays en pays : d'inexistante au Québec, elle tient une place importante dans le cours de chimie durant les trois dernières années d'études en France. Les États-Unis présentent un cas particulier où les élèves peuvent choisir de nombreuses options, parmi lesquelles peut se trouver un cours de chimie organique (variable d'une école à l'autre). La Belgique se situe à mi-chemin entre ces deux extrêmes : une introduction à la chimie organique est imposée lors du troisième degré de l'enseignement secondaire, quelle que soit l'option choisie.

La majorité des études menées dans des écoles de niveau secondaire à l'étranger portent sur un savoir largement plus étendu que celui du programme de chimie organique en Belgique, étant donné que les pays intégrant la chimie organique dans l'enseignement secondaire abordent déjà un grand nombre de réactions ainsi que les mécanismes de ces réactions, ce qui n'est pas le cas en Belgique. Nous ne trouvons donc qu'un nombre très restreint d'études qui se limitent au référentiel utilisé en Belgique.

### **La chimie organique n'a que récemment été insérée dans les programmes**

La chimie organique n'était pas enseignée dans les écoles secondaires il y a 50 ans. Ce n'est que récemment que de plus en plus de pays l'ont intégrée dans leur programme. On peut ainsi trouver des articles expliquant l'élaboration d'un premier cours d'introduction à la chimie organique dans différentes écoles, que ce soit aux États-Unis[76], [87], [88], en Finlande[70] ou encore en Australie[89], ainsi que l'avis de certains enseignants sur l'intérêt de cet enseignement : il semble que cette introduction de la chimie organique dans l'enseignement secondaire soit vue positivement.[75], [90]



Un exemple de programme proposé aux États-Unis en 1971[87] commence par considérer la structure, la notion d'isomérisation et la nomenclature d'hydrocarbures insaturés. Par la suite, la distillation fractionnée du pétrole est abordée, jusqu'à la production de l'essence. Les réactions d'addition sur alcènes et alcynes mènent aux polymères formés par polyaddition. La structure des alcools, des amines et des acides carboxyliques est ensuite abordée en utilisant des exemples de produits quotidiens (sans nomenclature). Pour finir, un deuxième type de réaction est abordé (la condensation) pour mener aux esters, aux amides et aux polymères formés par polycondensation. Le programme se termine en discutant des graisses, des huiles, des savons, des acides aminés et des protéines.

Il est amusant de constater que le nouveau référentiel de chimie organique élaboré en Belgique en 2015 est fort similaire, par son contenu, à ce programme élaboré il y a plus de 40 ans aux États-Unis. Si de plus en plus d'écoles secondaires dans le monde choisissent de mettre sur pied un cours d'introduction à la chimie organique, c'est le chemin inverse qui est suivi en Belgique, avec la diminution de la place de la chimie organique dans le programme du secondaire. La décision de réduire la quantité de matière enseignée dans le secondaire pour permettre une meilleure compréhension des concepts est à l'origine de cette diminution.

### **Quelques recherches intéressantes**

Plusieurs recherches se sont focalisées sur la partie expérimentale de l'enseignement. D'une manière générale, le travail en laboratoire est mis en avant comme outil permettant aux élèves de mieux s'approprier la chimie organique.[91] Les principales raisons invoquées par les enseignants qui ne pratiquent pas de laboratoire de chimie organique sont le manque de temps et le manque de moyens. Il existe cependant plusieurs articles détaillant des manipulations réalisables avec peu de matériel et durant une période de cours de 50 minutes.[92], [93]

Il existe de rares études approfondies autour de l'enseignement de la chimie organique dans le secondaire. Ce genre d'étude existe en Écosse, où l'on a testé les connaissances d'étudiants avant leur premier cours de chimie organique dans une université, afin de voir ce qu'ils avaient acquis en secondaire. Ce premier test a été comparé à la réussite des étudiants en fin d'année ; il existe un lien entre les étudiants réussissant leur année et ceux ayant le mieux répondu au test de début d'année. Les auteurs en concluent donc que le fait d'avoir déjà compris certaines notions de chimie organique en secondaire peut être favorable à la réussite des étudiants à l'université.[68]

Une seconde étude a été effectuée en Irlande. Celle-ci a tout d'abord identifié les concepts posant le plus de problèmes en chimie organique, selon les enseignants et les étudiants, à savoir les structures des molécules, les groupes fonctionnels, les caractéristiques des composés organiques, les réactions organiques et leurs mécanismes, ainsi que le travail en laboratoire.[72] Par la suite, un programme a été proposé afin d'aider les enseignants à transmettre la chimie organique dans les meilleures conditions possible.[73]

Une équipe grecque a élaboré un outil d'évaluation des étudiants[71], qui a également servi par la suite comme base à des chercheurs serbes pour créer un outil d'enseignement[74]. Cet outil consiste en un diagramme reliant les différents concepts importants, ou reliant différents produits et réactifs afin de mettre en évidence des réactions chimiques. Ce genre de diagramme permet aux élèves de

faire des liens entre les concepts importants et de visualiser quelles réactions permettent de relier les fonctions organiques entre elles.[94]

### **La recherche dans l'enseignement supérieur**

Bien que notre recherche se focalise sur l'enseignement secondaire, nous allons explorer la littérature concernant l'enseignement supérieur afin de découvrir ce qui a déjà été testé et expérimenté à ce niveau d'enseignement. Le savoir enseigné et le public d'apprenants ne sont pas ceux que nous visons, mais nous pouvons probablement nous inspirer de ce qui a déjà été mené comme recherche à ce niveau et imaginer les adaptations nécessaires pour que leurs résultats soient applicables à notre niveau.

De nombreuses recherches ont été menées dans le but d'améliorer l'apprentissage de la chimie organique dans l'enseignement supérieur. Des auteurs de différents continents se sont attaqués à un problème qui semble mondial, et toutes ces recherches peuvent donc aisément être regroupées puisqu'elles se focalisent sur le même contenu, à savoir l'enseignement de la chimie organique en partant de la chimie générale, en passant par la description des différentes fonctions organiques pour aboutir aux mécanismes réactionnels et à la synthèse organique.

Parmi ces recherches, on peut distinguer trois grandes voies explorées :

- Une proposition de nouvelles manières d'enseigner (approches didactiques innovantes, création de nouveaux supports d'enseignement, travaux collaboratifs entre étudiants...).
- Une modification du contenu à enseigner (limitation du nombre de réactions, omission de certains principes théoriques, abandon de l'approche par fonctions, la plus largement utilisée, pour une approche plus spiralaire...).
- Une approche basée sur les modes d'apprentissages et la compréhension des étudiants (focalisation sur les différentes manières dont les étudiants abordent le cours de chimie organique).

Nous allons parcourir rapidement les études majeures dans ces différents domaines, par le biais de quelques exemples choisis.

### **Propositions de nouvelles manières d'enseigner**

Certaines recherches ont visé l'élaboration de nouveaux supports d'enseignement afin d'aider les apprenants sur certains points particulièrement compliqués. On retrouve une base de données d'orbitales moléculaires rendant l'enseignement de certains mécanismes plus facile[63], une carte des réactions chimiques pour faciliter l'étude des réactions entre les différentes fonctions[80], ou encore un organigramme pour mieux comprendre la compétition entre substitutions et éliminations[95], pour ne citer que quelques exemples.

Certaines études ont été menées afin de conseiller l'enseignant dans le vocabulaire qu'il utilise. Par exemple, on constate qu'une des erreurs principales lors de l'écriture d'un mécanisme est que l'étudiant écrit les flèches dans le mauvais sens. Cette erreur serait due au fait que l'on emploie le même mot pour décrire une substitution nucléophile ou une addition électrophile : on parle d'attaque, que ce soit pour le nucléophile ou l'électrophile. L'étudiant ferait donc le lien entre l'atome qui « attaque » et l'atome d'où doit partir la flèche.[96]

Outre le vocabulaire, le symbolisme utilisé en chimie organique est d'une grande importance. Le type de représentation utilisé peut grandement influencer la compréhension des étudiants. Par exemple, il a été montré que l'on utilise majoritairement une représentation en trois dimensions lorsqu'on aborde les substitutions nucléophiles, alors que l'on préfère une représentation en deux dimensions pour parler des éliminations. De ce fait, la manière de représenter un substrat peut orienter la réponse des étudiants devant un exercice. Devant la même réaction, la majorité des étudiants prédisent une substitution nucléophile si les réactifs sont représentés en trois dimensions, mais si ceux-ci sont représentés en deux dimensions, alors la réaction majoritairement choisie par les étudiants est une élimination. Il convient donc d'adopter un symbolisme plus universel, quelle que soit la réaction étudiée.[69], [84]

De nombreux auteurs se sont penchés sur l'idée de donner une autre forme au cours de chimie organique, qui est traditionnellement un cours ex cathedra donné par un professeur devant un grand auditoire. Plusieurs propositions ont vu le jour :

- Un cours sous forme de résolutions de problèmes en petits groupes d'étudiants, encadrés par un assistant ou par un étudiant de niveau supérieur ayant suivi ce même cours précédemment, avec des résultats positifs et encourageants.[3], [59]
- Un cours basé sur le travail en groupe autour de la synthèse comparée de certaines molécules, suivi par une présentation orale, permettant une plus grande implication de la part des étudiants.[97]
- La même idée de travail en groupe a été exploitée également dans le cadre des laboratoires de chimie organique. Une comparaison entre des manipulations effectuées de manière coopérative et ces mêmes manipulations effectuées individuellement a été menée. Aucune différence significative n'a été observée quant aux connaissances acquises par les étudiants. Cependant, une évaluation qualitative a révélé que les étudiants ayant travaillé en groupe sont mieux préparés aux manipulations et plus satisfaits par les laboratoires.[55]
- Un enseignement basé sur l'apprentissage coopératif, l'apprentissage actif ou encore l'apprentissage en équipe dirigé par les pairs a donné d'excellents résultats.[98], [99]

Un enseignant a décidé d'organiser son cours de manière inversée : les étudiants doivent lire quelques pages du syllabus chez eux et, durant le cours, l'enseignant pose des questions aux élèves. Le taux de bonnes réponses peut, s'il est suffisamment élevé en fin d'année, augmenter leur grade final.[100]

D'autres auteurs se sont concentrés sur une dimension pédagogique plus générale. On peut par exemple citer l'utilisation d'examens plus réguliers[101], l'utilisation de logiciels d'auto-évaluation[102] et la participation des étudiants aux pratiques du chimiste organicien.[103]

Un dernier point soulevé au cours de certaines recherches précise que l'apprentissage se fait d'une meilleure manière lorsque l'étudiant a une bonne impression générale vis-à-vis de l'enseignant et que l'enseignement est agréable à suivre, voire « fun ».[101] Il n'est pas superflu de garder ce genre de considération à l'esprit lorsque nous nous retrouvons devant un public auquel nous voudrions apprendre quelque chose.

### **Modification du contenu à enseigner**

La redéfinition du contenu disciplinaire fait également l'objet de diverses recherches qui visent à élaguer une partie de ce contenu et à actualiser les différentes applications proposées dans le cours,

le but de ces changements étant que les étudiants maîtrisent les bases de la chimie organique. Certains auteurs proposent donc de limiter le nombre de réactions ou encore de diminuer la complexité de la matière en omettant certains principes théoriques (contrôles thermodynamique et cinétique) ou des notions de compétitions entre réactions (SN1, SN2, E1 et E2).[101], [104]

Une remarque intéressante pointe le fait que le niveau d'intelligence des humains ne semble pas avoir changé durant ces derniers millénaires.[101] Il est donc cohérent de penser que les étudiants d'aujourd'hui ont la même capacité d'apprentissage que les étudiants du siècle passé. Cependant, la recherche ne cesse d'avancer et de mettre à jour de nouvelles connaissances. Certains auteurs soulignent le fait qu'il serait donc pertinent de se demander si nous n'avons pas atteint un point où nous voulons enseigner beaucoup trop d'informations sur une période toujours aussi réduite, et qu'il serait préférable de repenser le cursus scolaire en termes de contenu abordable sur une durée de 4 ou 5 ans.[101]

Une autre approche proposée consiste en la réorganisation du contenu, plutôt que sa redéfinition. L'approche par fonction, bien que la plus utilisée de nos jours, ne semble pas la plus favorable et plusieurs autres possibilités ont été testées.

À l'université de Miami, une structuration spiralaire permet aux étudiants d'aborder la chimie organique par une approche plus globale lors de la première partie de l'année (les étudiants découvrent la nomenclature des fonctions organiques, leurs propriétés générales, certains mécanismes simples, etc...) avant de s'attaquer à des sujets plus précis durant la seconde moitié de l'année tout en revisitant la matière découverte en début d'année (réactions plus complexes ou modernes). Ceci permet aux étudiants de passer deux fois à travers l'entièreté des fonctions organiques étudiées. [54]

L'université d'Elon, en Caroline du Nord, a choisi une structuration par grands types de réaction. Le cours de chimie organique commence par un rappel en profondeur de plusieurs concepts fondamentaux de chimie générale, avant de parler des mécanismes réactionnels de manière globale. Enfin, le cours se termine par les différentes réactions, qui sont classées par type de mécanisme. Cette structuration originale a abouti à des résultats positifs.[60] D'autres universités ont également choisi de tester ce genre de structuration, avec quelques variations en fonction des auteurs, mais toujours avec des résultats positifs.[78]

Une autre proposition consiste en une approche de la chimie organique par les « six piliers de la chimie organique », que sont l'électronégativité, la liaison covalente polarisée, les effets inductifs, les effets stériques, la résonance et l'aromaticité.[105] Avant de parcourir les différentes fonctions organiques, le cours commence en expliquant ces différents concepts. En abordant chacune des fonctions organiques et leurs réactions, ces concepts sont passés en revue pour expliquer de manière répétée leur importance. L'idée est que l'étudiant devrait être capable de prédire une très grande variété de propriétés et de réactions s'il maîtrise correctement ces six piliers.[105]

Plus proche de nous, à Paris, une idée similaire a été testée. Le cours de chimie organique se découpe en différents blocs, en commençant par l'identification d'espèces chimiques et la représentation des molécules, menant à la relation entre la structure et les propriétés physiques et spectroscopiques. La synthèse organique est abordée ensuite, et la stéréochimie arrive uniquement en fin d'année. Ces

auteurs encouragent l'utilisation d'un outil, la réactionthèque, construit par les étudiants tout au long de l'année et qui récapitule toutes les réactions abordées.[1], [67], [106]

### **Approche par la compréhension des étudiants**

Certaines recherches se focalisent directement sur la compréhension (ou plutôt la non compréhension) du cours de chimie organique par les étudiants, à l'inverse des recherches précédentes qui sont directement centrées sur l'enseignement. Plusieurs études tentent de comprendre la manière dont les étudiants font le lien entre les nombreux concepts de chimie organique nécessaires pour résoudre des exercices[2], [57], [107], ou encore comment ils structurent ce nouveau savoir.[61]

Il en ressort que même de très bons élèves présentent de grandes difficultés face au cours de chimie organique. La raison invoquée serait une différence dans leur manière d'apprendre : certains sont des « relational learner », qui savent appliquer un certain schéma sur un nouvel exercice, faire une relation entre ce qu'ils ont appris et une nouvelle tâche, alors que d'autres sont plutôt des « instrumental learner », qui savent résoudre un exercice du même type qu'un autre exercice déjà vu précédemment, mais qui sont perdus devant un nouveau type de tâche. Les élèves ne réussissent pas à relier une nouvelle tâche avec un schéma, ils ne comprennent pas « pourquoi » il faut appliquer telle ou telle règle devant un nouveau problème, ils se sentent donc obligés d'apprendre par cœur toute une série de règles correspondant à chacun des cas possibles. On retrouve bien là un des problèmes majeurs posés par l'apprentissage de la chimie organique : l'étudiant apprend par cœur de nombreuses règles sans en comprendre réellement le fondement.[2]

Une autre étude a essayé de comprendre quel système de représentation les étudiants utilisent lorsqu'ils sont face à un problème de synthèse organique. Celui qui se démarque des autres est un système de type méthodologique dans lequel les étudiants pensent que, pour résoudre un problème de synthèse organique, il faut suivre une série de règles à appliquer dans un certain ordre. Ceci montre encore une fois que les étudiants choisissent d'apprendre des choses par cœur sans chercher à comprendre l'essence même de la synthèse organique.[107]

L'un des points qui semble poser énormément de problèmes aux étudiants, et qui éveille l'intérêt de nombreux chercheurs, est l'élaboration des mécanismes réactionnels. L'efficacité de l'utilisation des flèches de mécanisme a été explorée lors d'une étude, après avoir constaté que beaucoup d'étudiants ne font pas spontanément appel aux mécanismes pour prédire les produits de réactions. [60] L'utilisation de mécanismes permet aux étudiants de mieux réussir ce genre d'exercice uniquement lorsque l'écriture du mécanisme est nécessaire pour prédire correctement le produit. Dans le cas où il suffit de se souvenir d'un autre exercice similaire, il n'y a pas de différence entre les étudiants faisant appel ou non à un mécanisme.[53]

Certains points particuliers ont également été abordés dans ce cadre. C'est le cas par exemple des liaisons hydrogène. Il a été mis en évidence que les étudiants sont capables de donner une définition appropriée et de reconnaître avec quelles molécules un lien H peut se faire, cependant ils ne savent pas en déduire les modifications de propriétés physiques que celui-ci peut induire, par exemple sur le point d'ébullition.[56]

## **Vers un nouvel enseignement de la chimie organique**

Comme nous l'avons vu au cours de ce chapitre résumant une quantité non exhaustive de recherches menées sur l'enseignement de la chimie organique, nous sommes loin d'avoir trouvé une solution miracle qui permette à tous les apprenants de réellement appréhender la chimie organique. Il reste donc encore une place gigantesque pour le développement de nouvelles recherches et études visant à l'amélioration de l'enseignement de la chimie organique. Plusieurs axes peuvent être envisagés pour ces futures études, mais ceux que nous voulons privilégier au cours de notre recherche sont les suivants :

- L'enseignement de la chimie organique doit être repensé dès le premier contact avec cette matière, c'est-à-dire dès l'enseignement secondaire.
- Nous nous focaliserons sur une réorganisation du contenu à enseigner en secondaire, par une modification de la manière d'enseigner ce contenu. Notre recherche se focalisera donc sur l'enseignement et non sur l'apprenant.
- Nous ne souhaitons pas limiter notre recherche au champ théorique : celle-ci comportera donc une part importante de mise en pratique sur le terrain, dans les écoles et devant les élèves. Nous espérons pouvoir proposer aux enseignants une nouvelle manière d'aborder la chimie organique avec leurs élèves.
- Nous voulons insister sur la compréhension des apprenants et non sur la mémorisation de règles.
- Notre recherche visant à être exploitée par les enseignants d'écoles secondaires, nous ferons l'impasse sur les mécanismes réactionnels étant donné l'interdiction de les enseigner dans les écoles secondaires de Belgique francophone.

C'est sur cette base que nous allons développer, au cours du prochain chapitre, les objectifs poursuivis au cours de ce travail ainsi que la méthodologie générale mise en place pour y arriver.

# Chapitre III : Questions de recherche, objectifs de la thèse et méthodologie générale

## Objectifs de la thèse et questions de recherche

Notre recherche a pour objectifs principaux de mettre en évidence les difficultés auxquelles les apprenants sont confrontés lors de leur première rencontre avec la chimie organique au cours de l'enseignement secondaire, de comprendre d'où viennent ces difficultés et d'élaborer un outil à destination des enseignants permettant de contrer un certain nombre de ces difficultés.

Le point de départ de cette recherche est la détermination des erreurs et la mise en évidence des conceptions alternatives au sujet de la chimie organique présentes chez les élèves du secondaire. Il s'agit donc de démarrer notre recherche par un diagnostic de la situation actuelle des élèves face au thème de la chimie organique. Notre première question de recherche est donc la suivante :

**QR1** « *Quelles sont les conceptions alternatives présentes chez les apprenants en ce qui concerne l'apprentissage de la chimie organique au niveau secondaire ?* »

Une fois les conceptions alternatives mises à jour, nous pourrions nous atteler à la lourde tâche qu'est la conception d'activités didactiques qui permettent à l'apprenant d'éviter de tomber dans le piège de ces conceptions erronées, en prenant soin d'insister sur les points les plus problématiques. Notre deuxième question de recherche est donc :

**QR2** « *Quelles activités didactiques concevoir afin d'éviter l'émergence de conceptions alternatives chez les apprenants ?* »

Notre recherche se focalise plus particulièrement sur la mise au point de deux séquences d'apprentissage. Les thèmes de ces séquences sont choisis dans le but d'améliorer l'apprentissage des points les plus problématiques préalablement mis en évidence par nos premiers questionnaires. La méthode que nous préconisons au cours de ces séquences d'apprentissage est en lien direct avec ce qui est proposé par les référentiels de compétences et est en opposition avec ce que nous observons directement sur le terrain : plutôt que de baser l'enseignement sur un apprentissage focalisé principalement sur la mémorisation, la restitution, l'apprentissage « par cœur », nous proposons au contraire une séquence d'apprentissage qui lie concrètement les savoirs à la vie quotidienne, qui ne demande pas uniquement aux élèves de « connaître » un sujet mais surtout de pouvoir appliquer et transférer des acquis. La suite logique de notre travail nous mène à finaliser cette étude par la mise en application sur le terrain de ces séquences d'apprentissage et à l'évaluation de leur impact auprès des élèves. Cette dernière question de recherche nous amène dans les écoles, devant les élèves, afin de déterminer :

**QR3** « *Comment les séquences d'apprentissage développées influencent-elles les réponses des apprenants lors d'un questionnaire portant sur la chimie organique ?* »

Une fois les différentes questions de recherche posées, nous allons explorer la méthodologie à choisir afin de tenter d'y répondre.

## **Méthodologie générale**

Nous présentons ici la méthodologie globale que nous suivrons au cours de cette recherche. La mise en place des différentes étapes est détaillée dans les parties suivantes. La méthodologie choisie comporte trois étapes distinctes :

- Une première étape nous permet d'analyser le contenu enseigné en secondaire grâce aux référentiels de compétences et aux programmes des différentes écoles. Nous complétons cette analyse grâce aux différents outils d'évaluation utilisés par les enseignants.
- Une deuxième étape nous mène vers la mise en évidence des différentes conceptions alternatives présentes chez les apprenants.
- Une troisième étape consiste en l'élaboration de séquences d'apprentissage permettant d'éviter ces conceptions alternatives.

### **Première étape : Analyse du contenu à enseigner en secondaire**

Cette étape est indispensable afin de bien appréhender les différents savoirs et savoir-faire enseignés aux élèves dans le chapitre de chimie organique au niveau de l'enseignement secondaire. Elle permet de démarrer ce travail sur des bases correctes concernant les contenus à enseigner. Elle consiste en l'analyse poussée des référentiels de compétences et des programmes des écoles, ainsi que des manuels utilisés par les enseignants, ce qui nous permettra de faire une synthèse du savoir à enseigner, des connaissances que les apprenants doivent assimiler et des compétences qu'ils doivent acquérir au cours de l'enseignement de la chimie organique. Nous chercherons à mettre en évidence les liens pouvant exister entre le savoir à enseigner et l'épistémologie de la chimie organique telle que nous l'avons explorée précédemment.

D'autre part, nous analyserons également les outils d'évaluation proposés dans les livres et ceux utilisés par les enseignants afin de mettre en évidence la nature des exercices proposés aux apprenants à ce niveau d'enseignement de la chimie organique. Nous mettrons en évidence la part de restitution, d'application et de transfert au sein des évaluations, ainsi que la pertinence de celle-ci. Ceci nous permettra, par la suite, avec les informations également obtenues par l'analyse des conceptions alternatives, de proposer une réorganisation du savoir à enseigner que nous utiliserons lors de la conception de nouveaux outils d'enseignement.

### **Deuxième étape : Diagnostic des conceptions alternatives**

#### ***Phase 1 : élaboration et exploitation d'un questionnaire à réponses ouvertes***

Afin de mettre en évidence les conceptions alternatives des apprenants au sujet de la chimie organique, nous avons fait le choix d'utiliser un questionnaire comportant majoritairement des questions ouvertes, permettant aux apprenants de répondre le plus librement possible aux questions qui leur sont posées. Cette première approche nous semble la plus simple pour aborder de manière non biaisée les conceptions des apprenants. Ce questionnaire a été proposé à des élèves ayant déjà suivi le cours de chimie organique et ayant déjà dû étudier cette matière pour une évaluation. L'analyse quantitative des réponses des apprenants permet de comptabiliser les types d'erreurs les plus fréquentes, et de dévoiler certaines conceptions alternatives. Cependant, un des désavantages des questions à réponses ouvertes est le manque d'information dont nous disposons lorsque l'élève ne répond tout simplement pas à la question posée.



## ***Phase 2 : élaboration et exploitation d'un questionnaire à choix multiples et d'entretiens semi-dirigés***

Nous continuerons l'exploration des différentes conceptions alternatives présentes chez les élèves par la mise au point d'un questionnaire à choix multiple conçu, d'une part, en nous basant sur les réponses des élèves au questionnaire à réponses ouvertes, et d'autre part sur de précédentes recherches en didactique de la chimie afin de proposer aux élèves des distracteurs plausibles. L'utilisation d'un tel questionnaire présente plusieurs avantages que ce soit lors de l'encodage et de l'analyse des réponses des élèves ou lors de la passation du questionnaire, ce genre de questionnaire tendant à éviter le phénomène d'absence de réponse auquel nous avons été confrontés lors de la première phase de notre diagnostic. En parallèle, nous mènerons des entretiens semi-dirigés avec quelques élèves afin de mieux comprendre leurs conceptions alternatives. L'analyse de ce deuxième questionnaire ainsi que celle des entretiens semi-dirigés permettra de répondre à notre première question de recherche (QR1).

Cette étape se terminera par le choix de deux thèmes que nous considérons comme problématiques lors de l'apprentissage de la chimie organique. Ces deux thèmes nous mèneront à la dernière étape de notre travail et constitueront le point de départ de la construction de deux séquences d'apprentissage.

### **Troisième étape : Construction de deux séquences d'apprentissage**

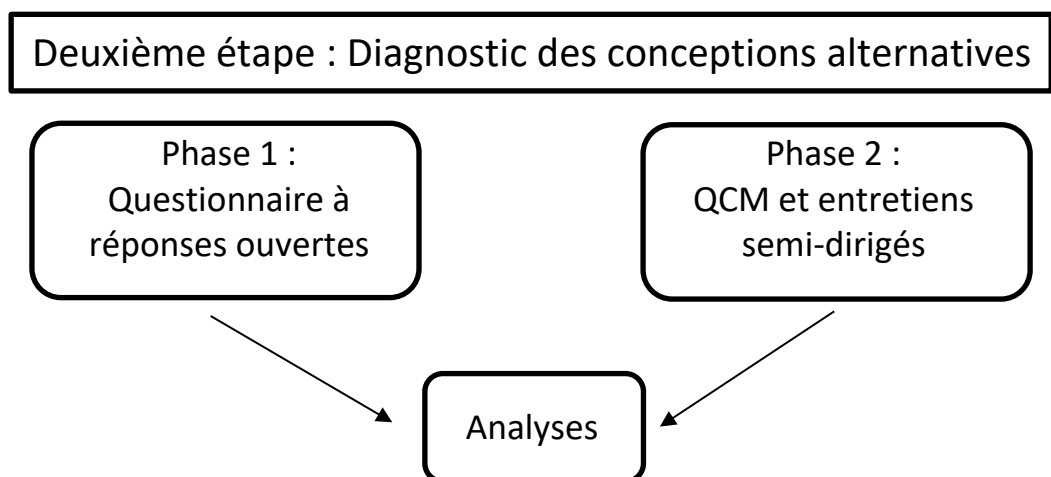
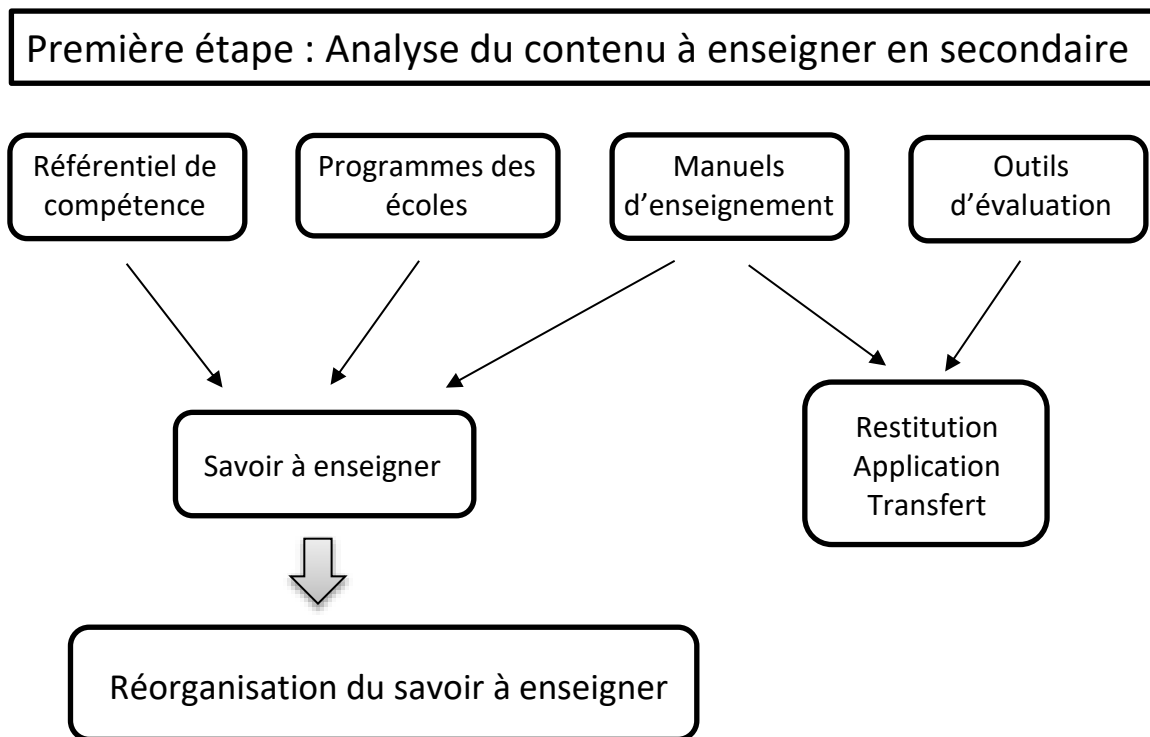
Chacune des séquences d'apprentissage construites lors de ce travail poursuit les mêmes objectifs. Elles seront traitées en parallèle selon la même logique. Ces séquences d'apprentissage auront pour but d'être utilisées en classe réelle et devront donc respecter certaines contraintes :

- La séquence doit susciter l'intérêt de l'élève ;
- La séquence ne doit nécessiter qu'un matériel présent dans toutes les classes de cours ;
- La durée de la séquence ne doit pas excéder la durée du cours qu'elle vise à remplacer ;
- Le contenu de la séquence doit respecter les référentiels si nous voulons qu'elle soit exploitée par les enseignants par la suite, il n'y est donc pas fait référence aux mécanismes réactionnels. Certaines fonctions, réactions ou écritures non intégrées au référentiel actuellement y seront cependant incluses.

Chacune des séquences d'apprentissage sera améliorée par un processus itératif permettant d'aboutir à une séquence répondant le mieux possible aux besoins des apprenants et de l'enseignant. Ce processus itératif se basera sur le test sur le terrain (en situation de classe réelle) de la séquence, sur l'analyse des résultats de l'évaluation des apprenants au terme de la séquence et sur la prise en compte des avis des apprenants et des enseignants sur ladite séquence. Chaque séquence présentée devant une classe sera donc légèrement différente de la séquence proposée à la classe précédente dans le but d'optimiser au maximum les séquences d'apprentissage. La mise en pratique des deux séquences permettra de fournir une réponse à notre deuxième question de recherche (QR2).

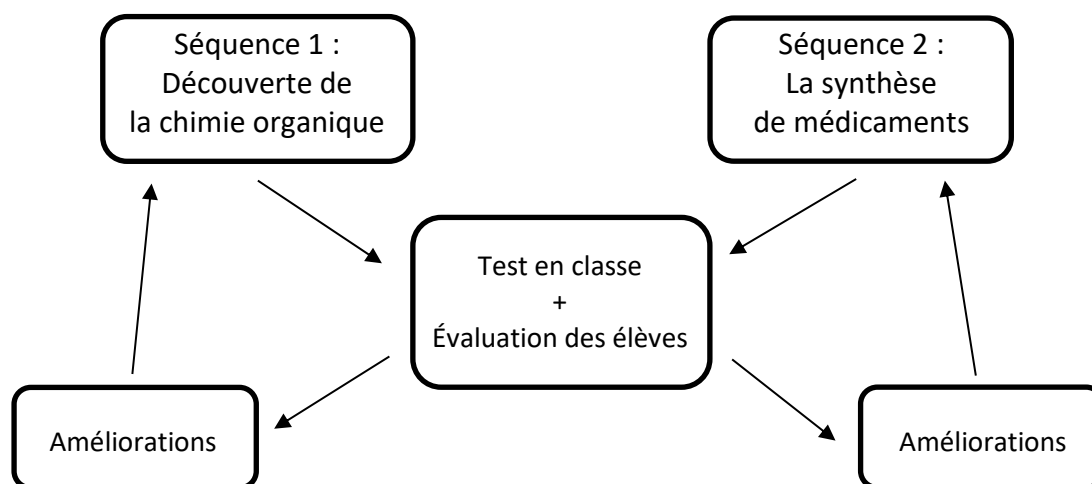
L'évaluation finale proposée aux apprenants en fin de séquence sera, quant à elle, sensiblement la même, afin de permettre la comparaison objective des résultats obtenus par les élèves ayant suivi une des nouvelles séquences d'apprentissage proposées et par les élèves ayant suivi un cours classique de chimie organique. Une analyse de ces résultats permettra de mesurer la variation de scores entre ces deux groupes d'élèves et ainsi de vérifier si les séquences d'apprentissage ont un effet positif sur la compréhension de la chimie organique par les élèves, ce qui fournira une réponse à notre troisième et dernière question de recherche (QR3).

**Méthodologie reprise sous forme schématique :**



➔ QR1 : « Quelles sont les conceptions alternatives présentes chez les apprenants en ce qui concerne l'apprentissage de la chimie organique au niveau secondaire ? »

### Troisième étape : Construction de deux séquences d'apprentissage



→ QR2 : « Quelles activités didactiques concevoir afin d'éviter l'émergence de conceptions alternatives chez les apprenants ? »

→ QR3 : « Comment les séquences d'apprentissage développées influencent-elles les réponses des apprenants lors d'un questionnaire portant sur la chimie organique ? »



Partie 2 :  
Analyse du contenu à enseigner  
au niveau secondaire

---



# Introduction

Nous nous sommes concentrés au chapitre précédent sur l'origine historique de la chimie organique et sur son épistémologie. Nous allons désormais nous intéresser à la manière dont l'enseignement belge francophone a décidé d'introduire la chimie organique pour la première fois aux élèves.

Au cours du premier chapitre de cette deuxième partie, nous étudierons le savoir à enseigner en secondaire en ce qui concerne la chimie organique. Nous commencerons en parcourant les différentes problématiques déjà mises en évidence dans la littérature au sujet de l'enseignement de la chimie organique dans le monde. Nous examinerons ainsi la nécessité de conserver un enseignement de la chimie organique au niveau de l'enseignement secondaire. Nous détaillerons ensuite les documents de référence sur lesquels les enseignements doivent se baser afin de faire découvrir la chimie organique aux élèves lors des deux dernières années de l'enseignement secondaire belge, et nous collecterons ces documents afin de créer un corpus de documents représentatif au sein duquel nous pourrions analyser le savoir à enseigner.

L'analyse de ce corpus débutera par les différents objectifs mis en avant par le référentiel de compétences. Nous étudierons leur présence au sein des différents chapitres consacrés à la chimie organique. Nous continuerons notre analyse en nous focalisant sur la structuration actuelle du savoir à enseigner, et l'adéquation entre cette structuration et les différents objectifs précédemment cités. Nous compléterons notre analyse en décomposant notre corpus en fonction des différents grands thèmes qui y sont abordés. Pour finir, nous proposerons une réorganisation du savoir à enseigner qui, nous l'espérons, est plus en adéquation avec les objectifs d'apprentissage prônés par le Ministère de la Communauté Française.

Le second chapitre portera sur les méthodes d'évaluation du savoir enseigné aux élèves en chimie organique. Nous commencerons par étudier les différents processus d'apprentissage indiqués dans le référentiel de compétences, et nous en extrairons trois principaux types de questions d'évaluation. Nous établirons ensuite des critères que nous utiliserons pour analyser le corpus d'évaluations que nous avons rassemblé, et qui se compose de questions reprises au sein de manuels et de questions utilisées par des enseignants.

L'analyse de ce corpus permettra de mettre en avant les différences entre les questions « théoriques » présentes dans les manuels et les questions « réelles » utilisées par les enseignants. Nous évaluerons si tous les types de questions sont présents de manière homogène au sein des évaluations et nous mettrons en avant l'importance de certains thèmes ou objets dans les questions proposées aux élèves.





# Chapitre I : Analyse du savoir à enseigner en chimie organique

## Problématique de l'enseignement de la chimie organique

La définition la plus commune de la chimie organique est la chimie du carbone et de ses composés. Cette définition semble réductrice si l'on interroge la fonction du chimiste organicien d'aujourd'hui. Ainsi, comme nous venons de le voir lors de la première partie de ce travail, la chimie organique poursuit plusieurs objectifs qui peuvent se résumer comme suit :

- Déterminer la structure des composés organiques.
- Mettre en évidence des liens entre la structure et les propriétés de composés organiques.
- Synthétiser des composés organiques à partir de matières premières.

Afin de mener à bien les deux premiers objectifs, le chimiste organicien doit maîtriser différentes techniques d'analyse (l'analyse centésimale, la spectrométrie de masse, la résonance magnétique nucléaire, la diffraction des rayons X, etc...). Cette partie de la chimie organique est souvent négligée lorsqu'on aborde la chimie organique pour la première fois, or elle reste le fondement historique de cette science, comme nous l'avons vu. La chimie organique est née de la volonté des scientifiques de comprendre de quoi est faite la matière, quelle est la composition des molécules et comment les classer.

Le troisième objectif de la chimie organique concerne la synthèse de molécules. Si, de nos jours, cet objectif est sans doute le plus important, il ne faut pas perdre de vue que la synthèse n'est apparue que tardivement dans l'histoire de la chimie. En effet, il a d'abord fallu passer par l'étape de détermination de la structure des composés avant de pouvoir imaginer les synthétiser d'une manière ou d'une autre. La synthèse organique est indispensable dans le monde actuel, permettant d'obtenir des quantités importantes de composés rares dans la nature ou de synthétiser des produits purement synthétiques, imaginés par des chercheurs suite à la mise en évidence de liens entre la structure et les propriétés d'autres molécules, le tout majoritairement dans un but de développement sociétal.

## Problématique de l'enseignement des fonctions organiques

L'étude de l'histoire de la chimie organique permet de mettre en évidence les grands principes qui ont permis sa construction, siècle après siècle. À l'époque de l'émergence de la chimie organique, la préoccupation première des scientifiques était alors de classer les différents composés qu'ils rencontraient. De nos jours, cette préoccupation de répartir les molécules en différentes catégories de composés, que l'on nomme désormais les fonctions organiques, est au centre de l'enseignement de la chimie organique. Quel que soit le niveau d'étude, on retrouvera très souvent un découpage de l'apprentissage en termes des différentes fonctions organiques, ce qui démontre l'importance de cette classification.

Cependant, cette approche semble ne pas toujours être bénéfique pour l'apprentissage des étudiants. En effet, certains chercheurs ont montré qu'une structuration du cours par fonction n'est pas en adéquation avec une stratégie de modélisation mais favorise au contraire la mémorisation « par cœur » et la restitution.[1] D'autres chercheurs ont déjà pu constater qu'une approche de type spiralaire[54], une approche basée sur une classification selon le type de réaction[78] ou encore le fait

d'aborder le cours de chimie organique par une vue d'ensemble des propriétés des molécules[105], [106] semble bénéfique pour les étudiants. En effet, les résultats des étudiants se voient améliorés par la mise en application de telles pratiques. Ces recherches se situent toutes à un niveau d'étude universitaire. Dès lors, il semble pertinent de se demander si, en fonction de l'analyse des conceptions alternatives des apprenants (voir partie 3 de ce travail), une de ces approches pourrait être introduite au niveau de l'enseignement secondaire.

Nous allons cependant devoir respecter une contrainte lors de l'étude des fonctions organiques en secondaire. Il existe en effet un très grand nombre de fonctions organiques, une transposition des approches testées en université à l'enseignement secondaire impose donc de se limiter à la dizaine de fonctions enseignées en secondaire. De la même manière, nous n'allons pas explorer les réactions chimiques ou les propriétés des molécules avec la même rigueur et le même niveau d'approfondissement en secondaire qu'à l'université, il conviendra donc de s'adapter à ces différences.

### **Problématique de la mise en contexte de la chimie organique**

De nos jours, de nombreuses molécules organiques sont synthétisées à partir de dérivés du pétrole. L'industrie pétrochimique a pris une importance capitale en chimie organique, bien que nous ayons vu qu'elle n'en est absolument pas à l'origine, historiquement parlant. Or, nous constatons que la majorité des écoles utilise le thème du pétrole comme application concrète de la chimie organique. Certaines écoles vont jusqu'à introduire la chimie organique grâce à la distillation fractionnée du pétrole, induisant le raccourci que celui-ci est à l'origine de la chimie organique. De plus, la récente prise de conscience de l'inévitable épuisement des ressources mondiales en pétrole conduit les chimistes vers de nouvelles pistes de synthèse qu'il serait intéressant de présenter aux futures générations au lieu d'insister aussi fortement sur la pétrochimie.

Les exemples de molécules organiques présentes dans la vie quotidienne qui sont évoqués face aux élèves sont très restreints. Certains enseignants citent plusieurs exemples, mais sans explorer en profondeur les différents domaines qui sont fortement impactés par la chimie organique, tels que l'industrie pharmaceutique, les textiles, les colorants, le mobilier, les cosmétiques, l'industrie alimentaire, etc... Les élèves ne réalisent bien souvent pas à quel point la chimie organique les entoure, alors que cette branche de la chimie a connu un essor remarquable au cours des deux derniers siècles, permettant une augmentation certaine de notre niveau de vie. Il serait donc intéressant de permettre aux élèves de prendre conscience du rôle majeur de la chimie organique dans leur vie actuelle.

### **Problématique de l'enseignement des objectifs de la chimie organique**

Nous avons vu que la chimie organique poursuit trois objectifs distincts. Si nous prenons en considération une molécule organique particulière, le chimiste organicien doit être capable de l'isoler et de déterminer sa structure, de mettre en évidence les liens entre sa structure et ses propriétés, et finalement de pouvoir la synthétiser.

L'étude de la structure des composés est effectuée au travers de la classification en différentes fonctions organiques, et certains liens sont effectués entre structure et propriétés lorsque l'on donne les principaux usages de molécules porteuses d'une fonction. Il manque bien entendu aux élèves les moyens d'arriver à déterminer une structure et la mise en avant des liens structure/propriétés est très légère. Le dernier objectif de la chimie organique n'est, quant à lui, que très rarement, voire jamais abordé en cours de chimie au niveau du secondaire. De nos jours, la synthèse organique occupe

cependant une grande partie des chimistes organiciens. Il serait donc intéressant de se demander si l'on pourrait initier les élèves à une version simplifiée de ce qu'est la synthèse organique.

Une contrainte importante dans l'enseignement secondaire en Belgique est liée à l'interdiction d'aborder les mécanismes avec les élèves. Se pose dès lors la question : comment aborder la synthèse organique sans mécanisme ? La réponse que l'enseignement a donné à cette question jusqu'ici est l'apprentissage de certaines réactions organiques particulières, telles que la saponification ou l'estérification, sous forme de « boîte noire ». Les élèves apprennent par cœur qu'« un alcool plus un acide donnent un ester plus de l'eau » sans réellement comprendre la réaction. Il semble effectivement difficile de faire comprendre aux élèves comment fonctionne une réaction organique sans recourir au mécanisme réactionnel, mais la synthèse organique a toutefois une dimension beaucoup plus large que celle d'effectuer une seule réaction. Il serait donc intéressant de donner aux élèves un point de vue plus général sur ce que représente la synthèse organique, sans leur demander d'apprendre une liste de réactions par cœur.

### **De l'importance d'apprendre la chimie organique en secondaire**

On pourrait se poser la question de la pertinence de la chimie organique dans les programmes du secondaire, au regard des limites imposées par le référentiel. De plus, nous savons que cette matière n'est pas du tout abordée à ce niveau dans certains autres pays. Cependant, nous voyons quelques arguments au maintien de cette matière à l'école secondaire :

- L'élaboration et l'implémentation de nouveaux cours de chimie organique au niveau de l'école secondaire à travers le monde, au cours des dernières décennies, et les retours positifs qui en ont découlé [75], [76], [87], [89], [90] ;
- L'avantage que procure l'étude d'une introduction à la chimie organique lorsque l'étudiant veut poursuivre un cursus universitaire scientifique. En effet, il a été montré que les étudiants ayant déjà intégré des notions de base en chimie organique réussissaient mieux le cours de chimie organique une fois à l'université [68] ;
- L'importance capitale de la chimie organique dans notre vie quotidienne. Celle-ci constitue une raison pour introduire cette matière auprès de n'importe quel étudiant, futur scientifique ou non, afin qu'il soit capable de se rendre compte de l'enjeu sociétal que représente la chimie organique.

Nous considérons donc que la chimie organique a effectivement gagné sa place dans le programme de l'enseignement secondaire, bien qu'il subsiste encore plusieurs problèmes au niveau de l'élaboration du savoir à enseigner aux élèves. Sur ces bases, nous allons maintenant détailler le savoir à enseigner en secondaire.

## **Le savoir à enseigner en secondaire francophone belge**

### **Les référentiels de compétences**

Depuis 2001, le contenu des cours de sciences dans l'enseignement secondaire général est déterminé par le document du Ministère de la Communauté Française « *Compétences terminales et savoirs requis en sciences – Humanités générales et technologiques* »[108]. Depuis septembre 2015, une nouvelle version du référentiel de compétences entre progressivement en vigueur.[109]

En effet, le savoir enseigné à l'école se doit d'évoluer, que ce soit en rapport avec l'évolution du savoir savant, en s'adaptant aux nouvelles théories et découvertes scientifiques, afin de garder une légitimité face aux « savants », ou par rapport à l'évolution du « savoir commun » de la société, permettant ainsi de légitimer le travail même de l'enseignant. Si l'on continue à enseigner des savoirs anciens, qui s'avèrent dépassés, voire incorrects (certains enseignants continuent à enseigner, par exemple en chimie, la notion de liaison dative, ou en physique, qu'il y a 9 planètes dans le système solaire), la légitimité de l'école pourrait être largement remise en cause. Il est donc nécessaire de passer périodiquement par une révision, voire une refonte de l'ensemble des contenus.

En 2012, à la demande de la ministre de l'Éducation Marie-Dominique Simonet, des experts ont entamé la rédaction de nouveaux référentiels dont les réseaux d'enseignement doivent s'inspirer pour rédiger leurs programmes. Se voulant plus clairs et plus lisibles, ces référentiels à présent terminés découpent les matières en Unités d'Acquis d'Apprentissages (UAA) précisant mieux les savoirs et savoir-faire à acquérir, établissant une continuité entre les apprentissages d'un degré à un autre, d'un réseau à l'autre.

Au sein de ce travail, nous avons fait le choix d'intégrer les anciens et les nouveaux référentiels. En effet, les premières années de cette thèse ont concordé avec les dernières années d'utilisation de l'ancien référentiel. Cependant, le nouveau référentiel étant d'application pour toutes les années du secondaire dès la rentrée 2018, nous avons également intégré le savoir à enseigner de ce nouveau référentiel à notre travail afin d'être le plus exhaustif possible.

### **L'organisation des options scientifiques en Belgique**

En Belgique, dans l'enseignement secondaire général, les élèves ont le choix entre deux options en ce qui concerne l'étude des sciences :

- Sciences de Base : cet enseignement est destiné aux étudiants ne désirant pas poursuivre des études scientifiques. Le but de ce cours est donc que chaque étudiant puisse acquérir une culture scientifique de base afin de pouvoir agir en citoyen responsable dans un monde de plus en plus empreint de sciences et de technologies.
- Sciences Générales : cet enseignement est destiné aux étudiants désirant poursuivre leurs études dans un domaine scientifique. Le but de ce cours est donc de donner une solide base scientifique aux élèves afin qu'ils puissent aborder les études supérieures dans les meilleures conditions possible.

Le savoir à enseigner n'est donc pas identique en fonction de l'option choisie par l'élève. Nous avons fait le choix de nous focaliser uniquement sur le savoir à enseigner aux élèves de Sciences Générales tout au long de ce travail.

### **Classification du savoir à enseigner**

Nous avons choisi de découper le (ou les) chapitre(s) de chimie organique en cinq thèmes principaux. Ces thèmes seront utilisés lors de l'analyse du savoir à enseigner et également au cours des autres parties de cette thèse. Ils sont les suivants :

- Thème 1 – Généralités sur la chimie organique : définition, place de la chimie organique dans la vie quotidienne, reconnaissance de produits et molécules organiques, identification de différentes fonctions organiques
- Thème 2 – Structure : étude de la structure des molécules organiques, notion d'isomérie
- Thème 3 – Propriétés : étude des propriétés des molécules organiques, de fonctions particulières, comparaison de différentes fonctions sur base d'une propriété (solubilité, polarité, température d'ébullition, etc...)
- Thème 4 – Réactions : réactions organiques et combustion, synthèse d'une molécule porteuse d'une fonction, différentes réactions que peut subir une molécule organique porteuse d'une fonction donnée
- Thème 5 – Nomenclature et représentation d'une molécule organique

Nous allons également classer le savoir à enseigner en catégories correspondant aux différentes fonctions organiques enseignées. Ainsi, nous pourrions apprécier l'importance de chaque fonction et de chaque thème au sein du corpus.

### **Création d'un corpus représentatif**

Afin de caractériser au mieux le contenu du savoir à enseigner en école secondaire, nous avons tout d'abord constitué un corpus de documents qui nous semble suffisamment représentatif. Ce corpus est composé des référentiels de compétences terminales de la Communauté française (ancien et nouveau), de programmes provenant des différents réseaux d'enseignement en Belgique francophone ainsi que de manuels de référence destinés aux enseignants belges. Pour chacun de ces documents, nous ne considérerons que les parties abordant la chimie organique.

### ***Référentiels d'enseignement***

- Le référentiel du ministère de la Communauté française (2001) – Compétences terminales et savoirs requis en sciences, Humanités générales et technologiques
- Le nouveau référentiel du ministère de la Communauté française (2015) – Compétences terminales et savoirs requis en sciences générales, Humanités générales et technologiques

### ***Programmes d'enseignement***

- Le programme de la Fédération Wallonie Bruxelles, 3<sup>ème</sup> degré – Chimie, 2001
- Le programme de l'enseignement catholique (SeGEC), 3<sup>ème</sup> degré, Sciences générales, 2010
- Le programme de la Ville de Bruxelles (CPEONS), 3<sup>ème</sup> degré, Chimie Sciences générales, 2013
- Le programme de l'Ecole Decroly (Felsi), 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> degré – Sciences, 2011

### ***Livres de référence***

Trois grands éditeurs belges de manuels scolaires existaient jusqu'en 2017 ; De Boeck, Van In et Plantyn. Les deux premiers ayant fusionné et les nouveaux manuels de Plantyn n'étant pas encore sortis au moment de la rédaction de ce travail, seuls sont analysés les manuels suivants :

- Chimie 5<sup>ème</sup>, Sciences générales, Pirson, De Boeck, 2004

- Chimie 6<sup>ème</sup>, Sciences générales, Pirson, De Boeck, 2004
- Chimie 5<sup>ème</sup>, Sciences générales, Pirson, De Boeck, 2011
- Chimie 6<sup>ème</sup>, Sciences générales, Pirson, De Boeck, 2011
- Chimie 5<sup>ème</sup>, Sciences générales, Pirson, Van In - De Boeck, 2017
- Chimie 6<sup>ème</sup>, Sciences générales, Pirson, Van In - De Boeck, 2018

## **Analyse du savoir à enseigner**

### **Les objectifs avancés par le ministère**

La première question que nous devons nous poser est toujours celle des objectifs poursuivis par un enseignement. C'est au sein du référentiel de compétences que nous trouvons les objectifs cibles de l'enseignement secondaire francophone, que voici :

*Il s'agit tout à la fois de soutenir l'intérêt des jeunes pour les sciences et de faire comprendre que la biologie, la chimie et la physique :*

- O1** - sont des sciences qui, grâce à une meilleure compréhension du monde, éclairent les personnes sur les questions qu'elles se posent concernant leur bien-être, leur sécurité et leur environnement ;
- O2** - sont en interaction étroite avec les développements technologiques ;
- O3** - font continuellement appel à des modèles, modèles avec leurs limites, qui permettent de décrire une réalité souvent complexe ;
- O4** - sont des sciences expérimentales contribuant à mettre en place des démarches rationnelles aptes à résoudre des problèmes ;
- O5** - confrontent sans cesse les représentations spontanées à des modèles établis ;
- O6** - doivent être articulées à d'autres disciplines pour donner une vision globale de la réalité ;
- O7** - sont nées et se développent dans des contextes culturels, socioéconomiques et techniques précis ;
- O8** - sont propices à une réflexion d'ordre éthique ;
- O9** - utilisent les raisonnements inductif, déductif, systémique et par analogie.

*Pour atteindre ces objectifs, il importe de développer chez les élèves les capacités indispensables pour la pratique scientifique dans une perspective citoyenne, qui sont les suivantes :*

- C1** - S'approprier des concepts fondamentaux, des modèles et des principes.
- C2** - Évaluer la portée et les limites des modèles et des principes.
- C3** - Conduire une recherche et utiliser des modèles.
- C4** - Utiliser des procédures expérimentales.
- C5** - Bâtir un raisonnement logique.
- C6** - Utiliser des procédures de communication.
- C7** - Résoudre des applications numériques.
- C8** - Utiliser les outils mathématiques et informatiques adéquats.
- C9** - Comprendre que les connaissances actuelles en sciences ont une histoire.
- C10** - Établir des liens entre les développements des sciences et des technologies.
- C11** - Être capable de synthétiser son point de vue et de le défendre au cours d'un débat.

Pour commencer, nous allons considérer chacun de ces objectifs pour évaluer s'ils peuvent théoriquement être atteints (ou au moins abordés) à partir des unités d'acquis d'apprentissage

consacrées à la chimie organique. Nous indiquerons sous chaque objectif certains éléments que la chimie organique peut lui apporter, accompagnés d'un exemple si besoin.

**O1** - *sont des sciences qui, grâce à une meilleure compréhension du monde, éclairent les personnes sur les questions qu'elles se posent concernant leur bien-être, leur sécurité et leur environnement ;*

→ La chimie organique prenant une part très importante dans notre vie quotidienne, il est évident qu'elle tient un rôle important pour l'amélioration de notre bien-être (composant des cosmétiques et produits hygiéniques, médicaments, vêtements...), de notre sécurité (composant des gilets pare-balles...) et de notre environnement (gestion des déchets...).

**O2** - *sont en interaction étroite avec les développements technologiques ;*

→ Il suffit de citer le pétrole et tous les développements que la pétrochimie a permis d'obtenir (plastiques, médicaments, sources d'énergie) pour se rendre compte du lien entre la chimie organique et le développement technologique.

**O3** - *font continuellement appel à des modèles, modèles avec leurs limites, qui permettent de décrire une réalité souvent complexe ;*

→ De nombreux modèles ont été établis, puis modifiés, et sont utilisés pour comprendre certaines notions de chimie organique (structure de Lewis, représentation de la géométrie des molécules, isomérie)

**O4** - *sont des sciences expérimentales contribuant à mettre en place des démarches rationnelles aptes à résoudre des problèmes ;*

→ L'établissement d'un protocole de réaction ou l'analyse des propriétés de certaines molécules organiques (température d'ébullition, réactivité, identification de fonctions) peut servir de support à la mise en place d'une démarche expérimentale visant la résolution d'un problème.

**O5** - *confrontent sans cesse les représentations spontanées à des modèles établis ;*

→ Le terme même de « chimie organique » induit à lui seul une représentation spontanée et erronée de la chimie organique, qui n'est pas la chimie des organes, mais bien la chimie du carbone.

**O6** - *doivent être articulées à d'autres disciplines pour donner une vision globale de la réalité ;*

→ La chimie organique peut être étroitement liée à la biologie afin de comprendre en profondeur comment fonctionnent les molécules constitutives du vivant. Elle peut également être abordée d'un point de vue de l'économie par exemple (industrie pharmaceutique, pétrochimique, etc...).

**O7** - *sont nées et se développent dans des contextes culturels, socioéconomiques et techniques précis ;*

→ Nous avons détaillé en profondeur le contexte au sein duquel la chimie organique s'est développée lors de la première partie de ce travail, et nous avons vu l'influence de ce contexte sur la façon dont la chimie organique est encore enseignée de nos jours.

**O8** - *sont propices à une réflexion d'ordre éthique ;*

→ La chimie organique étant liée à l'industrie pharmaceutique et cosmétique par exemple, les différents tests effectués sur les animaux pour développer de tels produits sont directement concernés par des questions d'éthique.

**O9** - *utilisent les raisonnements inductif, déductif, systémique et par analogie.*

→ Plusieurs règles de chimie organique peuvent être découvertes par les élèves suite à un raisonnement, par exemple par analogie entre deux fonctions organiques (nomenclature, réactivité).

Nous constatons que l'ensemble des objectifs généraux poursuivis par le référentiel de compétences peut être abordé au travers des unités d'acquis d'apprentissage de chimie organique. Nous allons effectuer la même démarche concernant les capacités liées à la pratique scientifique dans une perspective citoyenne, et ce en proposant un exemple de lien pour chacune des capacités mentionnées.

**C1 - S'approprier des concepts fondamentaux, des modèles et des principes.**

→ Tous les concepts de chimie organique sont d'application ici.

**C2 - Évaluer la portée et les limites des modèles et des principes.**

→ Comprendre qu'une représentation en deux dimensions de molécules ne permet pas d'appréhender toutes leurs propriétés.

**C3 - Conduire une recherche et utiliser des modèles.**

→ L'étendue du domaine que recouvre la chimie organique est propice à la poursuite d'une recherche, que ce soit sur un type de polymère, sur une molécule particulière ou encore sur une fonction organique précise. Chacune de ces recherches fera appel à un ou des modèles.

**C4 - Utiliser des procédures expérimentales.**

→ La chimie organique est plus que propice aux manipulations de synthèse de molécules ou aux expériences de reconnaissance de groupes fonctionnels.

**C5 - Bâtir un raisonnement logique.**

→ L'évolution des températures d'ébullition au sein des différentes classes de molécules organiques selon leur fonction suit un raisonnement logique que l'élève peut construire. Nous mettons l'accent sur le fait que c'est l'élève qui doit construire lui-même le raisonnement logique et non pas appliquer un raisonnement appris précédemment, ce qui correspond plutôt à l'objectif O4.

**C6 - Utiliser des procédures de communication.**

→ La chimie organique présente son propre langage (nomenclature) et ses propres conventions d'écriture (représentation développée, semi-développée, topologique) que les élèves doivent assimiler. La mise au point d'un protocole expérimental peut également être envisagée.

**C7 - Résoudre des applications numériques.**

→ La résolution d'applications numériques n'est pas la capacité la plus entraînée en chimie organique, mais elle peut cependant être facilement entraînée en effectuant des problèmes stœchiométriques impliquant des réactions organiques comme, par exemple, des calculs de quantités de CO<sub>2</sub> libérées par la combustion d'un carburant.

**C8 - Utiliser les outils mathématiques et informatiques adéquats.**

→ Plusieurs logiciels peuvent être utilisés pour dessiner des molécules organiques ou pour construire un tableau de réactivité reliant différentes fonctions.

**C9 - Comprendre que les connaissances actuelles en sciences ont une histoire.**

→ La première définition historique de la chimie organique est le parfait d'exemple de l'évolution des connaissances, qui a fait passer la définition de chimie organique de « chimie du vivant » à « chimie du carbone ».

**C10 - Établir des liens entre les développements des sciences et des technologies.**



➔ Le développement de la chimie organique a permis le développement en parallèle de l'industrie pharmaceutique et pétrochimique.

**C11** - Être capable de synthétiser son point de vue et de le défendre au cours d'un débat.

➔ Un débat sur les avantages et les inconvénients des matières plastiques ou encore sur les différences entre la synthèse industrielle d'une molécule et son équivalent « naturel » peut être envisagé en classe.

À l'instar des objectifs, toutes les capacités liées à la pratique scientifique peuvent également être entraînées lors des chapitres de chimie organique. Nous allons ensuite vérifier si ces objectifs généraux et ces capacités sont effectivement abordés lors de l'étude de la chimie organique en détaillant le contenu du corpus que nous avons rassemblé. Les graphiques suivants indiquent la présence des différents objectifs (figure 2.1) et capacités (figure 2.2) au sein des différents chapitres contenant de la chimie organique dans les documents du corpus analysés.

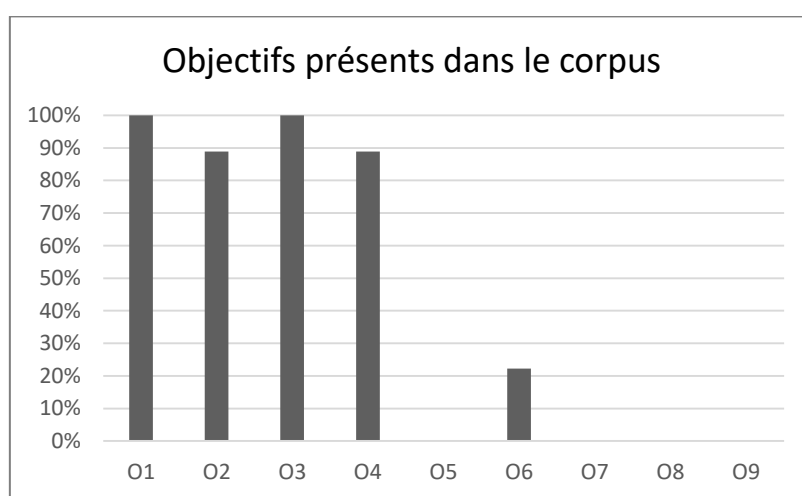


Figure 2.1 : Pourcentage de documents repris dans le corpus faisant travailler les objectifs O1 à O9

Nous constatons que certains objectifs sont présents dans la majorité du corpus (O1 à O4) mais que d'autres ne sont repris dans aucun document (O5, O7 à O9).

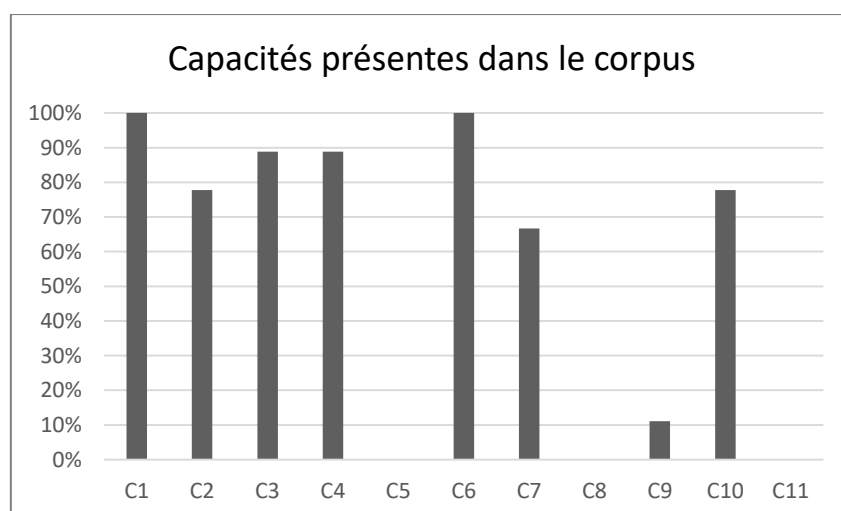


Figure 2.2 : Pourcentage de documents repris dans le corpus faisant travailler les capacités C1 à C11

À l'instar des résultats obtenus concernant les objectifs, nous constatons que certaines capacités scientifiques sont entraînées dans la majorité des documents analysés (C1 à C4, C6, C7 et C10) alors que d'autres capacités ne sont que peu voire pas du tout présentes (C5, C8, C9 et C11).

En poussant notre analyse un cran plus loin, nous constatons que certains objectifs/capacités sont directement liés à l'étude d'une fonction particulière. Par exemple, l'objectif O2 (son interaction étroite avec les développements technologiques) et la capacité C10 (Etablir des liens entre les développements des sciences et des technologies) sont à chaque fois présents au sein du chapitre concernant les alcènes et les polymères. L'objectif O4 (son des sciences expérimentales contribuant à mettre en place des démarches rationnelles aptes à résoudre des problèmes) et la capacité C4 (Utiliser des procédures expérimentales) sont quant à eux principalement présents au sein du chapitre concernant les esters. On peut donc pointer que ces objectifs/capacités ne sont pas abordés de manière transversale, mais sont plutôt associés à une fonction précise.

De manière complémentaire, les objectifs et capacités ne se retrouvant pas dans les chapitres consacrés à la chimie organique nous semblent particulièrement propices à l'abord de la chimie organique de manière globale et non fonction après fonction. Ainsi, il nous semble que la capacité C5 (Bâtir un raisonnement logique) peut être entraînée en appliquant ce que l'on apprend sur une fonction à une autre fonction similaire, en laissant par exemple les élèves imaginer des règles de nomenclature ou de réactivité d'une fonction en les dérivant de celles d'une autre fonction. La capacité C8 (Utiliser les outils mathématiques et informatiques adéquats) peut également se développer en présentant aux élèves des logiciels de représentation de molécules et en leur demandant de représenter des molécules ou des réactions afin de dresser des tableaux récapitulatifs reprenant un ensemble de fonctions ou de réactions. La mise en application de ces objectifs/capacités serait favorisée par une approche globale de la chimie organique et non pas structurée par fonctions ou par réactions, ce qui est le cas pour la majorité des documents présents dans le corpus, comme nous allons le voir ci-dessous.

### **La structuration du savoir à enseigner**

Notre analyse de la structuration du savoir à enseigner au sein des différents livres et programmes d'enseignement du corpus montre l'omniprésence de la structuration par fonction (les alcanes, puis les alcènes, puis les alcools, etc...). Cette structuration se constate immédiatement en parcourant la table des matières des différents ouvrages, ou en observant le découpage effectué par les concepteurs de programmes d'enseignement en chimie organique.

Cette structuration du savoir à enseigner est historique et présente chaque fonction l'une après l'autre, en détaillant sa structure, ses propriétés, sa nomenclature et, parfois, une réaction qu'elle peut subir. L'ordre des fonctions est presque toujours identique et suit une progression liée à leur complexité : les premières fonctions abordées sont les hydrocarbures (alcanes, alcènes et parfois alcynes), suivies des alcools, qui mènent parfois aux fonctions aldéhydes et cétones. Viennent ensuite les fonctions acides carboxyliques et esters. Les fonctions azotées (amines et amides) sont parfois abordées. Cette logique est suivie par l'ancien référentiel de compétences, tous les anciens programmes et les manuels écrits à cette époque. Pour illustration, voici un extrait de la table des matières portant sur les chapitres de chimie organique d'un livre de 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> années.

Les alcanes  
Les alcènes  
Des alcènes aux polymères de polyaddition  
Les alcools  
Les aldéhydes et les cétones  
Réactions réversibles et équilibre chimique dynamique (estérification)

*Extrait de la table des matières du Pirson, 2004*

Le nouveau référentiel de compétences tente d'innover quelque peu en modifiant l'ordre des différentes fonctions. On y aborde tout d'abord les alcanes ainsi que les fonctions nécessaires à l'abord de la réaction d'estérification (alcools, acides carboxyliques et esters). Les alcènes et les fonctions azotées sont quant à elles vues en deuxième partie de cours. Les programmes et manuels élaborés en suivant ce nouveau référentiel ont donc adopté le même ordre de découverte des fonctions organiques.

Certains programmes et certains manuels ont choisi de nommer leurs différents chapitres non pas en termes de fonctions mais en termes de réactions. Cependant, chaque réaction vue en secondaire étant typiquement associée à une fonction particulière, ceci revient exactement à faire une structuration par fonction. Pour illustration, voici un extrait de la table des matières portant sur les chapitres de chimie organique d'un livre de 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> années, dans laquelle nous reconnaissons l'ordre des fonctions imposé par le nouveau référentiel et un découpage établi sous forme de fonctions, bien que les titres des chapitres ne soient plus directement des noms de fonctions organiques.

Classification des composés organiques et inorganiques  
Représentation et nomenclature des alcanes  
Composés oxygénés en chimie organique et leurs usages  
Combustion des alcanes  
Réaction d'estérification  
Réaction de saponification  
Synthèse des polymères et structure des protéines  
Les matières plastiques

*Extrait de la table des matières du Pirson, 2018*

Ainsi, nous pouvons conclure que l'ensemble des documents présents dans le corpus impose une structuration par type de fonction, bien que l'ordre des fonctions varie entre l'ancien et le nouveau référentiel de compétences. Seul un programme n'impose pas clairement de structuration. Comme nous l'avons vu précédemment, certains chercheurs ont déjà déterminé qu'une telle structuration n'était pas bénéfique à l'élève. D'une part, elle ne permet pas à l'élève d'avoir une vue d'ensemble de la chimie organique, de toutes ses fonctions et des propriétés de celles-ci. D'autre part, cette structuration favorise la stratégie de restitution.[1], [54], [60], [67] Or, les objectifs avancés par le référentiel de compétences sont clairs : il faut au contraire favoriser une vision globale (O6) et utiliser des capacités de raisonnement pour résoudre des problèmes (O3, O4, O9) et non pas apprendre par cœur quelques règles et définitions. Il nous semble donc pertinent de remettre en cause la structuration préétablie par les référentiels de compétences.

### Les grands thèmes abordés

Une autre façon de caractériser le savoir à enseigner repris dans les documents du corpus est d'établir une distinction des savoirs sur base des différents thèmes abordés. Pour rappel, voici les différents thèmes que nous avons choisi de considérer :

- Thème 1 – Généralités
- Thème 2 – Structure
- Thème 3 – Propriétés
- Thème 4 – Réactions
- Thème 5 – Nomenclature

Pour chaque fonction abordée, nous pouvons ainsi envisager de présenter le groupe fonctionnel et des généralités le concernant (Thème 1), les structures particulières de cette fonction, principalement les isomères possibles et la structuration tridimensionnelle (Thème 2), les propriétés physiques de molécules porteuses de cette fonction (Thème 3), une ou plusieurs réactions impliquant cette fonction (Thème 4) ainsi que la nomenclature propre à cette fonction (Thème 5).

Nous avons repéré dans chaque document du corpus la présence ou non de chacun de ces cinq thèmes à propos de chaque fonction. Ceci permet de mettre en évidence l'importance de certains thèmes par rapport à d'autres, ainsi que l'abord partiel de certaines fonctions pour lesquelles seuls certains thèmes sont abordés, comme nous pouvons le voir sur la figure 2.3.

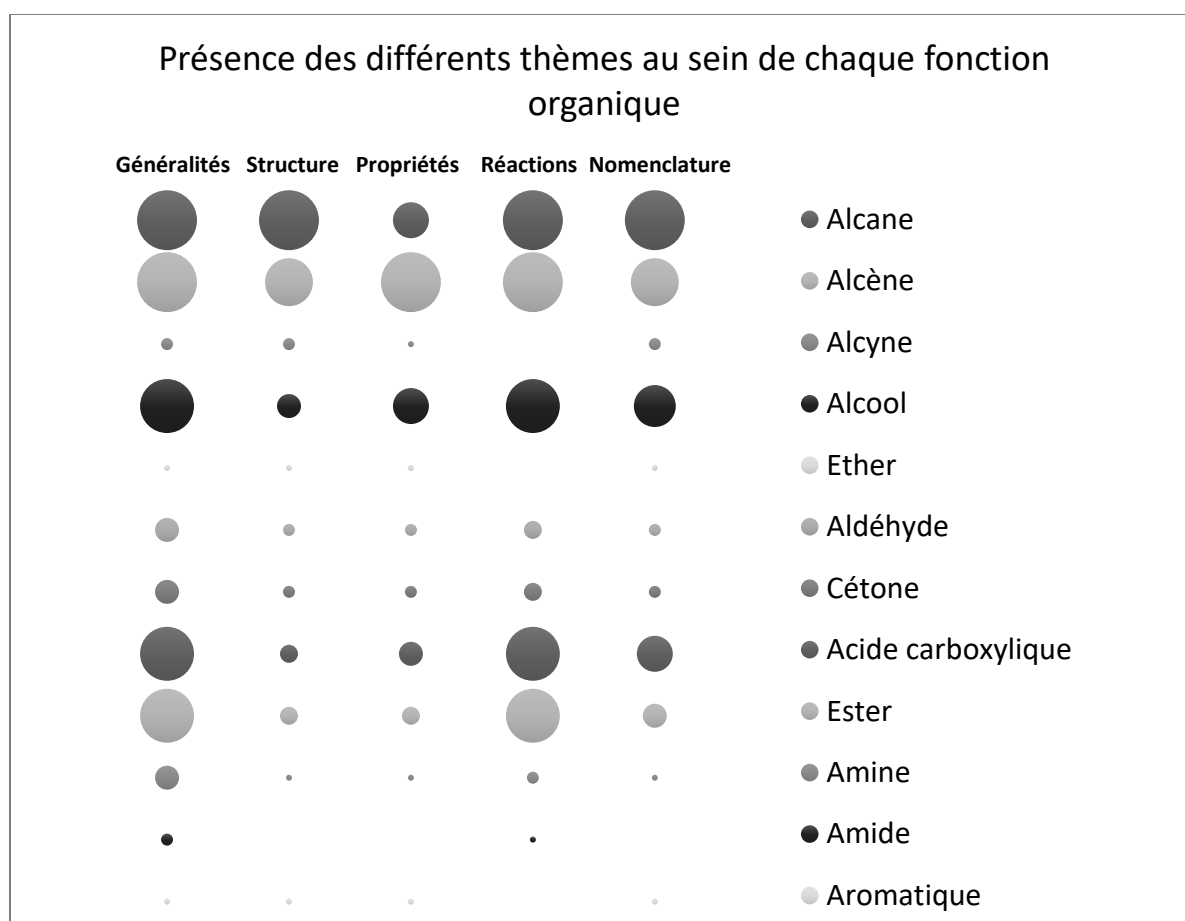


Figure 2.3 : Vue d'ensemble des différents thèmes abordés au sein de chaque fonction organique. L'aire de chaque cercle est proportionnelle au nombre de documents du corpus abordant chaque thème au sein de chaque fonction.

À la lecture de ce graphique, nous constatons que seules deux fonctions sont vues en long et en large dans tous les documents de référence ; il s'agit des alcanes et des alcènes pour lesquels les cinq thèmes sont abordés dans la grande majorité des documents du corpus. Les trois fonctions oxygénées impliquées dans la réaction d'estérification, à savoir l'alcool, l'acide carboxylique et l'ester, arrivent ensuite. On constate que leur réactivité est abordée dans la plupart des cas, mais que la structure, les propriétés ou la nomenclature de ces fonctions ne sont pas toujours vues. Les autres fonctions sont abordées de manière beaucoup moins constante au sein des différentes sources. De manière globale, nous constatons que les thèmes 2 (Structure) et 3 (Propriétés) sont les plus délaissés dans les documents de référence.

Cette analyse permet de mettre en évidence que certains thèmes semblent directement reliés à certaines fonctions organiques. Par exemple, les alcools, les acides carboxyliques et les esters sont très majoritairement abordés d'un point de vue réactionnel, avec la réaction d'estérification (et de saponification, dans une moindre mesure). Cependant, ces trois fonctions organiques ne sont pas intéressantes uniquement pour cette réaction, mais ont aussi des propriétés particulières ou peuvent présenter différents types d'isoméries (isomère de fonction, de position, de structure...), à l'instar d'autres fonctions.

Nous verrons dans le chapitre suivant si les évaluations utilisées par les enseignants et proposées dans différents manuels scolaires sont en lien avec le savoir à enseigner en secondaire.



# Chapitre II : Analyse des évaluations proposées aux élèves

## L'évaluation des élèves

L'évaluation des connaissances et compétences des élèves constitue, quelle que soit la discipline enseignée, un sujet d'étude en soi. Au cours de ce travail, nous avons fait le choix de nous baser sur les directives d'évaluation présentes au sein du nouveau référentiel de compétences élaboré par le Ministère de la Communauté française[109]. Nous allons donc clarifier les différents termes choisis par le Ministère.

Les **ressources** rassemblent l'ensemble des savoirs, savoir-faire, attitudes et stratégies qui sont indispensables à la réalisation de tâches sur un sujet donné.

Les **processus** sont des opérations de nature et de complexité différentes utilisant les différentes ressources. Ils sont au nombre de trois :

- **Connaitre** : construire et expliciter des ressources.
- **Appliquer** : mobiliser des acquis dans le traitement de situations entraînées.
- **Transférer** : mobiliser des acquis dans le traitement de situations nouvelles.

Le référentiel insiste sur l'importance de mettre en place des savoirs et savoir-faire décontextualisés des situations d'apprentissage et des tâches d'entraînement mais également d'apprendre à les mobiliser correctement dans des situations entraînées et des situations nouvelles. Ces trois processus sont donc d'une importance similaire et doivent se retrouver de manière équilibrée au sein des évaluations proposées aux élèves.

Il est important de distinguer clairement ces trois processus. Voici ce qu'en dit le référentiel de compétences :

*« Dans chaque unité, la dimension « **connaitre** » correspond à la nécessité d'outiller les élèves de connaissances suffisamment structurées et détachées d'un contexte déterminé, susceptibles de pouvoir être mobilisées indifféremment d'une situation donnée à l'autre (lors de tâches d'application et/ou de transfert).*

*Il ne s'agit donc pas de capitaliser des savoirs de manière érudite ou de driller des procédures de manière automatique, mais de développer chez l'élève un niveau « méta » : être capable à la fois d'explicitier ses connaissances ou ses ressources, et de justifier les conditions dans lesquelles celles-ci peuvent être mobilisées.*

*Dans l'**application**, la variation des paramètres entre tâches entraînées et tâches « nouvelles » est faible : on exige moins d'autonomie de la part de l'élève. Les tâches sont en quelque sorte « standardisées » et « routinisées ». [...] Les tâches d'application portent donc sur des problèmes ou situations parents de ceux travaillés en classe et susceptibles d'être résolus par l'élève en fonction de problèmes ou situations « phares » qui serviront de référents pour résoudre ce type de problèmes ou situations.*

Dans le **transfert**, la variation des paramètres entre tâches entraînées et tâches « nouvelles », voire « inédites », est plus forte : on attend un plus grand degré d'autonomie de la part de l'élève. Le transfert, comme l'application, est le résultat d'un apprentissage : l'élève doit avoir pris conscience que ce qu'il apprend est transférable à certaines conditions, doit pouvoir identifier la famille (ou classe) de tâches, de problèmes ou de situations où tel transfert est possible, doit avoir appris à construire des homologues entre des tâches, problèmes, situations, contextes tout en relevant des différences qui nécessiteront des ajustements au moment du transfert. »

### Les types de questions

Sur ces bases, nous pouvons catégoriser trois types de questions proposés aux élèves lors d'évaluations :

- Restitution ( $\alpha$ ) : connaître et expliciter des ressources ou les restituer telles quelles
- Application ( $\beta$ ) : utiliser des ressources pour résoudre une application entraînée
- Transfert ( $\gamma$ ) : utiliser des ressources pour résoudre une application nouvelle

Chacune de ces questions peut porter sur une ou plusieurs fonctions organiques ainsi que sur un ou plusieurs thèmes. Chaque fonction organique est identifiée par une lettre et chaque thème est identifié par un chiffre. Chaque question est ainsi codée en trois parties : le type de tâche, les fonctions présentes et les thèmes abordés. Notons que nous avons inséré une « fonction organique » supplémentaire à notre liste ; les polymères. Bien qu'ils ne soient pas à proprement parler une fonction organique, certains chapitres ou exercices portent spécifiquement sur les polymères en incluant des fonctions diverses au sein du polymère. Comme tous les polymères sont abordés de manière similaire en secondaire, nous avons fait le choix de regrouper tous les exercices les concernant. Il en va de même pour les alcanes que nous classerons également comme étant une « fonction alcane » au cours de ce travail, c'est-à-dire une molécule ne comportant aucune fonction organique. Nous avons également ajouté deux thèmes qui, pour nous, sortent du cadre strict de la chimie organique, mais que nous retrouvons dans certaines évaluations. Il s'agit des thèmes « Stœchiométrie », regroupant des exercices de stœchiométrie appliqués à des réactions organiques, et « Thermochimie », regroupant des exercices de thermochimie appliquée à la chimie organique.

$\alpha$ Restitution
$\beta$ Application
$\gamma$ Transfert

a Alcane
b Alcène
c Alcyne
d Alcool
e Ether
f Aldéhyde
g Cétone
h Acide carboxylique
i Ester
j Amine
k Amide
l Aromatique
p Polymère

1 Généralités
2 Structure
3 Propriétés
4 Réactions
5 Nomenclature

6 Stœchiométrie
7 Thermochimie



Ainsi, si une question est codée  $\beta$ -b2, il s'agit d'une tâche d'application sur la structure d'un alcène. Une tâche  $\alpha$ -dhi4 concerne la restitution d'une réaction contenant un alcool, un acide carboxylique et un ester.

Toutes les questions incluant d'autres notions de chimie, telles que des notions d'équilibre chimique ou de cinétique par exemple, ont été exclues de notre analyse afin de nous focaliser sur les questions de chimie organique uniquement.

### **Création d'un corpus à analyser**

Afin de caractériser au mieux le contenu des évaluations en école secondaire, nous avons tout d'abord constitué un corpus représentatif. Comme il n'existe pas d'évaluation standardisée en Belgique, nous avons collecté des évaluations réellement utilisées par des enseignants auprès de leurs élèves. Nous avons également rassemblé les exercices proposés dans les manuels de référence destinés aux enseignants et qui sont utilisés par les professeurs. Nous analyserons donc les différentes questions proposées aux élèves au sein des évaluations des enseignants et les exemples de questions proposées dans les manuels de référence.

### ***Énoncés de contrôles et d'examens utilisés par les enseignants***

- 6 évaluations provenant d'enseignants de la Fédération Wallonie Bruxelles
- 8 évaluations provenant d'enseignants du SeGEC
- 9 évaluations provenant d'enseignants de la Ville de Bruxelles (CPEONS)
- 12 évaluations provenant d'enseignants de la Felsi

### ***Exercices et tâches proposées dans les manuels destinés aux enseignants***

- Chimie 5<sup>ème</sup>, Sciences générales, Pirson, De Boeck, 2004
- Chimie 6<sup>ème</sup>, Sciences générales, Pirson, De Boeck, 2004
- Chimie 5<sup>ème</sup>, Sciences générales, Pirson, De Boeck, 2011
- Chimie 6<sup>ème</sup>, Sciences générales, Pirson, De Boeck, 2011
- Chimie 5<sup>ème</sup>, Sciences générales, Pirson, Van In - De Boeck, 2017
- Chimie 6<sup>ème</sup>, Sciences générales, Pirson, Van In - De Boeck, 2018

## **Analyse des évaluations**

Les questions d'évaluation ont été analysées selon trois critères : le type de question (restitution, application ou transfert), le ou les thème(s) des questions et la ou les fonction(s) sur laquelle/lesquelles porte la question. Chacun de ces critères sera étudié dans les paragraphes suivants. Nous comparerons à chaque fois les évaluations proposées dans les manuels les plus utilisés (Pirson 2004, 2011 et 2018) et celles réellement utilisées par les enseignants.

Tout au long de cette analyse, si une catégorie ne contient pas un minimum de 10 questions, nous n'en tiendrons pas compte et ne l'afficherons pas dans nos résultats. Ceci explique que toutes les catégories ne sont pas présentes sur chaque graphique.

### **Analyse des évaluations en fonction du type de question**

Nous commençons par analyser les différents types de questions repris dans les évaluations. Pour rappel, les types de questions sont les suivants :

- Restitution ( $\alpha$ ) : connaître des ressources et les restituer telles quelles

Les questions de restitution concernent les différentes règles à connaître par cœur et à restituer telles quelles, sans aucune application de ladite règle. Il peut également s'agir de restituer une réaction par cœur, d'explicitier un savoir, ou de connaître le nom commun de certaines molécules par cœur sans application des règles de nomenclature (vinaigre ou formol par exemple).

- Application ( $\beta$ ) : utiliser des ressources pour résoudre une application entraînée

Les questions d'application concernent l'application de diverses règles ou de divers raisonnements à des molécules particulières, lors de situations déjà entraînées précédemment à l'évaluation. Il peut s'agir de nommer des molécules grâce aux règles de nomenclature, de comparer plusieurs molécules sur base de leurs structures (isomères) ou de leurs propriétés (solubilité, température d'ébullition), de passer d'une représentation à une autre (développée vers semi-développée ou vice versa), d'écrire la structure de molécules par comparaison avec la structure d'une autre molécule similaire (isomère, ou passage d'un monomère à un polymère ou vice versa), d'écrire des réactions au départ de réactifs et/ou de produits donnés.

- Transfert ( $\gamma$ ) : utiliser des ressources pour résoudre une application nouvelle

Les questions de transfert sont similaires aux questions d'application, puisqu'il s'agit toujours de mobiliser une ou plusieurs ressources préalablement apprises, mais l'exercice demandé aux élèves englobe en général plusieurs thèmes ou fonctions différents au sein d'un même exercice, l'exercice peut également demander de mobiliser des ressources pour de nouvelles molécules, ou encore d'appliquer une procédure dans le sens inverse du sens habituel (imaginer des réactifs pour obtenir tels produits au cours d'une réaction).

Idéalement, nous devrions retrouver des questions réparties de manière équitable entre ces trois types de questions, afin de se rapprocher au mieux des considérations du référentiel de compétences.

### Répartition des types de questions dans les manuels

Au sein des différents manuels analysés, nous constatons une prédominance marquée de questions d'application (69%) au détriment des questions de transfert (21%) et de restitution (10%). Cette répartition (voir figure 2.4) est donc très loin de la répartition « théorique idéale » proposée par le référentiel de compétences.

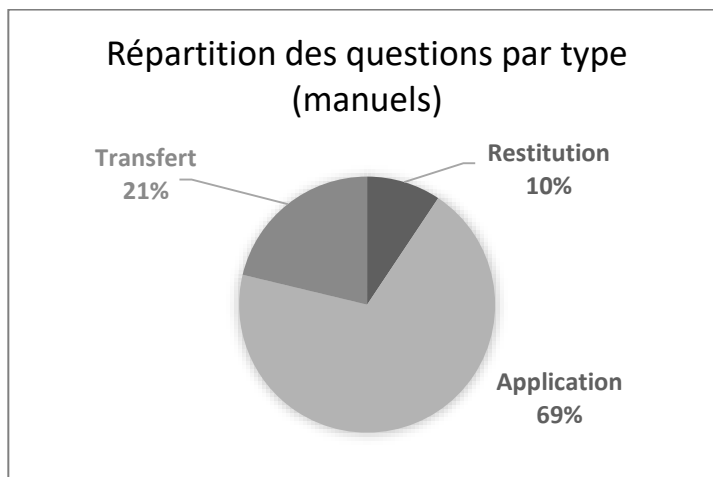


Figure 2.4 : Répartition des questions par type de question dans les manuels analysés

Nous pouvons également nous demander si le type de question a évolué dans le temps. En effet, les manuels analysés comportent trois versions successives du même manuel, versions revues et corrigées pour s'approcher au mieux du référentiel de compétences. Nous constatons sur la figure 2.5 que la répartition reste extrêmement similaire au fil du temps.

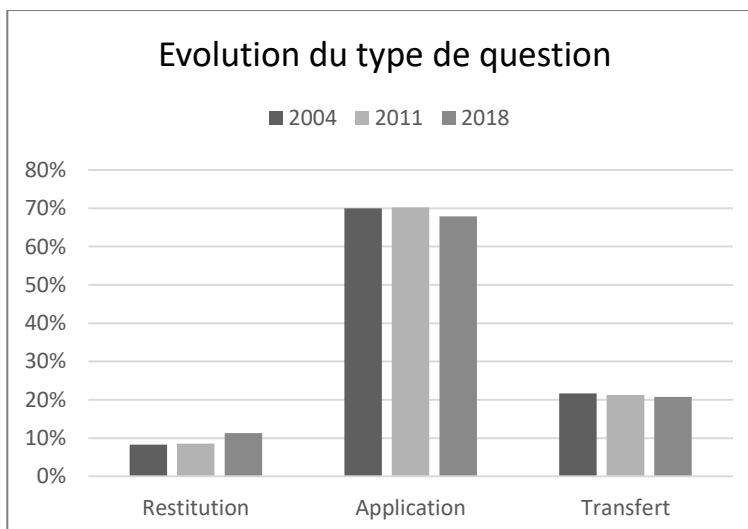


Figure 2.5 : Évolution du type de question au sein des manuels analysés (Pirson 2004, 2011 et 2018)

### Répartition des types de questions utilisées par les enseignants

Voyons maintenant sur les figures 2.6 et 2.7 si les enseignants suivent les recommandations du référentiel de compétences ou des manuels de référence.

Nous constatons que les questions d'application sont toujours largement majoritaires (61%) au détriment des questions de restitution (29%) et de transfert (10%). En comparaison avec la répartition équilibrée prônée par le référentiel de compétences, nous constatons que les enseignants proposent un pourcentage correct de questions de restitution, mais qu'il y a un énorme manque de questions de transfert qui sont transformées en questions d'application, a priori plus simples pour les élèves.

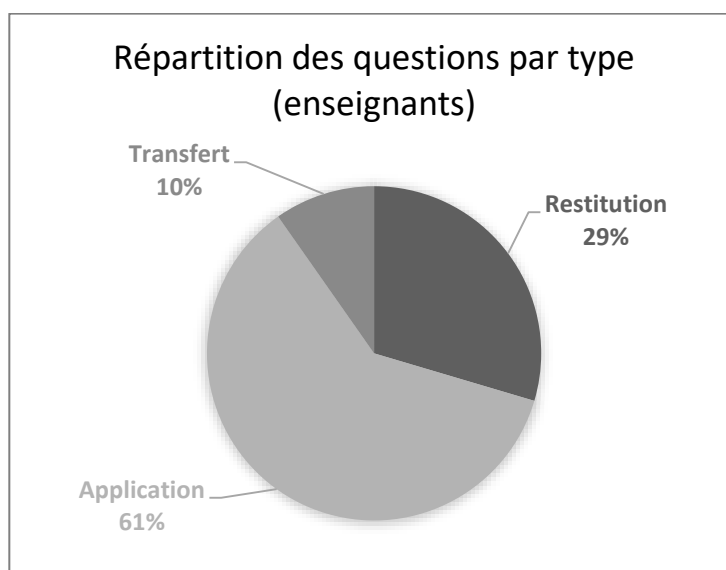


Figure 2.6 : Répartition des questions utilisées par les enseignants en fonction du type de question

Gardons à l'esprit que cette répartition est une moyenne établie sur 6 enseignants pour un total de 267 questions. En détaillant le profil de chaque enseignant, nous constatons que certains enseignants ne posent aucune question de transfert (Prof A et B) tandis que d'autres ne posent presque aucune question de restitution (Prof F). À l'exception du Prof A, tous les enseignants posent en majorité des questions d'application.

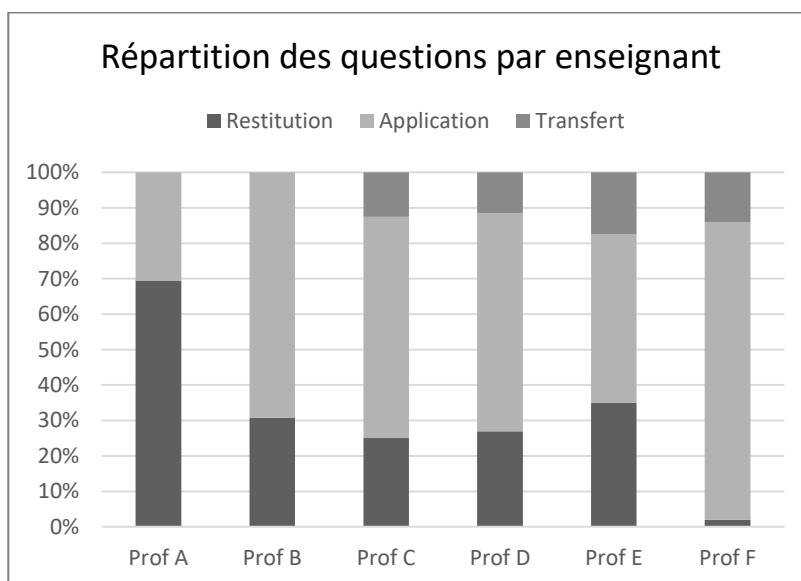


Figure 2.7 : Profils des différents enseignants (Prof A à Prof F) en fonction du type de question qu'ils utilisent

### Comparaison entre les manuels et les enseignants

En dressant côte à côte la répartition des questions proposées dans les manuels et celles utilisées par les enseignants (voir figure 2.8), nous constatons que les questions d'application sont majoritaires de part et d'autre, et que la grande différence se situe au niveau des deux autres thèmes : les manuels favorisent les questions de transfert et ne posent que très peu de questions de restitution, tandis que les enseignants font le choix inverse en posant trois fois plus de questions de restitution que de questions de transfert.

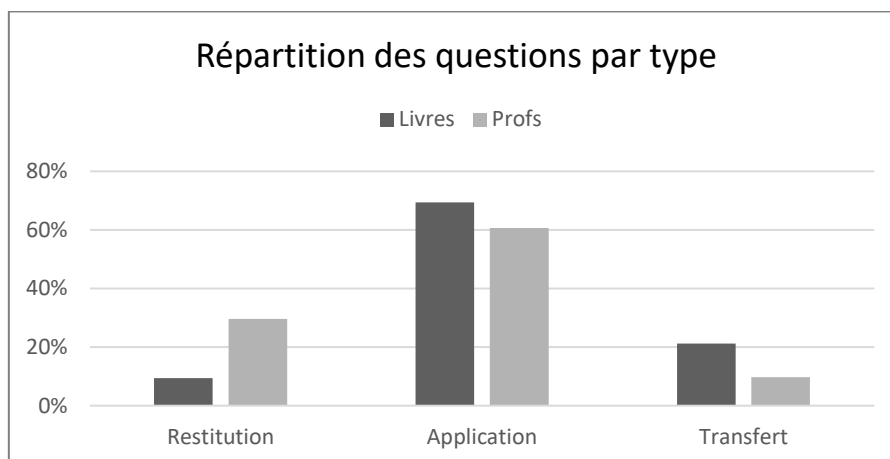


Figure 2.8 : Comparaison de la répartition des questions par type pour les manuels et les enseignants

### Un type de question favorise-t-il un thème particulier ?

Nous allons maintenant prendre un compte un deuxième critère : le thème des questions. Nous allons essayer de mettre en évidence si un thème est surreprésenté ou sous-représenté au sein d'un type de question, au sein des questions proposées par les manuels d'une part, et dans les questions utilisées par les enseignants d'autre part.

### Questions de restitution

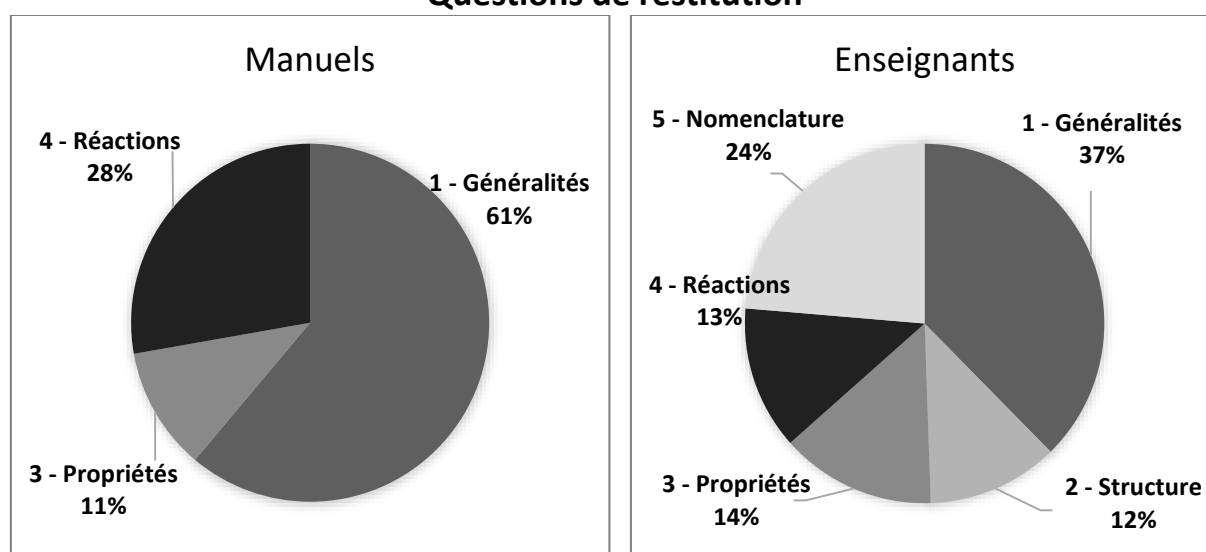


Figure 2.9 : Répartition des questions de restitution dans les manuels (gauche) et chez les enseignants (droite) en fonction des thèmes

Nous constatons une grande différence de profil entre les questions suggérées par les manuels et celles utilisées par les enseignants (voir figure 2.9). La grande majorité des questions de restitution proposées dans les manuels concernent le thème « Généralités » (61%). Nous retrouvons également des questions concernant les réactions (28%) et quelques questions sur les propriétés des molécules (11%), mais aucune question sur la structure ou la nomenclature des molécules organiques.

Parmi les questions utilisées par les enseignants, la majorité concerne également le thème « Généralités » (37%). Nous retrouvons ensuite des questions portant sur la structure, les propriétés et les réactions (de 12 à 14%), et près d'un quart des questions de restitution concernent la nomenclature. Les enseignants posent donc des questions de restitution sur des thèmes plus variés que ce qui se trouve au sein des manuels. Néanmoins, nous constatons que les questions de restitution concernent majoritairement le thème « Généralités » dans les manuels et chez les enseignants.

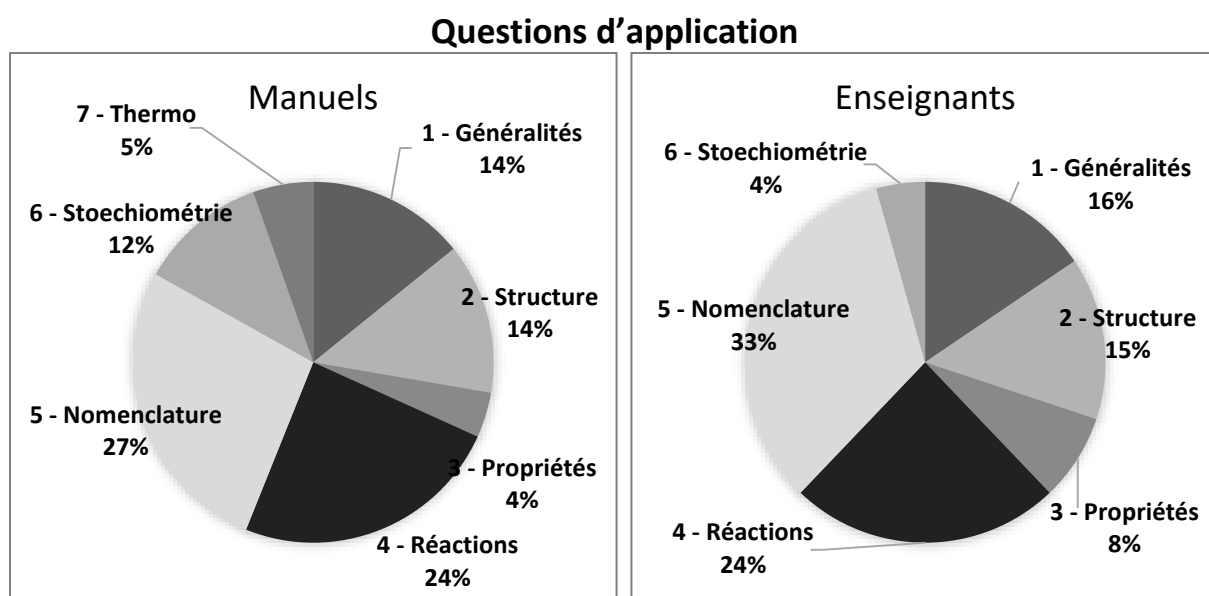


Figure 2.10 : Répartition des questions d'application dans les manuels (gauche) et chez les enseignants (droite) en fonction des thèmes

En observant les deux graphiques reprenant les questions d'application (voir figure 2.10), nous constatons que leurs profils sont assez similaires, si ce n'est que les enseignants utilisent un peu plus de questions de nomenclature, au détriment des questions de stoechiométrie et de thermochimie. La répartition au sein des sept thèmes n'est cependant pas homogène. En effet, nous constatons que la moitié des questions d'application concernent deux thèmes : réactions (24%) et nomenclature (27% et 33%).

## Questions de transfert

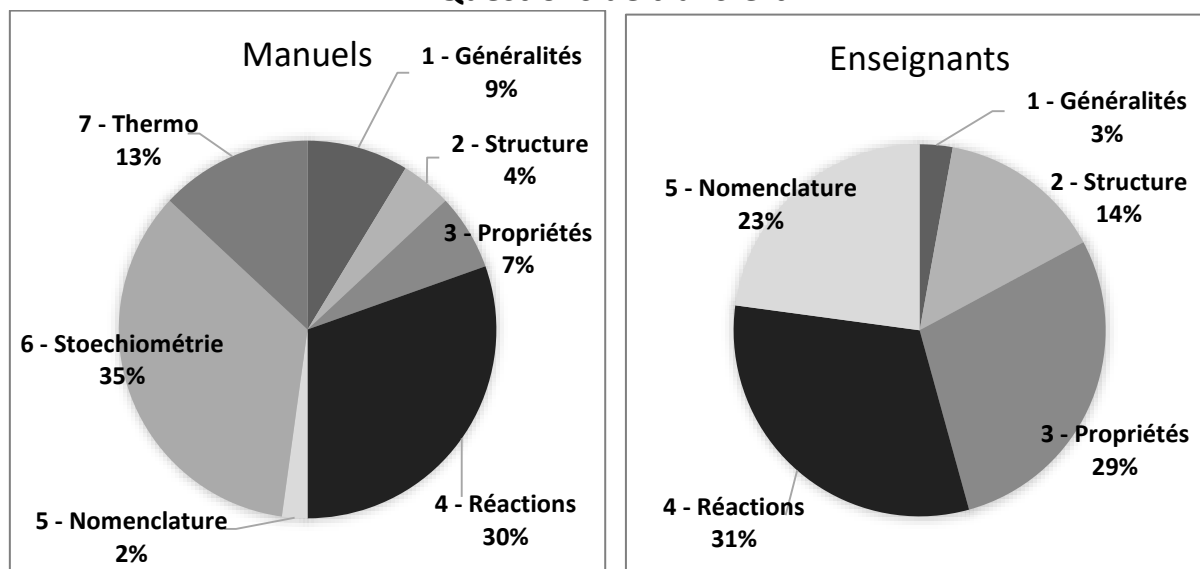


Figure 2.11 : Répartition des questions de transfert dans les manuels (gauche) et chez les enseignants (droite) en fonction des thèmes

Les deux graphiques reprenant les questions de transfert dans les manuels et chez les enseignants ne se ressemblent globalement pas (voir figure 2.11). Nous constatons que les thèmes principaux repris dans les manuels concernent la stoechiométrie (35%) et les réactions (30%). Des questions de thermodynamique sont également présentes (13%), et les quatre autres thèmes ne sont pas très représentés (entre 2% et 9%).

Les enseignants n'utilisent aucune question de stoechiométrie ni de thermochimie. Le thème le plus représenté concerne les réactions (31%), suivi de près par le thème des propriétés (29%) et de la nomenclature (23%), deux thèmes pratiquement non repris au sein des manuels. Nous retrouvons également des questions concernant la structure des molécules (14%). Les questions d'ordre général sont très peu présentes (3%).

En conclusion, nous pouvons affirmer que les questions de restitution portent majoritairement sur des généralités concernant la chimie organique ou certaines fonctions organiques et que les questions d'application sont les plus variées mais portent principalement sur de la nomenclature ou des réactions organiques. Les questions de transfert utilisées par les enseignants concernent les réactions, les propriétés et la nomenclature, alors que les manuels reprennent majoritairement des questions de transfert portant sur la stoechiométrie et les réactions.

### ***Un type de question favorise-t-il une fonction organique particulière ?***

Nous allons désormais prendre un compte un troisième critère, à savoir les différentes fonctions organiques enseignées. Nous allons essayer de mettre en évidence si une fonction organique est surreprésentée ou sous-représentée au sein d'un type de question, au sein des questions proposées par les manuels d'une part, et dans les questions utilisées par les enseignants d'autre part.

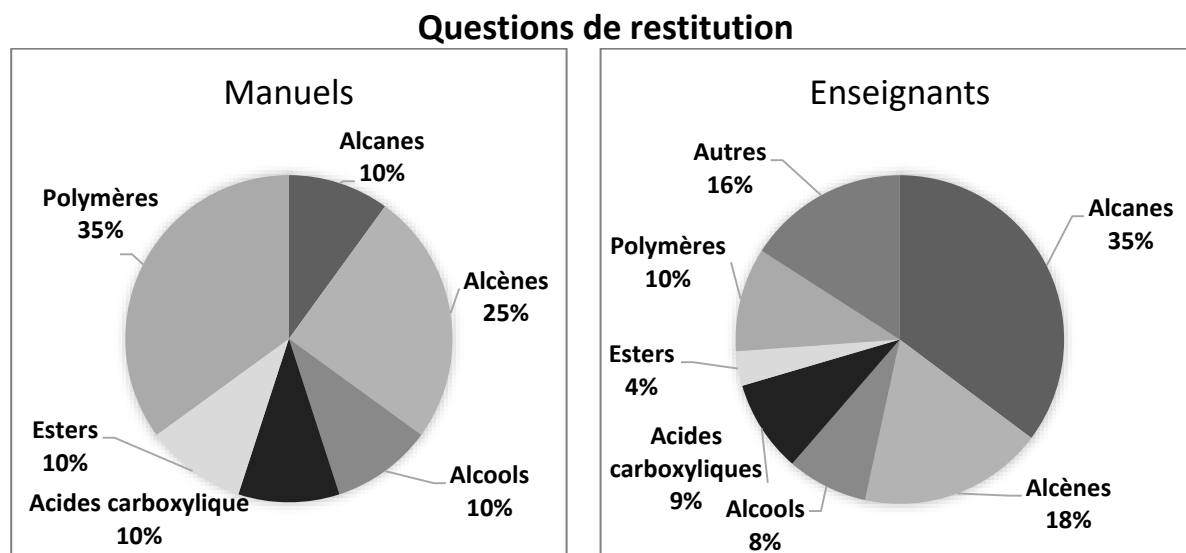


Figure 2.12 : Répartition des questions de restitution dans les manuels (gauche) et chez les enseignants (droite) par fonction organique

Nous constatons des différences importantes entre le graphique reprenant les questions de restitution proposées dans les manuels et celui représentant les questions utilisées par les enseignants (voir figure 2.12). Les manuels préconisent une majorité de questions de restitution concernant les polymères (35%) et les alcènes (25%). Les autres fonctions également présentes le sont chacune avec 10% des questions (alcanes, alcools, acides carboxyliques et ester).

Les enseignants quant à eux utilisent majoritairement des questions de restitution concernant les alcanes (35%). Les alcènes et les polymères arrivent ensuite avec respectivement 18% et 10% des questions. Les fonctions alcools, acides carboxyliques et esters sont les moins présentes. Cependant, les enseignants ont également recours à d'autres fonctions que celles présentes dans les manuels. Les fonctions reprises dans la catégorie « Autres » sont les aldéhydes, les cétones, les alcynes, les éthers et les amines.

De manière générale, ce sont les hydrocarbures (alcanes, alcènes et certains polymères abordés) qui occupent une place majoritaire au sein des questions de restitution, que ce soit chez les enseignants ou dans les manuels, bien que la répartition en termes de fonction organique ne soit pas similaire. Les questions de restitution portent donc moins souvent sur les fonctions oxygénées.



## Questions d'application

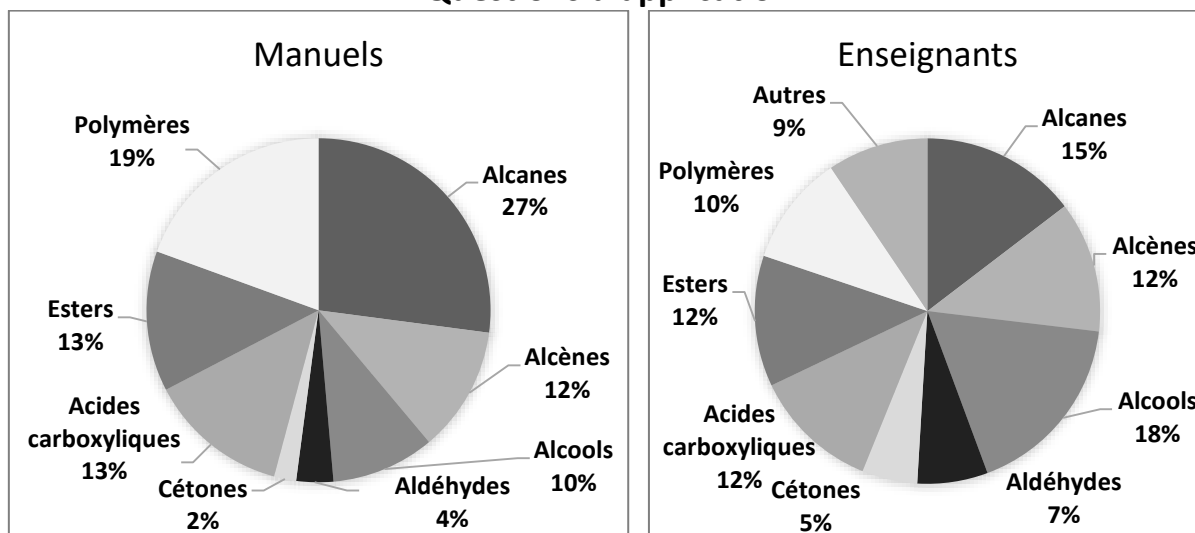


Figure 2.13 : Répartition des questions d'application dans les manuels (gauche) et chez les enseignants (droite) par fonction organique

Les questions d'application concernent une grande variété de fonctions organiques et leur répartition est globalement homogène. Nous remarquons (voir figure 2.13) que les manuels insistent sur les alcanes (27%) et les polymères (19%), tandis que la fonction organique légèrement favorisée par les enseignants est l'alcool (18%). Cependant, nous observons une répartition assez homogène des questions d'application sur les différentes fonctions organiques, particulièrement chez les enseignants.

## Questions de transfert

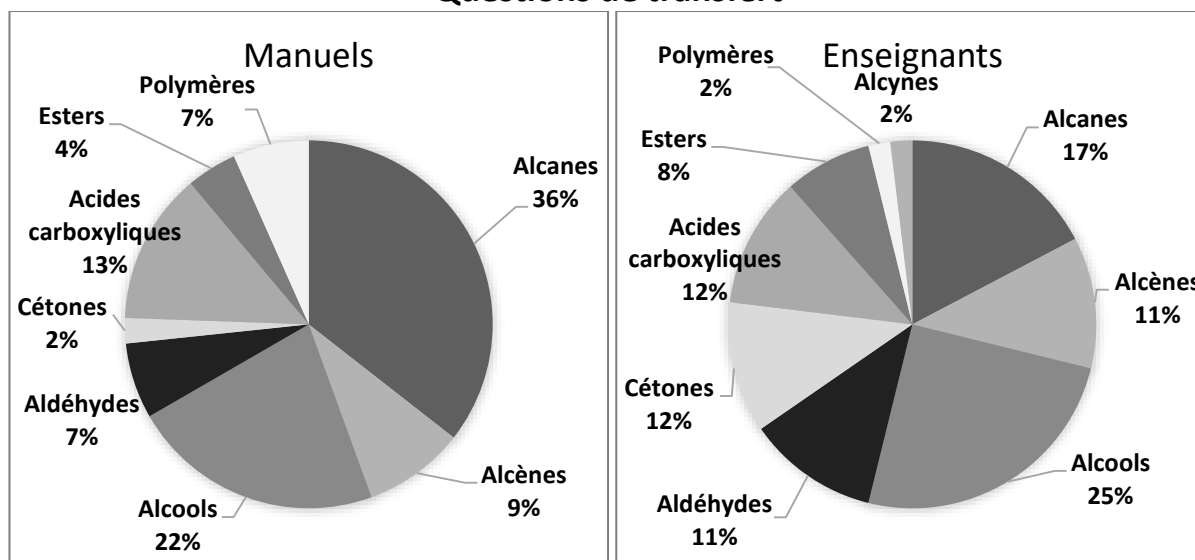


Figure 2.14 : Répartition des questions de transfert dans les manuels (gauche) et chez les enseignants (droite) par fonction organique

À l'instar des questions d'application, les questions de transfert concernent une grande variété de fonctions organiques (voir figure 2.14). La répartition est cependant différente : nous constatons que les polymères sont beaucoup moins représentés au profit de certaines fonctions oxygénées. Dans les

manuels, les alcanes prennent la plus grande place au sein des questions de transfert (36%), suivis par les alcools (22%) et les acides carboxyliques (13%).

Chez les enseignants, la répartition est plus homogène, avec une petite préférence pour les questions concernant les alcools (25%), puis les alcanes (17%). Les alcènes, aldéhydes, cétones, acides carboxyliques et esters se partagent le reste des questions équitablement. Ce sont maintenant les fonctions oxygénées qui occupent la majorité des questions.

En conclusion, nous pouvons affirmer que les questions de restitution se concentrent sur les hydrocarbures (les alcènes et les polymères sont majoritaires au sein des manuels, et les alcanes le sont chez les enseignants), que les questions d'application sont réparties de manière assez homogène entre les différentes fonctions organiques et que les questions de transfert présentent des profils différents chez les enseignants, qui favorisent les fonctions oxygénées dans leur ensemble, et dans les manuels, qui mettent en avant les alcanes et, dans une moindre mesure, les alcools.

### **Analyse des évaluations en fonction du thème des questions**

Nous continuons notre analyse en classant les différentes questions par rapport au(x) thème(s) qu'elles abordent. Pour rappel, voici les différents thèmes que nous considérons :

#### 1 – Généralités : reconnaître des molécules organiques, identifier les fonctions organiques

Les questions sur les généralités reprennent l'identification des fonctions organiques, leur utilisation dans la vie quotidienne et les connaissances générales sur chaque fonction.

#### 2 – Structure : étude de la structure des molécules organiques, notion d'isomérisation

Les questions sur la structure des molécules sont typiquement des questions sur la représentation ou l'identification d'isomères, l'identification d'un monomère au sein d'un polymère, l'écriture d'une structure particulière sans qu'il n'y ait de nomenclature impliquée.

#### 3 – Propriétés : étude des propriétés des molécules organiques

Les questions portant sur les propriétés des molécules organiques concernent principalement les propriétés de solubilité, de polarité et l'évolution des températures d'ébullition.

#### 4 – Réactions : réactions organiques

Les questions sur les réactions organiques reprennent toutes les questions au cours desquelles l'élève doit, à un moment, écrire ou compléter une réaction organique, que ce soit donner le ou les produit(s) manquant(s), identifier ou nommer une réaction, expliquer comment synthétiser un produit, etc...

#### 5 – Nomenclature : nommer et représenter une molécule organique

Les questions reprises sous le thème de nomenclature concernent toutes les questions où l'élève doit écrire une structure au départ d'un nom, écrire un nom au départ d'une structure, ou passer d'une représentation à l'autre (développée, semi-développée ou topologique).

## 6 – Stœchiométrie : exercices de stœchiométrie appliqués à la chimie organique

Toutes les questions où l'élève doit équilibrer une réaction ou faire des calculs de stœchiométrie sont reprises ici. Il s'agit typiquement de questions autour d'une réaction de combustion.

## 7 – Thermochimie : exercices de thermochimie appliqués à la chimie organique

Les questions de thermochimie reprennent les calculs d'énergie de liaison ou de chaleur libérée ou absorbée au cours d'une réaction organique.

### ***Répartition des questions par thème dans les manuels***

Les sept thèmes sont présents dans les questions suggérées dans les différents ouvrages analysés (voir figure 2.15). Nous constatons que certains thèmes sont favorisés, comme le thème des réactions (26%) et le thème de nomenclature (19%) alors que d'autres sont assez peu présents, comme le thème des propriétés (5%) ou la thermochimie (7%).

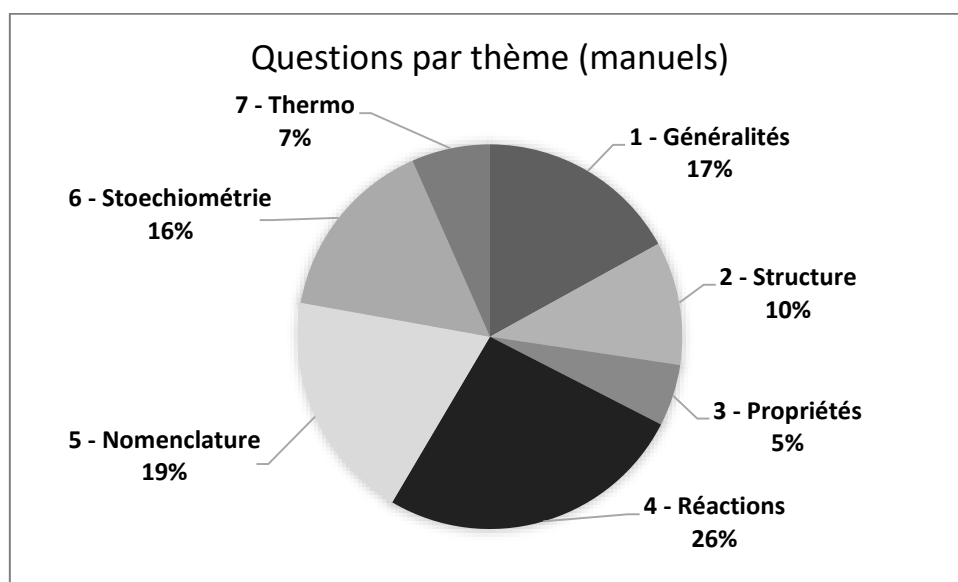


Figure 2.15: Répartition des questions par thème dans les manuels analysés

Nous constatons également, en observant la figure 2.16, que les différentes versions des ouvrages analysés ne présentent que de faibles variations quant à la répartition des questions au sein des différents thèmes au cours du temps. Nous notons globalement une diminution des questions sur les réactions (de 30% à 21%), ce qui représente la modification la plus importante, au profit de questions concernant la structure des molécules (augmentation de 8% à 14%) et la stœchiométrie (augmentation de 13% à 18%) si nous notons les changements les plus importants. Néanmoins, la répartition des questions reste globalement constante dans le temps.

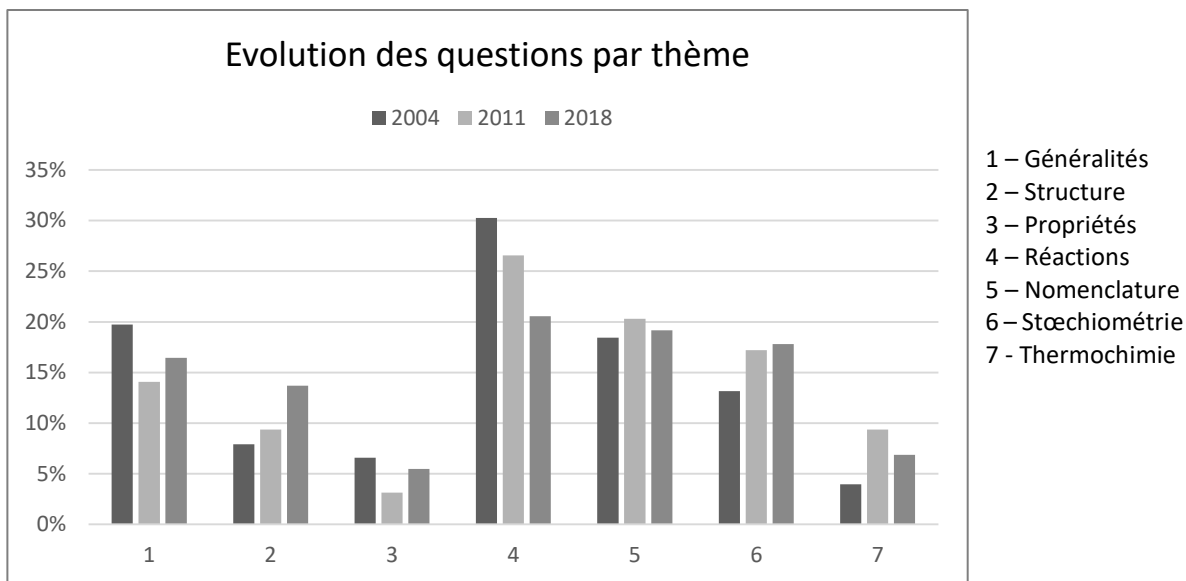


Figure 2.16 : Évolution de la répartition des questions par thème dans les manuels analysés (Pirson 2004, 2011 et 2018)

### Répartition des questions par thème chez les enseignants

Chez les enseignants, nous constatons que tous les thèmes ne sont pas présents (voir figure 2.17). En effet, aucune question ne concerne la thermochimie, et très peu de questions portent sur de la stœchiométrie. Le thème favorisé par les enseignants est la nomenclature avec presque un tiers des questions (29%). Les thèmes concernant les réactions (22%) et les généralités (20%) viennent ensuite. Les questions portant sur la structure (14%) et les propriétés (12%) des molécules organiques sont moins présentes.

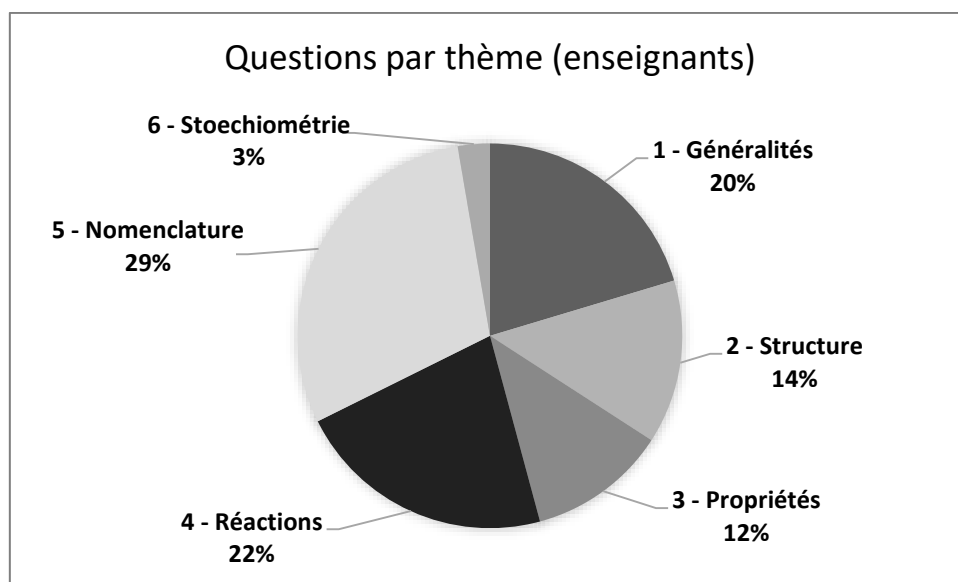


Figure 2.17 : Répartition des questions utilisées par les enseignants en fonction du thème de la question

Si nous détaillons le profil des différents enseignants, nous constatons une fois encore des différences d'un enseignant à l'autre (voir figure 2.18). La différence la plus importante se situe au niveau du thème des réactions puisqu'un enseignant peut avoir recours à seulement 5% de questions concernant les réactions (Prof E), ou au contraire jusqu'à 60% de questions à ce sujet (Prof C).

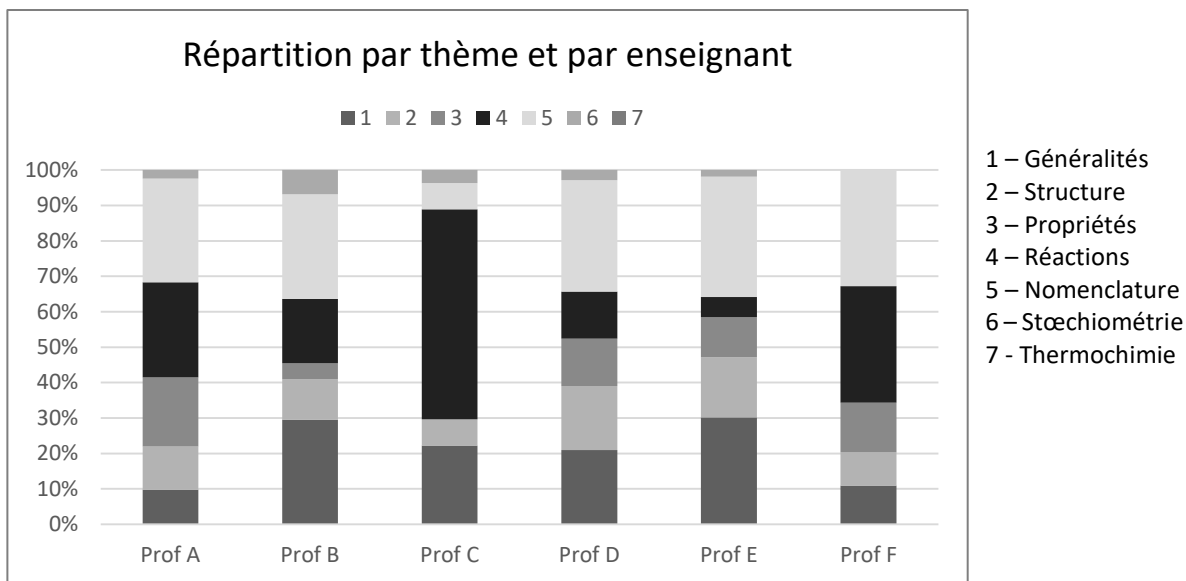


Figure 2.18 : Profils des différents enseignants (Prof A à Prof F) en fonction des thèmes de question qu'ils utilisent

### Comparaison entre les manuels et les enseignants

En dressant côte à côte la répartition des questions proposées dans les manuels et celles utilisées par les enseignants (voir figure 2.19), nous constatons que les manuels se centrent beaucoup plus que les enseignants sur des questions de stœchiométrie ou de thermochimie. Ces questions étant régulièrement liées aux réactions, le taux de questions portant sur les réactions est logiquement un peu plus élevé également dans les manuels. Les enseignants posent quant à eux plus de questions concernant la nomenclature (+11%), les propriétés des molécules (+7%), la structure (+4%) et les généralités (+3%).

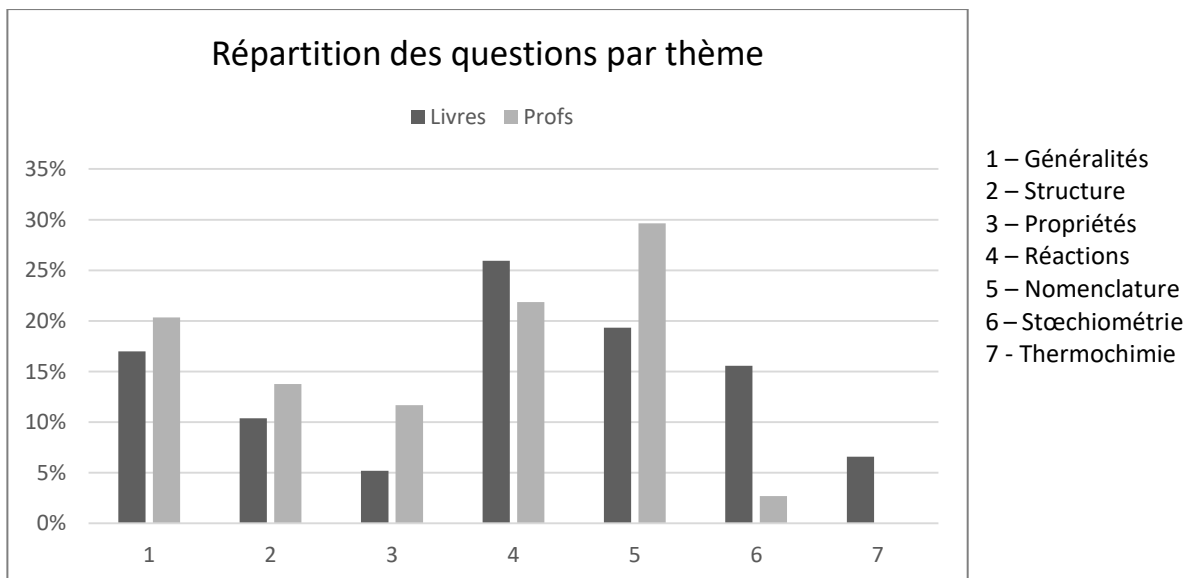


Figure 2.19 : Comparaison de la répartition des questions par thème pour les manuels et les enseignants

### ***Un thème favorise-t-il un type de question ?***

Nous allons maintenant prendre en compte un deuxième critère : le type des questions. Nous allons essayer de mettre en évidence si un type est surreprésenté ou sous-représenté au sein d'un thème particulier, au sein des questions proposées par les manuels d'une part, et dans les questions utilisées par les enseignants d'autre part.

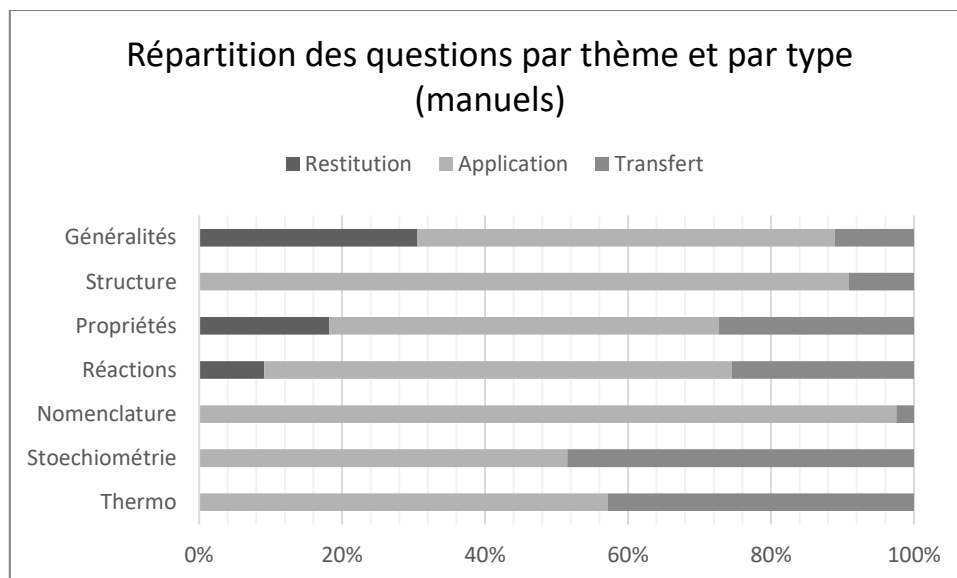


Figure 2.20 : Répartition des questions proposées dans les manuels, classées par type, au sein de chaque thème

Dans les manuels, nous constatons directement que tous les types de questions ne sont pas présents au sein de chaque thème (voir figure 2.20). Seuls les thèmes Généralités, Propriétés et Réactions contiennent des questions de chaque type. Les thèmes Structure et Nomenclature sont presque entièrement focalisés sur des questions d'application. Les thèmes Stœchiométrie et Thermochimie sont partagés équitablement entre des questions d'application et de transfert.

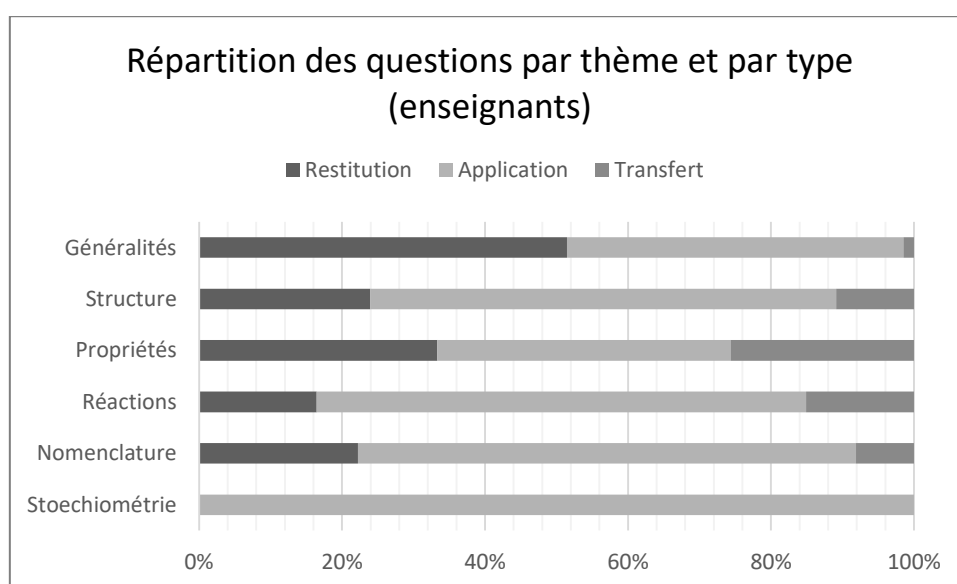


Figure 2.21 : Répartition des questions utilisées par les enseignants, classées par type, au sein de chaque thème

Si l'on regarde les questions proposées par les enseignants (voir figure 2.21), nous constatons que les cinq premiers thèmes comportent des questions de tous les types ; seul le thème Stœchiométrie ne propose que des questions d'application. Nous notons cependant que le thème Généralités est presque exempt de questions de transfert et qu'il comporte presque autant de questions de restitution que de questions d'application. Le thème Propriétés semble être celui proposant les trois types de questions de manière la plus équilibrée.

En conclusion, nous constatons que les enseignants semblent plus équitables dans leur répartition des différents types de questions selon les thèmes abordés. Tous les thèmes comportent une majorité de questions d'application, que ce soit dans les manuels ou chez les enseignants. Les questions de restitution sont les plus présentes au sein du thème Généralités. Les deux derniers thèmes, Stœchiométrie et Thermo, ne présentent aucune question de restitution.

### ***Un thème favorise-t-il une fonction particulière ?***

Nous allons désormais prendre en compte notre troisième critère, à savoir les différentes fonctions organiques enseignées. Nous allons essayer de mettre en évidence si une fonction organique est surreprésentée ou sous-représentée au sein d'un thème, au sein des questions proposées par les manuels d'une part, et dans les questions utilisées par les enseignants d'autre part.

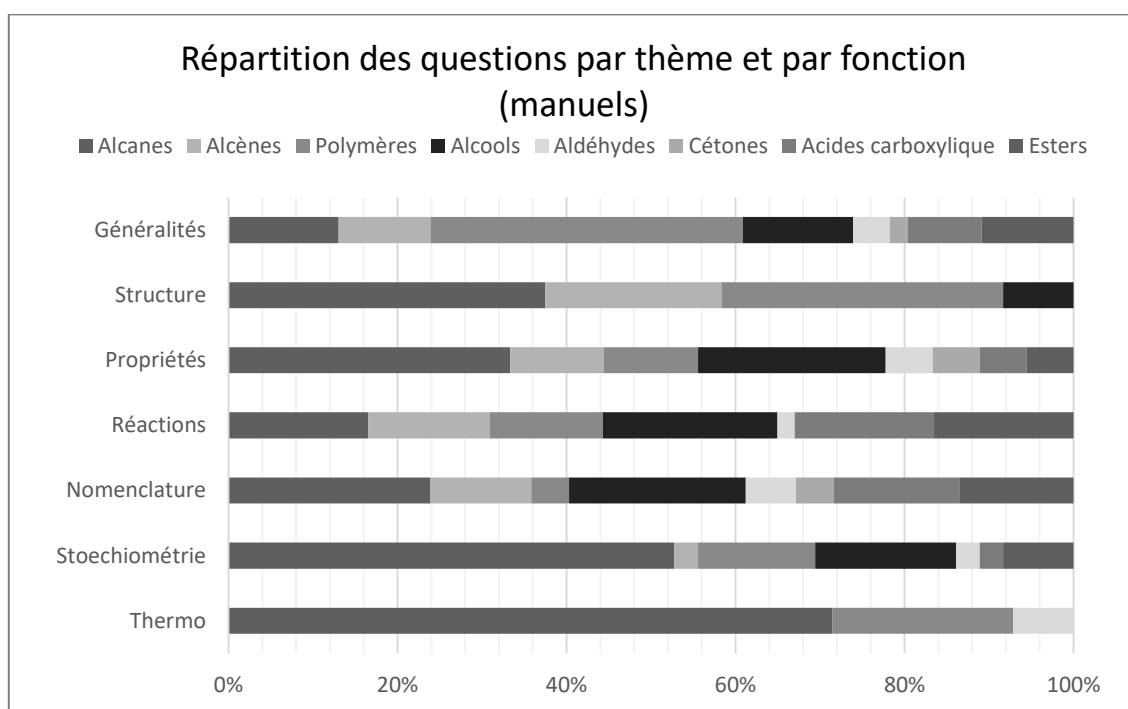


Figure 2.22 : Répartition des questions proposées dans les manuels, classées par fonction, au sein de chaque thème

Au sein des manuels (voir figure 2.22), plusieurs thèmes portent sur toutes les fonctions (ou presque). C'est le cas des thèmes Généralités, Propriétés, Réactions (à l'exception des cétones), Nomenclature et Stœchiométrie (à l'exception des cétones également). Le thème Structure se focalise sur les quatre premières fonctions abordées (alcanes, alcènes, polymères et alcools) et le thème Thermo utilise très majoritairement les alcanes (70%) et complète ses questions avec les alcènes et les polymères. Nous constatons que les alcanes sont la fonction la plus étudiée d'un point de vue

Structure, Propriétés, Nomenclature, Stœchiométrie et Thermochimie. Le thème Généralités est dominé par les polymères. Le thème dont les questions sont réparties de manière la plus homogène est celui des Réactions.

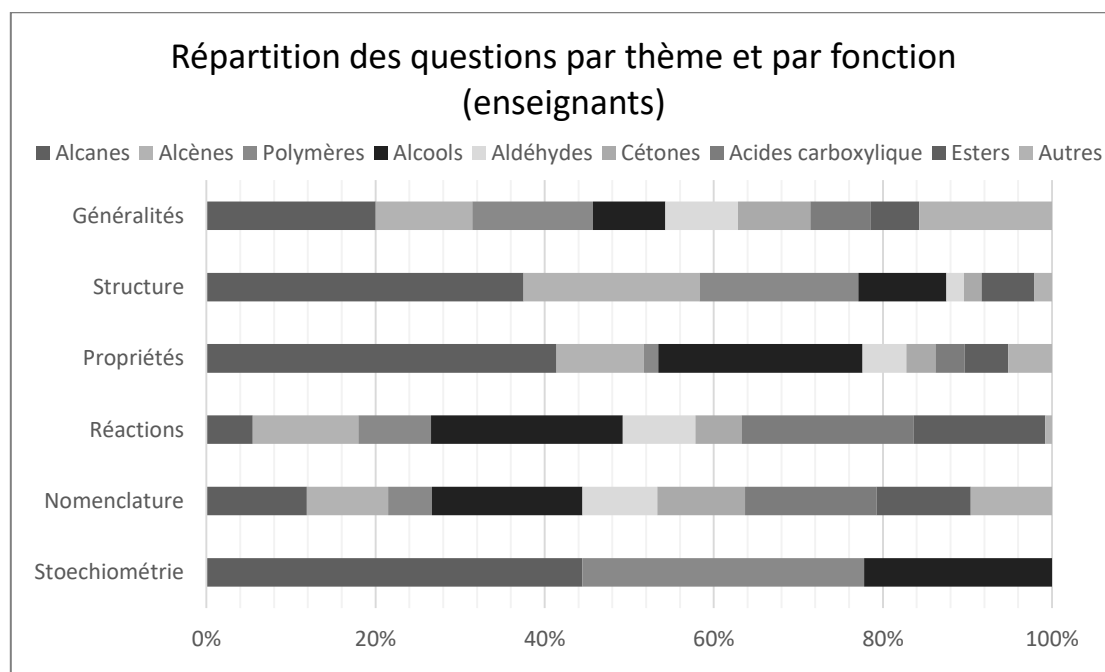


Figure 2.23 : Répartition des questions utilisées par les enseignants, classées par fonction, au sein de chaque thème

Si l'on regarde les questions utilisées par les enseignants (voir figure 2.23), nous constatons que la majorité des thèmes abordent toutes les fonctions (ou presque). C'est le cas pour les thèmes Généralités, Structure (à l'exception des acides carboxyliques), Propriétés, Réactions et Nomenclature. Seul le thème Stœchiométrie n'aborde que les alcanes, les polymères et les alcools. Les alcanes sont majoritairement présents au sein des thèmes Structure, Propriétés et Stœchiométrie.

De manière générale, nous pouvons affirmer que les Généralités, les Propriétés, les Réactions et la Nomenclature de toutes les fonctions sont abordés, que ce soit dans les manuels ou par les enseignants. Les alcanes sont largement mis en avant lors de l'étude de la Structure et des Propriétés des molécules organiques. Ils sont également utilisés majoritairement pour les questions de Stœchiométrie et de Thermochimie. Nous constatons que les enseignants répartissent les questions de manière plus équitable au sein des différents thèmes que le suggèrent les manuels.

### **Analyse des évaluations classées par fonction organique**

Nous continuons notre analyse en nous focalisant sur le troisième critère que nous voulons explorer : les fonctions organiques abordées en secondaire. Les différentes fonctions vues en secondaire sont, dans l'ordre habituellement utilisé par les enseignants, les suivantes :

- Les alcanes
- Les alcènes
- Les polymères
- Les alcools



- Les aldéhydes
- Les cétones
- Les acides carboxyliques
- Les esters
- Autres

Certains enseignants abordent d'autres fonctions que nous reprendrons sous une catégorie « Autres » et qui contient, dans notre cas, les alcynes, les éthers, les amines, les amides et les composés aromatiques. Ces fonctions ne se retrouvent jamais au sein des manuels.

### **Répartition des questions par fonction dans les manuels**

En observant la figure 2.24, nous constatons que les différents ouvrages analysés ne proposent que très peu d'exercices concernant les aldéhydes et les cétones (2-3%). La fonction qui occupe la plus grande place est la fonction alcane (25%). Les autres fonctions sont toutes présentes dans des proportions similaires (10 à 18%).

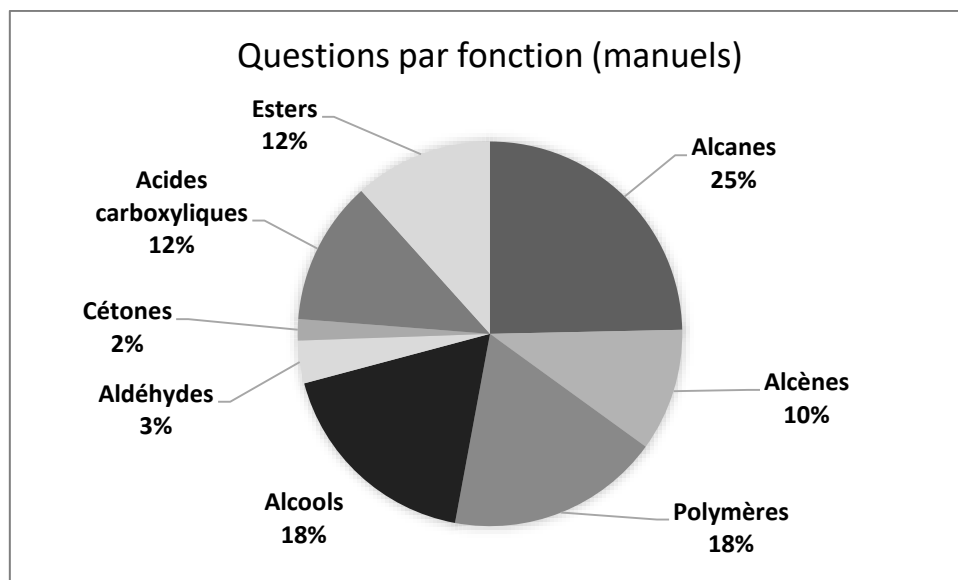


Figure 2.24 : Répartition des questions par fonction organique dans les manuels analysés

En comparant la répartition des questions au fil du temps (voir figure 2.25), nous constatons que les ouvrages de 2004 et 2018 sont extrêmement similaires du point de vue des fonctions abordées. L'ouvrage de 2011 présente quant à lui des différences importantes : les aldéhydes et les cétones n'y apparaissent pas du tout, la présence d'alcools a significativement chuté au profit des fonctions alcanes, alcènes, polymères, acides carboxyliques et esters.

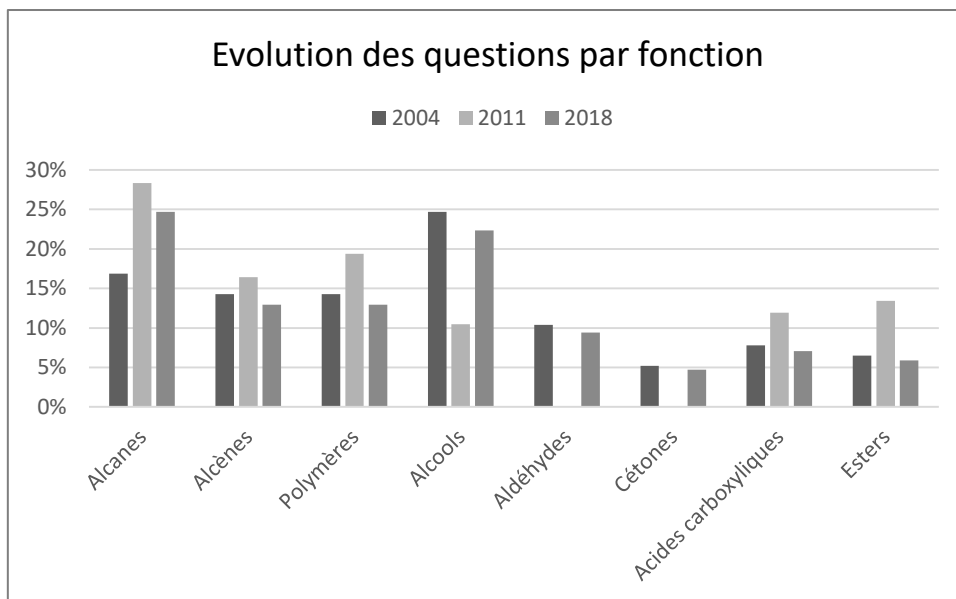


Figure 2.25 : Évolution de la répartition des questions par fonction dans les manuels analysés (Pirson 2004, 2011 et 2018)

### Répartition des questions par fonction chez les enseignants

Les questions utilisées par les enseignants couvrent toutes les fonctions reprises dans le référentiel de compétences ainsi que d'autres fonctions, pour certains enseignants (voir figure 2.26). Nous constatons que les alcanes, les alcools et les alcènes sont les plus présents (respectivement 20%, 17% et 14%). Toutes les autres fonctions couvrent de manière relativement équitable les questions restantes (de 6% à 14% des questions).

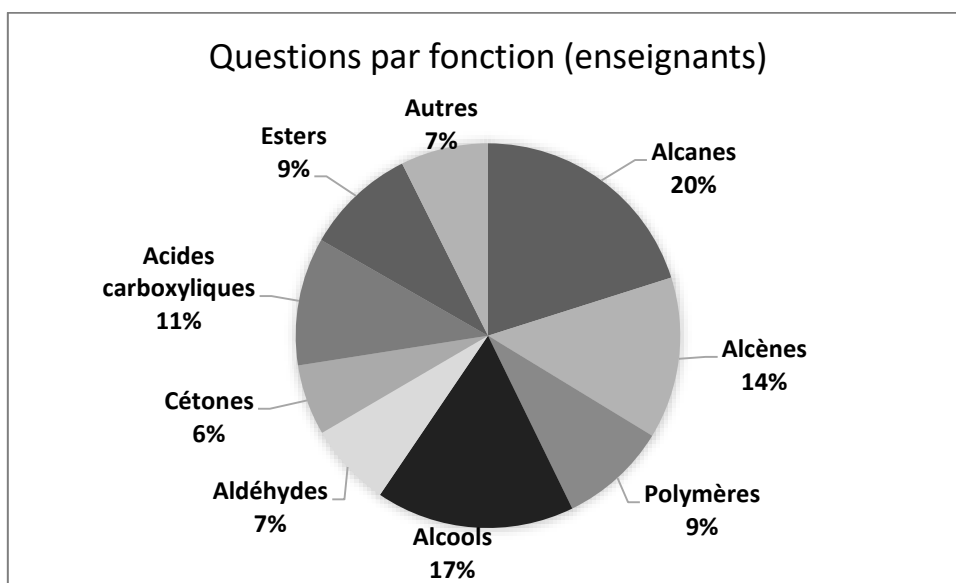


Figure 2.26 : Répartition des questions utilisées par les enseignants en fonction du thème de la question

### Comparaison entre les manuels et les enseignants

En comparant le contenu des exercices proposés dans les manuels à ceux utilisés par les enseignants dans les écoles (voir figure 2.27), nous constatons que les manuels accordent plus d'importance aux alcanes (+5%) et aux polymères (+8%) que les enseignants qui préfèrent inclure d'autres fonctions (+7%) à leur cours et à conserver les aldéhydes et les cétones (+4%). Le pourcentage de questions accordé aux autres fonctions est sensiblement identique dans les manuels et chez les enseignants.

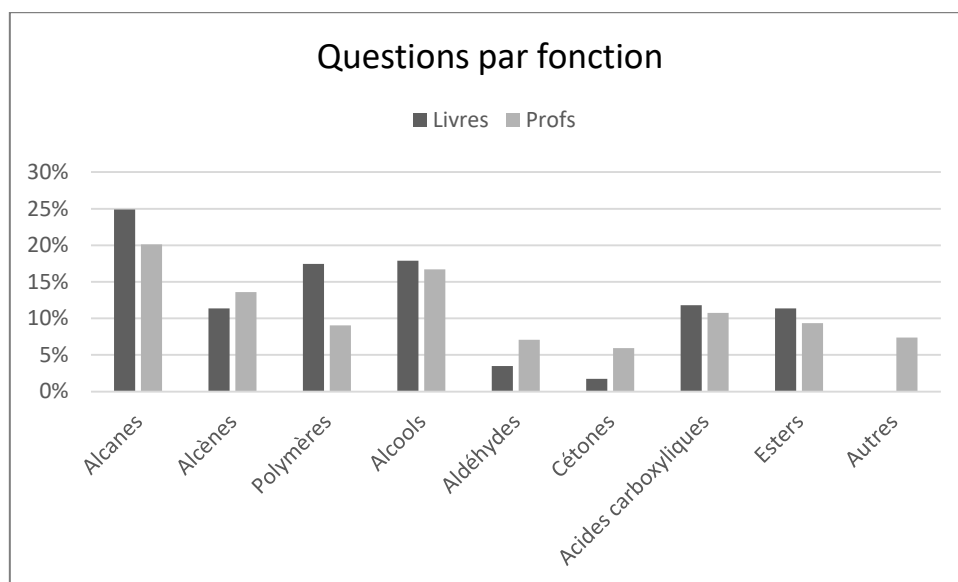


Figure 2.27 : Comparaison de la répartition des questions par fonction pour les manuels et les enseignants

### Une fonction favorise-t-elle un type de question ?

Nous allons maintenant prendre en compte un deuxième critère : le type de questions. Nous allons essayer de mettre en évidence si un type est surreprésenté ou sous-représenté au sein d'une fonction particulière, au sein des questions proposées dans les manuels d'une part, et dans les questions utilisées par les enseignants d'autre part.

Au sein des ouvrages analysés (voir figure 2.28), nous constatons directement que les trois types de questions sont présents au sein de chaque fonction. Les alcènes et les polymères contiennent le plus grand taux de questions de restitution (17% et 19%) et le moins grand taux de questions de transfert (15% et 7%). Chaque fonction comporte environ 70% de questions d'application.

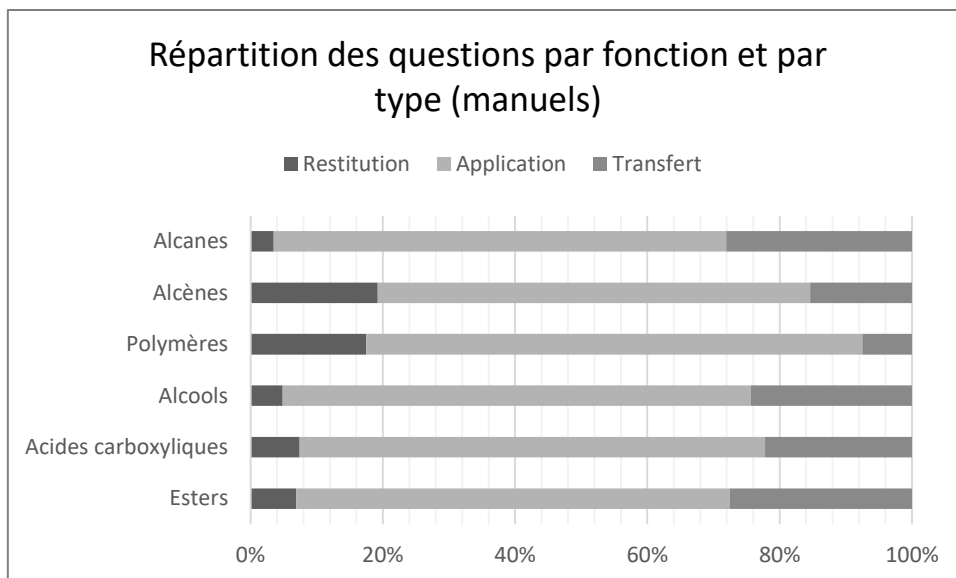


Figure 2.28 : Répartition des questions proposées dans les manuels, classées par type, au sein de chaque fonction

En observant la répartition des questions utilisées par les enseignants (voir figure 2.29), nous constatons de plus grandes variations que dans les manuels. Tous les types de questions sont également représentés au sein de chaque fonction. Cependant, nous constatons que les questions de restitution peuvent être très peu présentes (environ 10%) au sein des questions sur les alcools ou les esters, et qu'elles peuvent présenter plus de 40% des questions au sein des alcanes. De la même manière, les questions de transfert peuvent être presque absentes (polymères) ou représenter plus d'un quart des questions sur une fonction (aldéhydes et cétones). Les questions d'application sont presque toujours majoritaires et peuvent occuper de 40% (alcanes) à 80% (esters) des questions.

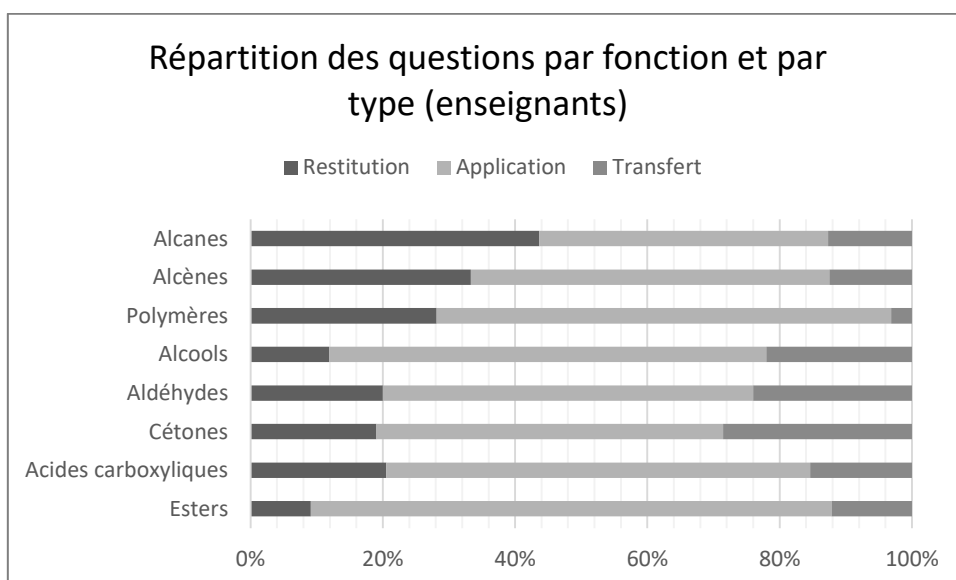


Figure 2.29 : Répartition des questions utilisées par les enseignants, classées par type, au sein de chaque fonction

D'une manière générale, nous constatons que les questions de restitution sont les plus présentes au sein des hydrocarbures (alcanes, alcènes, et certains polymères) tandis que les questions de transfert sont focalisées majoritairement sur les fonctions oxygénées. Cette tendance est fortement marquée chez les enseignants, et moins marquée au sein des manuels qui proposent plus de questions de transfert sur les alcanes. Cependant, nous notons que chaque fonction contient toujours des questions de chaque type.

### ***Une fonction favorise-t-elle un thème ?***

Nous allons désormais prendre un compte notre troisième critère, à savoir les différents thèmes abordés. Nous allons essayer de mettre en évidence si un thème est surreprésenté ou sous-représenté au sein d'une fonction organique, au sein des questions figurant dans les manuels d'une part, et dans les questions proposées par les enseignants d'autre part.

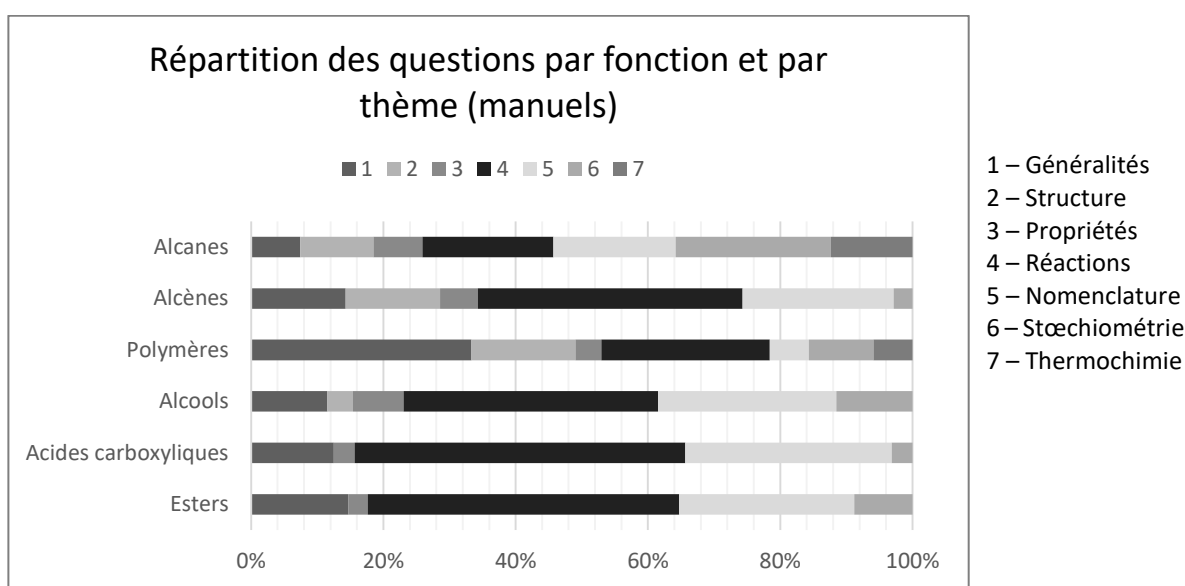


Figure 2.30 : Répartition des questions proposées dans les manuels, classées par thème, au sein de chaque fonction

Au sein des différents ouvrages analysés (voir figure 2.30), nous constatons que seuls les alcanes et les polymères contiennent des questions abordant les sept thèmes repris dans notre analyse. Aucune des autres fonctions ne contient de questions de Thermochimie. Les alcènes et les alcools contiennent des questions sur les six premiers thèmes, tandis que les acides carboxyliques et les esters ne contiennent pas de questions de Structure ni de Thermochimie.

Les questions concernant les alcanes sont réparties de manière équilibrée entre les différents thèmes. Les questions concernant les polymères le sont moins, étant donné que près d'un tiers des questions se focalisent sur des Généralités. Au sein des autres fonctions, le thème majoritaire est celui des Réactions avec environ 40 à 50% de questions le concernant. La Nomenclature est également très présente au sein de ces autres thèmes avec entre 20 et 30% des questions.

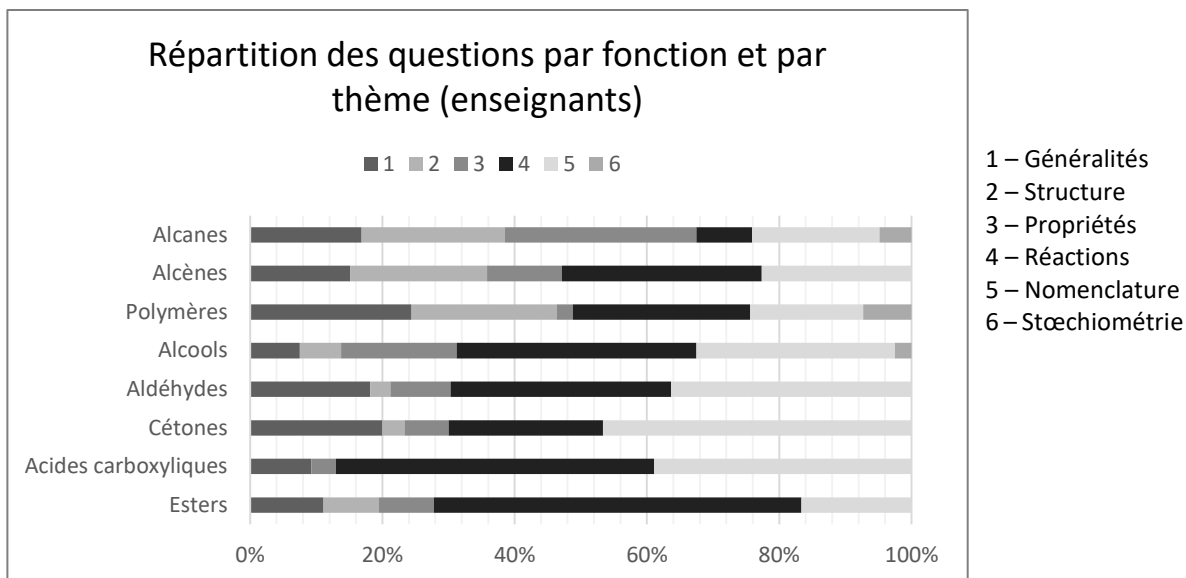


Figure 2.31 : Répartition des questions utilisées par les enseignants, classées par thème, au sein de chaque fonction

En ce qui concerne les questions utilisées par les enseignants (voir figure 2.31), les choses sont légèrement différentes puisqu'aucune question ne porte sur la Thermochimie, il n'y a donc que six thèmes. Les trois fonctions abordant ces six thèmes sont les alcanes, les polymères et les alcools. Aucune des autres fonctions ne contient de questions de Stœchiométrie. C'est au sein des alcanes que la répartition est la plus homogène entre les six thèmes. Cette répartition est également relativement homogène chez les alcènes, bien qu'il n'y ait que cinq thèmes représentés.

Au sein des autres fonctions, nous constatons une prédominance des thèmes Réactions et Nomenclature. En effet, la somme de ces deux thèmes recouvre environ 70% des questions au sein des alcools, des aldéhydes, des cétones et des esters, et monte même jusqu'à près de 90% chez les acides carboxyliques, le seul thème des Réactions prenant près de la moitié des questions au sein de ces deux dernières fonctions.

De manière générale, nous retrouvons un clivage entre les hydrocarbures (alcanes, alcènes et certains polymères) et les fonctions oxygénées : les hydrocarbures sont abordés en répartissant les questions de manière plus équitable au sein des différents thèmes alors que les fonctions oxygénées sont évaluées majoritairement sur base du thème des Réactions et, dans une moindre mesure, de la Nomenclature.

## **Conclusion**

L'analyse des évaluations proposées dans les manuels et celles utilisées par les enseignants en classe permet de mettre en évidence que l'évaluation n'est globalement pas homogène, que ce soit en termes de type de questions, des thèmes évalués ou des fonctions évaluées. Cependant, il est rassurant de noter que les questions des enseignants sont globalement plus équilibrées que celles proposées dans les manuels, quel que soit le critère d'analyse. Les enseignants pourraient cependant augmenter le nombre de questions de transfert au détriment de questions d'application afin d'être plus en phase avec ce que propose le référentiel de compétences. Rappelons rapidement les conclusions importantes à tirer de notre analyse des évaluations :

### *Concernant les types :*

- Les questions de restitution portent majoritairement sur des Généralités concernant la chimie organique ou certaines fonctions organiques. Elles sont plus présentes chez les enseignants que dans les manuels.
- Les questions d'application sont les plus variées mais portent principalement sur de la Nomenclature ou des Réactions organiques. Elles sont largement majoritaires.
- Les questions de transfert utilisées par les enseignants concernent les Réactions, les Propriétés et la Nomenclature, alors que les manuels reprennent majoritairement des questions de transfert portant sur la Stœchiométrie et les Réactions. Elles sont plus présentes au sein des manuels que chez les enseignants où elles sont largement minoritaires.

### *Concernant les thèmes :*

- Les thèmes les plus évalués sont les thèmes de Réactions et de Nomenclature.
- Le thème Stœchiométrie occupe une place importante au sein des manuels, mais pas du tout chez les enseignants.
- Les thèmes les moins importants sont ceux concernant la Structure et les Propriétés des molécules organiques.
- Les Généralités, les Propriétés, les Réactions et la Nomenclature de toutes les fonctions sont abordées, que ce soit dans les manuels ou par les enseignants.
- Les alcanes sont largement mis en avant lors de l'étude de la Structure et des Propriétés des molécules organiques. Ils sont également utilisés majoritairement pour les questions de Stœchiométrie et de Thermochimie.
- Les enseignants répartissent les questions de manière plus équitable au sein des différents thèmes que les manuels, bien qu'ils n'abordent absolument pas la Thermochimie.

### *Concernant les fonctions :*

- Les fonctions sur lesquelles portent le plus de questions sont les premières fonctions abordées, à savoir les alcanes, les alcènes, les polymères et les alcools. Les autres fonctions sont évaluées de manière moins approfondie.
- Les ouvrages analysés ne reprennent pas toujours toutes les fonctions (disparition des aldéhydes et cétones certaines années et apparition des amines dans le futur) alors que les enseignants font le choix d'aborder un plus grand nombre de fonctions organiques, incluant pour certains les alcynes, les éthers, les amines ou les aromatiques.

- L'évaluation des hydrocarbures est plus homogène d'un point de vue des thèmes. C'est d'autre part au sein de ces fonctions que nous retrouvons le plus de questions de restitution.
- L'évaluation des fonctions oxygénées se focalise sur les Réactions et sur la Nomenclature, avec très peu de questions de restitution et plus de questions de transfert.

Nous constatons que les évaluations portent sur des questions qui n'englobent pas de manière homogène les différents types de questions, les différentes fonctions organiques abordées, ni les différents thèmes de chimie organique. Bien qu'une homogénéité ne soit pas indiquée dans tous les cas, nous pensons qu'il n'est pas pertinent de proposer aux élèves des évaluations qui sont trop ciblées sur un type de question, ou sur une combinaison particulière de thème/fonction organique, par exemple. En effet, les élèves doivent avoir la possibilité d'être évalués sur des savoirs et des savoir-faire variés afin qu'ils n'associent pas une fonction particulière avec un type de questions, ou à l'inverse qu'un type de question ne soit associé qu'à certaines fonctions précises.

Toutes ces analyses restent basées sur des recommandations théoriques du Ministère de la Communauté française au travers de référentiels et de manuels, ainsi que sur des questions d'évaluation utilisées par les enseignants ; elles ne nous permettent pas, à ce stade de notre travail, de juger de leur efficacité face aux élèves. Dans la troisième partie de ce travail, nous allons donc partir à la rencontre des élèves en allant dans les classes. Nous pourrons ainsi tester leurs connaissances au sujet de la chimie organique et constater directement de l'efficacité de l'enseignement de la chimie organique tel qu'il est actuellement conçu.



Partie 3 :  
Etude des conceptions  
alternatives des élèves

---



# Introduction

La partie précédente de ce travail nous a permis de découvrir les recommandations officielles en termes d'enseignement de la chimie organique dans les écoles secondaires en Belgique francophone, ainsi que les types de questions recommandées dans les manuels et utilisées par les enseignants pour évaluer le savoir des élèves. Dans cette troisième partie, nous allons nous plonger dans l'analyse de ce que les élèves ont retenu et compris de leur enseignement concernant la chimie organique en allant directement à leur rencontre.

Au cours du premier chapitre de cette troisième partie, nous commencerons par éclaircir la notion de conception alternative et nous établirons une liste de conceptions alternatives déjà identifiées par de précédentes recherches à travers le monde. Nous discuterons ensuite de la méthodologie mise en place au cours de ce travail afin de mettre en évidence les conceptions alternatives présentes chez les élèves de l'enseignement belge francophone.

Le second chapitre détaillera le questionnaire à réponses ouvertes que nous avons conçu comme première étape de l'exploration du savoir des élèves. Ce premier questionnaire couvre cinq grands thèmes de la chimie organique et nous permettra de débroussailler le terrain pour la suite de notre étude.

Le troisième chapitre se consacre à notre deuxième outil de diagnostic ; le questionnaire à choix multiple. Celui-ci nous permettra d'obtenir une analyse plus précise des connaissances des élèves sur certains points précis. En parallèle, le quatrième chapitre nous permet d'explorer particulièrement le thème de la réactivité en chimie organique grâce à une série d'entretiens semi-dirigés.

Enfin, nous terminerons au chapitre cinq par la mise en évidence des différentes conceptions alternatives présentes chez les élèves ayant participé à cette étude. Nous tenterons de proposer des exemples concrets qui permettraient aux enseignants d'éviter d'ancrer ces conceptions dans l'esprit des élèves, ou de les modifier. Pour finir, nous établirons une proposition de réorganisation de l'enseignement et de l'évaluation de la chimie organique en secondaire qui, nous l'espérons, pourra donner aux élèves une image plus globale et plus juste de la chimie organique.



# Chapitre I : Comment identifier les conceptions alternatives présentes chez les élèves ?

## Les conceptions alternatives en chimie

### Qu'est-ce qu'une conception alternative ?

Selon le cadre constructiviste, lorsque nous nous retrouvons face à un nouveau phénomène au cours de notre vie quotidienne, nous développons nos propres modèles et conceptions afin de nous l'expliquer au mieux. Ceux-ci peuvent aussi bien être en accord qu'en opposition avec la science, mais ils demeureront présents tant qu'ils nous sembleront cohérents.

Lors de l'apprentissage de nouveaux concepts, les étudiants vont recourir au même processus : en effet, ils doivent les intégrer tout en reconstruisant ceux qu'ils pensaient avoir déjà acquis, tous ces concepts étant reliés les uns aux autres. Pour ce faire, il leur est nécessaire de reconstruire et de réorganiser le savoir déjà acquis précédemment.[110] Si l'on n'y prend pas garde, la construction opérée par l'étudiant peut ne pas être en accord avec la théorie scientifiquement acceptée par la communauté[111] ; c'est ce que l'on appelle une « misconception », que nous traduirons par conception alternative. De nombreux termes sont utilisés dans la littérature pour parler de ces conceptions différentes de ce que l'on voudrait apprendre à l'élève, comme les préconceptions ou les idées intuitives, mais nous nous bornerons à l'utilisation unique du terme « conception alternative » dans le cadre de cette thèse.

La recherche en didactique a montré que ces conceptions alternatives sont difficilement perceptibles par les enseignants.[4] De ce fait, elles présentent un obstacle important au cours de l'apprentissage des élèves. Ces conceptions alternatives s'expriment à travers la résolution de tâches et peuvent mener à des résultats erronés, alors que l'étudiant pense avoir réellement compris les concepts abordés. Il est donc important qu'elles ne restent pas dans l'esprit des élèves. Le plus grand défi se trouve donc dans le fait que l'élève pense avoir compris ce qu'on lui a expliqué. Le problème induit par les conceptions alternatives est donc très différent de celui de l'élève qui serait conscient de n'avoir pas compris quelque chose. Afin de résoudre ce problème, un grand nombre de recherches ont été menées dans le but d'identifier les conceptions alternatives présentes chez les élèves et de proposer des solutions pour les éliminer.

Malgré le fait que la communauté scientifique et enseignante a connaissance de ce souci lors de l'apprentissage de nouvelles matières, personne n'a encore réussi à développer une méthode universelle pour éviter le développement de conceptions alternatives chez les élèves. Les enseignants doivent imaginer une façon de confronter ces conceptions alternatives, différentes d'un élève à l'autre, qui permet de proposer une meilleure explication que celle ancrée dans l'esprit de l'élève. S'il n'a pas de raison de modifier sa première conception, il ne la modifiera pas. Le professeur doit donc trouver le moyen de modifier chaque conception alternative présente chez chacun de ses élèves. Cette tâche est loin d'être simple, d'autant plus que ces conceptions alternatives sont très résistantes au changement et sont persistantes dans le temps. [112]–[114]

### **Comment identifier une conception alternative ?**

Pour identifier correctement ces conceptions alternatives, différentes procédures existent, chacune d'entre elles présentant un certain nombre d'avantages et d'inconvénients. Les premières recherches à ce sujet ont été menées en utilisant une méthode à base d'entretiens, au cours desquels l'élève est amené à expliquer oralement au chercheur son raisonnement ; toutefois, cette méthode requiert énormément de temps et n'est donc pas applicable à un grand nombre d'élèves. Ainsi, pour avoir accès aux conceptions alternatives d'échantillons plus larges, la recherche s'est tournée vers l'utilisation de questionnaires écrits. Ceux-ci peuvent être composés de questions ouvertes ou de questions à choix multiples. Les QCM sont les plus populaires auprès des chercheurs car les élèves peuvent y répondre plus rapidement, plus facilement, sans avoir besoin d'écrire des phrases pour expliquer leur réponse. Ainsi, l'élaboration de tels questionnaires prend une part importante dans la recherche, particulièrement la sélection des « mauvaises » réponses que nous appelons des distracteurs. Si les distracteurs proposés ne sont pas des conceptions alternatives plausibles, ils ne seront pas choisis par les élèves et le QCM n'aura pas atteint son but. On considère qu'un distracteur sélectionné par plus de 20% des élèves est un indicateur fiable de la présence d'une conception alternative.[115]

En chimie, les conceptions alternatives sont souvent le résultat d'un enseignement passé, l'élève ayant énormément de possibilités de mal interpréter les explications d'un enseignant. Chaque interprétation erronée peut mener à la création d'une conception alternative.[58]

Au sein de la littérature, nous pouvons trouver une grande quantité d'études décrivant les conceptions alternatives présentes chez les élèves du secondaire et du supérieur à propos du cours de chimie générale. Beaucoup de chercheurs se sont focalisés sur des thèmes classiques propres à cette matière, tels que la mole[116], [117], les liaisons chimiques[118], l'équilibre chimique[119]–[121] ou encore la thermodynamique[122].

La mise en place d'outils permettant d'identifier les conceptions alternatives en chimie organique n'est que très récente, et ce domaine reste donc encore à explorer.[123], [124] Cependant, il existe certaines études à propos du concept d'acidité au sein de la chimie organique[125], [126], des conceptions alternatives à propos des hydrocarbures[127], du concept d'aromaticité[128] ou encore quelques études plus générales focalisées sur certains cours de chimie organique[58], [129], [130]. D'autres chercheurs se sont plutôt intéressés aux conceptions alternatives présentes chez les enseignants[131], [132]. À notre connaissance, au jour où nous écrivons ces lignes, il n'existe aucune étude concernant les conceptions alternatives en chimie organique au niveau de l'école secondaire de Belgique.

### **Les conceptions alternatives identifiées chez les élèves**

Seules quelques études se sont déjà focalisées sur la recherche de conceptions alternatives en chimie organique. Voici celles qui ont déjà pu être identifiées chez les apprenants, que ce soit dans l'enseignement secondaire ou supérieur, regroupées par thème :

#### ***Nomenclature organique<sup>2</sup>***

- Si ce n'est pas précisé, on suppose que le groupement est sur le premier carbone.
- La position d'un groupement éther n'a pas besoin d'être précisée.

---

<sup>2</sup> Les conceptions alternatives n'ayant pas de référence dans ce rapport proviennent d'un document PDF en ligne (<http://oise-is-chemistry-2011-2012.wikispaces.com/> consulté le 10/08/2015) sans auteur connu.

- On peut numéroter en passant à travers un groupement éther.
- On numérote toujours en partant de l'extrémité la plus proche d'une ramification.

### ***Structure des molécules organiques***

- L'atome de carbone a plus ou moins de 4 liaisons[4].
- Lorsque la chiralité d'une molécule ne résulte pas simplement de la présence d'un carbone asymétrique, elle n'est pas reconnue[133].
- Les atomes d'azote peuvent partager cinq paires électroniques pour former des liaisons[118].
- Pour déterminer la présence d'un atome de carbone asymétrique, il faut chercher les carbones liés à quatre atomes différents[129].
- Une molécule est considérée comme optiquement active et capable d'avoir des isomères optiques si elle contient au moins un atome de carbone chiral[129].
- Dès qu'il y a une double liaison C=C avec deux groupements différents de chaque côté de la double liaison, il existe une isomérisation cis-trans. Donc, le 1-chloro-2-bromocyclohexène présente une isomérisation cis-trans[129].
- Des isomères ont toujours la même fonction[134], [135].
- La notion de résonance : c'est un échange rapide d'électrons, c'est un équilibre, les structures de résonance existent réellement[3].

### ***Propriétés des molécules organiques***

- Un lien hydrogène est n'importe quel lien impliquant un hydrogène[4], [56], [135].
- La force d'un acide organique est déterminée par sa fonction[126].
- La force d'un acide est déterminée par la stabilité de la molécule[126].
- La paire d'électrons est partagée équitablement entre les deux éléments dans tous les liens covalents[118].
- La forme d'une molécule est déterminée par la polarité des liaisons [118].
- Une molécule non polaire se forme quand les atomes dans la molécule ont des électronégativités similaires[118].
- Les forces intermoléculaires sont les forces dans une molécule[118].
- Le benzène consiste en une alternance de doubles et simples liaisons.
- La température d'ébullition est une propriété chimique.
- Les forces intermoléculaires sont reliées aux liaisons qui peuvent être brisées.
- Les alcanes ayant des longues chaînes ont des points de fusion élevés car ils ont beaucoup de liaisons hydrogène C-H.
- Les alcools sont basiques à cause de la présence d'un groupe OH[129].
- Le méthanol se dissocie en  $\text{CH}_3^+$  et  $\text{OH}^-$ [4].
- Utilisation incorrecte de termes de chimie générale[58].

### ***Réactions organiques***

- Évaluation de la stabilité des produits plutôt que de la faisabilité du mécanisme pour arriver à une molécule particulière[58].
- Un alcène a besoin de chaleur pour réagir avec un halogène.
- La synthèse d'une molécule implique la réaction de cette molécule avec une autre substance
- Les alcènes peuvent décolorer le brome en absence de lumière, mais pas en présence de lumière[129].

- Les phénols ne réagissent pas avec les acides carboxyliques car ils sont tous les deux acides, et les acides ne réagissent pas ensemble[129].
- Lors de l'addition de HX sur un alcène, la règle de Markovnikov peut toujours être utilisée pour prédire le produit de l'addition[129].
- Toutes les molécules qui contiennent un groupement C=O peuvent réagir selon une addition nucléophile, parce qu'il y a une insaturation[129].
- Pendant une estérification, une condensation se produit parce que l'eau est obtenue comme produit de réaction. Un groupement OH est perdu par l'alcool et un H est perdu par l'acide[129].
- Des ions basiques peuvent être présents dans des mécanismes de réaction en milieu acide[4].

### ***Stabilité et réactivité***

- Les liaisons triples sont plus stables que les liaisons doubles, qui sont plus stables que les liaisons simples. Une liaison simple est donc plus réactive qu'une liaison double ou triple[129], [133].
- La rupture d'une liaison est exothermique[4], [123], [136].
- La molécule ayant l'énergie la plus basse est la molécule la moins stable[58].
- La réactivité des halogénures d'alkyles lors d'une réaction avec NaOH suit l'ordre suivant : R-F > R-Cl > R-Br > R-I, car plus l'halogène est électronégatif, plus il est réactif[129].
- Les chlorures d'acides sont plus réactifs que les acides carboxyliques lors d'une estérification parce qu'ils sont plus acides[129].
- L'effet inductif et l'effet mésomère dirigeant les substitutions aromatiques ne sont pas compris (différentes compréhensions possibles)[129].
- Les règles pour déterminer le meilleur nucléophile sont utilisées pour déterminer le meilleur groupe partant, et inversement[129].
- Les électrons vont vers des éléments neutres ou chargés négativement[129].

Le nombre de ces conceptions alternatives peut sembler important, mais il est à remettre en perspective avec le référentiel de compétences de l'enseignement secondaire francophone de Belgique. En effet, la majorité d'entre elles ne concernent pas les élèves du secondaire.

### **Méthodologie appliquée afin d'identifier les conceptions alternatives**

Comme nous l'avons vu en explorant la littérature, il existe plusieurs méthodes permettant de mettre en avant les conceptions alternatives présentes chez les élèves. Nous avons fait le choix de combiner trois méthodes :

- Un questionnaire à réponses ouvertes, portant sur l'entièreté du référentiel de chimie organique.
- Un questionnaire à choix multiples, portant sur certains points particuliers du référentiel de chimie organique.
- Des entretiens semi-dirigés permettant une approche qualitative, portant sur d'autres points particuliers du référentiel.

L'utilisation de ces différentes méthodes nous permettra de répondre à notre première question de recherche, que nous rappelons brièvement :



**QR1** « *Quelles sont les conceptions alternatives présentes chez les apprenants en ce qui concerne l'apprentissage de la chimie organique au niveau secondaire ?* »

Nous détaillons dans ce chapitre les différentes méthodologies suivies afin de déterminer les questions composant ces trois outils ainsi que la méthode de passation des différents questionnaires aux échantillons d'élèves concernés. Les réponses des élèves sont présentées en détail dans les trois chapitres suivants, accompagnées d'une première analyse. Enfin, nous fournissons dans le chapitre V une analyse plus globale afin de mettre en évidence les conceptions alternatives mises à jour par les trois outils utilisés.

### **Questionnaire à réponses ouvertes**

#### ***Élaboration du questionnaire***

Notre point de départ pour la mise au point de ce premier questionnaire est l'analyse des différents programmes d'enseignement en Belgique francophone. Étant donné l'absence d'étude sur le contenu enseigné en Belgique, nous voulons tout d'abord établir un diagnostic général de l'état des connaissances des élèves sur la totalité de la chimie organique enseignée au niveau du secondaire. Pour ce faire, notre questionnaire parcourt une très large part du savoir enseigné à ce niveau. Nous avons tenté d'être le plus complet possible afin de déterminer quels thèmes posent les problèmes d'apprentissage les plus importants.

Certains enseignants avec lesquels nous collaborons ont relu le questionnaire et nous ont conseillé de changer certaines formulations ou d'ajouter l'une ou l'autre question afin de le compléter. Une première version a été testée auprès de 158 étudiants suivant les cours de propédeutique à l'ULB et venant d'un large panel d'écoles. Après ce premier test, nous avons effectué de légères modifications et nous sommes parvenus à la version finale du questionnaire.

Au vu du grand nombre de questions composant le questionnaire (32 questions), nous avons décidé de le diviser en cinq grands thèmes. Voici les différents thèmes et les questions reprises sous chacun d'entre eux.

#### **Thème 1 : Questions d'ordre général sur la chimie organique (6 questions)**

- Q1 – Qu'est-ce que la chimie organique ?
- Q2 – Parmi ces différentes molécules, entourez les molécules organiques
- Q3 – Citez quelques produits de la vie de tous les jours se rapportant à la chimie organique
- Q4 – Donner un exemple de produit quotidien correspondant à chaque fonction
- Q5 – Citez un polymère naturel
- Q6 – Expliquez le principe de la distillation du pétrole

#### **Thème 2 : Questions se rapportant à la structure des molécules organiques (6 questions)**

- Q7 – Qu'est-ce qu'un isomère ?
- Q8 – Reliez les différents isomères entre eux
- Q9 – Dessinez tous les isomères de l'hexane ( $C_6H_{14}$ )
- Q10 – Dessinez la ou les molécule(s) dont la formule brute est  $C_4H_8$
- Q11 – Donnez un exemple d'alcool primaire, secondaire et tertiaire
- Q12 – Identifiez les différentes fonctions présentes dans ces molécules

### **Thème 3 : Questions sur les propriétés des molécules - notions de chimie générale (4 questions)**

- Q13 – Classez les alcanes suivants par ordre croissant de température d'ébullition  
Q14 – Laquelle de ces molécules a la température d'ébullition la plus élevée ?  
Q15 – Parmi les fonctions suivantes, entourez celles qui sont polaires.  
Q16 – Parmi les molécules suivantes, entourez celles qui peuvent faire des liens H.

### **Thème 4 : Questions se rapportant aux réactions organiques (14 questions)**

#### **Catégorie A : Restitution**

- Q17 – Écrivez l'équation de combustion complète du  $C_6H_{14}$ .  
Q18 – Comment fabrique-t-on des alcools ?  
Q19 – Quel est le produit de l'oxydation d'un alcool primaire ?  
Q20 – Par quel type de réaction peut-on synthétiser un acide carboxylique ?  
Q21 – Comment s'appelle la réaction qui permet d'obtenir un ester ?  
Q22a – Nommez les différentes réactions permettant de passer d'une fonction à l'autre.

#### **Catégorie B : Application**

- Q23 – Les réactions suivantes sont-elles des réactions d'addition ?  
Q24 – Écrivez le(s) produit(s) de ces réactions.  
Q25 – Quel est le produit majoritaire de cette réaction ?  
Q26 – Au départ du propylène, dessinez la structure du polymère correspondant.  
Q27 – Écrivez la réaction permettant d'obtenir du propanoate d'éthyle.  
Q28 – Écrivez une réaction de saponification.

#### **Catégorie C : Transfert**

- Q22b – Nommez les différentes réactions permettant de passer d'une fonction à l'autre.  
Q29 – Quelle réaction dois-je faire pour préparer de l'hexane ?  
Q30 – Quelle réaction dois-je faire pour préparer du butène ?

### **Thème 5 : Questions de nomenclature organique (2 questions)**

- Q31 – Nomenclature et représentation des alcanes  
Q32 – Nomenclature des fonctions organiques

### ***Méthodologie de passation du questionnaire***

Une fois le questionnaire mis au point, nous avons pu nous rendre directement dans les écoles secondaires afin de le soumettre aux élèves.

#### Échantillon

Afin de rendre notre étude la plus complète possible, nous nous sommes rendus dans des écoles appartenant aux quatre réseaux de l'enseignement francophone de Belgique. Notre échantillon se compose de 14 écoles de Bruxelles et du Brabant Wallon, appartenant à ces réseaux selon la répartition suivante :

- 6 écoles appartenant à la Fédération Wallonie-Bruxelles ;
- 4 écoles appartenant à l'enseignement catholique (SeGEC) ;
- 3 écoles appartenant à la Ville de Bruxelles (CPEONS) ;
- 1 école appartenant à la Felsi.

Nous avons pu collaborer avec 20 enseignants et interroger 694 élèves au total. Nous avons proposé le même questionnaire à des élèves de Sciences Générales (2 à 3 heures de chimie par semaine) et à des élèves de Sciences de Base (1 heure de chimie par semaine). En option Sciences Générales, nous

avons interrogé 460 élèves et en option Sciences de Base, nous avons interrogé 234 élèves. La répartition des élèves en fonction de leur option et de leur réseau est reprise dans le tableau 3.1.

	Sciences Générales		Sciences de Base		Total	
	Écoles	Élèves	Écoles	Élèves	Écoles	Élèves
<b>Fédération Wallonie-Bruxelles</b>	5	209	1	50	6	259
<b>Enseignement catholique (SeGEC)</b>	4	113	1	26	4	139
<b>Ville de Bruxelles (CPEONS)</b>	2	103	3	79	3	182
<b>Felsi</b>	1	35	1	79	1	114
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>460</b>	<b>6</b>	<b>234</b>	<b>14</b>	<b>694</b>

Tableau 3.1 : Répartition des écoles et des élèves ayant participé au questionnaire en fonction de l'option de l'élève

### Conditions de passation du questionnaire

Le questionnaire est proposé aux élèves sous forme de « sondage » et non pas comme une interrogation. Le questionnaire tel que présenté aux élèves est disponible dans l'Annexe 1. Les élèves ne sont pas prévenus et n'ont donc pas étudié spécifiquement pour le jour où nous venons. Cependant, ils ont déjà étudié la matière auparavant, que ce soit pour une interrogation ou un examen. La totalité du questionnaire peut être remplie en deux périodes de cours.

Au vu de la diversité des programmes d'une école à l'autre, nous avons décidé d'adapter notre questionnaire en fonction de la matière effectivement abordée avec les élèves. Avec l'aide de l'enseignant, nous avons éliminé les questions portant sur de la matière non vue - ceci explique donc les disparités quant au nombre de réponses en fonction de la question. Le temps imparti aux élèves pour remplir le questionnaire est adapté en fonction du nombre de questions auxquelles ils doivent répondre.

### Méthode d'analyse du questionnaire

Les questionnaires ont été encodés manuellement. Un encodage qualitatif a été effectué sur les premiers questionnaires récoltés (en l'occurrence les étudiants de propédeutique ainsi que les trois premières écoles visitées), ce qui a permis de créer un « code book » pour l'ensemble du questionnaire. Par la suite, l'intégralité des questionnaires a été encodée selon ce code book. L'analyse des réponses des étudiants a été effectuée grâce au logiciel Excel.

Les questionnaires ont été présentés à des élèves de Sciences de Base et de Sciences Générales. Nous ne présenterons ici que les résultats pour les élèves de Sciences Générales. Les résultats des élèves de Sciences de Base leur sont similaires quant au type d'erreur effectué malgré un pourcentage d'erreur plus important. Nous faisons donc le choix de nous concentrer uniquement sur les élèves de Sciences Générales jusqu'à la fin de notre travail de recherche. En effet, nous supposons que si nous pouvons mettre en évidence des conceptions alternatives chez les élèves de Sciences Générales, celles-ci seront très probablement présentes également chez les élèves de Sciences de Base. Les résultats des élèves de Sciences de base sont disponibles dans l'Annexe 2.

## **Questionnaire à choix multiples (QCM)**

### ***Mise au point du questionnaire***

Ce second questionnaire a été élaboré à la suite de celui à réponses ouvertes. Nous n'avons en effet pas réussi à obtenir l'information voulue sur certains sujets car les réponses, ou plus souvent l'absence de réponse, ne nous permettaient aucune analyse. Nous avons donc proposé un second questionnaire à un nombre plus restreint d'élèves (201 participants). Les questions y sont revues sous forme de choix multiples ou de tableaux à choix multiples. Les élèves ne doivent plus répondre de façon ouverte et l'analyse de leurs réponses est donc facilitée.

Pour chacune des questions, les réponses proposées aux élèves sont imaginées à partir des réponses les plus fréquemment proposées par les élèves lors du précédent questionnaire à réponses ouvertes, ou encore inspirées des conceptions alternatives déjà identifiées dans la littérature, ceci afin de proposer des distracteurs plausibles aux élèves.

Le questionnaire est divisé en deux parties :

- Une première partie de questions à choix multiples, avec une seule réponse possible.
- Une deuxième partie contenant divers tableaux à compléter, appelant toujours néanmoins une réponse fermée.

Les différentes questions sont présentées ci-après. Les réponses proposées aux élèves ainsi que le détail des tableaux contenant les molécules proposées aux élèves sont indiqués lors de l'analyse des résultats.

### **Questions à choix multiples :**

Q1) La chimie organique est :

Q2) Un polymère est :

Q3) Un alcool primaire est :

Q4) Parmi les molécules suivantes, laquelle est un alcool secondaire ?

Q5) Un isomère est :

Q6) Pour faire passer une molécule de la phase liquide à la phase gazeuse, il faut chauffer la molécule afin de :

Q7) Pour qu'une molécule soit polaire, il faut :

Q8) Qu'est-ce qu'une liaison hydrogène (ou lien H) ?

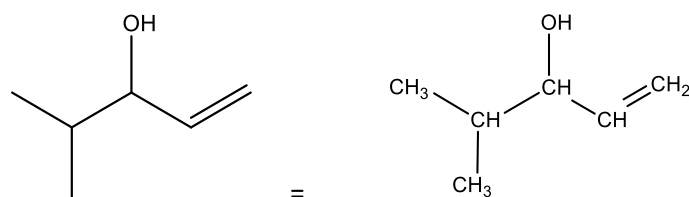
### **Complète les différents tableaux et pointillés :**

T1) Voici une liste de produits de la vie quotidienne. Est-ce qu'ils font partie de la chimie organique ? Si oui, quelle est la fonction principale qui les compose ?

T2) Les molécules suivantes sont-elles des polymères ? Si oui, sont-ils des polymères de synthèse ou des polymères naturels ?

T3) Voici plusieurs paires de molécules. Déterminez si les deux molécules représentées sont identiques, isomères, ou ni l'un ni l'autre.

T4) Les chimistes organiciens utilisent le plus souvent l'écriture topologique pour représenter les molécules organiques. Cette écriture ne représente pas les carbones ni les hydrogènes liés aux carbones, elle ne montre que les liaisons entre carbones, et les autres éléments. Sachant que :



Complète le tableau de représentations suivant.

T5) Voici une molécule organique. Identifie les différentes fonctions qui ont été entourées.

T6) Voici différentes molécules. Pour chaque molécule, détermine si elle est polaire ou non polaire, et si elle peut faire des liaisons hydrogène ou non.

### ***Méthodologie de passation du questionnaire***

Une fois ce deuxième questionnaire mis au point, nous nous sommes rendus dans les écoles secondaires afin de le soumettre aux élèves. Le questionnaire tel que présenté aux élèves est disponible dans l'Annexe 3.

### Échantillon

Afin de rendre l'étude la plus complète possible, nous nous sommes rendus dans des écoles appartenant aux quatre réseaux de l'enseignement francophone de Belgique. Notre échantillon se compose de 6 écoles de Bruxelles et du Brabant Wallon, appartenant à ces réseaux selon la répartition suivante :

- 2 écoles appartenant à la Fédération Wallonie-Bruxelles ;
- 2 écoles appartenant à l'enseignement catholique (SeGEC) ;
- 1 école appartenant à la Ville de Bruxelles (CPEONS) ;
- 1 école appartenant à la Felsi.

Nous avons pu collaborer avec 6 enseignants et interroger 201 élèves de Sciences Générales au total. La répartition des élèves en fonction de leur école est reprise dans le tableau 3.2.

	<b>Sciences Générales</b>	
	<b>Écoles</b>	<b>Élèves</b>
<b>Fédération Wallonie-Bruxelles</b>	2	96
<b>Enseignement catholique (SeGEC)</b>	2	37
<b>Ville de Bruxelles (CPEONS)</b>	1	27
<b>Felsi</b>	1	41
<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>201</b>

Tableau 3.2 : Répartition des écoles et des élèves ayant participé au QCM

### Conditions de passation du questionnaire

Les conditions sont exactement les mêmes que lors du questionnaire précédent. Le questionnaire est proposé aux élèves sous forme de « sondage » et non pas comme une interrogation. Les élèves ne sont pas prévenus et n'ont donc pas étudié spécifiquement pour le jour où nous venons. Cependant, ils ont déjà étudié la matière auparavant, que ce soit pour une interrogation ou un examen. Le questionnaire peut être rempli en 45 minutes.

### Méthode d'analyse du questionnaire

Les questionnaires ont été encodés manuellement. L'analyse des réponses des étudiants a été effectuée grâce au logiciel Excel.

### Entretiens semi-dirigés

#### ***Mise au point du guide des entretiens semi-dirigés***

Le but premier de ces entretiens semi-dirigés est d'essayer de mettre en évidence les problèmes de compréhension liés aux réactions organiques. Les questions choisies portent donc principalement sur les réactions. Nous avons ajouté quelques questions supplémentaires, liées à la place de la chimie organique dans la vie quotidienne, que nous avons posées aux élèves si le temps imparti à notre entretien le permettait encore. Ces questions supplémentaires ont été élaborées afin de voir si l'un des buts du programme de secondaire, à savoir faire des élèves les citoyens de demain, était effectivement rempli.

Voici les différentes questions posées oralement aux élèves :

#### **Questions à propos des réactions :**

- Qu'est-ce qu'une réaction chimique ?
- Peux-tu donner un exemple de réaction chimique ?
- Peux-tu expliquer comment se déroule cette réaction ?
  - o Comment les réactifs deviennent-ils les produits ?
  - o Quelles liaisons sont cassées ?
  - o A-t-on besoin de quelque chose pour que la réaction fonctionne ?
- Si la réaction proposée ne contient pas de composé organique, poser la même question pour une réaction qui en contient.

#### **Questions supplémentaires à propos de la place de la chimie organique :**

- Qu'est-ce que la chimie organique ?
- Peux-tu donner des exemples de choses organiques dans la vie quotidienne ?
  - o Comment déterminer si quelque chose est organique ou non ?
- Les médicaments font-ils partie de la chimie organique ?
  - o Quelle est la différence entre un médicament issu de la nature et fabriqué par l'homme ?
  - o Lequel choisirais-tu et pourquoi ?

#### ***Méthodologie de passation des entretiens***

Chaque entretien a été effectué en tête à tête avec un élève de 5<sup>ème</sup> ou de 6<sup>ème</sup> année du secondaire, dans un local à l'écart de leurs camarades ; ils se sont portés volontaires et n'ont donc pas été désignés par leur enseignant. Le cadre de cet entretien leur a été expliqué avant de démarrer l'enregistrement, en leur précisant que ce qu'ils diraient ne serait pas communiqué à leur enseignant et que leur identité resterait anonyme. La transcription des différents entretiens est disponible dans l'Annexe 4.

### Échantillon

L'échantillon se compose de 15 élèves de 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> année du secondaire, venant de trois écoles appartenant à des réseaux différents (Enseignement catholique, Fédération Wallonie-Bruxelles et Felsi).

### Méthode d'analyse des entretiens

Tous les entretiens ont été enregistrés et retranscrits manuellement ensuite. Les différents élèves interviewés sont identifiés par un numéro allant de « E01 » à « E15 ».

L'analyse des entretiens est effectuée question par question. Les citations reprises directement des entretiens sont indiquées entre guillemets et en italique, suivies du numéro correspondant à l'élève.





## Chapitre II : Questionnaire à réponses ouvertes

L'analyse des réponses des élèves est présentée ci-après, thème par thème. Chaque graphique représenté indique le nombre d'élèves ou le pourcentage d'élèves ayant fourni le même type de réponse. Le nombre d'élèves ayant répondu à la question est indiqué pour chaque question.

### **Thème 1 : Questions générales & vie quotidienne**

Sous ce thème, nous voulons regrouper toutes les questions portant sur la chimie organique en général et sur son lien avec la vie quotidienne. Nous retrouvons donc des questions portant sur la définition de la chimie organique, sur des sujets mis en avant dans les écoles tels que les polymères ou le pétrole, ainsi que sur des exemples de produits ou de molécules tirés de la vie quotidienne.

Voici la liste des 6 questions concernées :

- Q1 – Qu'est-ce que la chimie organique ?
- Q2 – Parmi ces différentes molécules, entourez les molécules organiques
- Q3 – Citez quelques produits de la vie de tous les jours se rapportant à la chimie organique
- Q4 – Donnez un exemple de produit quotidien correspondant à chaque fonction
- Q5 – Citez un polymère naturel
- Q6 – Expliquez le principe de la distillation du pétrole

Analysons maintenant les réponses des élèves à ces différentes questions.

#### **Q1 : Qu'est-ce que la chimie organique ? (N = 460)**

La réponse à cette question étant ouverte, nous avons basé l'encodage sur le ou les termes principaux utilisés par l'élève pour définir la chimie organique. Rappelons que la réponse correcte est que la chimie organique correspond à la chimie du carbone, à quelques exceptions près.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 3.1, pour la majorité des élèves, la chimie organique correspond à la chimie du carbone (26%), à la chimie des composés organiques (17%) ou à la chimie du vivant (14%). Il n'y a donc qu'un quart des élèves qui donne la définition correcte de la chimie organique. Un constat surprenant est de noter que 20% des élèves ne donnent aucune définition de la chimie organique et laissent leur feuille blanche.

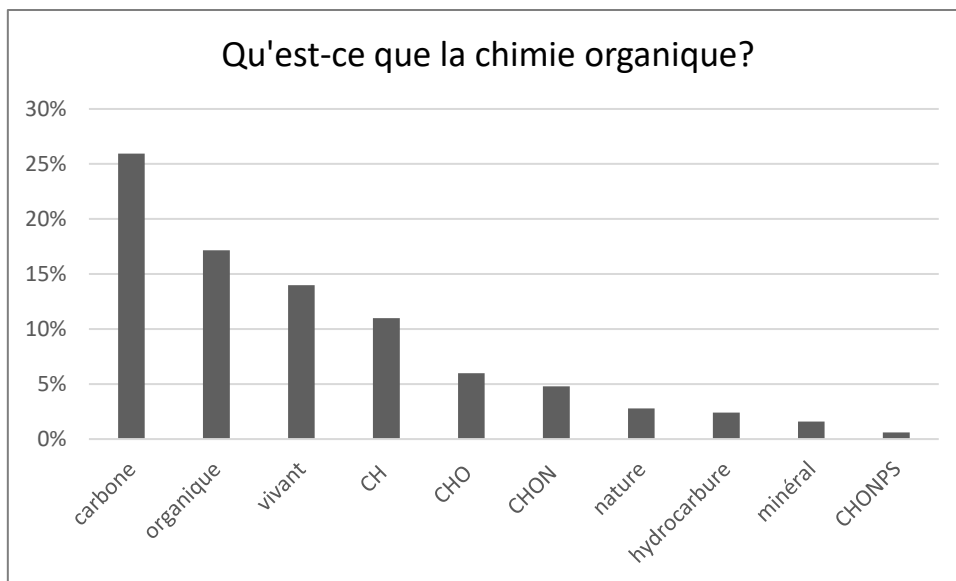


Figure 3.1 : Mots-clés utilisés par les élèves pour définir la chimie organique (N = 460)

### **Différence par réseau**

Une analyse par réseau a mis en évidence de grandes différences quant à la définition que les élèves donnent de la chimie organique. Nous pouvons voir sur la figure 3.2 le pourcentage d'élèves ayant utilisé les termes « carbone », « organique », « vivant » et « CH » pour définir la chimie organique, en fonction du réseau de l'école auquel appartient l'élève.

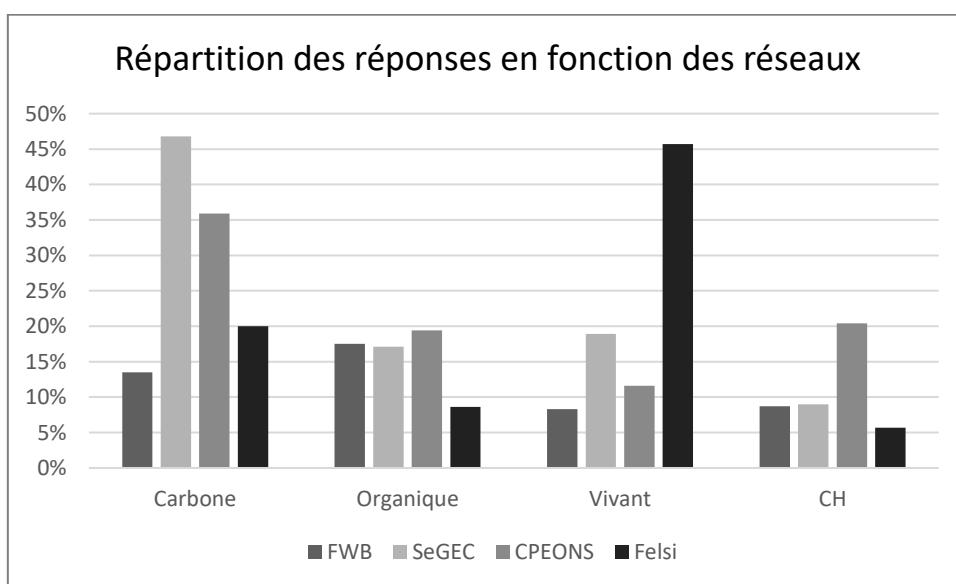
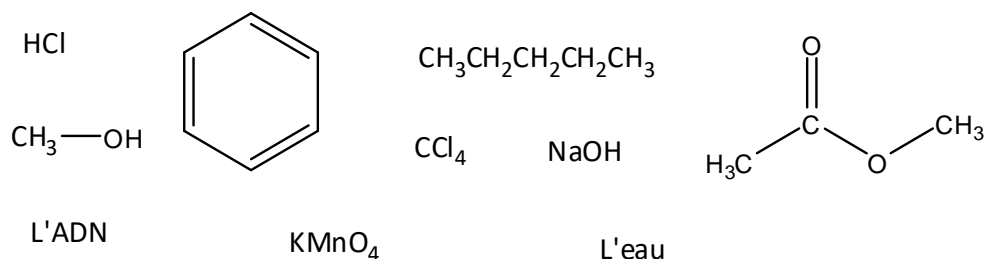


Figure 3.2 : Répartition des mots-clés utilisés par les élèves pour définir la chimie organique en fonction du réseau d'où provient l'élève (N = 460)

Au sein du SeGEC et du CPEONS, le terme majoritairement utilisé est la chimie du « carbone ». Cependant, on note qu'au sein de l'école visitée faisant partie de la Felsi, le terme largement majoritaire est la chimie du « vivant ». Cette école insiste clairement sur le lien entre la chimie organique et le monde vivant (une seule école, mais 5 enseignants différents), ce qui n'est pas le cas dans les autres réseaux.

## Q2 : Identification des molécules organiques (N = 460)

Pour cette question, il est demandé à l'élève d'entourer les molécules considérées comme faisant partie de la chimie organique parmi les molécules suivantes :



Les réponses données par les élèves sont très claires pour certaines molécules, qui sont identifiées correctement par une très grande majorité d'élèves. Cependant, nous notons que certaines molécules posent problème, comme nous pouvons le voir sur la figure 3.3.

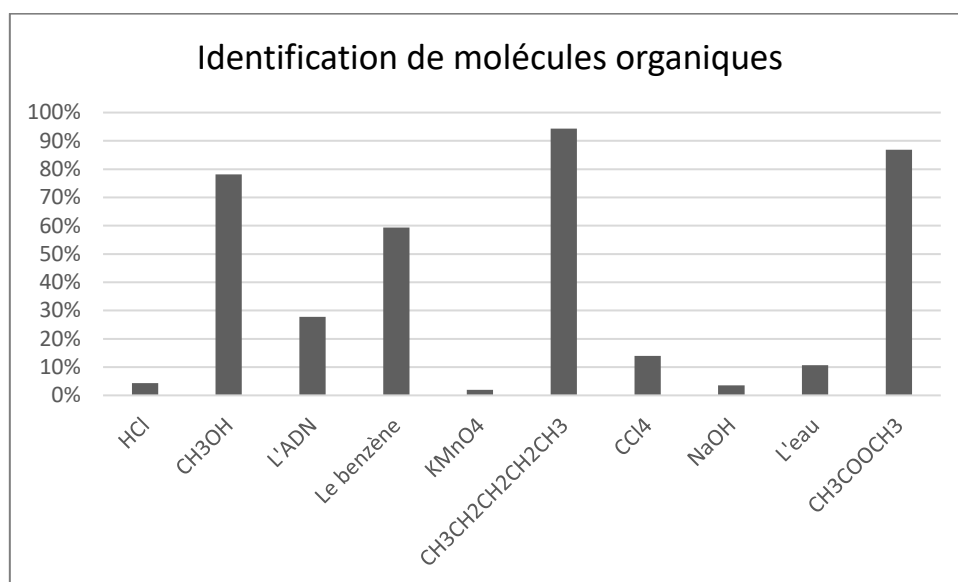


Figure 3.3 : Pourcentage d'élèves ayant identifié la molécule comme étant organique (N = 460)

Le pentane est identifié comme organique par presque tous les élèves (94%), suivent l'ester proposé (87%) et le méthanol (78%). Le benzène n'est identifié que par 60% des élèves, l'ADN par 28% et le CCl<sub>4</sub> par 14%. Les autres molécules ne sont pas organiques. HCl, KMnO<sub>4</sub> et NaOH sont identifiés par moins de 5% des élèves. Par contre, l'eau est identifiée par 11% des élèves comme étant une molécule organique. Si l'on considère le nombre d'élèves ayant correctement identifié toutes les molécules organiques proposées, seuls 2% des élèves y arrivent.

### Corrélation avec la définition de la chimie organique

Afin de tenter de comprendre d'où viennent les identifications correctes et les erreurs, nous avons décidé de faire un test de corrélation entre les réponses des étudiants à cette question et à la précédente. Nous imaginons que la définition qu'un élève se fait de la chimie organique va avoir une grande influence sur les molécules qu'il considère comme étant des molécules organiques.

Nous pouvons mettre en évidence (voir tableau 3.3) que les élèves associant la chimie organique à la chimie du carbone rejettent automatiquement l'eau des molécules organiques. De manière similaire, bien que moins significative, les élèves associant la chimie organique avec la chimie du vivant sont plus nombreux à identifier l'ADN comme étant organique. On peut conclure avec ces deux questions que l'enseignant a tout intérêt à appuyer sur la définition réelle de la chimie organique tout en faisant le lien avec la chimie du vivant, mais en faisant attention à ne pas limiter la chimie organique à la chimie du vivant, ce qui induit des erreurs auprès des élèves.

	L'eau n'est pas organique	L'eau est organique		L'ADN n'est pas organique	L'ADN est organique
Chimie organique ≠ chimie du carbone	279	49	Chimie organique ≠ chimie du vivant	295	93
Chimie organique = chimie du carbone	130	0	La chimie organique = chimie du vivant	36	34

Tableau 3.3 : Mise en relation des réponses des élèves aux questions Q1 et Q2

### **Q3 : Exemples de produits de la vie de tous les jours (N = 460)**

Il est demandé aux élèves de citer quelques produits de la vie de tous les jours se rapportant à la chimie organique. Nous constatons que 20% des élèves ne savent pas citer un seul exemple. Parmi les 80% restants (N = 372), la figure 3.4 indique les exemples cités plus de 6 fois.

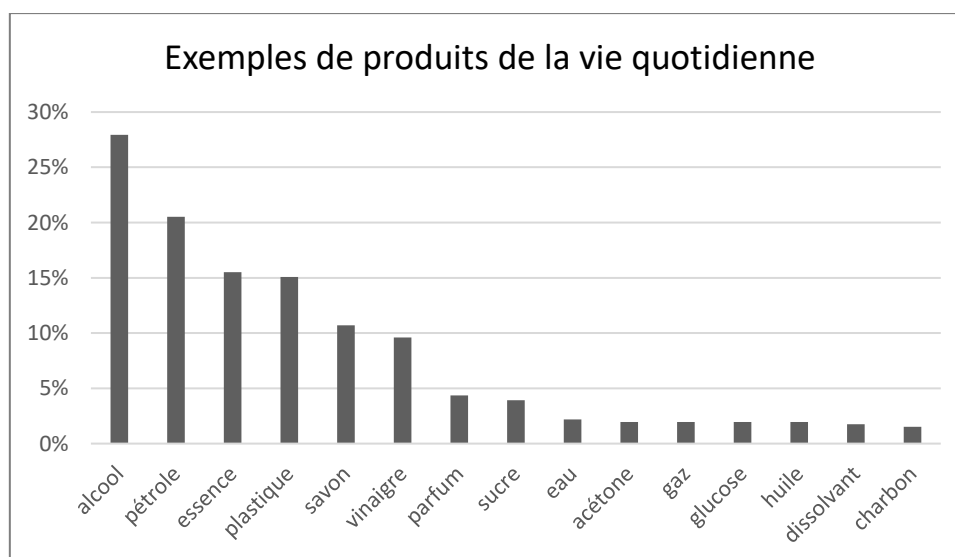


Figure 3.4 : Exemples de produits de la vie quotidienne se rapportant à la chimie organique et cités par plus de 6 élèves (N = 372)

Les quelques exemples revenant le plus souvent sont l'alcool, le pétrole, l'essence, le plastique, le savon et le vinaigre. Ces différents produits de la vie quotidienne sont effectivement présents dans le programme que doivent suivre les écoles et sont donc étudiés en profondeur. Notons que quelques

erreurs se glissent dans certaines propositions des élèves, telles que l'eau ou le gaz (qui peut être organique ou non en fonction du gaz).

**Q4 : Donnez un exemple de produit de la vie quotidienne ou de molécule biologique contenant une fonction...**

Nous demandons cette fois aux élèves de citer un produit de la vie quotidienne qui contient une fonction particulière. Les fonctions vues n'étant pas les mêmes dans chaque école, le nombre d'élèves ayant répondu pour chaque fonction est variable.

La figure 3.5 montre qu'il n'y a pas plus d'un quart des élèves qui peut citer un exemple correct pour la majorité des fonctions. La seule exception positive concerne la fonction alcool, pour laquelle plus de 60% des élèves peuvent donner un exemple. Ceci n'est pas surprenant, étant donné que le nom du produit quotidien est le même que le nom de la fonction organique. Il est étonnant de constater que l'une des fonctions pour laquelle les élèves ont le plus de difficulté à donner un exemple est la fonction alcène, alors qu'elle est vue longuement en cours, ce qui n'est pas le cas de la fonction aldéhyde, qui n'est souvent que survolée, et qui présente également un très faible taux de réponses correctes.

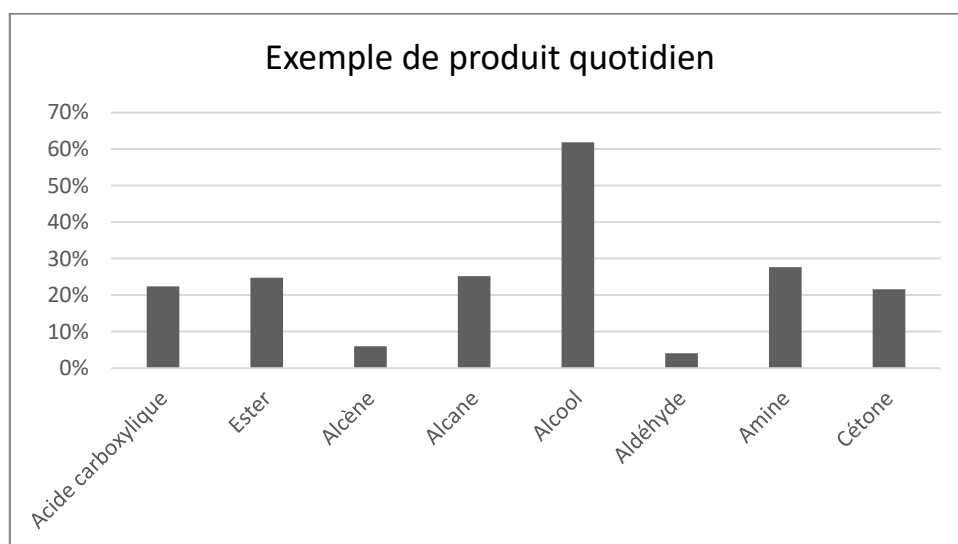


Figure 3.5 : Pourcentage d'élèves donnant un exemple correct de produit de la vie quotidienne contenant une fonction particulière (N = 317 pour l'acide carboxylique et l'ester, N = 433 pour l'alcène et l'alcane, N = 369 pour l'alcool, N = 186 pour l'aldéhyde, N = 112 pour l'amine et N = 171 pour la cétone)

**Q5 : Citez un polymère naturel (N = 162)**

Nous demandons cette fois aux élèves de citer un polymère naturel. La figure 3.6 montre les réponses trouvées chez au moins 2 élèves, qu'elles soient correctes ou non.

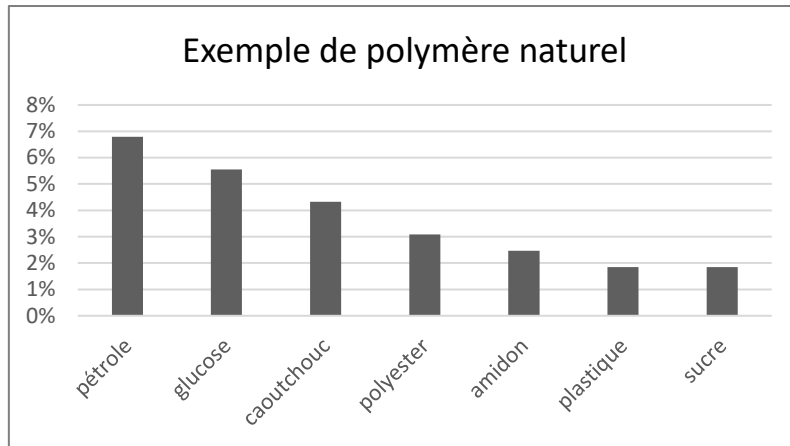


Figure 3.6 : Exemples de « polymère naturel » proposé par au moins 2 élèves (N = 162)

Les « polymères naturels » les plus cités ne sont pas forcément des polymères, et encore moins souvent des polymères naturels. Seuls 10% des élèves savent citer un vrai polymère naturel (amidon, ADN, polysaccharide, caoutchouc ou glycogène, dont certains ne sont cités qu'une seule fois). Le pétrole, produit cité le plus de fois, n'est pas un polymère, tout comme le glucose ou le sucre. Le plastique n'est quant à lui pas naturel.

**Q6 : Expliquez le principe de la distillation du pétrole (N = 240)**

La distillation du pétrole est une des premières notions abordées lorsque l'on commence la chimie organique dans la majorité des écoles secondaires. Cette question est donc là pour évaluer la compréhension et la mémorisation des élèves à ce propos. La question étant une question ouverte, nous l'avons codée en trois possibilités :

- Explication correcte : l'élève explique la notion de séparation des différentes molécules composant le pétrole en fonction de leur température d'ébullition, celle-ci étant liée à la taille des molécules.
- Explication floue : quelques notions correctes présentes dans la réponse de l'élève mais réponse incomplète ou très vague.
- Explication incorrecte ou pas de réponse.

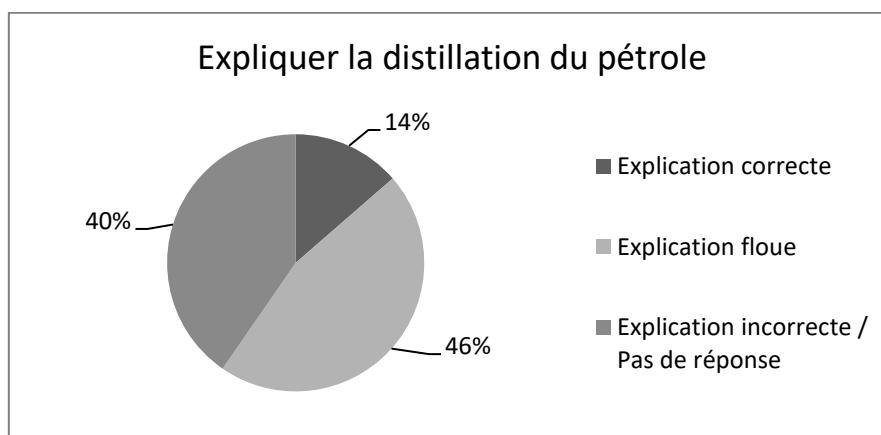


Figure 3.7 : Pourcentage de réponses correctes, floues et incorrectes à la question « Explique le principe de la distillation du pétrole » (N = 240)

On constate en observant la figure 3.7 que la majorité des élèves (46%) essaient de donner une explication mais que celle-ci n'est que partielle. Ils ont retenu l'idée qu'il y a une grande tour et que l'on chauffe le pétrole brut pour en faire des produits « utilisables », mais la façon dont se fait cette transformation reste encore un mystère. Seuls 14% d'entre eux ont expliqué correctement le principe de la séparation des différents constituants en fonction de leur température d'ébullition.

### **Récapitulatif des réponses au thème 1**

On peut conclure l'analyse de cette première partie du questionnaire en mettant d'ores et déjà en avant quelques problèmes importants dès l'abord de la chimie organique :

- La majorité des élèves ne définit pas correctement ce qu'est la chimie organique ;
- Seuls 2% des élèves identifient correctement toutes les molécules organiques qui leur sont présentées ;
- Il est difficile pour les élèves de donner des exemples de produits de la vie quotidienne lorsqu'il faut les associer avec une fonction particulière, ou encore de citer un polymère naturel ;
- Le principe de la distillation du pétrole, qui est pourtant un thème majeur dans beaucoup d'écoles secondaires, est loin d'être intégré par les élèves.

De manière plus quantitative, le pourcentage moyen de réponses correctes lors de cette première partie s'élève à 27%.

### **Thème 2 : Structure des molécules organiques**

Le thème concernant la structure des molécules organiques regroupe les différentes questions invitant les élèves à dessiner une structure particulière, à comprendre une structure dessinée ainsi que les questions liées au concept d'isomère, qui représente les différentes structures possibles pour une même formule brute.

Voici la liste des 6 questions concernées :

- Q7 – Qu'est-ce qu'un isomère ?
- Q8 – Reliez les différents isomères entre eux
- Q9 – Dessinez tous les isomères de l'hexane ( $C_6H_{14}$ )
- Q10 – Dessinez la ou les molécule(s) dont la formule brute est  $C_4H_8$
- Q11 – Donnez un exemple d'alcool primaire, secondaire et tertiaire
- Q12 – Identifiez les différentes fonctions présentes dans ces molécules

#### **Q7 : Qu'est-ce qu'un isomère ? (N = 259)**

La notion d'isomère est introduite aux élèves dès l'abord des alcanes, elle arrive donc rapidement dans le chapitre de la chimie organique. Elle est ensuite revue lors des alcènes, en introduisant l'isomérisie cis/trans, et est de nouveau abordée à travers les fonctions oxygénées. C'est donc une notion qui devrait être bien intégrée par les élèves.

Il est demandé aux élèves de donner leur définition du terme isomère. La définition attendue est qu'un isomère est une molécule possédant la même formule moléculaire qu'une autre molécule, mais une

formule semi-développée (ou développée) différente. Étant donné que cette question attend une réponse ouverte, les réponses données par les élèves ont été codées en trois possibilités :

- Explication correcte : l'élève fournit une définition claire et correcte.
- Explication floue : l'élève fournit une définition mal écrite, une phrase incohérente, mais l'élève semble avoir compris la notion d'isomère, il ne sait simplement pas l'expliquer correctement.
- Explication incorrecte / pas d'explication : l'élève n'a pas compris ou n'a rien écrit.

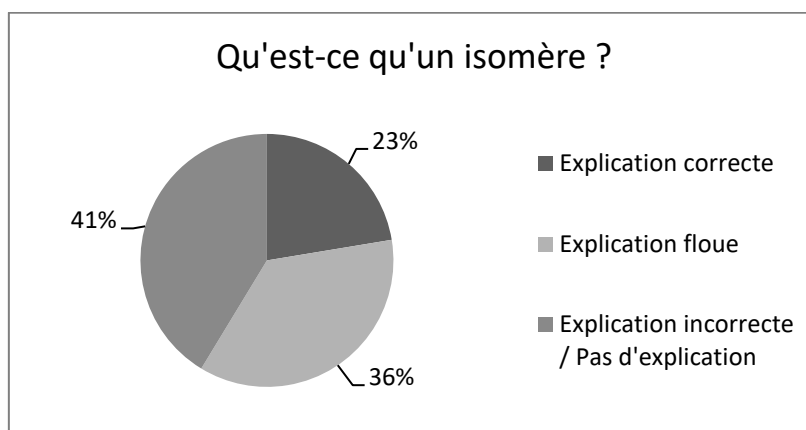
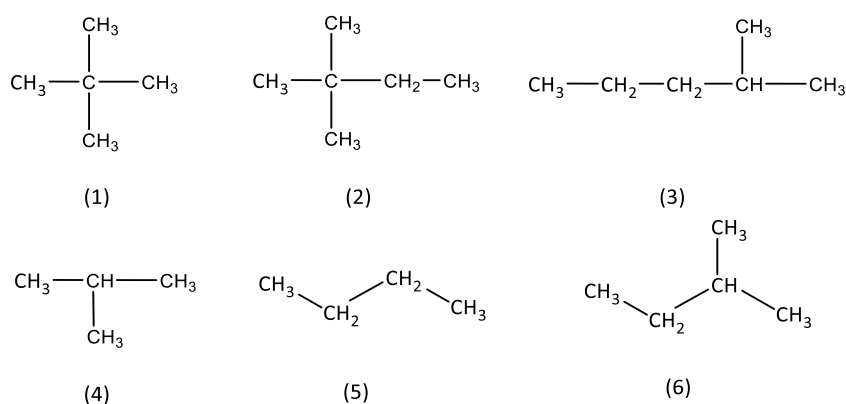


Figure 3.8 : Pourcentage d'élèves ayant donné une explication correcte, floue ou incorrecte à la question « Qu'est-ce qu'un isomère ? » (N = 259)

La figure 3.8 montre que moins d'un quart des élèves sait donner une définition claire et correcte de la notion d'isomère, cependant plus de la moitié des élèves semble avoir compris le concept d'isomérisation. Nous allons tester cette hypothèse grâce à la question suivante, qui demande d'appliquer le concept d'isomère à des molécules.

#### **Q8 : Reliez les différents isomères entre eux (N = 259)**

Trois paires d'isomères sont présentées aux étudiants afin qu'ils les identifient. Voici les six molécules telles que présentées dans le questionnaire :





Les paires d'isomères sont les molécules (1) et (6), (2) et (3), et (4) et (5). Une identification est considérée comme correcte lorsque les trois paires d'isomères sont correctement identifiées. La figure 3.9 indique la répartition des réponses fournies par les élèves.

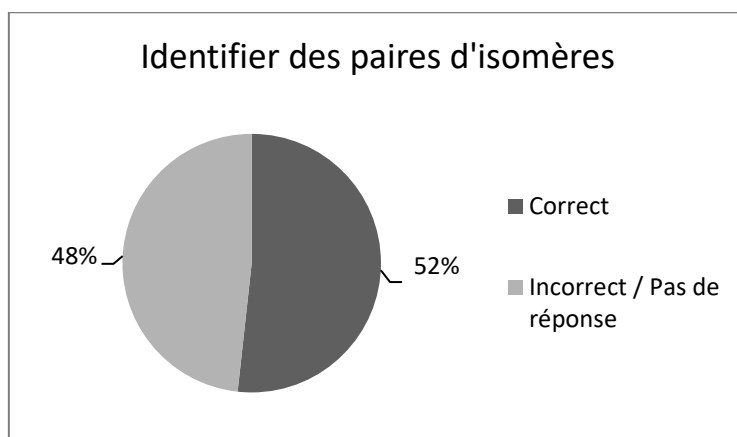


Figure 3.9 : Pourcentage d'élèves ayant correctement identifié les trois paires d'isomères présentées (N = 259)

La moitié des élèves sait identifier correctement les paires d'isomères. Les élèves n'ayant pas donné une définition correcte du terme « isomère » à la question précédente n'ont pas été capables d'identifier correctement les paires d'isomères, alors que la grande majorité des élèves ayant donné une définition « floue » ont répondu correctement à cette question, confirmant ainsi l'hypothèse précédente, à savoir que ces élèves ont effectivement compris ce qu'est un isomère mais ont du mal à l'exprimer correctement. Gardons cependant en mémoire qu'un biais est possible quant à la façon dont est posée la question. En effet, des élèves n'ayant pas forcément compris ce qu'est un isomère pourraient avoir identifié des paires de molécules en se basant sur un autre critère.

#### **Q9 : Dessinez tous les isomères de l'hexane (N = 259)**

Plutôt que de demander aux élèves d'identifier des isomères, nous pouvons également leur demander de dessiner différents isomères au départ d'une formule brute. Nous attendions ici qu'ils représentent les cinq isomères de l'hexane, sous n'importe quelle forme (formule développée, semi-développée, topologique...). La figure 3.10 montre, pour chacun des isomères, le pourcentage d'élèves l'ayant représenté.

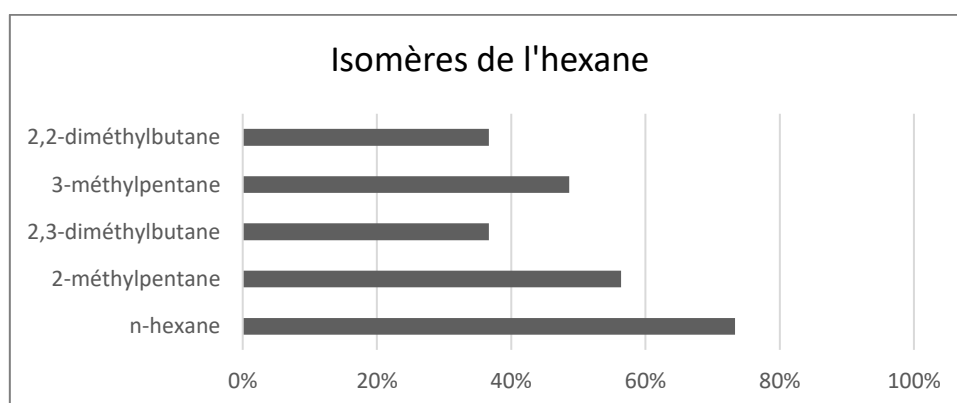


Figure 3.10 : Pourcentage d'élèves ayant représenté chacun des 5 isomères de l'hexane (N = 259)

Le n-hexane est l'isomère auquel la majorité des élèves pense (73%). Les deux pentanes substitués viennent ensuite (48% et 56%). Les deux isomères les moins souvent représentés sont les deux dérivés du butane (37%). De plus, seuls 16% des étudiants sont capables de trouver les 5 isomères. Ils sont seulement 20% à dessiner 4 des 5 isomères.

Nous avons également remarqué lors de l'encodage des réponses que certains élèves écrivent plusieurs fois la même molécule en pensant dessiner des molécules différentes (voir figure 3.11). 28% des élèves dessinent deux fois (et parfois trois fois !) la même molécule en pensant dessiner des isomères différents. La figure suivante présente les erreurs de ce type les plus fréquentes chez les élèves, à savoir la représentation du 3-méthylpentane (35% des erreurs), du n-hexane (27% des erreurs) et du 2-méthylpentane (14% des erreurs) selon différentes orientations.

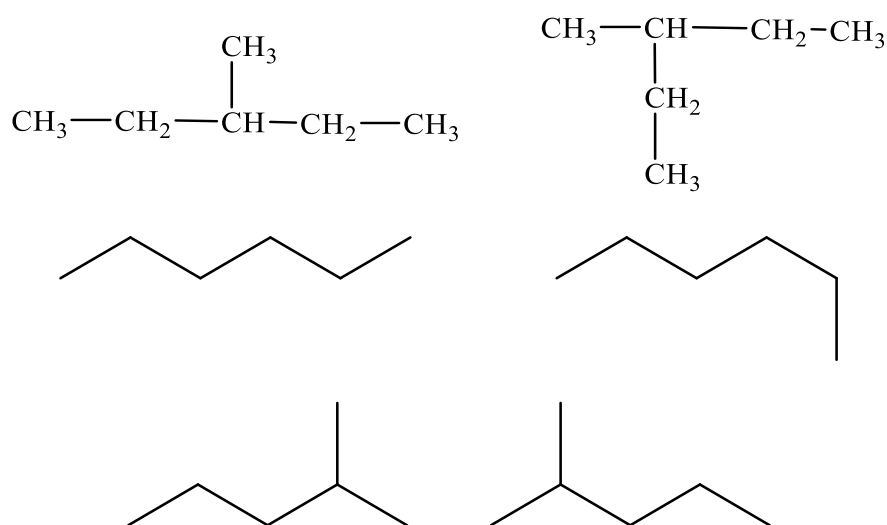


Figure 3.11 : Exemples de représentations utilisées par des élèves pour dessiner ce qu'ils pensent être des isomères, la molécule de gauche étant chaque fois « l'isomère » de la molécule de droite

#### **Q10 : Dessinez les molécules de formule brute $C_4H_8$ (N = 243)**

Cette question est similaire à la question précédente demandant aux élèves de dessiner les isomères de l'hexane, mais elle s'applique désormais à un alcène et ne mentionne pas le terme « isomère » dans l'énoncé de la question. Il y a également 5 isomères possibles (4 alcènes et un cycloalcane). Lorsque les élèves ne font pas la distinction entre le cis-but-2-ène et le trans-but-2-ène (utilisation de la formule semi-développée, par exemple), nous considérons par défaut qu'il s'agit du cis-but-2-ène pour l'encodage.

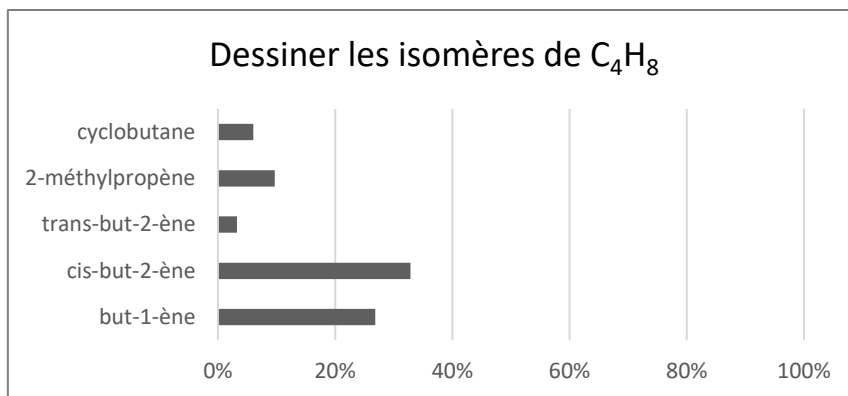


Figure 3.12 : Pourcentage d'élèves ayant représenté chacun des 5 isomères du C<sub>4</sub>H<sub>8</sub> (N = 243)

La figure 3.12 montre que moins de la moitié des élèves sait dessiner un des isomères demandés. En effet, plus de la moitié des élèves laissent leur feuille blanche pour cette question. De plus, pas un seul élève ne parvient à trouver les 5 isomères, et seuls 2 élèves en donnent quatre. Nous constatons que les résultats sont bien inférieurs à ceux de la question précédente, portant sur les isomères de l'hexane.

**Q11 : Donnez un exemple d'alcool primaire, secondaire et tertiaire (N = 228)**

Les élèves doivent ici donner un exemple d'alcool primaire, secondaire et tertiaire. Il n'est pas précisé la forme de la réponse souhaitée, ils peuvent donc aussi bien donner un nom qu'une structure. La grande majorité des réponses ont été données sous la forme d'une structure semi-développée, nous traiterons donc cette question dans la partie concernant la structure. De plus, même si la réponse est donnée sous forme de nom, il est important de savoir se la représenter pour déterminer s'il s'agit d'un alcool primaire, secondaire ou tertiaire.

La figure 3.13 montre le pourcentage d'élèves qui sont capables de donner un exemple correct pour chacune des catégories demandées :

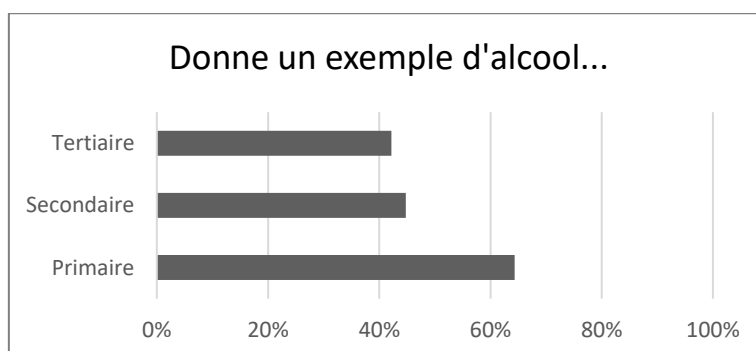


Figure 3.13 : Pourcentage d'élèves donnant un exemple correct d'un alcool primaire, secondaire ou tertiaire (N = 228)

La majorité des élèves sait donner un exemple d'alcool primaire, mais moins de la moitié peut donner un exemple d'alcool secondaire ou tertiaire, et seuls 36% des élèves ont donné un exemple correct pour les trois alcools demandés. La notion d'alcool primaire, secondaire ou tertiaire ne semble donc pas acquise pour la majorité d'entre eux.

### **Q12 : Identifiez les fonctions présentes (N = 246 à 363)**

Une molécule de chaque fonction vue au cours est présentée à l'élève. Le nombre d'élèves ayant répondu pour chaque fonction est donc variable en fonction du nombre de fonctions vues dans son école et dans l'année en cours. Ainsi, nous n'avons pas demandé aux élèves de 6<sup>ème</sup> année d'identifier un alcane ou un alcène, fonctions vues en 5<sup>ème</sup> année et non revues lors de l'année en cours. La figure 3.14 indique le pourcentage d'élèves identifiant correctement chaque fonction.

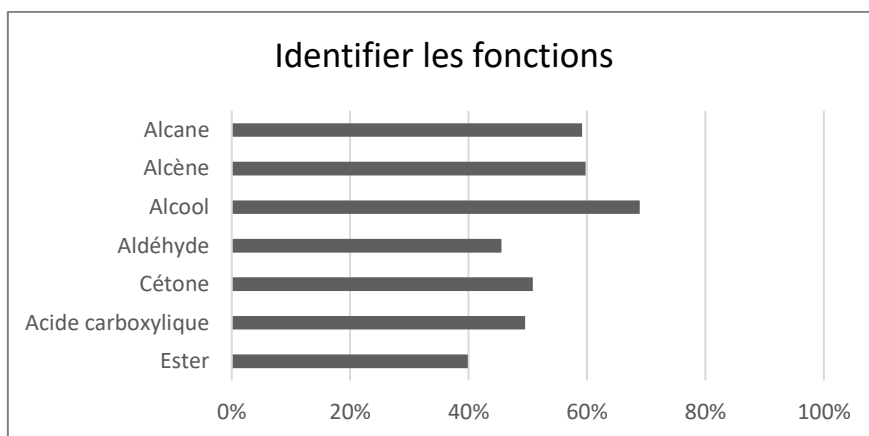


Figure π : Pourcentage d'élèves identifiant correctement chacune des fonctions présentées (N = 246 pour l'alcane et l'alcène, N = 338 pour l'aldéhyde, N = 363 pour la cétone et l'alcool, N = 311 pour l'acide carboxylique et l'ester)

La fonction la mieux identifiée par les élèves est l'alcool (69%), suivie par l'alcane et l'alcène (59%). Viennent ensuite la cétone et l'acide carboxylique (50%). L'aldéhyde (45%) et l'ester (40%) sont bons derniers. Les trois fonctions les mieux identifiées sont les trois fonctions abordées en premier lieu dans le cours, et donc probablement les plus familières pour les élèves. Les fonctions oxygénées du bas du classement sont facilement confondues les unes avec les autres.

### **Récapitulatif des réponses au thème 2**

L'analyse des différentes réponses des élèves aux questions portant sur la structure des molécules organiques met en avant quelques problèmes :

- Près de la moitié des élèves ne sait pas ce qu'est un isomère (ils ne peuvent ni donner une définition correcte, ni identifier des isomères).
- Plus d'un quart des élèves pense dessiner deux isomères alors qu'ils dessinent deux fois la même molécule.
- Seul un élève sur 6 est capable de dessiner les 5 isomères de l'hexane tandis qu'aucun élève ne sait dessiner ceux du butène.
- Seul un tiers des élèves donne un exemple correct d'un alcool primaire, secondaire et tertiaire
- Environ la moitié des élèves identifie correctement les différentes fonctions organiques présentes dans une molécule.

De manière plus quantitative, le pourcentage moyen de réponses correctes lors de cette première partie s'élève à 30%, ce qui est similaire au thème précédent.

### **Thème 3 : Propriétés des molécules organiques**

Le thème suivant concerne les différentes propriétés physiques et chimiques des molécules organiques, telles que leur température d'ébullition, leur polarité ou encore leur capacité à former des liaisons hydrogène. Ces différentes propriétés s'expliquent grâce à des notions de chimie générale qui devraient avoir été vues précédemment.

Voici la liste des 4 questions concernées :

- Q13 – Classez les alcanes suivants par ordre croissant de température d'ébullition  
Q14 – Laquelle de ces molécules a la température d'ébullition la plus élevée ?  
Q15 – Parmi les fonctions suivantes, entourez celles qui sont polaires.  
Q16 – Parmi les molécules suivantes, entourez celles qui peuvent faire des liens H.

#### **Q13 – Classez les alcanes suivants par ordre croissant de température d'ébullition (N = 240)**

Différentes formules brutes d'alcanes sont proposées aux élèves qui doivent les classer par ordre croissant de température d'ébullition. La figure 3.15 indique la répartition des réponses des élèves.

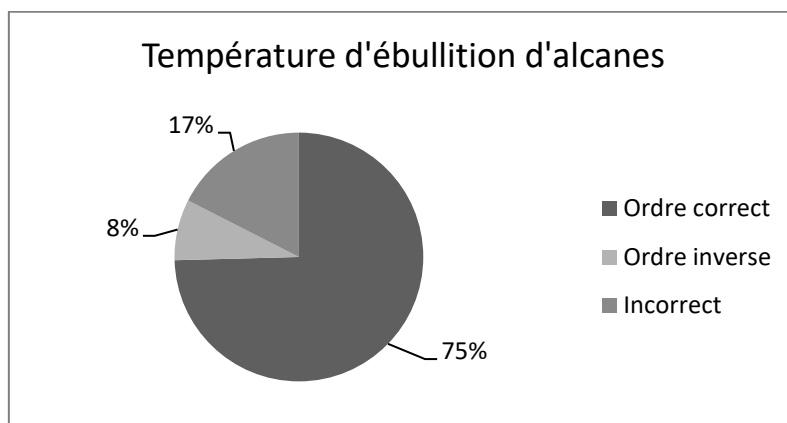


Figure 3.15 : Pourcentage d'élèves ayant classé les différents alcanes proposés dans l'ordre correct, l'ordre inverse et dans un ordre incorrect de température croissante d'ébullition (N = 240)

Une grande majorité d'élèves (75%) sait classer les alcanes par ordre de température d'ébullition. Un petit nombre d'entre eux les ordonne dans le mauvais sens. On peut se demander si le terme « croissant » utilisé dans l'énoncé est bien compris par tous les élèves, il est donc délicat de postuler que les 8% ayant donné l'ordre inverse ne connaissent pas la règle concernant les températures d'ébullition, ils ont peut-être simplement confondu les termes « croissant » et « décroissant ».

#### **Q14 – Laquelle de ces molécules a la température d'ébullition la plus élevée ? (N = 346)**

La formule brute d'un alcane et de l'alcool correspondant sont présentées aux élèves. On leur demande de donner la molécule qui a la température d'ébullition la plus élevée et de justifier leur choix. La figure 3.16 montre le pourcentage d'élèves ayant répondu et justifié correctement leur réponse.

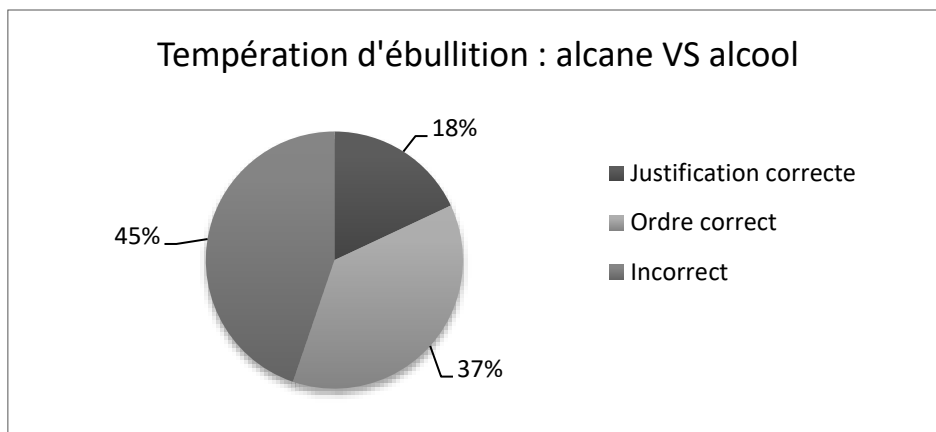


Figure 3.16 : Pourcentage d'élèves ayant correctement justifié et identifié, identifié sans justification et incorrectement identifié l'alcool comme ayant une température d'ébullition plus élevée que l'alcane correspondant (N = 346)

Plus de la moitié des élèves ont répondu correctement, mais seulement 18% d'entre eux peuvent justifier correctement leur réponse, à savoir que l'alcool fait plus d'interactions de Van der Waals, il peut faire des liaisons hydrogène et cela demande donc plus d'énergie pour séparer les molécules d'alcool et donc pour les faire passer en phase gazeuse.

**Q15 – Parmi les molécules suivantes, entourez celles qui sont polaires (N = 315)**

Quatre molécules reprenant quatre fonctions organiques (alcane et alcène apolaires, alcool et acide carboxylique polaires) sont représentées aux élèves qui doivent identifier les molécules polaires. La figure 3.17 montre la répartition des réponses des élèves.

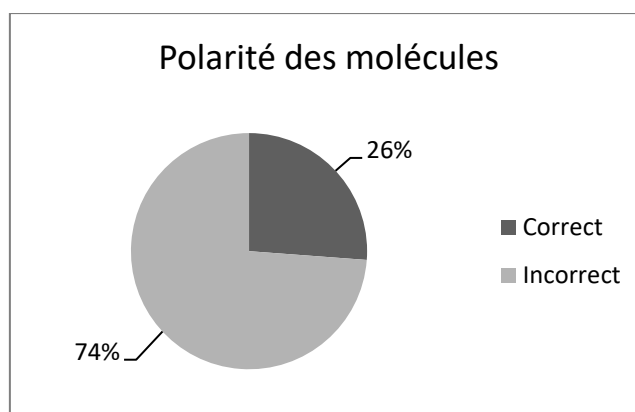
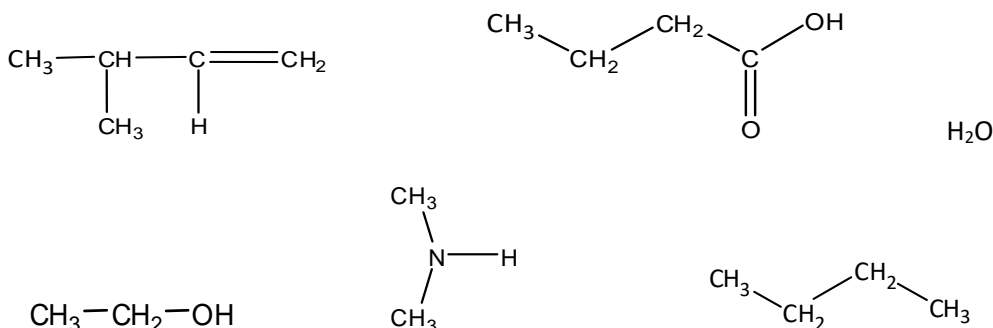


Figure 3.17 : Pourcentage d'élèves identifiant correctement les molécules polaires (N = 315)

Seul un quart des élèves identifie correctement les alcools et les acides carboxyliques comme étant polaires. Cependant, cette question devrait être reformulée en présentant diverses structures moléculaires aux élèves afin de voir s'ils ont une réelle compréhension de ce qu'est une molécule polaire, ou bien s'ils ont simplement appris que telle fonction est polaire, et telle autre ne l'est pas.

**Q16 – Parmi les molécules suivantes, entourez celles qui peuvent faire des liens H (N = 312)**

Une autre propriété importante, que ce soit en chimie organique ou en chimie générale, est la capacité d'une molécule à former des liaisons hydrogène. Les six molécules suivantes sont présentées aux élèves. Il leur est demandé d'entourer celles qui sont capables de faire des liens H :



La figure 3.18 montre le pourcentage d'élèves ayant entouré chacune des molécules :

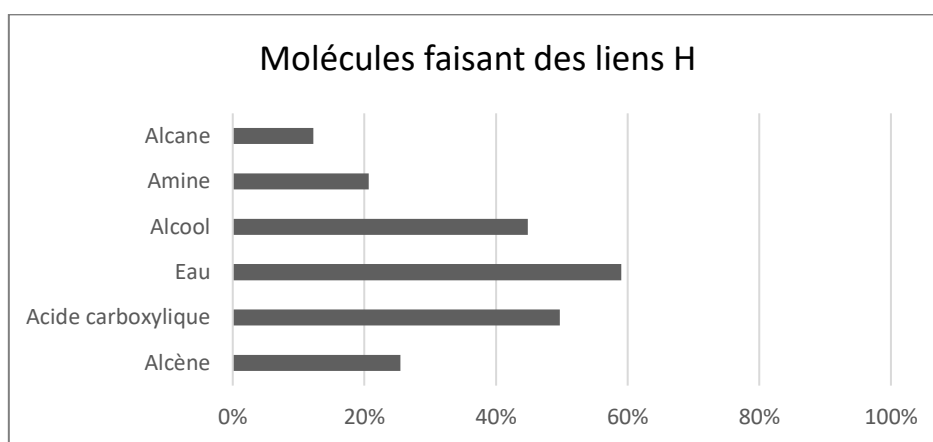


Figure 3.18 : Pourcentage d'élèves ayant identifié chaque molécule comme étant capable de faire des liaisons hydrogène (N = 312)

L'eau est identifiée correctement par plus de la moitié des élèves, mais l'acide carboxylique et l'alcool ne sont identifiés que par une petite moitié d'élèves. L'amine n'est identifiée que par 20% des élèves. Cette différence peut s'expliquer par le fait que la fonction amine n'est pas vue telle quelle dans le cours de chimie organique, excepté dans quelques écoles. Plus de 25% des élèves pensent qu'un alcène peut faire des liens H et 12% pensent qu'un alcane peut faire des liens H.

**Récapitulatif des réponses du thème 3**

L'analyse des différentes réponses des élèves aux questions portant sur les propriétés des molécules organiques met en avant quelques problèmes quant aux notions de chimie générale qu'elles impliquent :

- Les trois quarts des élèves savent classer des alcanes en fonction de leur température d'ébullition, mais seulement un élève sur cinq est capable d'expliquer pourquoi un alcool a une température d'ébullition plus élevée que l'alcane correspondant.
- Seulement un quart des élèves sait quelles fonctions organiques sont polaires.

- Les conditions requises pour qu'une molécule soit capable d'effectuer une liaison hydrogène ne sont pas comprises par les élèves ; seulement 6% d'entre eux identifient correctement toutes les molécules capables d'effectuer de telles liaisons.

De manière plus quantitative, le pourcentage moyen de réponses correctes lors de cette première partie s'élève à 31%, ce qui est similaire aux deux premiers thèmes.

#### **Thème 4 : Réactions organiques**

Toutes les questions se rapportant à une réaction sont regroupées sous ce thème. Il a été constaté précédemment que les notions liées aux réactions entre molécules organiques, et plus tard le mécanisme derrière ces réactions, sont une des difficultés majeures dans l'apprentissage de la chimie organique. Afin de mieux caractériser les différents problèmes auxquels les élèves sont confrontés, nous avons décidé de diviser ce thème en fonction des différentes aptitudes auxquelles les élèves doivent faire appel pour répondre aux différentes questions. Nous présentons donc 3 sous-catégories en nous basant sur les trois types de processus présentés dans le nouveau référentiel de compétences :

- Catégorie A : restitution
- Catégorie B : application
- Catégorie C : transfert

#### ***Catégorie A – Restitution***

Nous retrouvons dans cette catégorie les questions demandant aux élèves de restituer quelque chose qui a été vu tel quel au cours, par exemple par quel type de réaction on peut synthétiser telle ou telle fonction, l'écriture ou l'identification d'une réaction vue en cours.

Voici la liste des 6 questions concernées :

- Q17 – Écrivez l'équation de combustion complète du  $C_6H_{14}$ .  
 Q18 – Comment fabrique-t-on des alcools ?  
 Q19 – Quel est le produit de l'oxydation d'un alcool primaire ?  
 Q20 – Par quel type de réaction peut-on synthétiser un acide carboxylique ?  
 Q21 – Comment s'appelle la réaction qui permet d'obtenir un ester ?  
 Q22 – Nommez les différentes réactions permettant de passer d'une fonction à l'autre.

Certaines questions peuvent sembler sortir du cadre de la simple restitution. Nous avons néanmoins choisi de les placer dans ce thème car l'enseignement se fait de telle sorte que les élèves ont appris « par cœur » qu'un alcool se fabrique par fermentation, ou encore qu'un alcool primaire s'oxyde en aldéhyde puis en acide carboxylique (par exemple).

#### **Q19 – Écrivez l'équation de combustion complète du $C_6H_{14}$ (N = 263)**

Il était attendu des élèves qu'ils écrivent l'équation suivante :  $C_6H_{14} + 19/2 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 7 H_2O$ . L'état physique des différentes molécules n'était pas demandé et n'est donc pas pris en compte dans l'encodage des réponses. Certains élèves écrivent simplement que la réaction nécessite de l'oxygène



mais ne se souviennent plus des produits (codé comme « Ajout de O<sub>2</sub> »). La réaction est parfois écrite dans le sens inverse. Comme l'indique la figure 3.19, l'erreur la plus fréquente est une erreur de stœchiométrie, mais cette erreur ne nous intéresse pas dans le cadre de cette thèse, car nous nous intéressons uniquement aux erreurs liées à la chimie organique et pas aux erreurs de stœchiométrie. La moitié des élèves connaît donc les différents réactifs impliqués dans une réaction de combustion ainsi que les produits d'une telle réaction.

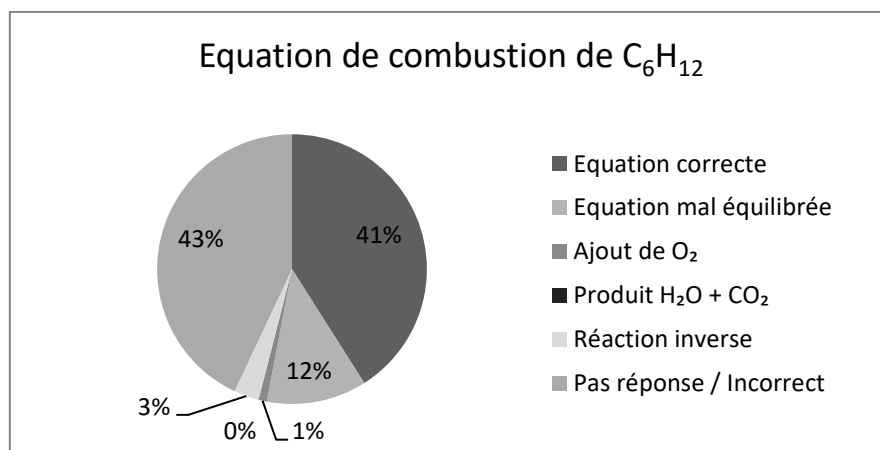


Figure 3.19 : Répartition des réponses des élèves à la demande d'écriture d'une équation de combustion (N = 263)

### **Q18 – Comment fabrique-t-on des alcools ? (N = 319)**

Les alcools sont abordés de diverses façons dans les écoles. Par cette question, nous désirons voir si les élèves sont capables de donner une manière de fabriquer un alcool (la question est volontairement posée de manière très large), et de déterminer quelle est la méthode qui revient le plus souvent. Les réponses des élèves sont reprises sur la figure 3.20.

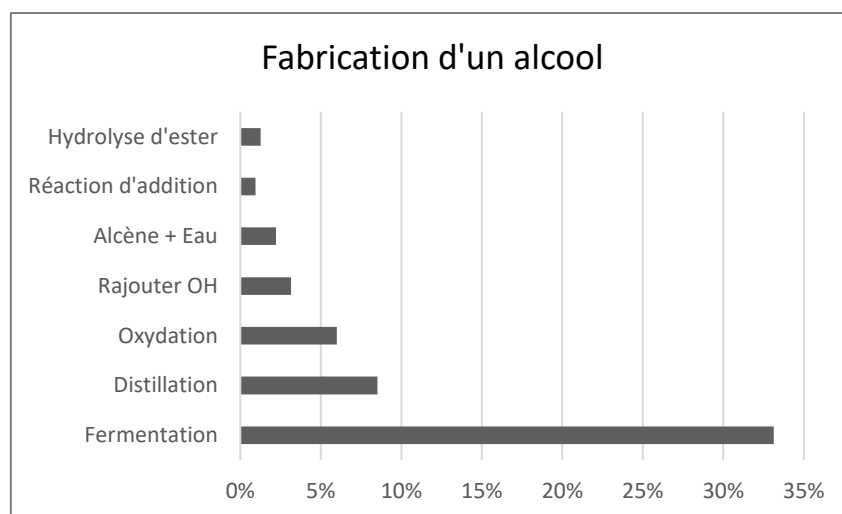


Figure 3.20 : Méthodes proposées par les élèves pour fabriquer un alcool (N = 319)

Un peu moins de la moitié des élèves (44%) donne une réponse correcte. Nous remarquons que pour 3% des élèves, il faut « rajouter OH » pour faire un alcool. Ils ont bien enregistré ce qu'est une fonction

alcool, par contre ils n'ont pas compris qu'une réaction chimique ne consiste pas juste à « rajouter » une liaison.

La méthode de fabrication majoritairement donnée parmi les élèves est la fermentation (33%). La distillation est également proposée (8%) ; bien qu'elle ne permette pas de fabriquer un alcool à partir d'une autre molécule, elle est utilisée pour passer d'un alcool à un alcool d'une pureté supérieure, il y a donc une certaine logique dans cette réponse. Quelques élèves proposent directement une réaction pour arriver à un alcool. Des réactions d'oxydation (6%) ou d'addition (1%) sont proposées, mais la réponse n'est pas assez précise pour savoir si l'élève sait réellement quelle oxydation ou quelle addition il faut effectuer pour obtenir un alcool. Certains élèves pensent à faire une hydrolyse d'ester (1%) ou à faire réagir un alcène avec de l'eau (2%), ce qui est également correct.

### **Q19 – Quel est le produit de l'oxydation d'un alcool primaire ? (N = 265)**

L'oxydation d'un alcool primaire est une réaction enseignée dans la plupart des écoles. Elle mène tout d'abord à un aldéhyde et, si l'oxydation est poursuivie, elle donne un acide carboxylique. Les deux réponses sont donc correctes, et les élèves peuvent dès lors donner plusieurs réponses correctes. Certains élèves semblent avoir associé « oxydation » avec « combustion », et donnent donc comme réponse qu'on obtient du  $\text{CO}_2$  et de l'eau. La répartition des réponses est présentée sur la figure 3.21.

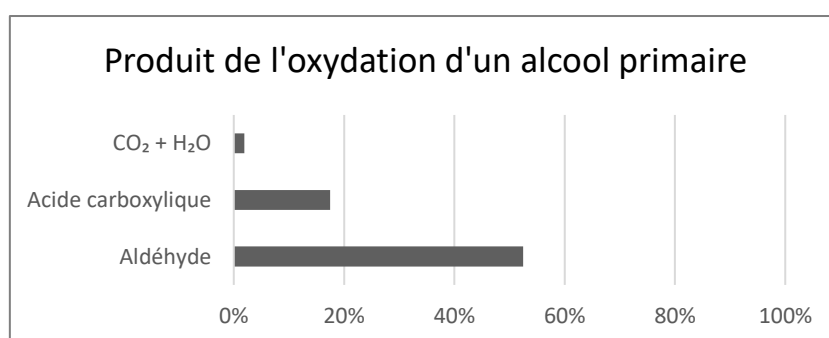


Figure 3.21 : Produits de l'oxydation d'un alcool primaire selon les élèves (N = 265)

Plus de la moitié des élèves donnent l'aldéhyde comme réponse, 17% des élèves donnent l'acide carboxylique, et 2% pensent qu'il s'agit d'une combustion. 10% des élèves ont compris que l'on peut obtenir un aldéhyde ou un acide carboxylique et donnent les deux réponses. 40% des élèves ne donnent aucune réponse.

### **Q20 – Par quel type de réaction peut-on synthétiser un acide carboxylique ? (N = 294)**

Cette fois, il est demandé aux élèves de trouver une réaction qui permette d'obtenir un acide carboxylique. La réponse logiquement attendue serait l'oxydation d'un alcool primaire ou d'un aldéhyde. La figure 3.22 présente les différentes réponses des élèves.

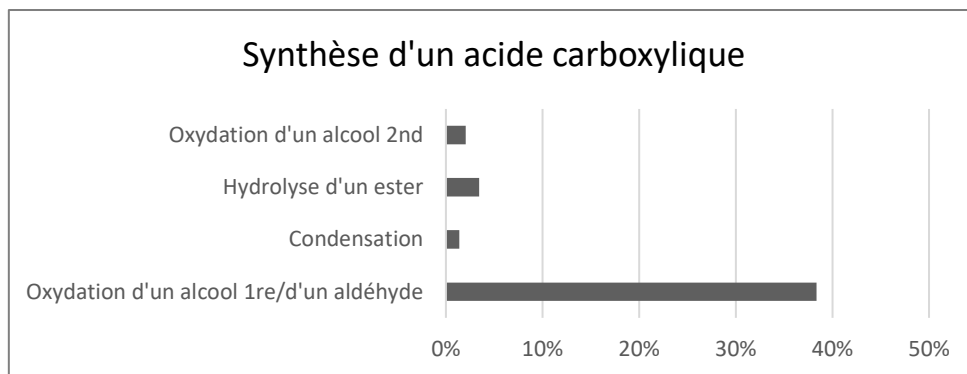


Figure 3.22 : Méthodes de synthèse d'un acide carboxylique proposées par les élèves (N = 294)

Comme nous le pensions, la réponse majoritaire est l'oxydation d'un alcool primaire ou d'un aldéhyde (38%). Certains élèves parlent de l'oxydation d'un alcool secondaire (2%), ce qui est incorrect ou d'une « condensation » (1%), réponse qui est trop vague mais probablement incorrecte au vu des réactions enseignées dans le secondaire. Une autre réponse correcte est d'inverser la réaction d'estérification et donc d'effectuer l'hydrolyse d'un ester (3%). Plus de 40% des élèves émettent donc des propositions correctes.

#### **Q21 – Comment s'appelle la réaction qui permet d'obtenir un ester ? (N = 294)**

Après l'alcool et l'acide carboxylique, nous demandons maintenant aux élèves de donner une réaction permettant de former un ester. La réponse attendue était l'estérification. La figure 3.23 présente les différentes réponses des élèves.

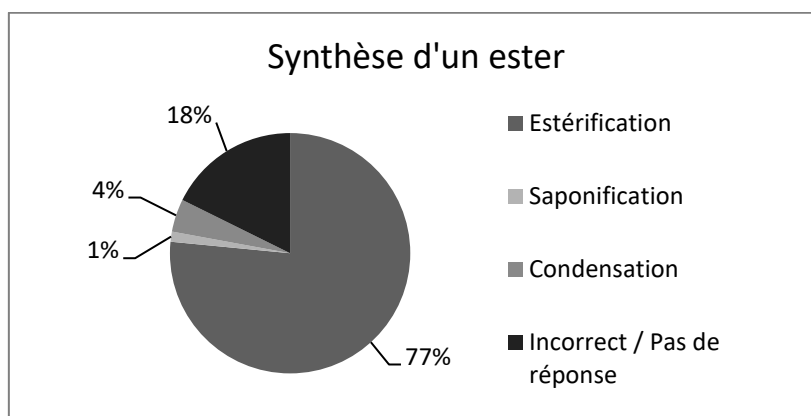
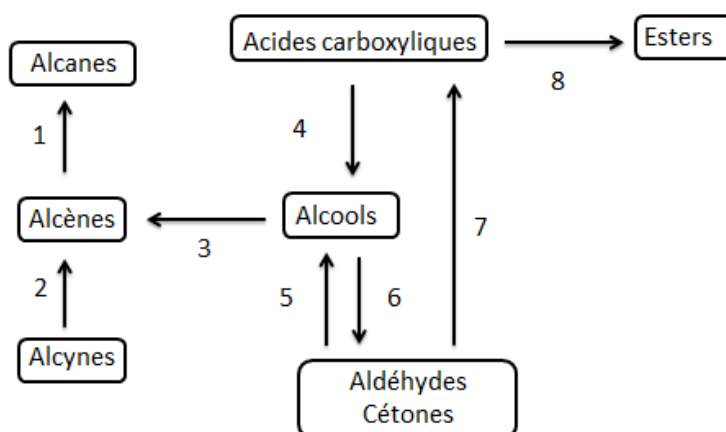


Figure 3.23 : Méthodes de synthèse d'un ester proposées par les élèves (N = 294)

La grande majorité des élèves fournit une réponse correcte (77%). Quelques élèves confondent avec la saponification (1%), qui implique un ester dans les réactifs, et certains élèves parlent d'une condensation (4%), ce qui peut être correct mais la réponse est trop vague que pour être considérée comme exacte. La restitution semble donc ici bien ancrée, nous n'avons cependant aucune information sur leur compréhension de cette réaction.

### Q22a – Nommez les différentes réactions permettant de passer d’une fonction à l’autre (N = 188)

Cette question propose aux élèves d’établir des liens entre les réactions permettant de passer d’une fonction à l’autre. Certaines réactions sont enseignées telles quelles en cours alors que d’autres ne le sont pas. Nous analyserons ici les réactions numéro 6, 7 et 8, qui sont vues en cours. Les réponses attendues de la part des élèves sont une réaction d’oxydation (6 et 7) et une réaction d’estérification (8). Les autres réactions seront analysées dans une autre catégorie.



La figure 3.24 indique les pourcentages de réponses correctes pour ces 3 réactions.

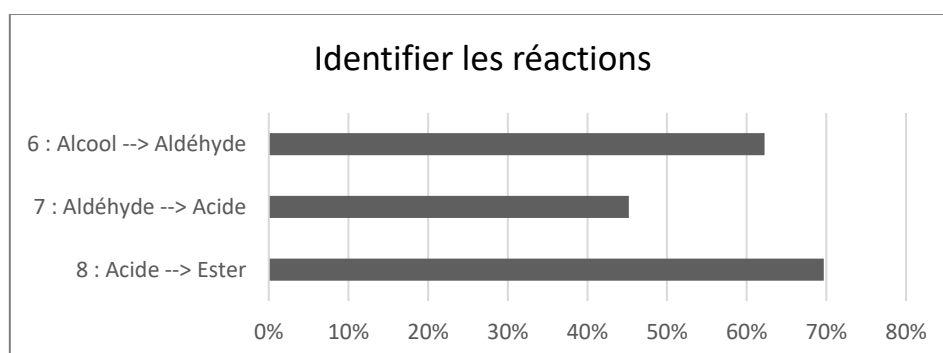


Figure 3.24 : Pourcentage d’élèves identifiant correctement les réactions indiquées (N = 188)

70% des élèves identifient correctement l’estérification, 62% identifient correctement l’oxydation pour passer d’un alcool à un aldéhyde, et seulement 45% savent que c’est également une oxydation qui permet de passer de l’aldéhyde à l’acide carboxylique.

### Catégorie B – Application

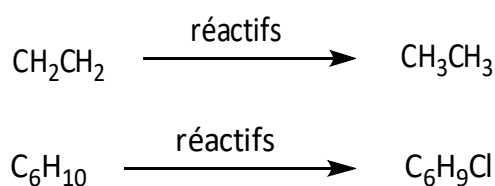
Cette deuxième catégorie regroupe les questions incitant les élèves à appliquer des règles ou à écrire une réaction au départ d’un réactif ou pour obtenir un produit particulier. La réaction a été vue de manière générale au cours, mais pas forcément sur la molécule du questionnaire.

Voici la liste des 6 questions concernées :

- Q23 – Les réactions suivantes sont-elles des réactions d'addition ?  
 Q24 – Écrivez le(s) produit(s) de ces réactions.  
 Q25 – Quel est le produit majoritaire de cette réaction ?  
 Q26 – Au départ du propylène, dessinez la structure du polymère correspondant.  
 Q27 – Écrivez la réaction permettant d'obtenir du propanoate d'éthyle.  
 Q28 – Écrivez une réaction de saponification.

**Q23 – Les réactions suivantes sont-elles des réactions d'addition ? (N = 166)**

Les deux réactions suivantes sont présentées aux élèves :



Il est demandé aux élèves d'identifier correctement la première réaction comme étant une addition, mais pas la deuxième. Les deux réactions doivent être identifiées correctement pour que la réponse à la question soit considérée comme correcte. La figure 3.25 montre la répartition des réponses des élèves.

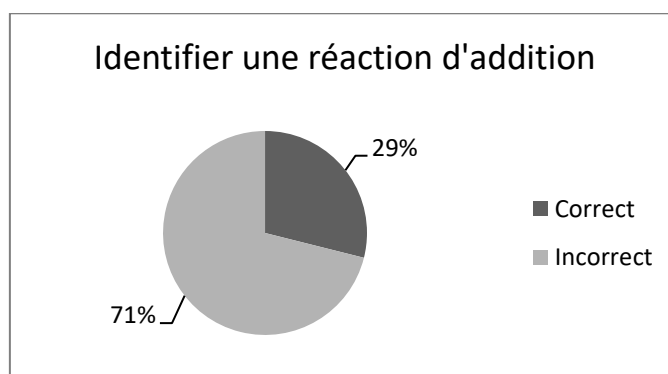


Figure 3.25 : Pourcentage d'élèves identifiant correctement une réaction comme étant une réaction d'addition (N = 166)

Seuls 29% des élèves savent identifier une réaction d'addition, alors que c'est un des premiers types de réactions abordés au cours de chimie organique, par le biais de l'addition sur alcènes.

**Q24 – Écrivez le(s) produit(s) de ces réactions (N = 189)**

Trois réactions d'addition sur alcène sont proposées aux élèves, avec trois réactifs différents. Il est demandé aux élèves d'écrire la structure du produit de chaque réaction. Le taux de bonne réponse correspondant à chaque réactif est indiqué sur la figure 3.26 (la règle de Markovnikov n'est pas prise en compte dans cette question) :

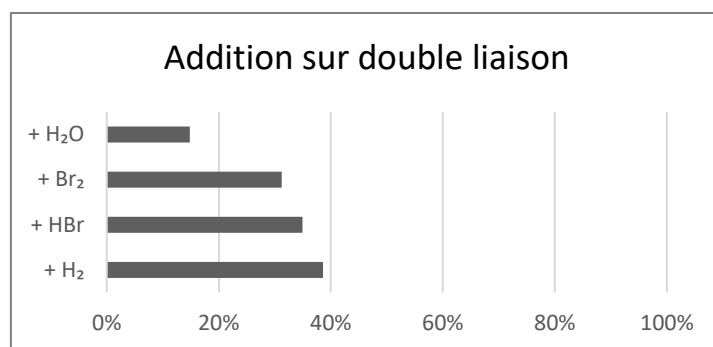


Figure 3.26 : Pourcentage d'élèves écrivant correctement la structure du produit de l'addition demandée (N = 189)

Entre 30 et 40% des élèves savent effectuer une réaction d'addition de H<sub>2</sub>, de HBr ou de Br<sub>2</sub>, et 27% des élèves effectuent correctement les trois additions demandées.

### **Q25 – Quel est le produit majoritaire de cette réaction ? (N = 127)**

Une réaction d'addition similaire aux précédentes est proposée aux élèves. Cette fois, il s'agit d'une addition d'HCl. Le but de cette question est maintenant de voir si la règle de Markovnikov (l'hydrogène s'additionne sur le carbone le moins substitué) est correctement appliquée par les élèves. Les réponses correctes ne sont donc que celles dont l'addition a été effectuée en respectant la règle de Markovnikov. La figure 3.27 montre la répartition des réponses des élèves.

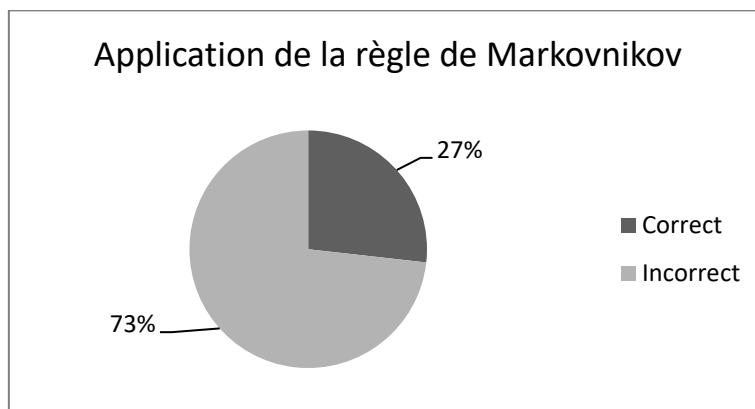


Figure 3.27 : Pourcentage d'élèves ayant appliqué la règle de Markovnikov lors de l'addition de HCl sur un alcène (N = 127)

27% des élèves ont effectué l'addition correctement. En comparant ce pourcentage avec les réponses correctes lors de l'addition de HBr à la question précédente (35%), on constate que 77% des élèves ont effectué l'addition correctement selon Markovnikov, et donc que 23% des élèves appliquent la règle dans le mauvais sens (ou ne l'appliquent pas du tout). Nous remarquons ici que la majorité des élèves savent appliquer une règle qu'on leur demande d'apprendre par cœur sans la comprendre, étant donné que la rationalisation de la règle de Markovnikov, à savoir le passage par un carbocation lors du mécanisme de l'addition, n'est pas enseignée dans le secondaire. On peut donc s'interroger sur la pertinence d'introduire cette règle dans le secondaire, laquelle n'est d'ailleurs pas prévue par les référentiels.

**Q26 – Au départ du propylène, dessinez la structure du polymère correspondant (N = 162)**

La structure du propylène est présentée aux élèves, structure à partir de laquelle il leur est demandé de dessiner le polymère correspondant. La figure 3.28 indique la répartition des réponses des élèves.

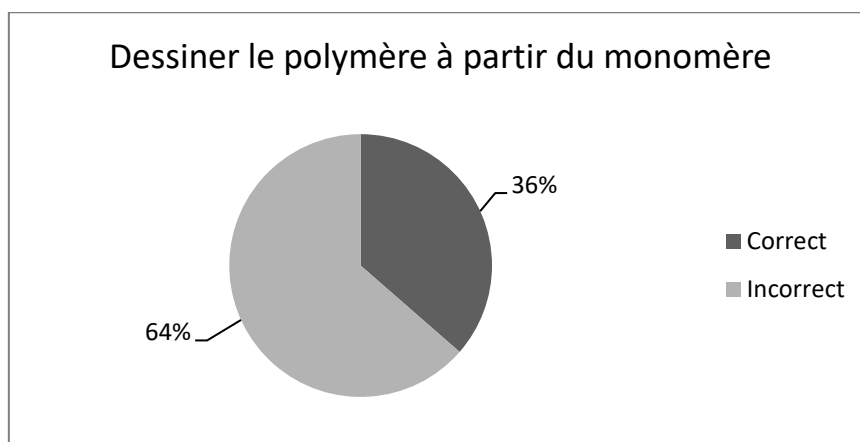


Figure 3.28 : Pourcentage d'élèves représentant correctement le polymère à partir du monomère proposé (N = 162)

Un tiers des élèves sait passer correctement du monomère au polymère.

**Q27 – Écrivez la réaction permettant d'obtenir du propanoate d'éthyle (N = 294)**

Nous avons précédemment demandé aux élèves par quelle réaction nous pouvons préparer un ester. 77% des élèves étaient capables de donner une bonne réponse. Nous leur demandons maintenant d'écrire une réaction d'estérification. La figure 3.29 montre la répartition des réponses des élèves.

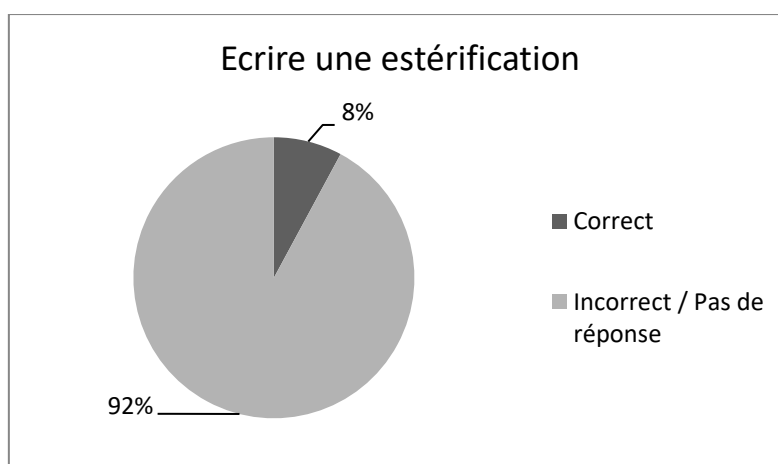


Figure 3.29 : Pourcentage d'élèves écrivant correctement la synthèse du propanoate d'éthyle (N = 294)

Seuls 8% des élèves sont capables d'écrire une réaction d'estérification. Si la pure mémorisation semble clairement acquise, il en va donc tout autrement de la réelle maîtrise du concept.

**Q28 – Écrivez une réaction de saponification (N = 240)**

La réaction de saponification est un des thèmes importants du chapitre de chimie organique dans beaucoup d'écoles. Cette réaction devrait donc être bien maîtrisée par les élèves. Nous leur

demandons ici d'écrire une réaction de saponification de manière générale. La figure 3.30 indique la répartition des réponses des élèves.

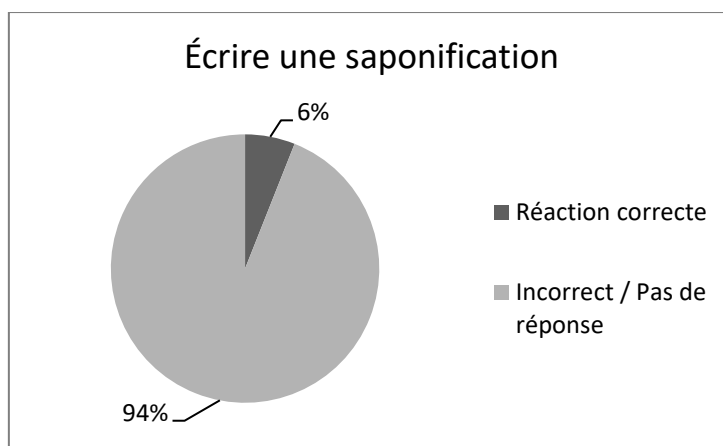


Figure 3.30 : Pourcentage d'élèves écrivant correctement une réaction de saponification (N = 240)

Seulement 6% des élèves savent écrire une réaction de saponification. La maîtrise de cette réaction est donc clairement insuffisante.

### ***Catégorie C – Transfert***

Cette dernière catégorie regroupe les questions dont les élèves n'ont pas établi les réponses telles quelles au cours, mais pour lesquelles ils peuvent les déduire en réfléchissant. Par exemple, ils ont vu que l'oxydation d'un alcool donne un aldéhyde, ils savent que l'inverse d'une oxydation est une réduction, ils peuvent donc en déduire que pour passer d'un aldéhyde à un alcool, il faut faire une réduction.

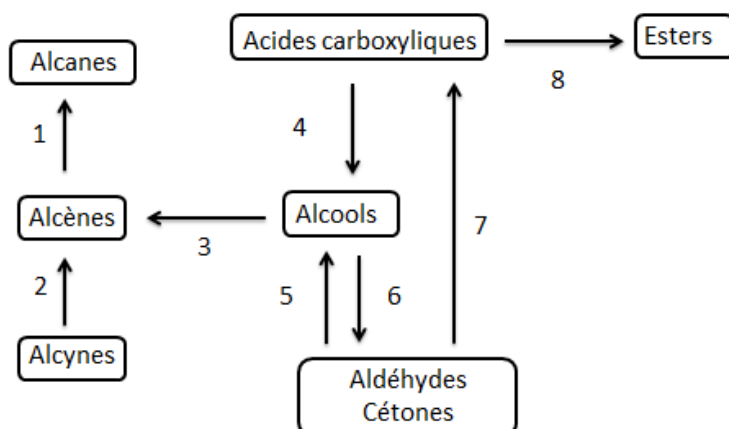
Voici la liste des 3 questions concernées :

- |   |
|---|
| <p>Q22b – Nommez les différentes réactions permettant de passer d'une fonction à l'autre.<br/>Q29 – Quelle réaction dois-je faire pour préparer de l'hexane ?<br/>Q30 – Quelle réaction dois-je faire pour préparer du butène ?</p> |
|---|

### **Q22b – Nommez les différentes réactions permettant de passer d'une fonction à l'autre (N= 169/188)**

Dans cet énoncé, il est proposé aux élèves de nommer les réactions permettant de passer d'une fonction à l'autre. Certaines réactions sont enseignées telles quelles en cours alors que d'autres ne le sont pas. Nous analyserons ici les réactions numéro 1, 2, 3, 4 et 5, qui ne sont pas abordées directement en cours. Cependant, les élèves peuvent identifier correctement ces réactions en réfléchissant. Ils ont étudié l'hydrogénation des alcènes et des alcynes, ils savent donc identifier les réactions 1 et 2. Ils ont vu l'addition d'eau sur un alcène, ils peuvent donc identifier la réaction 3, qui est la déshydratation d'un alcool, ou une élimination d'eau. Ils ont également parlé des différentes oxydations, ils peuvent donc identifier les réactions 4 et 5 qui sont les réactions inverses, et donc des réductions.





La figure 3.31 indique les pourcentages de réponses correctes pour ces 5 réactions :

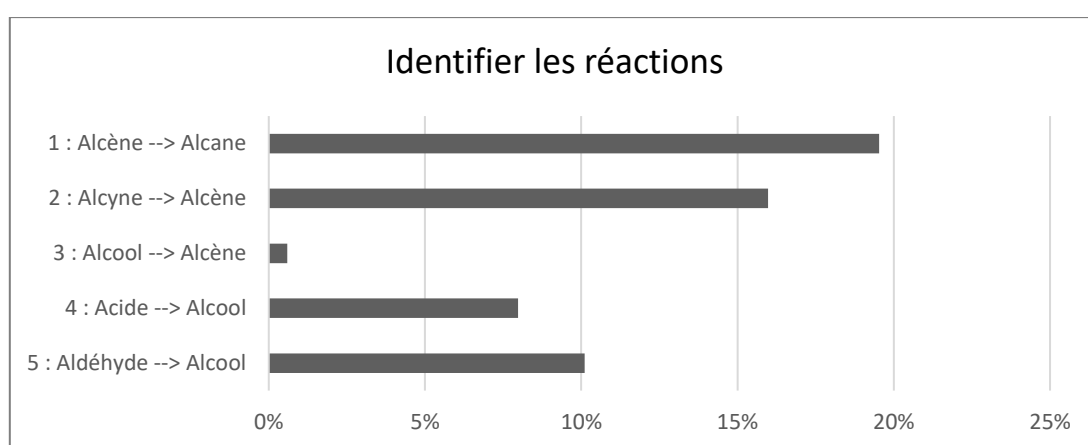


Figure 3.31 : Pourcentage d'élèves identifiant correctement les réactions indiquées (N = 169/188)

Le taux de réponses correctes ne dépasse jamais les 20%, ce qui indique clairement que les élèves ne sont pas capables d'identifier ces réactions.

### **Q29 – Quelle réaction dois-je faire pour préparer de l'hexane ? (N = 243)**

Nous demandons ici aux élèves d'imaginer un moyen de préparer un alcane. Ils n'ont pas directement abordé de réaction pour préparer un alcane, mais ils ont vu l'hydrogénation d'un alcène, dont le produit est un alcane. La figure 3.32 indique les réponses données par les élèves.

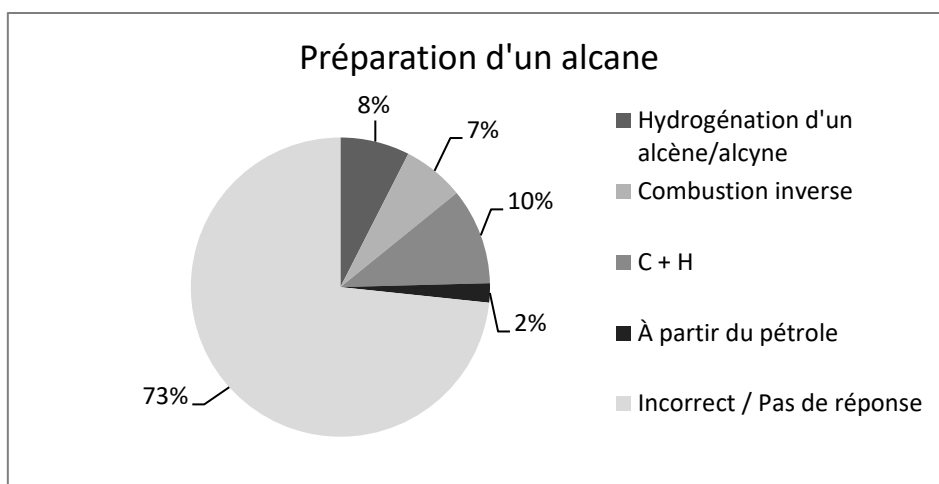


Figure 3.32 : Méthodes proposées par les élèves pour préparer de l'hexane (N = 243)

Moins de 10% des élèves donnent une réponse cohérente, à savoir l'hydrogénation d'un alcène (ou d'un alcyne) ou encore obtenir un alcane à partir du pétrole. Ce n'est pas à proprement parler une réaction, mais nous voulions voir si les élèves étaient capables de réfléchir à une façon d'obtenir un alcane, et c'est une réponse cohérente et réfléchie.

Nous observons que 10% des élèves pensent qu'il faut « du C et du H » pour faire un alcane. Cette réponse montre encore une fois que ces élèves n'ont pas compris le principe d'une réaction chimique. Il ne suffit pas de prendre tous les éléments et de créer des liaisons entre eux pour obtenir la bonne molécule.

7% des élèves écrivent une réaction de combustion dans le sens inverse. Ici, nous voyons que les élèves n'ont pas compris que toutes les réactions ne peuvent pas se faire dans les deux sens.

Nous constatons que la grande majorité des élèves (73%) n'a aucune proposition pour obtenir un alcane.

### **Q30 – Quelle réaction dois-je faire pour préparer du butène ? (N = 146)**

Cette question est similaire à la précédente, mais concerne la préparation d'un alcène. La réponse attendue est l'hydrogénation d'un alcyne. La figure 3.33 indique les différentes réponses proposées par les élèves.

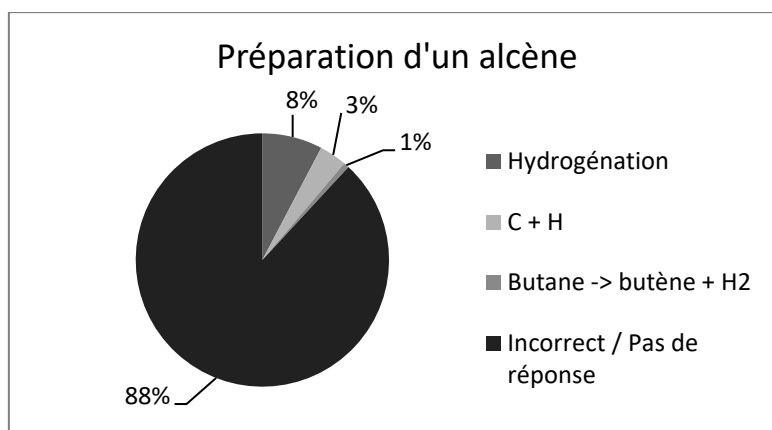


Figure 3.33 : Méthodes proposées par les élèves pour préparer du butène (N = 146)

8% des élèves donnent la réponse que nous attendions, à savoir l'hydrogénation d'un alcyne. 3% des élèves pensent qu'il faut « du C et du H ». 1% des élèves ont imaginé faire l'inverse d'une réaction d'hydrogénation d'un alcène. Nous observons que le taux de tentatives de réponses est encore plus bas que pour la question précédente.

#### **Récapitulatif des réponses au thème 4**

Sur l'ensemble des questions de la première catégorie (restitution), nous constatons que plus de la moitié des élèves peut répondre correctement, la moyenne de bonnes réponses étant de 54%. Au sein de la deuxième catégorie (application), le taux de réponses correctes ne s'élève pas au-dessus de 40% et peut descendre jusqu'à 6%. La moyenne pour ce thème est seulement de 22%. La troisième catégorie (transfert) présente les moins bons taux de réussite, avec une moyenne de 10%. Ces deux dernières catégories présentent les taux de réussite les plus faibles de tout le questionnaire. Si les questions de pure mémorisation pourraient laisser penser que ces concepts sont maîtrisés, les questions d'application et de transfert montrent au contraire qu'il n'en est rien.

L'analyse des différentes réponses des élèves aux questions portant sur les réactions organiques met en avant quelques problèmes :

- Un tiers des élèves n'a aucune idée de ce qu'est une réaction de combustion ;
- Plus de la moitié des élèves ne propose aucune réponse pour préparer un alcool ou un acide carboxylique ;
- 4 élèves sur 5 savent qu'il faut faire une estérification pour obtenir un ester mais seulement 8% des élèves savent écrire correctement une telle réaction ;
- 40% des élèves ne savent pas ce que donne l'oxydation d'un alcool primaire ;
- Moins d'un élève sur trois sait reconnaître une réaction d'addition et représenter le produit d'une telle réaction ;
- Un tiers des élèves sait représenter correctement le polymère obtenu à partir d'un monomère ;
- Seulement 6% des élèves savent écrire correctement une réaction de saponification ;
- Moins d'un élève sur dix propose une façon correcte de préparer un alcane ou un alcène ;
- La reconnaissance d'une réaction organique est très variable en fonction de la réaction présentée : près de 70% des élèves reconnaissent l'estérification mais pratiquement aucun élève ne sait nommer la déshydratation d'un alcool.

#### **Thème 5 : Nomenclature organique**

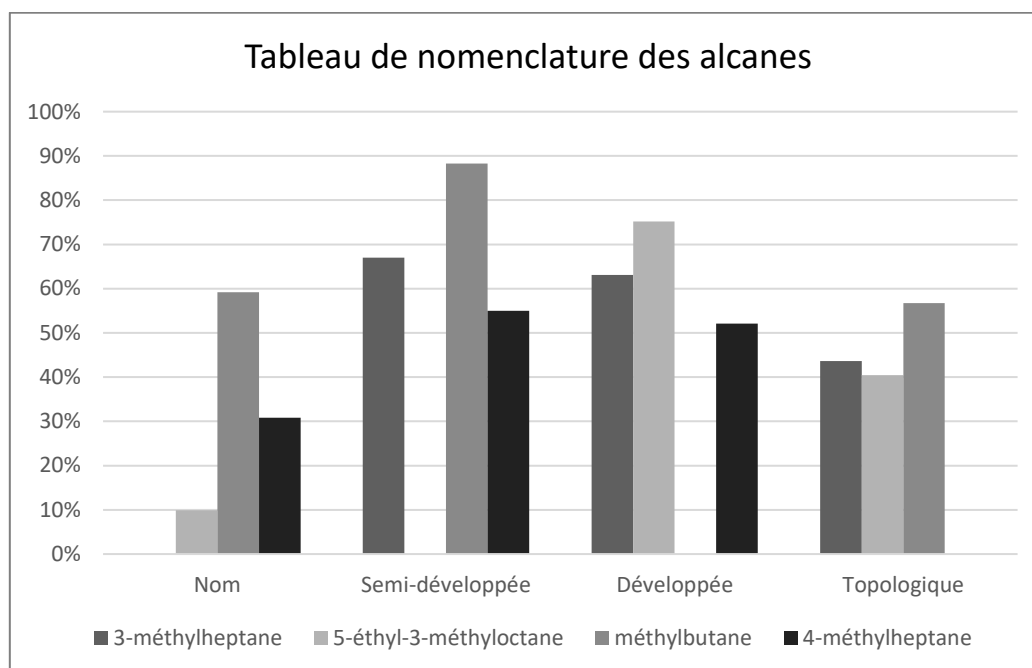
Le dernier thème concerne les questions liées à la nomenclature, que ce soit la déduction du nom d'une molécule à partir de sa structure, ou l'inverse. Nous avons posé deux questions de nomenclature aux élèves ; l'une concerne les alcanes et examine les différentes façons de représenter une molécule, et la seconde teste les connaissances en nomenclature pour différentes fonctions vues par l'élève.

##### **Q31 : Nomenclature des alcanes (N = 282)**

Un tableau est présenté aux élèves, comportant quatre molécules. On donne le nom, la formule semi-développée, la formule développée ou l'écriture topologique de ces molécules, et on demande aux

élèves de donner les autres représentations possibles, et le nom de la molécule. Les molécules utilisées sont le 3-méthylheptane, le 5-éthyl-3-méthyl-octane, le méthylbutane et le 4-méthylheptane.

La figure 3.34 reprend les résultats des élèves, les quatre molécules étant indiquées par leur nom. L'information qui est fournie aux élèves dans le questionnaire correspond à la case où est indiqué un « - » dans le tableau. Par exemple, le 3-méthylheptane était indiqué par son nom et le 4-méthylheptane était indiqué en écriture topologique. Les différentes représentations utilisées dans le questionnaire sont représentées dans la figure 3.35.



	Nom	Semi-développée	Développée	Topologique
3-méthylheptane	-	67%	63%	44%
5-éthyl-3-méthyl-octane	10%	-	75%	40%
méthylbutane	59%	88%	-	57%
4-méthylheptane	31%	55%	52%	-
<b>Moyenne</b>	<b>33%</b>	<b>70%</b>	<b>63%</b>	<b>47%</b>

Figure 3.34 : Pourcentage d'élèves ayant indiqué correctement le nom, la représentation semi-développée, développée ou topologique de chacune des quatre molécules proposées (N = 282)

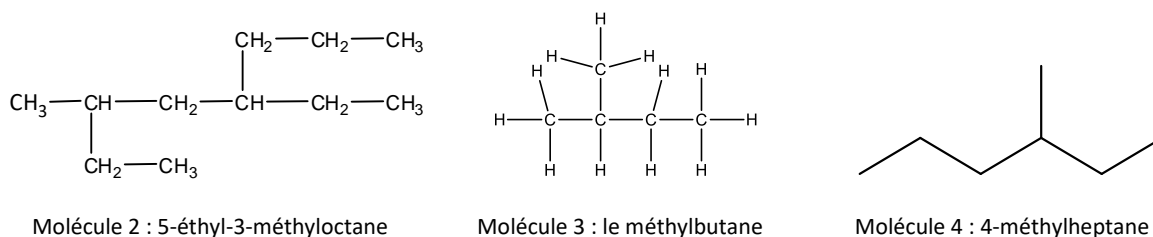


Figure 3.35 : Représentation des molécules 2, 3 et 4 telles que présentées dans le questionnaire distribué aux élèves (ceux-ci ne reçoivent aucune structure pour la molécule 1 qui est identifiée par son nom).

Nous constatons que les pourcentages sont très variables en fonction de ce qui est donné comme point de départ aux élèves, et de la difficulté de la molécule présentée.

- La première molécule, le 3-méthylheptane, est simple, mais les élèves doivent comprendre correctement son nom pour pouvoir écrire les trois structures.
- La deuxième molécule, le 5-éthyl-3-méthyl-octane, est la plus grande et la plus compliquée des molécules proposées. Pour la nommer correctement, il faut bien connaître toutes les règles de nomenclature.
- La troisième molécule, le méthylbutane, est très simple et ne devrait pas poser de problèmes, excepté le fait que les élèves doivent se souvenir que le préfixe correspondant à 4 carbones est « but ».
- La quatrième molécule est fort semblable à la première, excepté la position du méthyle.

D'une manière générale, nous constatons que les pourcentages de réponses correctes sont plus élevés pour les représentations semi-développées (70%) et développées (63%). L'écriture topologique, qui n'est pas reprise dans le référentiel de compétences, est abordée par certains enseignants, mais la majorité d'entre eux ne l'utilise pas. Il est donc relativement surprenant de constater que près de la moitié des élèves (47%) utilise correctement cette représentation. La question posant le plus de soucis est celle demandant aux élèves de nommer une molécule, avec un taux de réussite de seulement 33%.

En dehors des pourcentages de réponses correctes, nous nous intéressons aux types d'erreurs commises par les élèves. Voici donc une analyse détaillée des différentes erreurs des élèves en fonction de l'information demandée.

### ***Donner le nom associé à une structure***

La première colonne du tableau a pour objet de demander aux élèves de donner le nom d'une molécule présentée sous forme développée, semi-développée ou topologique. Afin de nommer correctement un alcane, les élèves doivent se souvenir de la suite de règles à appliquer et les appliquer correctement :

- Identifier la chaîne principale (chaîne de carbones la plus longue) ;
- Utiliser le préfixe correspondant au nombre de carbones de la chaîne principale ;
- Identifier les ramifications et le préfixe correspondant ;
- Numérotter la chaîne principale dans le bon sens afin que les ramifications portent les numéros les plus petits possible ;
- Écrire les ramifications dans l'ordre alphabétique.

Les élèves peuvent donc commettre plusieurs erreurs qui ont été encodées comme telles :

- « Préfixe » : utilisation d'un mauvais préfixe pour la chaîne principale ;
- « Chaîne principale » : chaîne principale mal identifiée ;
- « Ramification » : erreur dans le nom d'une ramification ;
- « Numérotation » : numérotation de la chaîne principale dans le mauvais sens ;
- « Ordre alphabétique » : les ramifications ne sont pas écrites dans l'ordre alphabétique ;
- « Autre » : logique de l'élève incomprise.

Toutes les erreurs peuvent être commises pour nommer la deuxième molécule car elle comporte deux ramifications. La règle de l'ordre alphabétique ne peut par contre pas être appliquée dans le cas des molécules 3 et 4. La figure 3.36 présente le pourcentage d'élèves ayant commis chaque type d'erreur, en fonction de la molécule proposée.

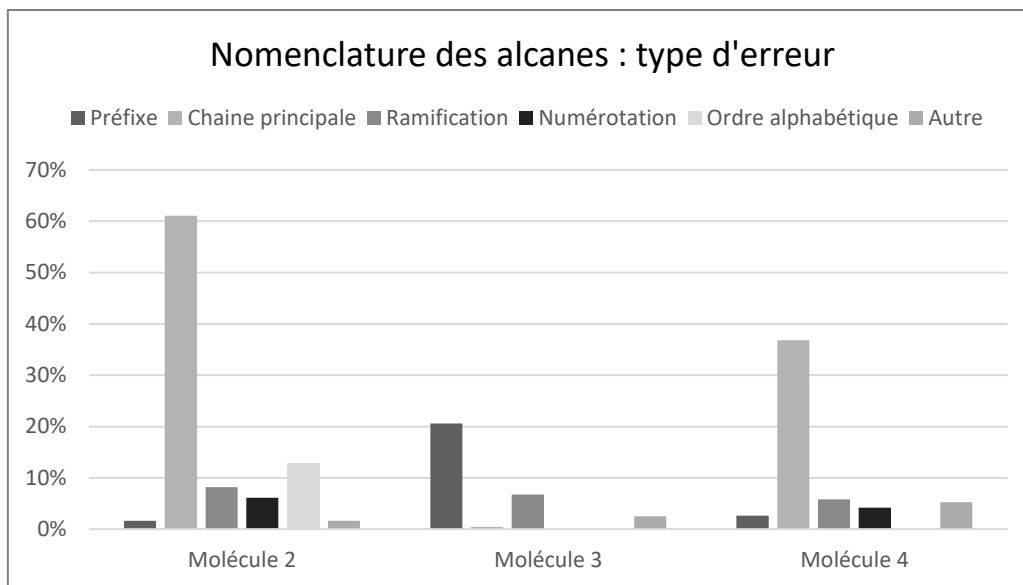


Figure 3.36 : Mise en avant des erreurs récurrentes chez les élèves lors d'exercices de nomenclature des alcanes (N = 282)

La molécule 2 est la plus compliquée : seuls 10% des élèves ont réussi à la nommer correctement. L'erreur la plus commise est de mal identifier la chaîne principale (60% des élèves). Ensuite, la règle la plus souvent oubliée est de mettre les ramifications dans l'ordre alphabétique (13% des élèves). Les autres erreurs sont commises par moins de 10% des élèves.

La molécule 3 est la plus facile. Plus de la moitié des élèves savent la nommer correctement (59% de réponses correctes). L'erreur principale commise par 21% des élèves est de se tromper quant au préfixe à utiliser pour caractériser une chaîne de 4 carbones.

La dernière molécule est semblable à la molécule 1 dont le nom est donné dans le tableau. Cependant, les élèves semblent avoir été perturbés par la façon dont la molécule est représentée et nombre d'entre eux ont imaginé être face à un diméthylhexane, et non face à un méthylheptane. L'erreur majoritaire (34% des élèves) est donc l'identification de la chaîne principale.

### ***Donner la formule semi-développée***

La deuxième colonne du tableau a pour objet de demander aux élèves d'écrire la formule semi-développée des molécules. La formule semi-développée représente la structure de la molécule, les liens entre les différents atomes excepté les liaisons aux hydrogènes.

Les différentes erreurs que nous constatons chez les élèves sont les suivantes :

- « Nb de C » : erreur dans le compte de carbones ;
- « Nb de H » : erreur dans le compte d'hydrogènes ;
- « Position » : erreur dans le positionnement d'une ramification ;
- « Autre » : autre type d'erreur ou logique de l'élève incomprise.

La figure 3.37 présente le pourcentage d'élèves ayant commis chaque type d'erreur, en fonction de la molécule proposée.

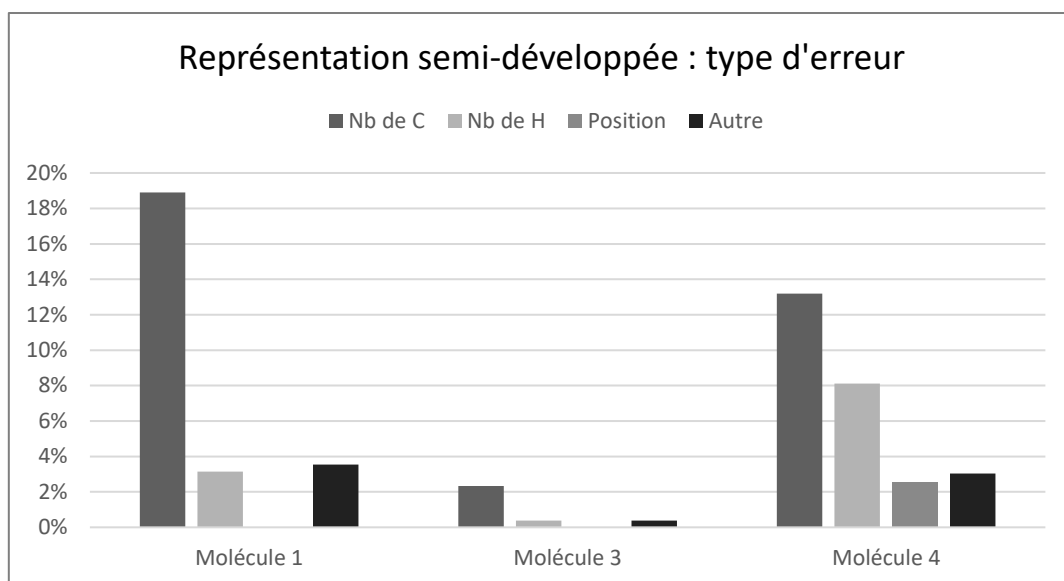


Figure 3.37 : Mise en avant des erreurs récurrentes chez les élèves lors d'exercices de représentation de molécules en formule semi-développée (N = 282)

Les deux tiers des élèves savent écrire la structure de la molécule 1 à partir de son nom. L'erreur principale (19% des élèves) est de se tromper dans le nombre de carbones, ce qui traduit une méconnaissance de la liste des préfixes étant donné que cette molécule est indiquée par son nom.

Près de 90% des élèves savent écrire la structure semi-développée de la molécule 3 à partir de sa formule développée, il y a donc très peu d'erreurs pour cette molécule.

La moitié des élèves sait passer d'une écriture topologique à une structure semi-développée. L'erreur la plus commise est de se tromper dans le nombre de carbones, ce qui traduit un souci dans la lecture de l'écriture topologique de la molécule. La notion de valence du carbone n'est pas entièrement maîtrisée, certains élèves (8%) se trompant dans le nombre d'hydrogènes liés à chaque carbone.

### ***Donner la formule développée***

La troisième colonne du tableau a pour objet de demander aux élèves d'écrire la formule développée des molécules. La formule développée représente la structure de la molécule en montrant tous les atomes et toutes les liaisons entre atomes. Les différentes erreurs possibles sont les mêmes que pour la formule semi-développée. La figure 3.38 présente le pourcentage d'élèves ayant commis chaque type d'erreur, en fonction de la molécule proposée.

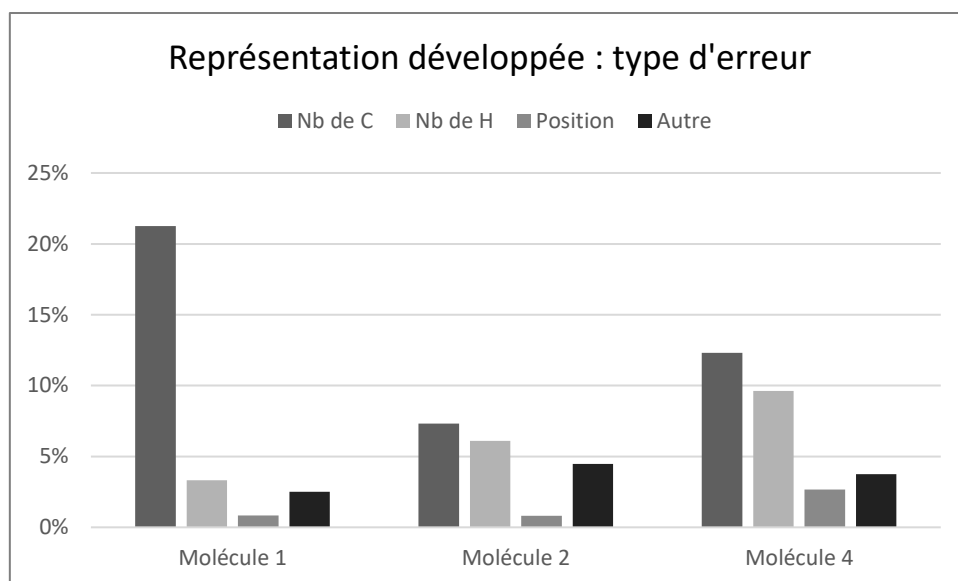


Figure 3.38 : Mise en avant des erreurs récurrentes chez les élèves lors d'exercices de représentation de molécules en formule développée (N = 282)

Les réponses données par les élèves sont très similaires aux réponses concernant la formule semi-développée, pour les deux molécules communes. La majorité des élèves qui essaient de répondre le font correctement.

L'erreur principale (21% des élèves) en partant d'un nom (molécule 1) est de se tromper dans le nombre de carbones, il s'agit donc d'un souci de nomenclature en matière de dénomination de radicaux.

En partant d'une formule semi-développée d'une molécule compliquée (molécule 2), il y a autant d'erreurs par rapport au nombre de carbones qu'au nombre d'hydrogènes (6 à 7% des élèves).

Au départ d'une écriture topologique (molécule 4), l'erreur principale est de se tromper dans le nombre de carbones (12% des élèves) ou le nombre d'hydrogènes (10% des élèves).

### ***Donner l'écriture topologique***

La quatrième colonne du tableau a pour objet de demander aux élèves d'écrire la molécule sous la forme topologique, c'est-à-dire sans écrire les carbones ni les hydrogènes liés aux carbones. Cette écriture n'est pas au programme et n'est pas enseignée dans la majorité des écoles. Certains enseignants ont choisi de l'aborder avec leurs élèves, mais ce n'est pas le cas majoritaire. L'écriture topologique est cependant l'écriture la plus utilisée par les chimistes organiciens. Nous avons donc voulu déterminer si les élèves sont capables de comprendre cette écriture.

Les différentes erreurs possibles sont :

- « Manque C » : il manque un ou plusieurs carbones dans la structure dessinée ;
- « Trop de C » : il y a un ou plusieurs carbones en trop dans la structure dessinée ;
- « Position » : la ramification n'est pas sur le bon carbone ;
- « Autre » : autre erreur ou logique de l'élève incomprise.

La figure 3.39 présente le pourcentage d'élèves ayant commis chaque type d'erreur, en fonction de la molécule proposée.



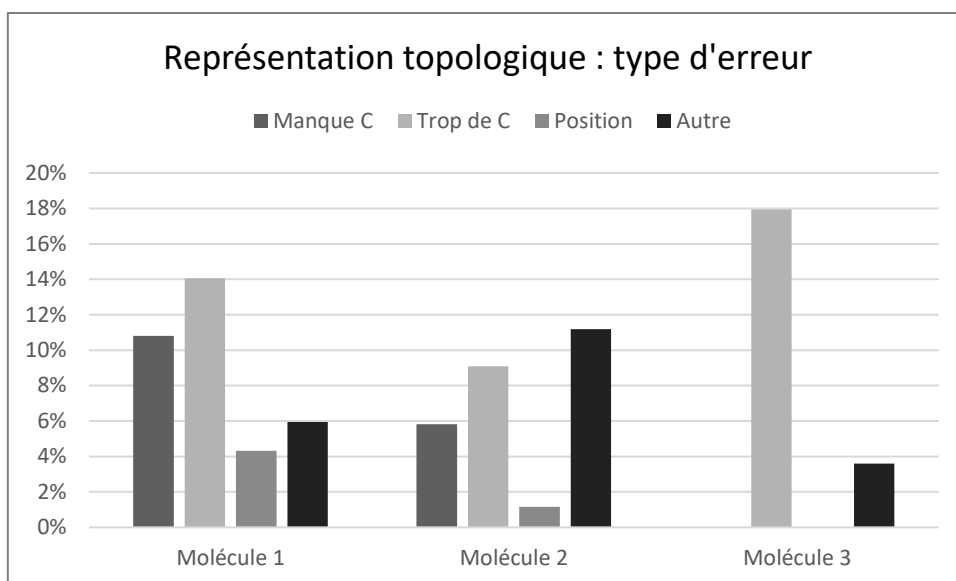


Figure 3.39 : Mise en avant des erreurs récurrentes chez les élèves lors d'exercices de représentation de molécules en écriture topologique (N = 282)

Un peu moins de la moitié des élèves a dessiné correctement la première molécule. L'erreur la plus souvent commise est de se tromper sur le nombre de carbones (25% des élèves). Les élèves ont légèrement tendance à dessiner trop de carbones.

Plus de la moitié des élèves a répondu correctement pour la deuxième molécule. Il est surprenant de constater que le meilleur résultat concerne la molécule a priori la plus compliquée. À nouveau, l'erreur la plus commune est de ne pas utiliser le bon nombre de carbones (15% des élèves). Les élèves ont tendance à mettre plus souvent trop de carbones.

Au sujet de la troisième molécule, plus de la moitié des élèves a correctement répondu. Ici, nous voyons que la seule erreur est de mettre trop de carbones. La molécule était très petite, il est effectivement compliqué de mettre moins de carbones que le compte juste.

Quelle que soit la molécule considérée, les élèves ont tendance à mettre trop de carbones dans leurs réponses. L'explication probable est qu'ils comptent le nombre de liaisons qu'ils dessinent au lieu de compter le nombre de carbones, et comme ils dessinent deux carbones dès la première liaison, ils dessinent alors un carbone de trop.

### **Q32 : Nomenclature**

Cette dernière question aborde la nomenclature des différentes fonctions organiques vues en cours. Le nombre d'élèves ayant répondu pour chaque fonction est variable et dépend des fonctions effectivement abordées dans leur école. Pour chaque fonction, deux molécules sont proposées : une sous son nom, et l'autre sous sa formule semi-développée. Nous demandons chaque fois à l'élève de donner la forme manquante. La figure 3.40 indique le pourcentage de réponses correctes pour chaque fonction :

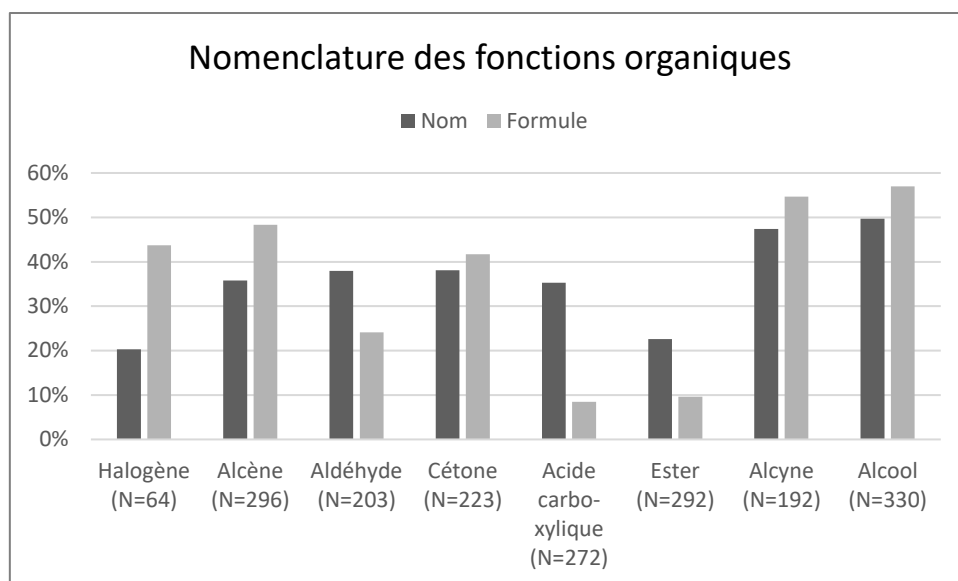


Figure 3.40 : Pourcentage d'élèves ayant correctement donné le nom associé à une structure donnée ou la formule associée à un nom, en fonction de la fonction organique présente dans la molécule

Les seules fonctions où les élèves atteignent tout juste la moyenne sont les alcools et les alcynes. Nous constatons qu'il n'y a pas une colonne qui obtient toujours de meilleurs résultats par rapport à l'autre, les élèves ne semblent donc pas avoir un « sens » privilégié pour répondre aux exercices de nomenclature ; ils ont autant de difficultés à donner le nom d'une molécule à partir de sa formule, que d'écrire la structure correspondant à un nom donné.

### **Récapitulatif des réponses au thème 5**

L'analyse des différentes réponses des élèves aux questions portant sur la structure des molécules organiques met en avant quelques problèmes :

- La principale source d'erreur lorsqu'un élève doit donner le nom d'une molécule est la mauvaise identification de la chaîne principale ;
- La principale source d'erreur lorsqu'un élève doit donner la structure développée ou semi-développée d'une molécule est de ne pas représenter le nombre correct de carbones ;
- La principale source d'erreur lorsqu'un élève doit dessiner une molécule grâce à l'écriture topologique est de ne pas représenter le bon nombre de carbones, avec une tendance à représenter trop de carbones ;
- D'une manière générale, quelle que soit la fonction, les élèves semblent avoir autant de difficultés à donner le nom d'une molécule au départ de sa structure que l'inverse.

De manière plus quantitative, le pourcentage moyen de réponses correctes lors de cette dernière partie s'élève à 48%, ce qui est raisonnable au vu des moyennes des autres parties de ce questionnaire.

## Analyse globale du questionnaire

Nous allons maintenant réaliser une analyse générale de chacun de ces thèmes afin de déterminer si un des thèmes présente plus de difficultés que les autres. Pour ce faire, nous allons regarder les différents pourcentages de bonnes réponses moyens obtenus pour chaque question. La figure 3.41 présente le taux de réponses correctes pour chaque question (ou partie de question lorsque la question est fort longue, comme dans le thème de nomenclature), présentés par thèmes, ainsi que la moyenne générale de chaque thème.

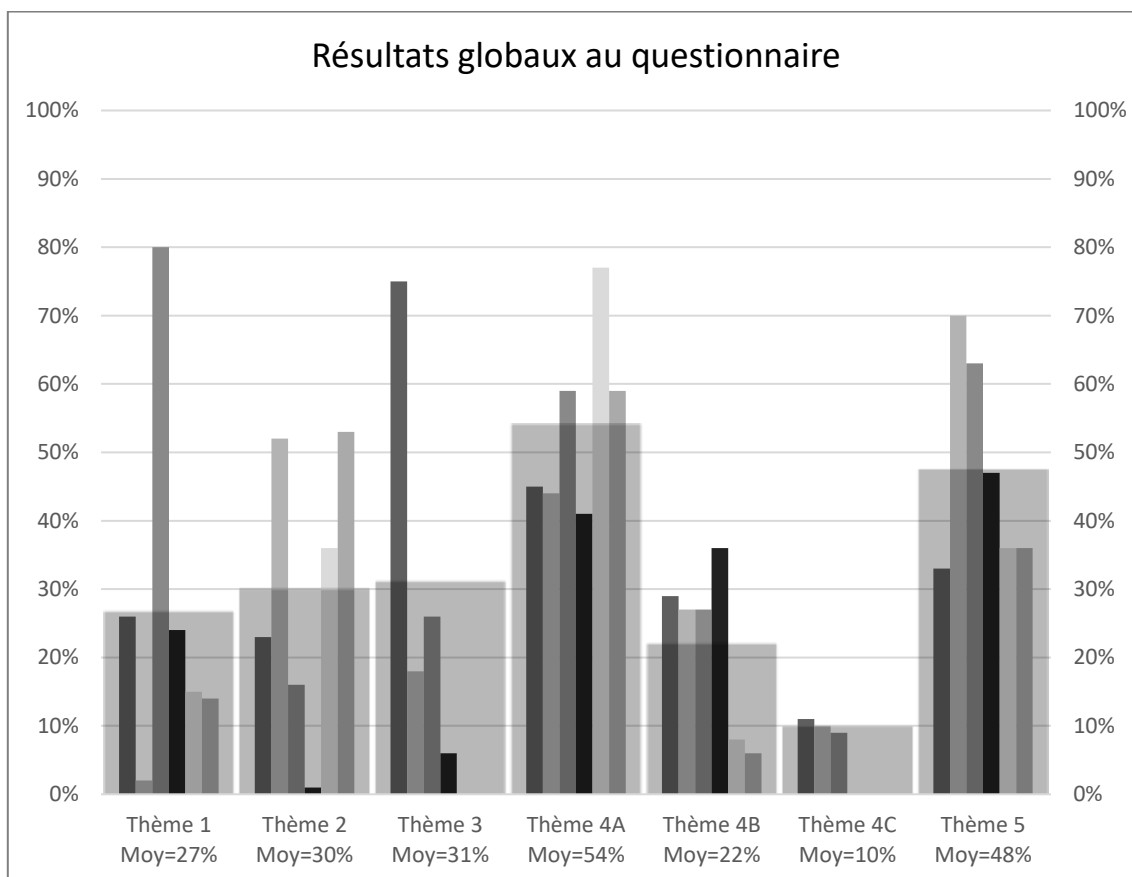


Figure 3.41 : Répartition des réponses correctes des élèves pour chacune des questions en fonction du thème et pourcentage moyen de bonnes réponses pour chacun des thèmes

Nous constatons qu'il y a deux thèmes qui semblent poser moins de problèmes aux élèves, à savoir le thème 4A (restitution de réactions) et le thème 5 (nomenclature), dont les résultats moyens sont aux alentours de 50%. Ces deux thèmes comportent principalement des questions de restitution, les élèves devant apprendre des règles ou des concepts par cœur. Nous constatons également qu'aucune des questions proposées dans ces deux thèmes ne présente un taux de réponses correctes très bas (inférieur à 10%), comme c'est le cas dans les thèmes restants. Nous pouvons donc imaginer que la totalité de la matière présente dans ces thèmes est assimilée de manière homogène.

Ensuite, nous observons que quatre thèmes ont des moyennes oscillant autour de 25-30%. Il s'agit du thème 1 (général) avec une moyenne de 27%, du thème 2 (structure) avec une moyenne de 30%, du thème 3 (propriétés) avec une moyenne de 31% et du thème 4B (application de réactions) avec une moyenne de 22%. De plus, nous constatons qu'au sein de chacun de ces thèmes se trouve au minimum une question dont le taux de bonnes réponses est inférieur à 10%, tandis que d'autres questions

présentent des taux de bonnes réponses qui peuvent s'élever jusqu'à 80%, ce qui montre une compréhension partielle des savoirs repris dans ces thèmes.

Enfin, le thème 4C (transfert sur les réactions) est bon dernier avec seulement 10% de moyenne et des résultats concentrés entre 9% et 11% de bonnes réponses, démontrant clairement un gigantesque manque de compréhension quant aux réactions organiques.

Cette première découverte des connaissances effectivement acquises par les élèves du secondaire donne un aperçu des thèmes les plus problématiques au cours de l'apprentissage de la chimie organique dans les écoles secondaires. Cependant, ce premier questionnaire comportant une majorité de questions à réponses ouvertes, nous avons malheureusement obtenu un grand nombre d'abstentions de la part des élèves, particulièrement pour certaines questions. Afin de combler le vide laissé dans notre analyse par ces questions non répondues, les réponses des élèves à notre questionnaire à choix multiples ainsi qu'aux entretiens semi-dirigés sont présentées au cours des deux prochains chapitres.

## Chapitre III : Questionnaire à choix multiples

L'analyse des réponses des élèves au questionnaire à choix multiples que nous avons mis au point est présentée ci-après. Les questions sont indiquées telles que présentées aux élèves, accompagnées des différents choix qui leur sont proposés. À côté de chacune des questions, un graphique indique le pourcentage d'élèves ayant fourni chaque type de réponse (a, b, c, d ou e), ainsi que le pourcentage d'élèves n'ayant pas répondu à la question (x). La réponse correcte est indiquée par un astérisque (\*). Le nombre d'élèves ayant répondu à chaque question est toujours de 201.

Les questions sont divisées en deux parties :

- Une première partie des questions à choix multiples, avec 4 ou 5 propositions de réponses. Ces questions sont numérotées de Q1 à Q8.
- Une deuxième partie composée de tableaux à compléter, les tableaux étant numérotés de T1 à T6.

### Partie 1 : Questions à choix multiples

#### Q1) La chimie organique est :

- a) La chimie du vivant
- b) La chimie du carbone (\*)
- c) La chimie des éléments « CHON »
- d) La chimie des molécules organiques

La figure 3.42 présente la répartition des réponses données par les élèves.

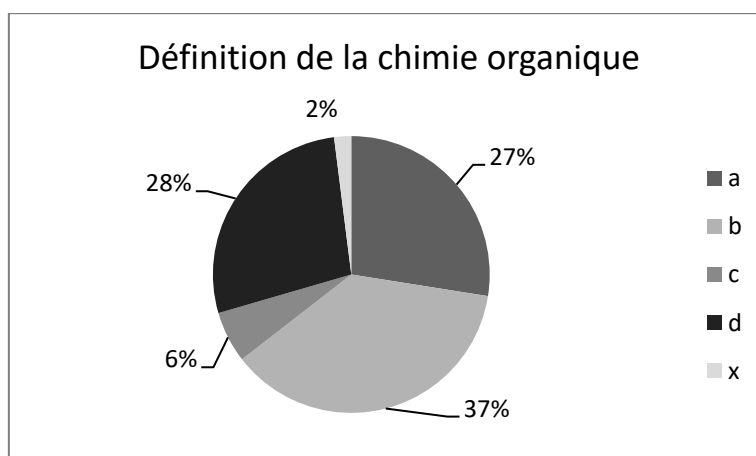


Figure 3.42 : Répartition des réponses des élèves à la question Q1 (N = 201)

Nous avons voulu reposer la même question pour démarrer ce questionnaire que pour le précédent, en reprenant les réponses majoritairement proposées par les élèves lors du questionnaire précédent. S'ils ne sont que 37% à donner la bonne réponse (la chimie du carbone), ils n'étaient que 26% à donner cette réponse lorsque la question était ouverte. Près de 2/3 des élèves ne peuvent donc pas définir précisément ce que recouvre la chimie organique.

**Q2) Un polymère est :**

- a) Une très longue molécule
- b) Un produit composé de beaucoup de molécules
- c) Une molécule constituée d'une unité de base qui se répète un grand nombre de fois (\*)
- d) Une molécule fabriquée par l'homme

La figure 3.43 présente la répartition des réponses données par les élèves.

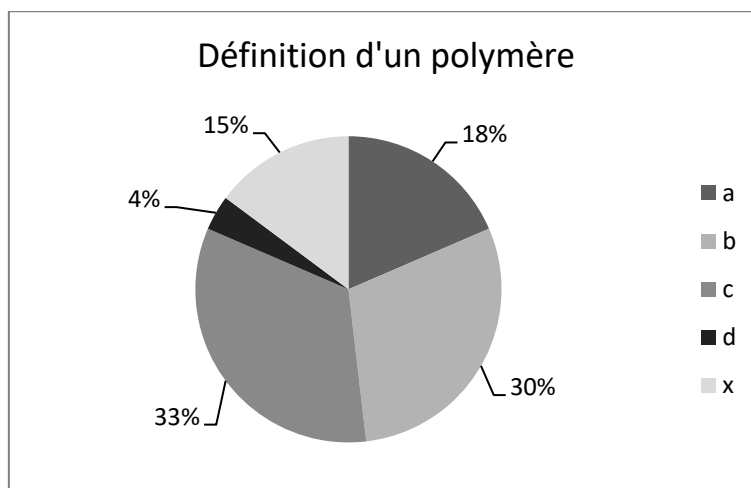


Figure 3.43 : Répartition des réponses des élèves à la question Q2 (N = 201)

Lors du précédent questionnaire, seuls 15% des élèves ont été capables de donner un exemple de polymère naturel, et l'exemple le plus souvent cité était le pétrole, qui n'est bien sûr pas un polymère. Nous avons donc voulu vérifier si les élèves connaissent la définition du terme « polymère ». Un tiers des élèves donne la définition correcte (une molécule constituée d'une unité de base qui se répète un grand nombre de fois). La majorité des élèves ne sait donc pas ce qu'est un polymère, et un tiers d'entre eux pense qu'il s'agit d'un produit composé de beaucoup de molécules, ce qui est cohérent avec l'exemple du pétrole proposé précédemment.

**Q3) Un alcool primaire est :**

- a) Une molécule contenant un seul groupement –OH
- b) Une molécule d'alcool linéaire
- c) Une molécule dont le groupement –OH est lié à un carbone lui-même lié à un seul carbone (\*)
- d) Une molécule d'alcool contenant moins de 5 carbones

La figure 3.44 présente la répartition des réponses données par les élèves.

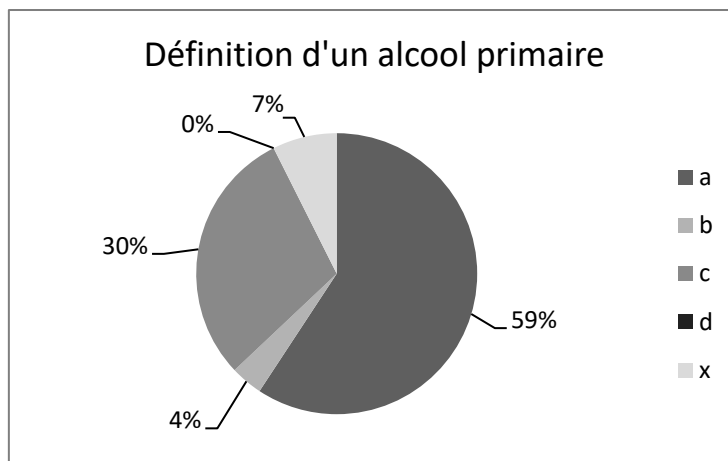
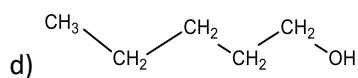
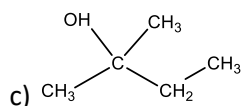
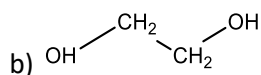
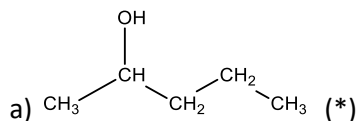


Figure 3.44 : Répartition des réponses des élèves à la question Q3 (N = 201)

Lors du précédent questionnaire, nous demandions aux élèves de donner un exemple d'alcool primaire, secondaire et tertiaire. La majorité des élèves pouvait nous dessiner un alcool primaire, mais pas un alcool secondaire ou tertiaire. Nous avons donc décidé de vérifier si les élèves étaient capables de définir ce qu'est un alcool primaire. Seulement 30% des élèves nous donnent la bonne réponse (une molécule dont le groupement  $-OH$  est lié à un carbone lui-même lié à un seul carbone), alors que 59% des élèves pensent qu'un alcool primaire ne porte qu'un seul groupement  $OH$ .

**Q4) Parmi les molécules suivantes, laquelle est un alcool secondaire ?**



La figure 3.45 présente la répartition des réponses données par les élèves.

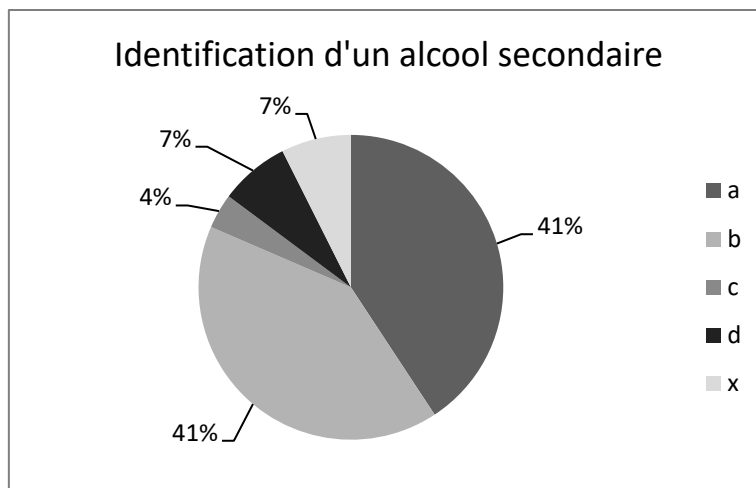


Figure 3.45 : Répartition des réponses des élèves à la question Q4 (N = 201)

Dans la suite logique de la question 3, nous avons voulu vérifier si les élèves sont capables de reconnaître un alcool secondaire. 41% des élèves identifient l'alcool secondaire, mais 41% des élèves pensent au contraire que l'alcool secondaire est la molécule comportant deux groupements OH, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus par rapport à la définition d'un alcool primaire qui ne comporterait qu'un seul groupement OH selon de nombreux élèves.

**Q5) Un isomère est :**

- a) Une molécule qui a la même formule brute qu'une autre molécule mais pas la même formule semi-développée (\*)
- b) Une molécule qui a le même nombre de carbones qu'une autre molécule mais une structure différente
- c) Une molécule qui a la même formule brute qu'une autre molécule mais une connectivité différente
- d) Une molécule qui a les mêmes ramifications qu'une autre molécule mais à des endroits différents

La figure 3.46 présente la répartition des réponses données par les élèves.

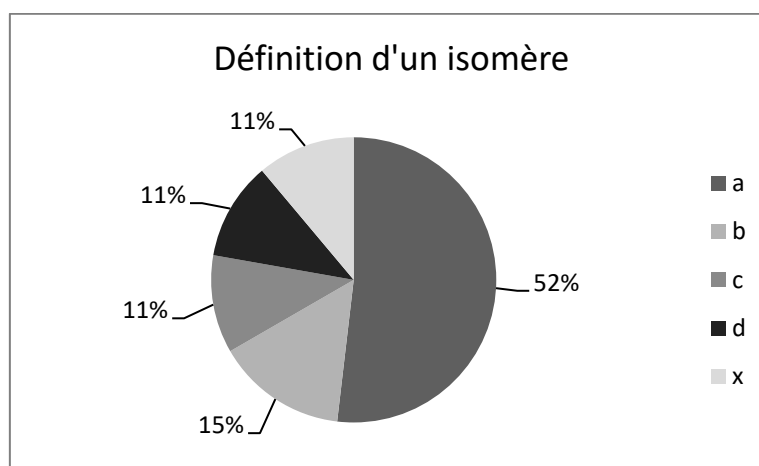


Figure 3.46 : Répartition des réponses des élèves à la question Q5 (N = 201)



Lors du précédent questionnaire, seulement un quart des élèves donnait une définition claire et correcte d'un isomère. Un autre quart des élèves semblait avoir compris la notion d'isomère sans pour autant pouvoir l'expliquer correctement. Par cette question à choix multiples, nous voulions donc vérifier notre hypothèse selon laquelle ces élèves avaient effectivement bien compris ce concept mais qu'il leur manquait simplement le moyen de le formuler correctement. Nous retrouvons bien ici 52% des élèves qui choisissent la définition correcte d'un isomère (une molécule qui a la même formule brute qu'une autre molécule mais pas la même formule semi-développée).

**Q6) Pour faire passer une molécule de la phase liquide à la phase gazeuse, il faut chauffer la molécule afin de :**

- a) Casser les liaisons au sein de la molécule
- b) Rompre les liaisons hydrogène que fait la molécule
- c) Vaincre les forces intermoléculaires entre les différentes molécules (\*)
- d) La rendre plus légère

La figure 3.47 présente la répartition des réponses données par les élèves.

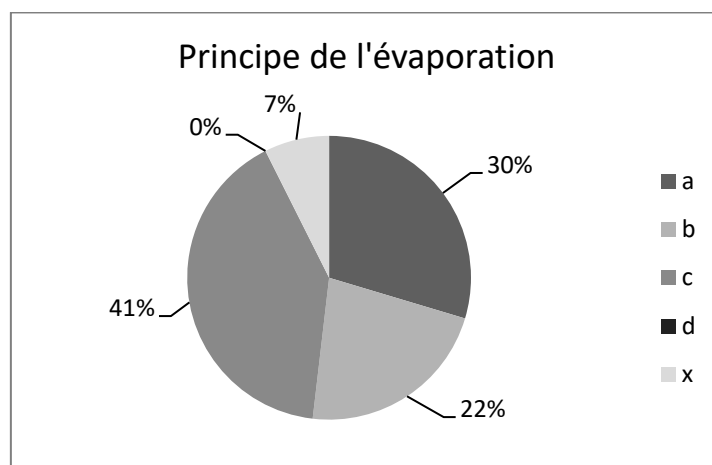


Figure 3.47 : Répartition des réponses des élèves à la question Q6 (N = 201)

Lors du précédent questionnaire, nous avons posé plusieurs questions sur l'évaporation des molécules organiques, sans pouvoir vérifier si les élèves avaient réellement compris le principe de l'évaporation. Nous avons donc posé cette question afin de vérifier que les élèves comprennent le concept d'évaporation. Nous constatons que 30% des élèves pensent qu'il faut casser les liaisons au sein même d'une molécule pour la faire passer à l'état gazeux, il y a donc là un réel problème de compréhension. 22% des élèves pensent qu'il faut uniquement rompre les liaisons hydrogène que fait la molécule, ce qui n'est qu'en partie correct. 41% des élèves donnent la bonne réponse (il faut vaincre les forces intermoléculaires entre les différentes molécules pour passer en phase gazeuse).

**Q7) Pour qu'une molécule soit polaire, il faut :**

- a) Que toutes ses liaisons soient polarisées
- b) Qu'elle soit symétrique
- c) Que le centre des charges négatives ne soit pas au même endroit que le centre de charges positives (\*)
- d) Que les éléments qui la composent aient une électronégativité similaire
- e) Que les éléments qui la composent aient une électronégativité différente

La figure 3.48 présente la répartition des réponses données par les élèves.

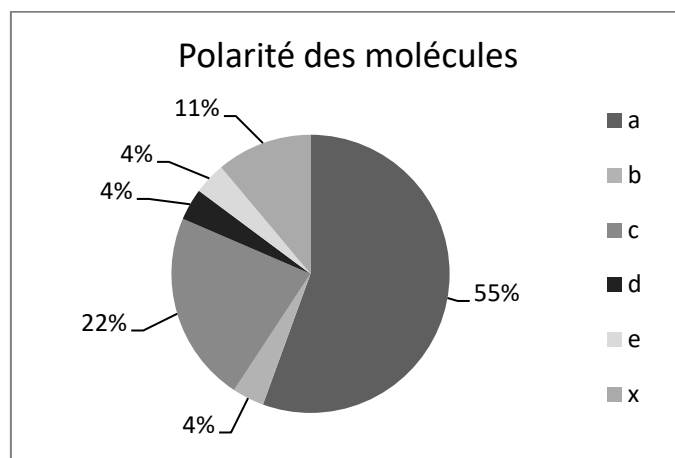


Figure 3.48 : Répartition des réponses des élèves à la question Q7 (N = 201)

Lors du questionnaire précédent, nous avons constaté que les élèves n'étaient pas capables de dire si une molécule est polaire ou non. Nous avons donc voulu vérifier la compréhension du concept de molécule polaire et apolaire. Seuls 22% des élèves donnent la bonne réponse (il faut que le centre des charges négatives ne soit pas au même endroit que le centre de charges positives pour qu'une molécule soit polaire), et 55% des élèves pensent que toutes les liaisons de la molécule doivent être polarisées pour que la molécule le soit elle aussi. Il y a à nouveau un problème de compréhension d'un concept important.

**Q8) Qu'est-ce qu'une liaison hydrogène (ou lien H) ?**

- a) Une liaison entre un hydrogène et un autre élément au sein d'une molécule
- b) Une liaison entre un hydrogène et un autre élément entre deux molécules
- c) Une liaison entre un hydrogène et un élément fortement électronégatif au sein d'une molécule
- d) Une liaison entre un hydrogène et un élément fortement électronégatif entre deux molécules (\*)

La figure 3.49 présente la répartition des réponses données par les élèves.

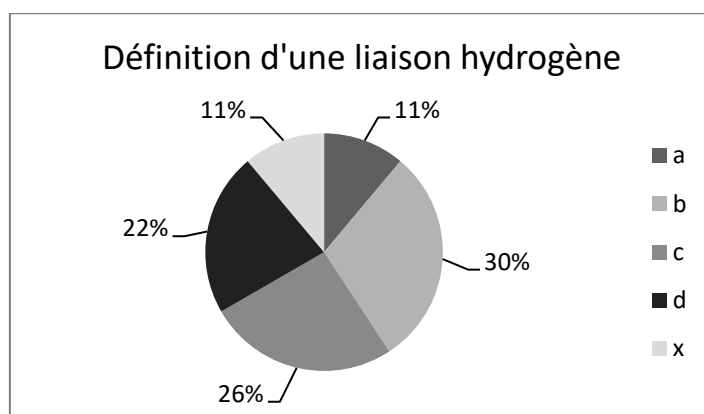


Figure 3.49 : Répartition des réponses des élèves à la question Q8 (N = 201)

Lors du questionnaire précédent, nous demandions aux élèves d'identifier les fonctions pouvant faire des liens H. Les résultats étant très moyens, nous avons voulu vérifier si les élèves connaissent la définition d'une liaison hydrogène. Les résultats sont très partagés, et seulement 22% des élèves donnent la bonne réponse (un lien H est une liaison entre un hydrogène et un élément fortement électronégatif entre deux molécules). Seulement la moitié des élèves a compris qu'une liaison hydrogène se fait entre deux molécules différentes et pas, sauf exception, au sein d'une molécule. Encore une notion importante qui n'a pas été clairement comprise par les élèves.

## **Partie 2 : Tableaux à compléter**

Au cours de cette partie, les questions sont posées sous forme de tableaux à compléter. Pour plus de clarté lors de notre analyse, nous ne reprenons pas les tableaux tels que présentés aux élèves. La présentation exacte des questions est reprise en annexe.

### **T1) Voici une liste de produits de la vie quotidienne. Est-ce qu'ils font partie de la chimie organique ? Si oui, quelle est la fonction principale qui les compose ?**

La figure 3.50 présente la répartition des réponses données par les élèves.

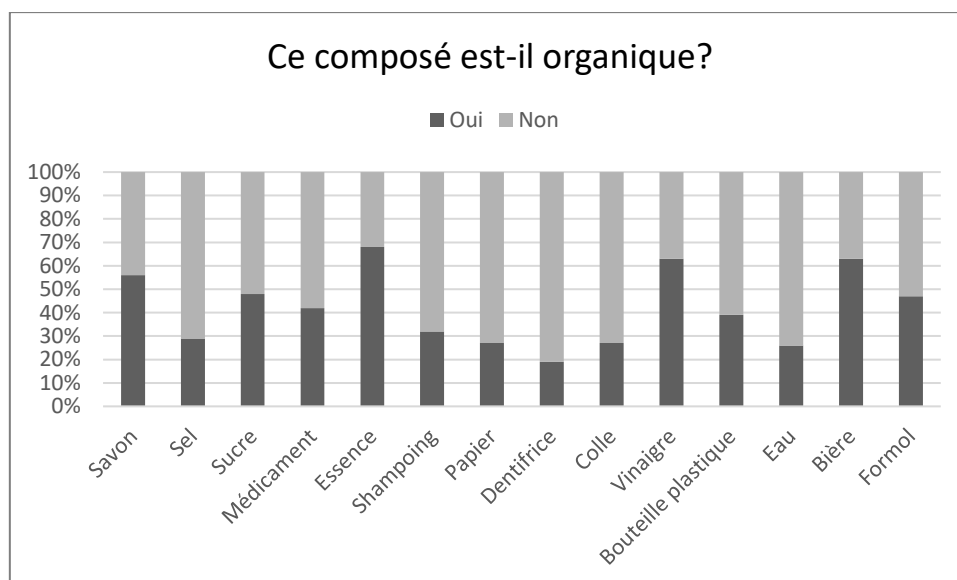


Figure 3.50 : Pourcentage d'élèves identifiant les composés proposés comme faisant partie de la chimie organique ou non (N = 201)

Lors du précédent questionnaire, nous demandions aux élèves de déterminer si des molécules représentées devant eux étaient organiques ou pas, et nous leur demandions également de citer des produits de la vie quotidienne qui faisaient partie de la chimie organique. Nous avons repris ici les différents produits cités par les élèves et leur avons demandé de déterminer s'ils étaient organiques ou pas, sans avoir leur structure. Seuls le savon, l'essence, le vinaigre et la bière sont identifiés comme étant organiques par un peu plus de la moitié des élèves. Le sel et l'eau, les deux seuls composés proposés qui ne sont pas organiques, sont quant à eux identifiés comme tels par plus d'un quart des élèves.

Nous leur avons également demandé de dire quelle fonction organique se retrouve dans chacun de ces composés. Les réponses des élèves se trouvent sur la figure 3.51. La seule fonction que les élèves

sont capables d'identifier à plus de 50% est la fonction alcool présente dans la bière. Si l'on considère les réponses données dont le pourcentage est le plus élevé, la fonction la plus proposée pour le savon est l'ester (20%), la fonction principale proposée pour l'essence est l'alcane (32%), celle proposée pour le vinaigre est l'acide carboxylique (21%) et la bouteille en plastique est composée d'alcènes (20%). Toutes ces réponses sont correctes (nous considérons que les élèves font l'association correcte entre le plastique et la fonction alcène qui est présente dans le monomère utilisé pour fabriquer le polymère constituant le plastique, bien qu'il n'y a plus à proprement parler d'alcène présent dans le polymère). Malgré le taux de réponse très faible, les élèves répondant à la question donnent en majorité la réponse correcte. Pour les autres exemples, la très grande majorité des élèves ne donne pas de réponse.

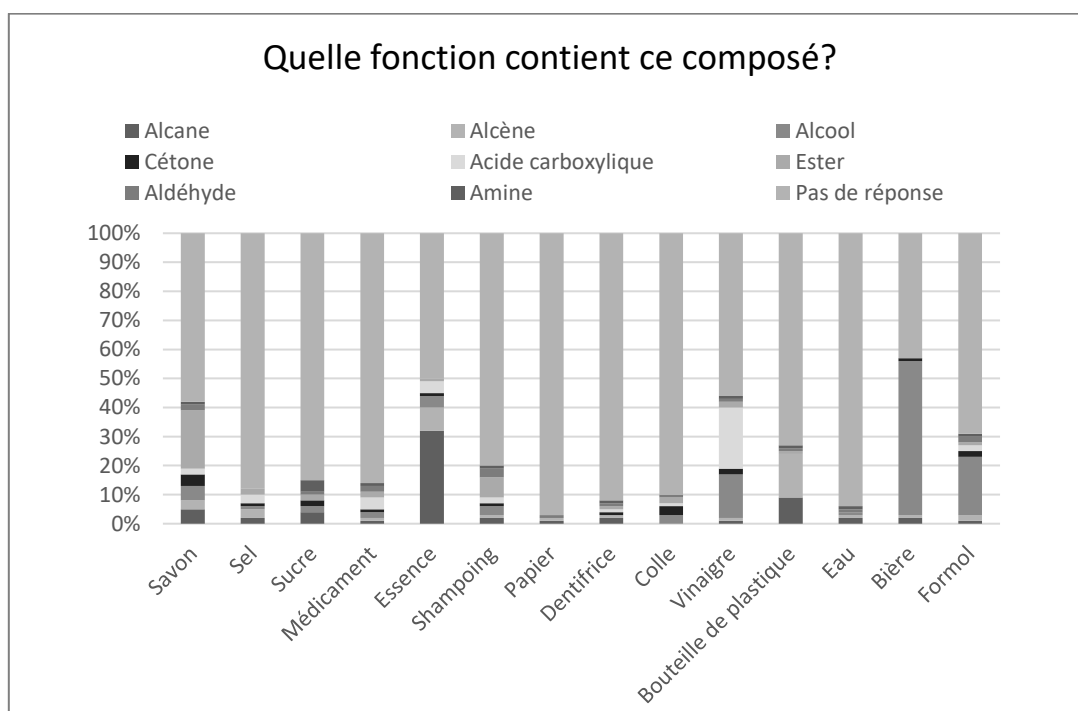


Figure 3.51 : Pourcentage d'élèves indiquant qu'une fonction particulière se trouve dans le produit proposé (N = 201)

**T2) Les molécules suivantes sont-elles des polymères ? Si oui, sont-ils des polymères de synthèse ou des polymères naturels ?**

La figure 3.52 présente la répartition des réponses données par les élèves.

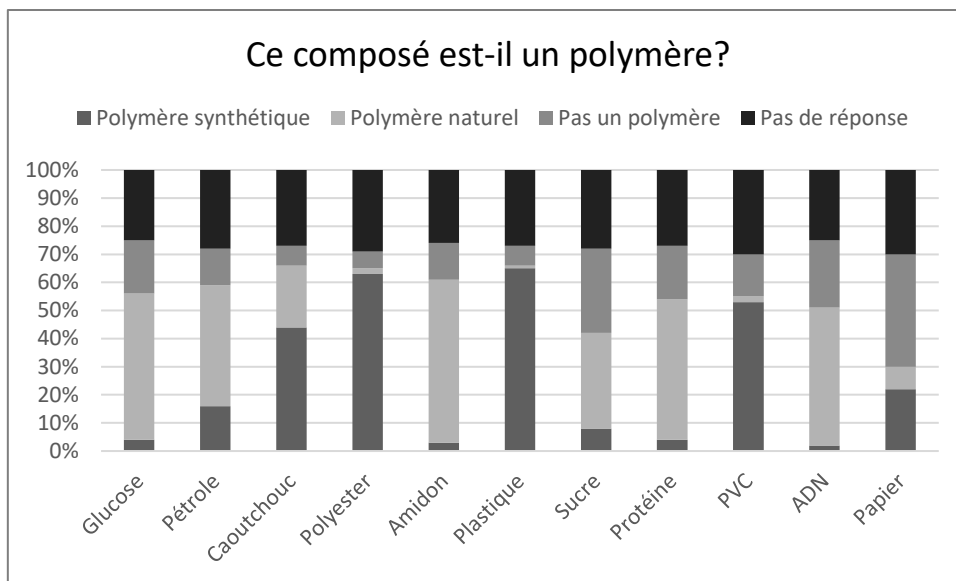
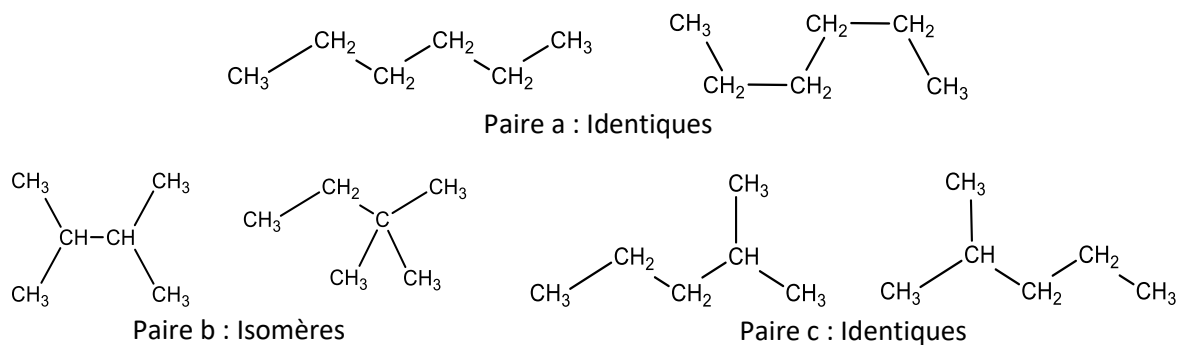


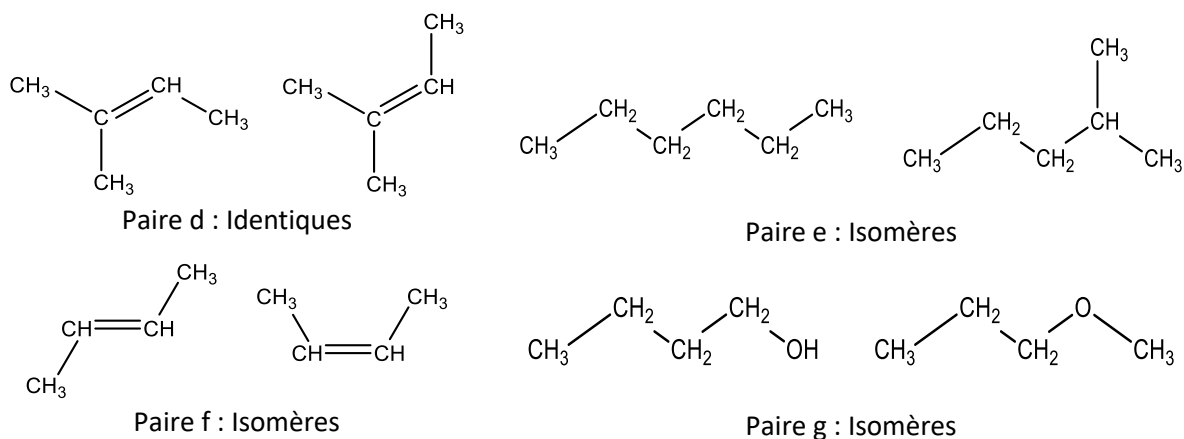
Figure 3.52 : Pourcentage d'élèves identifiant les composés proposés comme étant des polymères synthétiques, des polymères naturels ou pas un polymère (N = 201)

Lors du précédent questionnaire, seuls 15% des élèves ont été capables de donner un exemple de polymère naturel, et beaucoup nous donnaient un exemple de polymère synthétique alors que nous demandions un exemple de polymère naturel. Nous avons repris ici les polymères cités par les élèves et leur avons demandé de déterminer s'ils étaient des polymères ou non, et s'ils étaient naturels ou synthétiques. La majorité des réponses sont correctes, mais les pourcentages ne sont pas très élevés (on ne dépasse pas 65% de bonnes réponses). Trois erreurs sont commises par les élèves : le glucose et le pétrole sont encore majoritairement identifiés comme étant des polymères naturels, et le papier n'est pas identifié comme étant un polymère.

**T3) Voici plusieurs paires de molécules. Déterminez si les deux molécules représentées sont identiques, isomères, ou ni l'un ni l'autre.**

Lors du précédent questionnaire, nous demandions aux élèves de dessiner différents isomères d'une même molécule. Nous avons alors remarqué que nombre d'entre eux dessinaient plusieurs fois la même molécule en pensant dessiner des isomères, et qu'ils étaient souvent incapables de dessiner tous les isomères d'une molécule. Nous voulons donc vérifier avec cette question qu'ils sont capables de déterminer si deux molécules sont identiques, isomères, ou ni l'un ni l'autre. Voici les différentes paires de molécules présentées aux élèves, ainsi que la réponse attendue.





La figure 3.53 présente la répartition des réponses données par les élèves.

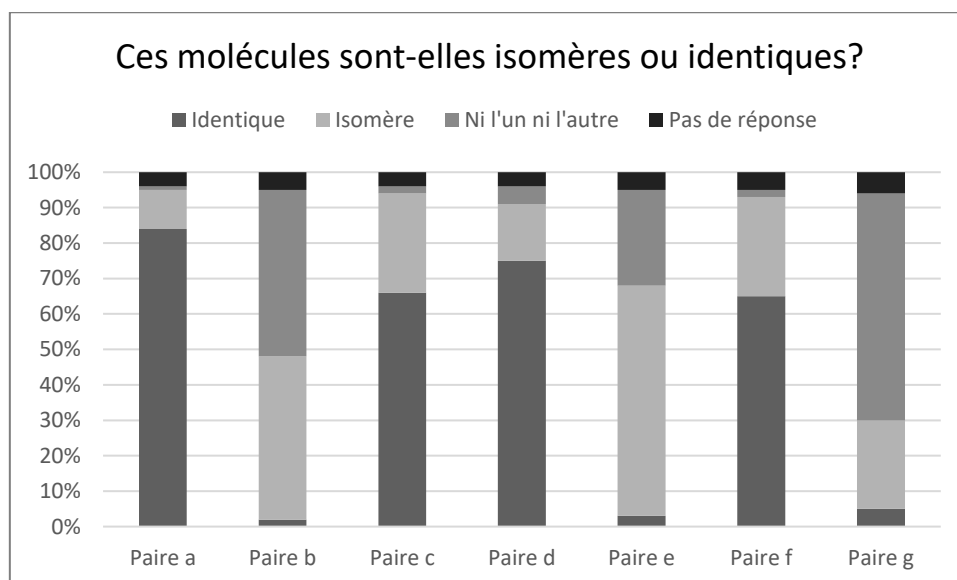


Figure 3.53 : Pourcentage d'élèves identifiant chaque paire de molécules comme étant isomères, identiques ou ni l'un ni l'autre (N = 201)

Les résultats des élèves semblent influencés par le type de molécule auquel ils sont confrontés. Voici les résultats en fonction du type des paires de molécules impliquées :

#### Paires identiques :

- Paire a : 84% des élèves identifient correctement les deux molécules comme étant identiques.
- Paire c : 66% des élèves identifient ces deux molécules comme étant identiques, mais 28% d'entre eux pensent qu'ils sont isomères.
- Paire d : 75% des élèves identifient correctement ces deux alcènes comme étant identiques.

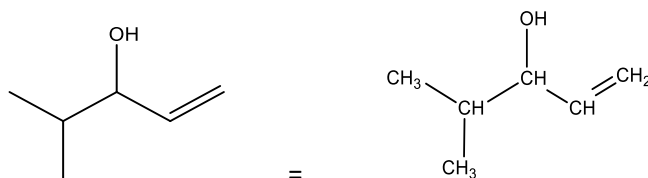
#### Paires d'isomères :

- Paire b : seulement 46% des élèves identifient correctement ces deux molécules comme étant des isomères, alors que 47% des élèves pensent qu'elles ne sont ni isomères, ni identiques.

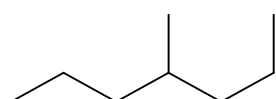
- Paire f : 65% des élèves pensent que ces deux isomères sont identiques, seulement 28% d'entre eux les identifient correctement comme étant isomères.
- Paire e : 65% des élèves identifient correctement ces deux molécules comme étant deux isomères, mais 27% d'entre eux pensent qu'elles ne sont ni identiques, ni des isomères.
- Paire g : cette paire est la seule contenant deux molécules n'étant pas des hydrocarbures, l'une est un alcool et l'autre est un éther. Seulement 28% des élèves les identifient comme étant effectivement des isomères, la majorité d'entre eux (64%) pensent que ces deux molécules ne sont absolument pas reliées.

Nous constatons que les élèves ont de meilleurs résultats lorsqu'il s'agit d'identifier deux molécules identiques et qu'ils ont plus de difficultés à identifier des isomères, particulièrement lorsque ces isomères sont des isomères cis/trans (paire f) ou des isomères de fonction (paire g).

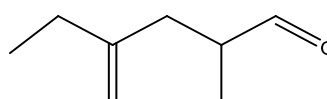
**T4) Les chimistes organiciens utilisent le plus souvent l'écriture topologique pour représenter les molécules organiques. Cette écriture ne représente pas les carbones ni les hydrogènes liés aux carbones, elle ne montre que les liaisons entre carbones, et les autres éléments.**



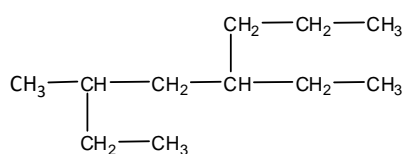
Après cette petite introduction sur l'écriture topologique, il est demandé aux élèves d'écrire la formule développée de deux molécules présentées sous forme topologique, et d'écrire la formule topologique de deux autres molécules présentées sous forme semi-développée. Les molécules proposées aux élèves sont les suivantes :



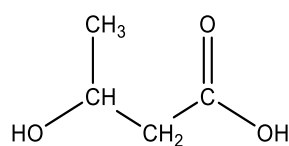
Molécule 1



Molécule 2



Molécule 3



Molécule 4

L'écriture topologique est l'écriture la plus utilisée par les chimistes organiciens. Or, elle n'est pas utilisée dans l'enseignement de la chimie organique dans les écoles secondaires. Nous avons déjà inclus cette écriture lors de notre précédent questionnaire, et nous avons observé qu'environ la moitié des élèves étaient capables d'écrire un alcane sous cette forme. Nous avons cette fois-ci rajouté deux molécules comportant un alcène, un aldéhyde, un alcool et un acide carboxylique afin de voir si les élèves peuvent également maîtriser cette écriture quelle que soit la fonction représentée. La figure 3.54 présente la répartition des réponses données par les élèves pour chaque molécule.

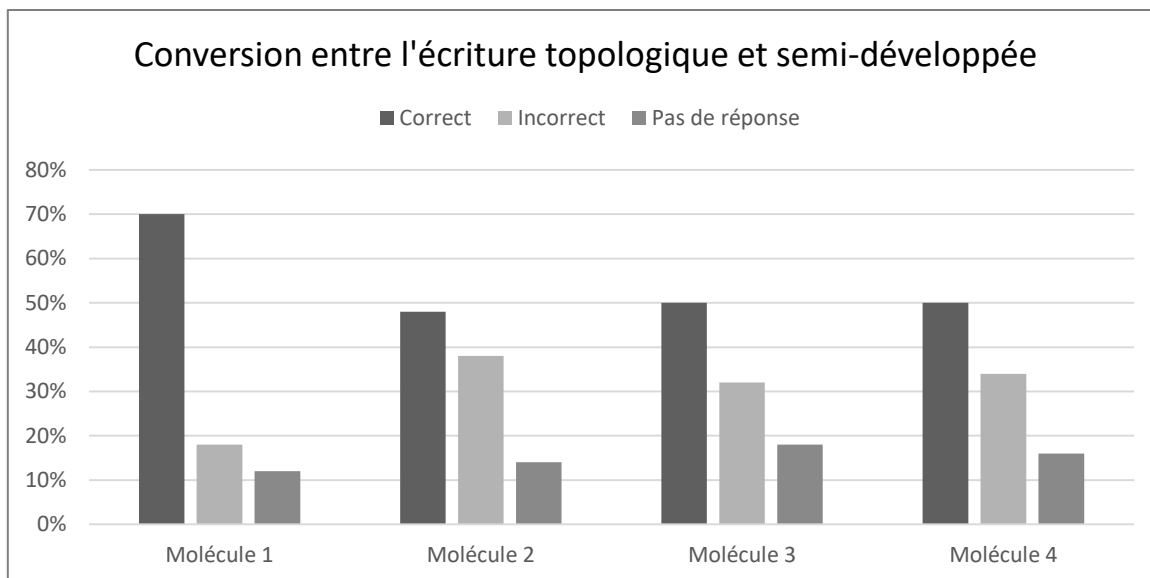


Figure 3.54 : Pourcentage d'élèves ayant correctement effectué la conversion depuis une écriture topologique vers une écriture semi-développée (molécules 1 et 2) ou vice versa (molécules 3 et 4) (N = 201)

Nous obtenons toujours le même genre de résultat, avec une moitié d'élève dessinant correctement la molécule. Les erreurs les plus fréquentes sont, comme nous pouvons le voir sur la figure suivante, différentes en fonction du sens de l'exercice. Nous avons codé le type d'erreur comme suit :

- « Trop de C » : le nombre de carbones est trop grand ;
- « Manque C » : le nombre de carbones est trop petit ;
- « Pb de H » : il y a trop ou trop peu d'hydrogène ;
- « Pb de O » : il y a trop ou trop peu d'oxygène ;
- « Autre » : autre type d'erreur ou logique de l'élève incomprise.

La figure 3.55 présente la répartition des réponses données par les élèves pour chaque molécule.

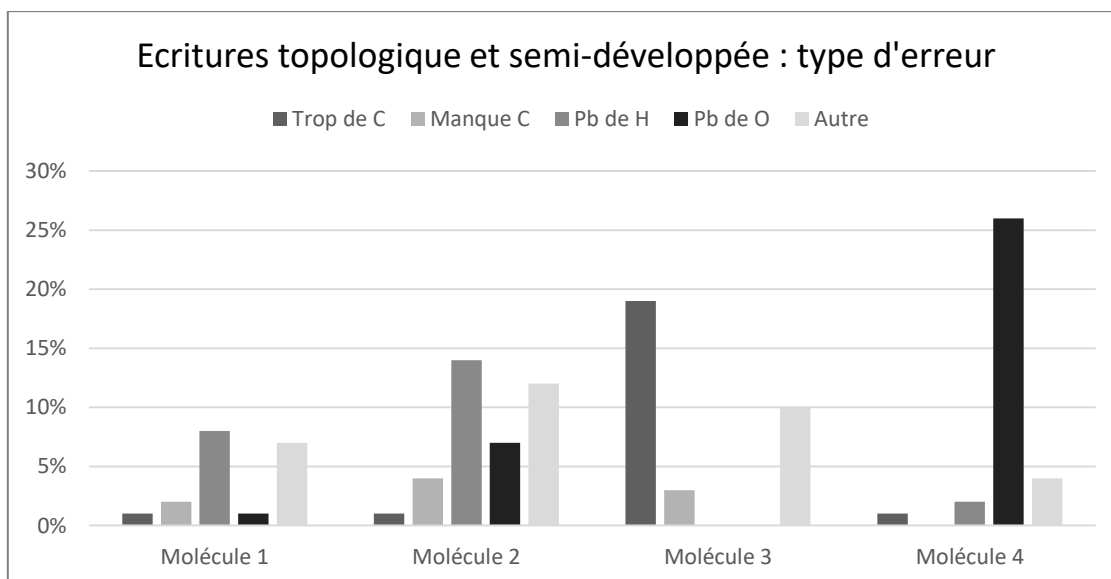


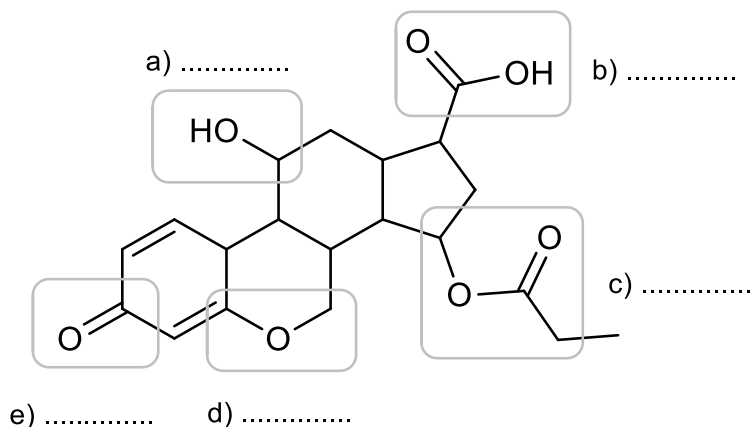
Figure 3.55 : Mise en avant du type d'erreur lors de la conversion depuis une écriture topologique vers une écriture semi-développée (molécules 1 et 2) ou vice versa (molécules 3 et 4) (N = 201)



Lorsque nous demandons aux élèves de passer d'une écriture topologique à une structure semi-développée, l'erreur principalement commise se situe au niveau du décompte d'hydrogènes (molécules 1 et 2 – 8% et 14% des élèves). Lorsque l'exercice est effectué dans l'autre sens, l'erreur majoritaire se situe au niveau du nombre de carbones (19% des élèves – molécule 3) ou de la représentation des oxygènes, lorsqu'il y en a dans la molécule (molécule 4), ceux-ci ayant tendance à disparaître dans la représentation topologique de la molécule (26% des élèves).

**T5) Voici une molécule organique. Identifie les différentes fonctions qui ont été entourées.**

La reconnaissance des différentes fonctions organiques a été abordée lors du précédent questionnaire en présentant aux élèves une seule fonction par molécule. Ils étaient alors entre 40 et 70% à identifier correctement la fonction présente, avec de meilleurs résultats pour les alcools, alcanes et alcènes. Nous avons voulu déterminer s'ils peuvent fournir des résultats similaires lorsqu'ils doivent identifier les fonctions présentes dans une plus grande molécule, qui est donc écrite sous forme topologique. Voici la molécule présentée aux élèves, suivie des résultats.



La figure 3.56 présente la répartition des réponses données par les élèves.

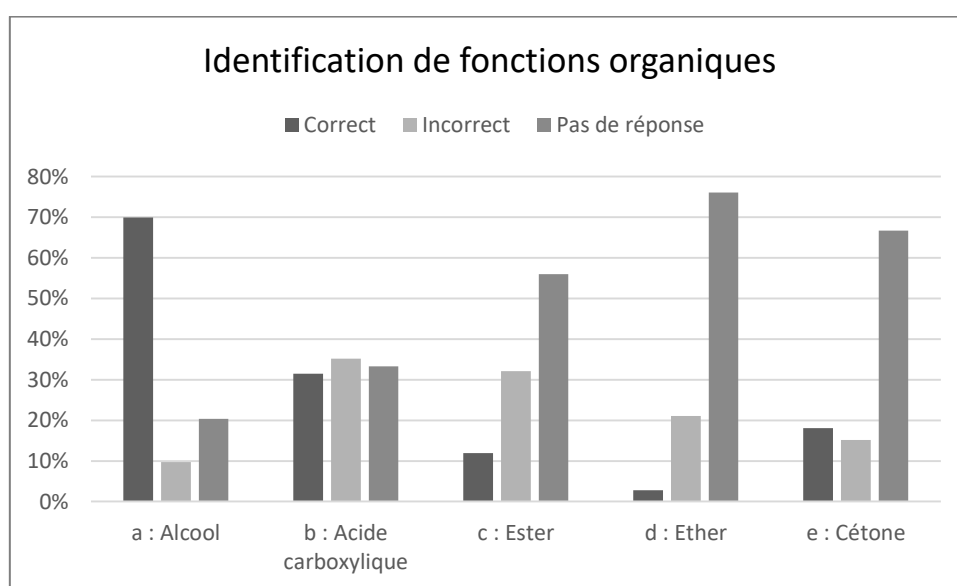
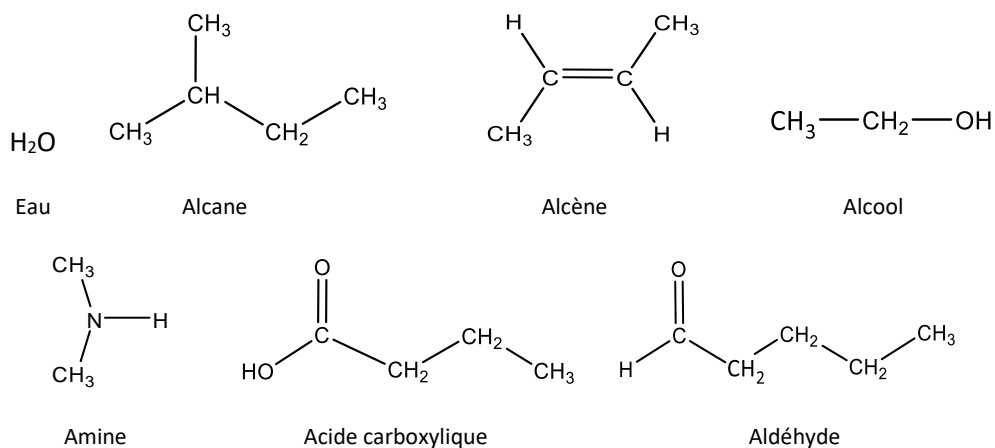


Figure 3.56 : Pourcentage d'élèves identifiant correctement les différentes fonctions organiques proposées (N = 201)

Nous constatons que la seule identification correcte concerne la fonction alcool (70% des élèves). Les autres fonctions proposées aux élèves ne sont pas correctement identifiées par la majorité des élèves.

**T6) Voici différentes molécules. Pour chaque molécule, détermine si elle est polaire ou non polaire, et si elle peut faire des liaisons hydrogène ou non.**



Lors du précédent questionnaire, nous avons demandé aux élèves de déterminer si certaines fonctions organiques et certaines molécules étaient polaires et si elles étaient capables de former des liaisons hydrogène. Nous avons réitéré la question, en espérant que le fait de représenter la structure des molécules aiderait les élèves à déterminer la réponse à ces questions. Nous nous demandions également si le fait de devoir réfléchir à la définition d'une molécule polaire et d'une liaison hydrogène lors de questions précédentes du questionnaire allait aider les élèves. Les figures 3.57 et 3.58 présentent les pourcentages des réponses donnés par les élèves.

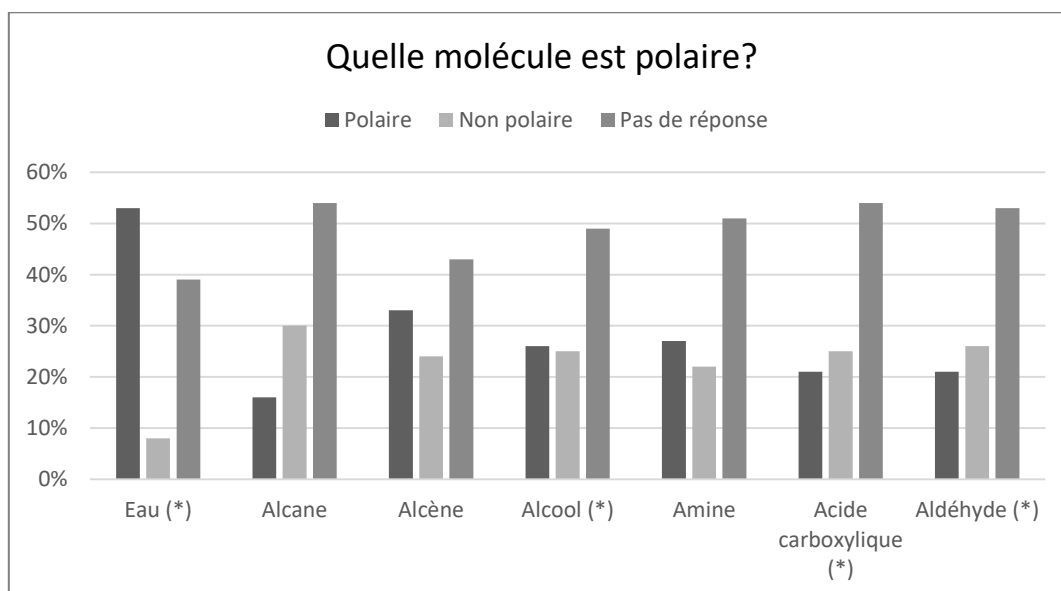


Figure 3.57 : Pourcentage d'élèves identifiant chacune des molécules proposées comme étant polaire, les molécules effectivement polaires sont indiquées par un (\*) (N = 201)

Nous constatons que la seule molécule que plus de la moitié des élèves identifie correctement comme étant polaire est l'eau. Lorsqu'il s'agit de déterminer si une molécule organique est polaire, les choses

semblent plus compliquées. L'alcool, l'acide carboxylique ainsi que l'aldéhyde présenté aux élèves, tous trois polaires, ne sont identifiés comme tels que par 21 à 26% des élèves. De manière encore plus surprenante, un élève sur trois pense que l'alcène proposé est polaire. Nous constatons ici que la majorité des élèves s'abstient de répondre, il semble donc que la notion de polarité pose de gros problèmes aux élèves.

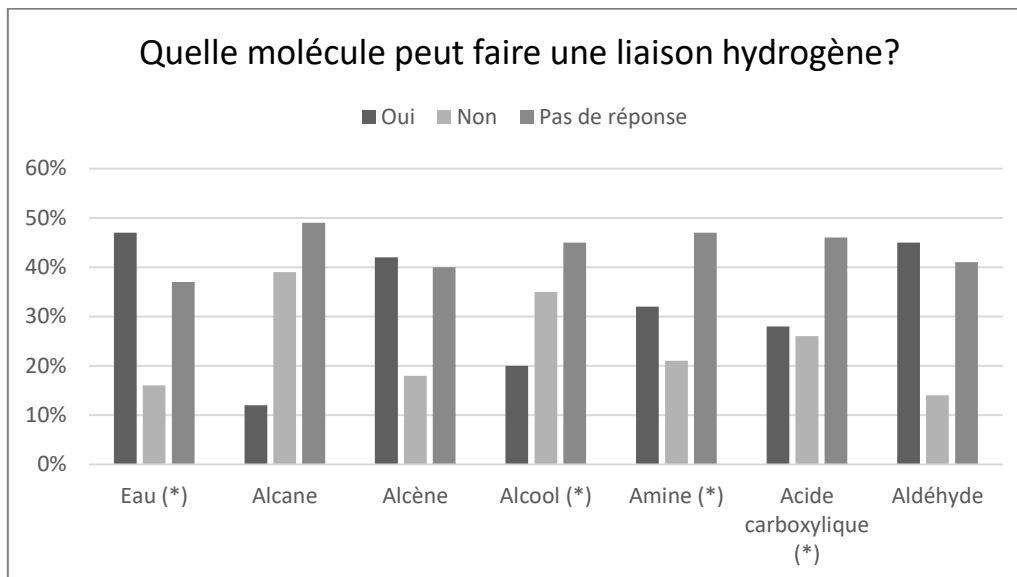


Figure 3.58 : Pourcentage d'élèves identifiant chacune des molécules proposées comme étant capable de faire une liaison hydrogène, les molécules pouvant effectivement faire une liaison hydrogène sont indiquées par un (\*) (N = 201)

À l'instar des réponses concernant la polarité des molécules, les élèves ont majoritairement choisi de s'abstenir en ce qui concerne la faisabilité des liaisons hydrogène. La seule molécule où près de la moitié des élèves affirme avec raison qu'elle est capable de faire des liens H est la molécule d'eau. L'alcool, l'amine et l'acide carboxylique, les trois autres molécules proposées étant capables de faire des liens H, ne sont sélectionnés que par 20 à 32% des élèves. De manière surprenante, l'alcène et l'aldéhyde, qui ne peuvent faire des liaisons hydrogène, sont pourtant identifiés par plus de 40% des élèves. Nous constatons que les conditions nécessaires pour qu'une molécule puisse faire des liaisons hydrogène ne sont pas intégrées par les élèves.

### **Analyse globale du questionnaire**

Comme pour le questionnaire précédent, nous allons clôturer notre analyse par une vision globale du taux de réponses correctes pour chaque question. Nous avons réuni les différentes questions en fonction des thèmes déterminés grâce au premier questionnaire. Les pourcentages sont cette fois compris entre 22% et 56%, les écarts ne sont donc plus aussi importants que précédemment, comme nous pouvons le voir sur la figure 3.59.

Les questions correspondant au thème 1 (chimie organique et vie quotidienne) sont celles concernant la définition de la chimie organique et d'un polymère, ainsi que l'identification de produits comme étant organiques et l'identification de polymères (Q1, Q2, T1, T2). Les élèves sont entre 33% et 47% à avoir répondu correctement.

Les questions concernant le thème 2 (structure des molécules organiques) sont celles concernant les classes d'alcool primaire ou secondaire, les isomères ainsi que la reconnaissance de fonctions organiques (Q3, Q4, Q5, T3, T5). La moyenne est identique au thème précédent mais les écarts sont légèrement plus importants, les réponses correctes s'étalant de 27% à 56%, montrant ainsi que les élèves maîtrisent mieux le concept d'isomère que la reconnaissance de fonctions.

Les questions correspondant au thème 3 (propriétés des molécules) sont celles reprenant les concepts de changement d'état, de polarité et de liaisons hydrogène. Les résultats sont ici les moins bons avec une moyenne de seulement 28%.

Nous avons également repris une question du thème 5 (nomenclature) en demandant aux élèves de faire le passage entre écriture topologique et semi-développée. Cette question, bien que dépassant seulement la moyenne, présente un des meilleurs taux de réussite avec 54%.

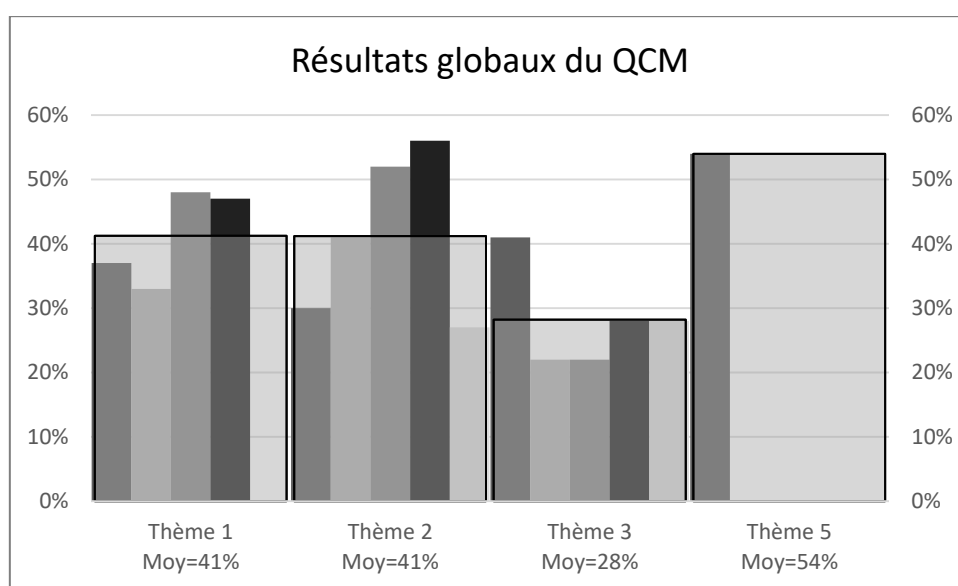


Figure 3.59 : Répartition des réponses correctes des élèves pour chacune des questions en fonction du thème et pourcentage moyen de bonne réponse pour chacun des thèmes (N = 201)

Nous avons décidé de ne pas poser de questions sur les réactions organiques (thème 4) par écrit et d'approfondir cette partie de la matière lors d'entretiens oraux avec certains élèves. Nous avons ainsi interviewé 15 élèves lors d'entretiens de 15 à 20 minutes enregistrés en tête à tête, comme nous allons le voir dans le chapitre suivant.

## Chapitre IV : Entretiens semi-dirigés avec les apprenants

Nous avons effectué des entretiens de 15 à 20 minutes avec 15 élèves. Ces entretiens ont été enregistrés, retranscrits puis analysés. Les citations entre guillemets et en italique sont les dires exacts des élèves (verbatim). Ils sont suivis par le code d'identification de l'élève en question (E01 à E15). L'analyse des entretiens semi-dirigés est présentée ci-après, question par question, en détaillant pour chaque question les grands types de réponses obtenus.

### **Q1 – Qu'est-ce qu'une réaction chimique ?**

Une des premières questions posées à l'élève est de lui demander sa définition d'une réaction chimique. Ils sont tous familiers avec ce concept depuis plusieurs années, mais cela reste pourtant un concept assez difficile à définir en utilisant des termes corrects.

Voici une définition communément acceptée pour une réaction chimique, faisant intervenir les items qui seront considérés par la suite :

*« Une réaction chimique est une transformation de la matière au cours de laquelle les espèces chimiques (atomiques, ioniques ou moléculaires) qui constituent la matière sont modifiées : les espèces qui sont consommées sont appelées réactifs. Les espèces formées au cours de la réaction sont appelées produits de réaction. »*

Cette définition fait clairement apparaître la notion importante de transformation de la matière qui doit être intégrée et exprimée par les élèves (à ne pas confondre avec les transformations physiques). Les élèves doivent utiliser les mots corrects afin de qualifier ce qui se trouve dans une réaction chimique, à savoir les réactifs au départ, et les produits à l'arrivée. Voyons comment les élèves répondent à cette question.

### **Les élèves n'utilisent pas correctement les termes « réactif » et « produit »**

Parmi les différents élèves interviewés, très peu utilisent le vocabulaire correct pour parler de ce qu'est une réaction. Certains utilisent le terme « produit », mais pas dans le sens du produit de réaction généré lors d'une réaction chimique. La majorité a oublié le terme correct et explique que l'on forme quelque chose, un « truc », lors de la réaction chimique. La notion d'élément chimique, d'atome ou de molécule est également souvent confuse, l'élève considère qu'une réaction chimique se fait à partir d'éléments chimiques, d'atomes ou de molécules sans forcément distinguer ces différents concepts.

*« C'est une molécule qui réagit pour former des produits. C'est un processus chimique. » - E01*

*« Une réaction chimique c'est quand on met en lien deux composants chimiques, deux éléments, du coup ça donne une réaction. » - E03*

*« C'est quand on fait interagir plusieurs éléments, par exemple du tableau périodique, des molécules ou des atomes, et que ensemble ils vont aboutir à quelque chose de différent que à la base. » - E04*

*« C'est quand tu prends des produits et que d'une certaine façon, que ces produits se modifient et forment, enfin tu mets des réactifs et ça forme des produits, donc ça change les molécules, donc des produits, des réactifs, forment d'autres molécules qui sont différentes, qui peuvent parfois rester les mêmes, et qui deviennent des réactifs. » - E05*

- « Une réaction chimique c'est le résultat de l'assemblage de deux ou plusieurs choses... C'est le résultat, ce qui va, ce que l'assemblage de choses va donner. » E08
- « On prend un élément chimique et un autre et on obtient le produit chimique. » E09
- « C'est quand deux produits sont additionnés et que ça fait une réaction. » E10
- « C'est quand deux produits donnent un autre produit, enfin donnent un... truc. » E11
- « C'est deux corps, deux composés qui réagissent ensemble pour former un produit. » - E15

On constate cependant que certains élèves donnent une définition utilisant effectivement les termes « réactif » et « produit », mais ce n'est pas la majorité.

- « C'est deux réactifs qui réagissent et forment des produits. » - E02
- « C'est une réaction qui est faite au départ de réactifs qui à la fin vont se transformer [...] en produits de la réaction. » - E14

### **Les élèves choisissent des termes variés pour qualifier la transformation**

La seconde notion qu'il est important de mentionner en définissant la réaction chimique est la notion de transformation de la matière. Les différents termes utilisés par les élèves pour évoquer cette transformation sont l'assemblage, l'addition, le mélange, l'association, la combinaison ou la transformation, ils parlent de faire interagir, de mettre en lien, de connecter, de mélanger et de transformer les produits chimiques impliqués dans la réaction. Dans certaines définitions, le passage des réactifs aux produits semble « magique », les différents réactifs étant mis ensemble pour donner des produits, sans plus d'explication. D'autres élèves vont qualifier la transformation de processus chimique ou encore de phénomène.

- « C'est un processus chimique. » - E01
- « Une réaction chimique c'est quand on met en lien deux composants chimiques, deux éléments, du coup ça donne une réaction. [...] Et ça va produire un phénomène. » - E03
- « C'est quand on fait interagir plusieurs éléments. » - E04
- « Pour moi une réaction chimique c'est [...] quand on connecte deux éléments, quand on mélange deux éléments, pour créer quelque chose de nouveau. » - E06
- « Une réaction chimique c'est le résultat de l'assemblage de deux ou plusieurs choses. » E08
- « On prend un élément chimique et un autre et on obtient le produit chimique. » E09
- « C'est quand deux produits sont additionnés et que ça fait une réaction. » E10
- « Une réaction chimique c'est [...] une chose qui se transforme après s'être associée avec quelque chose. » E12
- « C'est quand deux réactifs, enfin quand deux éléments [...] peuvent se combinaison pour donner quelque chose d'autre. Si jamais c'est des éléments qui ne se combinent pas, il n'y aura pas de réaction. » E13
- « C'est une réaction qui est faite au départ de réactifs qui à la fin vont se transformer [...] en produits de la réaction. » - E14

### **Les élèves font appel à d'autres notions pour qualifier la réaction chimique**

D'autres notions ont été utilisées par les élèves pour expliquer ce qu'est une réaction chimique. En voici quelques-unes.

#### ***Une réaction, c'est quand il y a réaction***

Certains élèves utilisent directement le mot « réaction » pour définir ce qu'est une réaction.

- « Une réaction chimique c'est quand on met en lien deux composants chimiques, deux éléments, du coup ça donne une réaction. » - E03

« C'est quand deux produits sont additionnés et que ça fait une réaction. » E10

### **Deux réactifs forment un produit**

Plusieurs élèves utilisent un chiffre précis pour définir le nombre de réactifs ou de produits dans une réaction. Ils parlent de deux réactifs qui donnent un produit. On retrouve plusieurs fois cette notion de deux réactifs qui se transforment en un seul produit.

« Donc tu mets deux réactifs, et puis ça donne un produit. » E11

« On additionne deux molécules et on a un produit. » E09

### **Une réaction se fait dans un seul sens**

Un élève a tenu à préciser qu'une réaction chimique ne peut se faire que dans un seul sens.

« Mais une réaction chimique ne peut pas être divisée après dans l'autre sens. C'est-à-dire par exemple si on ajoute de l'oxygène et de l'hydrogène, ça forme de l'eau, mais après l'eau on ne peut pas la rediviser en hydrogène et oxygène. » E08

### **Une réaction, c'est la formation d'une molécule**

Dans le discours de certains élèves, la réaction semble être associée à la formation d'une molécule, et pas à la réaction entre plusieurs molécules pour en former une autre. Ceci se vérifie à la question suivante, lorsque nous demandons un exemple de réaction chimique aux élèves, et qu'ils sont majoritaires à nous proposer la formation de l'eau. Nous constatons que les élèves font une confusion entre effectuer une réaction ou appliquer les règles de formation de molécules, en appliquant par exemple la règle de l'octet, comme nous pouvons le voir dans l'exemple suivant.

« C'est quand il y a des liens qui peuvent se faire entre différents atomes grâce à la dernière couche électronique, enfin si jamais il y a des nombres, si jamais il y a disons 7, si on prend quoi... du chlore c'est 7? Tu peux créer de l'acide chlorhydrique avec de l'hydrogène parce que l'hydrogène il n'y a qu'un seul électron sur la dernière couche et donc si tu mets de l'hydrogène et du chlore ensemble, ça donnerait de l'acide chlorhydrique composé d'hydrogène et de chlore qui ont pu réagir ensemble. »

E13

### **Une réaction produit ou utilise de l'énergie**

La production d'énergie ou de chaleur au cours d'une réaction chimique est pointée par plusieurs élèves.

« Ça peut soit faire des réactions qui vont faire sortir de la chaleur, soit certaines qui vont en enlever, enfin garder de la chaleur. » - E03

« Oui, ça peut être avec de l'énergie, du CO<sub>2</sub> en plus. » - E15

## **Q2 – Peux-tu donner un exemple de réaction chimique ?**

Après nous avoir donné leur définition d'une réaction chimique, nous avons demandé aux élèves de nous donner un exemple de réaction chimique afin d'avoir une base sur laquelle travailler. Nous allons

tout d'abord détailler les différentes réactions proposées par les élèves avant de parcourir les différentes explications données par ceux-ci lorsqu'on leur demande ce qu'il se passe au cours de la réaction qu'ils ont proposée.

### Les élèves proposent des réactions

Voici les différentes réponses proposées par les élèves lorsqu'on leur demande d'écrire un exemple de réaction chimique :

- «  $\text{HCl}_{(aq)} \rightarrow \text{H}^+ + \text{Cl}^-$  » - E01  
« Un acide plus un métal » - E02  
«  $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ . Ça va donner des ions de Na et des ions de Cl » - E03  
«  $4 \text{H} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$  » - E04  
«  $\text{H}_2 + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  » - E05, E06, E07, E08, E09  
«  $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_5\text{O}$  » - E10  
«  $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  » - E11  
« [pas de réaction] » - E12  
«  $\text{H} + \text{Cl} \rightarrow \text{HCl}$  » - E13  
«  $\text{C}_2\text{H}_6 + 7/2 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$  » - E14  
«  $\text{NaCl} (\text{dans } \text{H}_2\text{O}) \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$  » - E15

Nous avons été assez surpris de constater que la réaction la plus citée par les élèves est la formation de l'eau, à divers degrés de justesse (E04, E05, E06, E07, E08, E09, E11). Un seul élève propose spontanément une réaction faisant intervenir un réactif organique (E14). Trois élèves proposent une réaction de dissociation afin de former des ions (E01, E03, E15). Seuls cinq élèves écrivent une réaction correcte (E01, E10, E11, E14, E15). Nous considérons la réaction proposée par l'élève E10 comme étant correcte bien que le produit ne soit pas écrit de manière totalement correcte ( $\text{NH}_5\text{O}$  plutôt que  $\text{NH}_4\text{OH}$ ). Bien qu'ils soient occupés depuis plusieurs années à jongler avec différentes réactions chimiques, la majorité des élèves n'est toujours pas capable d'écrire spontanément une réaction chimique correcte.

### Les élèves expliquent leur réaction par toute une série de notions

Lorsqu'on demande aux élèves d'expliquer comment se fait la transformation des réactifs en produits, ils font appel à beaucoup de notions différentes pour répondre à cette question. Beaucoup d'élèves parlent d'une manière ou d'une autre de liaisons qu'il faut casser et former, mais les notions retenues par les élèves pour expliquer pourquoi et comment on casse certaines liaisons pour en reformer d'autres sont variées ; on passe par la règle de l'octet, la valence des atomes, l'électronégativité, la stabilité des composés, les électrons, l'énergie nécessaire à la réaction, l'équilibre de la réaction ou encore la polarité des molécules. Cette liste de notions montre déjà que les élèves ne savent pas vraiment dans quel cadre il leur faut faire appel à toutes ces notions, et lesquelles sont réellement pertinentes pour expliquer pourquoi et comment une réaction chimique a lieu.

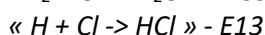
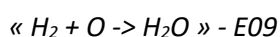
Le fait de se baser sur la **règle de l'octet** ou sur la notion de **valence** des atomes pour expliquer comment transformer les réactifs en produits met en évidence une incompréhension du domaine d'application de ces règles. En effet, ils appliquent des règles concernant la construction de structure moléculaire à des réactions chimiques. Nous observons ici une conception alternative qui semble



présente chez beaucoup d'élèves, à savoir qu'une réaction chimique est une réaction au cours de laquelle il y a formation d'une molécule au départ de ses éléments.

Certaines réactions peuvent effectivement servir à créer des molécules à partir d'ions ou d'atomes, mais ce n'est pas le cas de toutes les réactions. On observe que la moitié des réactions proposées concernent en effet la formation d'une molécule au départ des éléments qui la composent. Les élèves ont alors du mal à savoir à partir de quels réactifs la molécule peut être formée, les réactions proposées démarrent des différents atomes composant la molécule finale, qui ont été séparés les uns des autres pour se retrouver sous forme d'atomes ou de molécules monoatomiques dans les réactifs.

Voici deux exemples très démonstratifs :



L'explication de l'élève portant sur la formation de HCl démontre qu'il se base sur les notions déterminant la formation d'une molécule pour expliquer la réaction :

*« Donc, on a les [...] atomes d'hydrogène et de chlore, qui sont proches, qui sont en contact, qui ne sont pas vraiment en contact parce qu'il y a du vide entre etc, mais... Et autour il y a des nuages d'électrons, enfin qui sont, qui tournent pas, qui sont juste un peu partout à la fois, de ce que j'ai compris en gros, et le chlore n'a pas de volonté, mais on dit qu'il aimerait bien avoir l'électron unique de l'hydrogène, du coup ils vont partager cet électron et créer un lien, et la même chose se passera pour l'autre, je suppose. » - E13*

Dans le même ordre d'idée, certains élèves se basent sur la valence de chaque atome pour justifier le fait que certaines liaisons se brisent :

*« Comme ils ont droit qu'à deux liaisons, et qu'elles sont toutes les deux prises, celle-là elle ne peut plus exister forcément, du coup ils se séparent. » - E09*

Certains élèves se rendent compte qu'il faut **fournir de l'énergie** à des réactifs pour qu'ils réagissent ensemble et forment des produits.

*« Généralement je pense pas que ça se fait tout seul, genre comme ça il faut rajouter de l'énergie. Parce que genre, là, il y a du dihydrogène et de l'oxygène, pourtant on n'a pas spécialement une pièce remplie d'eau. Du coup, il faut de l'énergie, et en gros, si je me rappelle bien, l'oxygène, les oxygènes sont toujours par deux, et il faut qu'on les incite à se séparer, pour qu'il y ait un oxygène tout seul et un oxygène tout seul. » - E11*

*« Souvent il faut quelque chose, de l'énergie ou quoi, pour casser les liens. » - E05*

Plusieurs élèves vont faire appel à la notion de **stabilité** d'une molécule pour expliquer pourquoi une réaction a lieu. Ils sont plusieurs à avoir compris qu'une réaction chimique va générer des produits plus stables que les réactifs que l'on avait au départ.

*« Ils vont s'accrocher l'un avec l'autre par bénéfice, pour être plus stables et donc s'il y a une réaction ça veut dire que un élément sera plus stable avec un autre et que c'est pour ça qu'ils se séparent. » - E03*

*« Un atome cherche toujours à avoir le niveau énergétique le plus bas, le plus stable, enfin au plus il est bas au plus ça sera stable, et donc en mettant plusieurs éléments ensemble, ils auront peut-être un niveau énergétique plus bas et donc plus stable qui serait différent que s'ils étaient chacun tout seul, et donc ils vont s'agencer pour être le plus stable possible et donc avoir un niveau énergétique plus bas. » - E04*

*« Le  $H_2O$  est plus stable que  $H_2$  et  $O_2$ , donc quand ils se rencontrent ils se séparent et ils se mettent ensemble et voilà. » - E07*

Une bonne partie des élèves mentionne le fait qu'il faut **casser des liaisons** durant une réaction chimique.

*« La liaison qu'il y a entre les deux hydrogènes va devoir se casser, pareil entre les deux oxygènes. » - E04*

La notion d'**électrons** est utilisée par quelques élèves. Leur explication est alors basée sur la notion d'**électronégativité**. La rupture et la formation de liaisons, ou de molécules, est expliquée par le fait que l'atome le plus électronégatif va capter des électrons vers lui, et l'atome le moins électronégatif va en perdre, ce qui résulte en la rupture d'une liaison.

*« NaCl est attaché par, enfin a en lien certains électrons, et par l' $H_2O$  certains électrons vont aller plus d'un côté, enfin vont se séparer. » - E03*

*« En mettant les deux ensemble, [...] ils vont être attirés par leur électronégativité, [l'hydrogène et l'oxygène] vont assez bien ensemble, et donc ils vont être bien collés. » - E04*

Un élève a tenté d'expliquer la formation de nouvelles molécules par la **polarité**. Une molécule polaire va être attirée par une autre molécule polaire, le pôle positif attirant le pôle négatif de l'autre molécule, ce qui va permettre de créer de nouvelles liaisons. Pour cet élève, le fait qu'il existe une liaison est expliqué par l'attraction entre un pôle positif et un pôle négatif.

*« Dans une molécule il y avait plus et moins, et du coup il y avait le plus qui était attiré par le moins de l'autre composé et inversement. [...] Je pensais que c'était juste, vu qu'il y avait une liaison entre les deux, ça voulait dire qu'il y avait un pôle négatif et un pôle positif, que les deux s'attirent. » - E14*

### **Les élèves dessinent la structure des molécules impliquées dans leur réaction**

Afin de les aiguiller dans leur explication du « mécanisme » de la réaction qu'ils m'ont écrite, nous leur proposons ensuite de représenter la structure des réactifs et des produits de leur réaction. En général, cette étape se passe relativement bien, ils se souviennent des règles à suivre pour dessiner une molécule correctement (**règle de l'octet**, utilisation des **valences**). Ils ont parfois besoin que nous leur rappelions la **valence** de tel ou tel élément, ou simplement leur place dans le tableau périodique. Le fait d'avoir la structure des molécules sous leurs yeux semble leur permettre une meilleure visualisation de ce qui se passe au cours de la réaction. Avec leurs propres mots, ils expliquent que des liaisons doivent être brisées et que d'autres liaisons doivent être formées.

### **Les élèves n'utilisent pas un langage chimique correct**

Le vocabulaire chimique ne semble pas ancré dans l'esprit des élèves. Ils n'ont pas réussi à définir la réaction chimique en utilisant les termes de réactifs et de produits, et ils n'utilisent pas non plus les termes corrects pour parler de liaisons. Certains se souviennent du terme « valence » mais nous devons le rappeler à d'autres. Et une partie des élèves ne parle pas spontanément de « liaison », ils en restent aux « barres », aux « bras » ou aux « bras de valence ».

*« Il y a ces deux bras, mais là il n'en reste plus qu'un. [...] J'imagine que les barres vont s'enlever et elles vont aller se rajouter, comme ici avec les H, mais comme il y en a deux je ne sais pas. » - E08*

### **Q3 – Peux-tu donner un exemple de réaction organique ?**

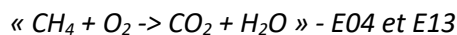
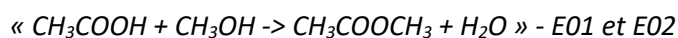
Vu que presque tous les élèves ont mentionné une réaction inorganique lorsqu'on leur demande un exemple de réaction chimique, nous leur avons ensuite spécifiquement demandé un exemple de réaction organique. Il s'agit ici de constater si les élèves ont plus de difficulté à travailler sur une réaction organique et s'ils pensent qu'une réaction organique est traitée de la même façon qu'une réaction inorganique ou non.

Dans un premier temps, nous avons écrit une réaction sur laquelle travailler. Très peu d'élèves ont été capables d'écrire correctement une réaction organique, il a donc fallu les aider, soit en leur donnant le nom de la réaction, soit en écrivant les réactifs pour eux, soit en écrivant la totalité de la réaction. Nous avons choisi de proposer la réaction d'estérification aux élèves, car c'est une réaction a priori vue dans toutes les écoles.

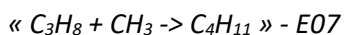
Parmi les élèves interviewés, un élève nous a directement proposé une réaction de chimie organique lors de notre question précédente. Les réponses de cet élève ont donc été traitées lors de la question précédente et n'apparaîtront pas ici.

### **Les élèves ne savent pas tous écrire spontanément une réaction organique**

Seulement quatre élèves ont proposé spontanément une réaction correcte, même si l'équation n'était pas pondérée, à savoir la combustion du méthane ou une réaction d'estérification.



Un cinquième élève a voulu écrire une réaction d'addition entre du propane et un groupement  $CH_3$ .



Deux autres élèves ont été capables de citer plusieurs réactions précises vues en cours, sans pour autant s'en souvenir suffisamment pour les écrire.

*« Par exemple comment est-ce qu'on fait du nylon, la photosynthèse, des choses comme ça... » - E09*

*« La photosynthèse [...] Je sais qu'il y avait le  $C_6H_{12}O_6$  avec la lumière qui réagissait... » - E15*

Pour les autres élèves, il a fallu leur proposer une réaction, qui fut dans ce cas l'estérification. Mais mentionner le nom de la réaction ne suffit pas toujours pour qu'ils se souviennent de ce qu'elle représente.

*« LVO : Alors, une réaction que normalement vous voyez tous, c'est l'estérification. Ouais y avait ça aussi, ça je me rappelle. C'est quand on rajoute un ester à quelque chose. » - E11*

### **Les élèves ne se souviennent pas des fonctions organiques**

Une estérification implique de faire réagir un acide carboxylique et un alcool afin de former un ester et de l'eau. Les élèves doivent donc se souvenir des différentes fonctions organiques utilisées dans cette réaction. Malheureusement, nous constatons que la majorité d'entre eux sont incapables de dessiner un alcool, un acide carboxylique et un ester.

*« L'estérification... L'ester c'est avec COOC... Non c'est deux trucs O, C, un O au-dessus... et un R c'est ce qu'on pouvait choisir. (dessine RCOOR, je l'aide). Et l'éther c'était... il n'y avait pas de... c'était R comme ça, O, R. (dessine une cétone). » - E08*

*« Euh l'ester c'est celui qui fait... hum... j'ai besoin d'un peu de temps pour me remémorer exactement comment ça fonctionnait toutes ces histoires... [...] C'était pas ROR? » - E03*

### **Les élèves écrivent les produits d'une estérification**

Lorsque les élèves ne sont pas capables d'écrire spontanément une réaction organique, nous leur proposons d'écrire les réactifs d'une estérification (acide acétique et éthanol) et leur laissons la possibilité d'écrire les produits. La majorité des élèves arrivent à écrire correctement l'ester correspondant, certains ayant besoin d'aide pour se rappeler ce qu'est un ester. La majorité des élèves ont retrouvé qu'il fallait ajouter une molécule d'eau dans les produits de réaction, soit directement en écrivant l'ester, soit après réflexion, en se rendant compte qu'il manquait deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène aux produits de la réaction pour que celle-ci soit pondérée. Les élèves ont compris comment dessiner les produits de réaction, mais ce n'est pas pour autant qu'ils ont compris ce qui se passe durant la réaction.

*« Mais ici j'ai gardé CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub> parce que c'est le R de [...] l'acide, et du coup j'ai retenu que cette partie-là, et puis j'ai mis l'autre R de [...] l'alcool, et puis du coup il me restait que de l'eau. [...] Mais en soi ce qui se passe concrètement, euh, je ne sais pas... » - E03*

Un élève s'est tout d'abord trompé et a dessiné l'acétate de méthyle au lieu de l'acétate d'éthyle. En lui rappelant que l'ester doit contenir le radical de l'alcool d'un côté, et le radical de l'acide de l'autre, il s'est finalement corrigé.

Afin de pousser la réflexion un peu plus loin, j'ai demandé à un élève ayant écrit spontanément une estérification s'il pouvait me dessiner les deux réactifs nécessaires à la formation d'un autre ester (le propanoate d'isopropyle). L'élève a été parfaitement capable de me dessiner l'acide carboxylique et l'alcool nécessaire à la formation de cet ester. Il existe donc des élèves ayant intégré correctement la réaction d'estérification !

### Les élèves dessinent la structure des molécules impliquées dans l'estérification

Comme lors de la question portant sur les réactions chimiques en général, nous avons conseillé aux élèves de se baser sur les structures des molécules impliquées dans les réactions pour les aider à expliquer comment les réactifs se transforment en produits. Nous avons constaté que les élèves préfèrent bien souvent redessiner les molécules sous forme totalement développée, lorsqu'elles leur sont proposées sous forme semi-développée.

« LVO : Et pour toi c'est plus facile comme ça? (formule développée) Ça te perturbe quand c'est écrit comme ça? (formule semi-développée)

Oui, comme ils sont tous les deux assemblés, je vois mal comment on peut les mettre ensemble.

Tandis que quand on les voit détachés, on va dire, chacun l'un de l'autre, c'est plus facile. » - E08

La plupart des élèves n'ont pas eu de difficultés à dessiner les différentes molécules impliquées dans la réaction. Dessiner des molécules organiques semble même être plus facile que de dessiner des molécules inorganiques pour lesquelles ils réfléchissent davantage à présenter une structure tridimensionnelle intégrant les doublets non liants et des angles de liaison corrects.

### Les élèves expliquent la réaction organique (estérification ou combustion) par toute une série de notions

De la même manière que pour la réaction inorganique, nous avons demandé aux élèves d'expliquer comment les réactifs se transforment en produits. Nous retrouvons certaines des notions utilisées pour répondre à cette même question concernant la réaction inorganique, telles que la valence, le besoin d'énergie et les liaisons chimiques.

Un des problèmes qui revient régulièrement concerne l'utilisation de la **valence** des atomes et de la **règle de l'octet** pour justifier qu'une molécule est stable, qu'elle est « bien comme ça », et que donc elle ne va pas réagir. Cette erreur est commise par plusieurs élèves.

« En fait j'ai du mal à saisir le truc parce que j'ai l'impression que  $CH_4$ , il est bien comme ça, enfin c'est 4 et puis 4 donc ça fait 8, donc il est bien comme ça... » - E13

Le besoin d'un apport en **énergie** est mentionné par certains élèves afin de démarrer la réaction.

« J'imagine qu'on doit rajouter de l'énergie, comme d'habitude, comme dans une réaction. » - E11

Les élèves vont plus facilement parler de **liaisons** qu'il faut rompre pour ensuite en former d'autres. Ils semblent bien comprendre qu'il faut appliquer les règles dont nous avons précédemment parlé lors de la question concernant les réactions inorganiques. Ils sont donc bien conscients que les réactions organiques sont similaires aux réactions inorganiques.

« Il y a une scission ici, je suppose, un oxygène va aller choper deux hydrogènes et l'autre prendra les deux autres. [...] Du coup le carbone se retrouve seul et il va aller rejoindre deux oxygènes. » - E13

« Il faudra d'office casser le lien de l' $O_2$ , du  $CH_4$  aussi... Donc il faut casser tous les liens qu'il y a dans le  $CH_4$  et dans le dioxygène pour arriver à avoir du  $CO_2$  et de l'eau. » - E04

Nous leur avons donc demandé s'il y avait un **ordre** particulier dans lequel les différentes liaisons doivent se casser, ou bien si toutes les liaisons se cassent, et qu'ensuite toutes les nouvelles liaisons se

forment. Les élèves semblent assez confus, mais en réfléchissant un peu, la plupart d'entre eux vont conclure que l'on va commencer par casser toutes les liaisons nécessaires et qu'ensuite on va former les nouvelles molécules. Bien que ceci ne soit pas correct et risque de mener à d'autres conceptions alternatives, l'idée de casser et former des liaisons est la bienvenue.

*« Je dirais que ça doit être à peu près tout en même temps. Enfin si par exemple on commence par séparer les deux oxygènes, ils doivent se réagencer avec le carbone mais qui est au milieu de tous les hydrogènes donc il faut aussi les casser pour pouvoir réagencer. » - E04*

Nous avons questionné certains élèves à propos de la **stabilité** des différentes molécules impliquées dans la réaction. Pour la majorité d'entre eux, il semble qu'une molécule, si elle est stable, ne peut plus être impliquée dans une réaction chimique. Une fois stable, elle restera la même. En les faisant réfléchir un peu, ils peuvent arriver à comprendre que toutes les molécules n'ont pas la même stabilité, et qu'une réaction peut donc impliquer des molécules moins stables qui vont ensuite former des molécules plus stables après la réaction. L'inverse est bien sûr également possible ; l'idée est ici d'effacer la notion de stabilité comme étant purement dichotomique.

*« LVO : Est-ce que tu as une idée de pourquoi on va casser des molécules stables pour en faire d'autres?*

*Parce que c'est, euh... ben il y a un truc de retour à la simplicité mais c'est... quand t'es stable, t'es stable non? Simplement, sans plus.*

*LVO : Elles sont toutes stables de la même façon?*

*C'est ce que je me disais, peut-être que celles-là sont plus stables que celles qui étaient stables avant.*  
*» - E13*

Lors de l'estérification, une molécule d'eau est formée. Afin d'expliquer sa formation, les élèves prennent un hydrogène sur un des réactifs, et un **groupement OH** sur l'autre réactif. Nous avons voulu savoir s'ils savaient quel réactif fournit le groupement OH. Nous avons pu constater que pour eux, l'acide comme l'alcool peut fournir le groupement OH indifféremment.

*« Il y a un OH (de l'acide) et un H qui est ici (de l'alcool), qui vont se retirer [...] de la molécule et alors l'oxygène qui est là (de l'alcool) et le carbone (de l'acide) se lient.*

*LVO : Est-ce que j'aurais pu faire, plutôt que prendre le OH ici (sur l'acide) et le H là (sur l'alcool), retirer le OH qui est ici (sur l'alcool) et le H qui est là (sur l'acide) ?*

*Je ne vois pas pourquoi on ne pourrait pas, ça reste la même chose, la finalité c'est la même. » - E11*

Plusieurs élèves ont signalé qu'on ne leur demande pas de réfléchir, qu'ils doivent simplement **apprendre par cœur** que lorsqu'on met tels réactifs ensemble, cela forme tels produits. Nous avons pu constater qu'il existe une frustration dans la manière dont le cours de chimie est donné. Souvent, les élèves savent que les choses sont plus compliquées que ce qu'on leur explique, mais le programme ne couvre pas cette matière et donc l'enseignant ne peut pas aller suffisamment loin dans la matière pour expliquer clairement les choses aux élèves.

*« Malheureusement on n'a pas vraiment appris plus concrètement comment, enfin quelles molécules il fallait accrocher ensemble, ce qu'il fallait enlever et ce qui fallait rajouter, c'était plus, ça plus ça égale ça, et on devait l'apprendre comme ça, mais on n'a pas [...] vraiment appris pourquoi... » - E12*

*« C'est ça que je reproche un petit peu au cours de chimie c'est que ça va vraiment juste du cas par cas, et on ne voit pas vraiment... Enfin, on ne pourrait pas être lâchés face à un nouveau problème et*

savoir se débrouiller avec je trouve, enfin avec ce qu'on a, enfin, si on pourrait concrètement mais, enfin on ne nous apprend pas vraiment à généraliser les choses je trouve. » - E09

« Il y a des moments où on ne nous explique pas et on nous pose juste les choses genre c'est super simple et moi ça me dérange un peu qu'on ne m'explique pas le fond, et puis qu'on fasse, quand on pose la question on te fait "non mais ça c'est pour plus tard, t'en as pas besoin pour comprendre"... oui mais, c'est quand même un peu frustrant, de se dire qu'on ne t'explique pas tout. » - E03

#### **Q4 – Qu'est-ce que la chimie organique ?**

Lorsque le temps alloué à l'entretien n'est pas encore atteint avec les questions précédentes, nous enchainons avec des questions plus générales sur la chimie organique. Nous avons commencé par leur demander quelle est leur définition de la chimie organique.

##### **Les élèves donnent leur définition de la chimie organique**

« C'est avec les éléments, c'est des éléments qu'on retrouve le plus souvent dans [...] des êtres vivants et que du coup c'est des éléments qui donnent du vivant quand ils sont assemblés ensemble. C'est le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote. » - E03

« La chimie organique, c'est tout ce qui est la chimie du vivant. » - E04

« La chimie organique c'est la chimie du vivant, et c'est avec, ça concerne les atomes de carbone principalement, d'oxygène, d'hydrogène et d'azote. » - E05

« C'est la chimie du carbone je pense, j'avais utilisé beaucoup le carbone dans la chimie organique. » - E06

« C'est la chimie des êtres vivants, et de ce qui contient du carbone. » - E07

« C'est l'étude d'éléments qu'on a découverts par le passé et de ses réactions quand on les mélange, quand on les assemble et tout. » - E08

« C'est la chimie du vivant. Et aussi il y a les principaux éléments, le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote. » - E09

« Chimie organique... Du vivant? Euh... les cellules et tout ça.... De la chimie du vivant quoi. » - E10

« C'est la chimie de la vie, c'est tout ce qui est la chimie qu'on trouve, je vais pas dire naturellement mais de tout ce qui est dans les êtres vivants, donc par exemple les végétaux ou les animaux. Et il y a quatre atomes différents qui sont dans la chimie organique, non plus en fait, il y en a plus, mais de base, qu'on trouve le plus souvent, c'est le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote. » - E11

« Pour moi la chimie organique c'est la chimie du vivant, donc tout ce qui se passe dans le corps, dans la matière. [...] La chimie organique c'est végétal et animal. » - E12

« C'est l'étude des composés organiques, c'est C, O, H et azote, enfin c'est composé de ça en gros. » - E13

« La chimie organique c'est la chimie naturelle on va dire, enfin c'est la science qui étudie les molécules organiques, [...] tout ce qui est composé de carbone et d'hydrogène, et d'oxygène à l'occasion. » - E14

*« Pour moi c'est la chimie de ce qui touche au carbone et aux êtres vivants, parce que les êtres vivants sont constitués de je ne sais plus trop combien de pourcents de carbone mais principalement de carbone et d'eau. » - E15*

### **Les élèves associent la chimie organique et la chimie du vivant**

Les mots-clés utilisés par les élèves pour définir ce qu'est la chimie organique sont principalement le vivant et les quatre éléments principaux composant les molécules organiques, à savoir le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote. Ils associent fortement la chimie organique à tout ce qui est animal et végétal, ou qui a une origine animale ou végétale. Ils associent également la chimie organique avec le corps humain et avec tout ce qu'il s'y passe. Il y a là une confusion entre chimie organique et biochimie (voir ci-dessus pour les extraits).

Les élèves ne connaissent pas la distinction entre chimie du vivant (ce qui correspond réellement au domaine de la biochimie) et chimie organique. Lorsqu'on leur demande si un produit qui n'est pas vivant, c'est de la chimie organique ou pas, ils sont confus et ne savent pas quoi répondre.

*« LVO : Et ce qui n'est pas vivant ce n'est jamais de la chimie organique?  
Je sais pas, je me dis peut-être, mais ça je suis pas sûre... mais je pense pas... » - E03*

*« LVO : Donc dès que c'est pas vivant, ce n'est pas de la chimie organique?  
Ça dépend de ce qu'on met, de comment on décrit vivant mais oui, tout ce qui est végétal, par exemple le bois, et animal, comme les humains ou les animaux, c'est de la chimie organique. Ce qu'il y a dans la pierre ou dans la terre, je crois que ça s'appelle de la chimie minérale il me semble. » - E04*

### **Les élèves face au conflit cognitif créé par l'association chimie organique et chimie du vivant**

En demandant des exemples de produits quotidiens faisant partie de la chimie organique, les élèves s'appuient fortement sur le lien entre chimie organique et chimie du vivant, confondant ainsi la chimie organique avec la biochimie.

*« J'ai du mal à faire la différence, [...] pour moi organique, ça fait direct tilt avec vivant, ou qui a été vivant à un moment, comme [...] des fossiles, ou du bois. » - E13*

Lorsque l'on pousse plus loin la conversation en mentionnant des exemples de composés organiques, ils doutent de leur définition quand elle est basée uniquement sur la chimie du vivant. En les faisant réfléchir, ils corrigent presque toujours ce qu'ils ont dit précédemment pour inclure des composés non vivants dans la chimie organique.

*« LVO : Si je regarde les fardes en plastique ou ce genre de choses, le plastique c'est organique?  
Effectivement, du coup c'est pas que du vivant. » - E11*

Il faut cependant parfois que je corrige moi-même leur définition de la chimie organique et que je leur rappelle que la majorité de ce qui compose le vivant est organique, mais que la chimie organique ne se limite pas à ce qui est vivant, qu'elle concerne tout ce qui contient du carbone.



## **Q5 – Peux-tu donner des exemples de produits organiques dans la vie quotidienne ?**

Après avoir demandé aux élèves ce qu'était la chimie organique, nous leur avons demandé de nous donner quelques exemples de produits de la vie quotidienne qui font partie de la chimie organique. Certains exemples reviennent régulièrement, tels que le bois, le plastique, le pétrole ou encore le corps humain. Le fait de passer par des exemples nous a permis de voir qu'ils ne sont presque aucun à avoir une notion correcte de ce qui fait partie de la chimie organique. Ils retiennent certains exemples vus en cours mais ne sont pas capables d'imaginer la quantité de choses qui nous entourent et qui appartiennent à la chimie organique.

### **Les élèves citent des produits quotidiens organiques**

Les différents produits qui ont été cités spontanément par les élèves lorsqu'on leur demande des exemples de produits organiques sont : le bois, le carton, le corps humain et ses différents composants, les arbres, l'alcool, le pétrole et ses dérivés, le plastique, le polyester, les plantes, la mousse, le caoutchouc, le glucose, le sucre, les gaz inflammables tels que le méthane et butane, les acides aminés, les protéines, les polymères, les champignons, le plastique, le savon, le shampoing, l'essence, le gaz naturel et les vernis. Un élève cite également la photosynthèse et la décomposition comme processus organiques. Nous constatons que tous les produits cités peuvent être assimilés à de la chimie organique, les élèves citent donc des exemples corrects. En outre, lorsque nous leur demandons de citer des exemples, les élèves interrogés citent spontanément des exemples qui s'éloignent de la définition qu'ils ont eux-mêmes donnée puisque plusieurs exemples ne sont pas issus du monde vivant.

### **Les élèves doivent déterminer si un produit est organique**

Ensuite, nous avons proposé certains produits de la vie quotidienne, qui étaient présents autour de nous lors de l'entretien, aux élèves et nous leur avons demandé de déterminer s'ils sont organiques ou non. Les élèves ne font pas toujours spontanément appel à ce qu'ils savent de la définition de la chimie organique pour déterminer si un produit est organique ou pas. Nous avons discuté préalablement à cette question de la définition de la chimie organique, et nous leur avons fourni une définition correcte de celle-ci si jamais leur définition originale ne l'était pas. Il faut régulièrement les aiguiller grâce à plusieurs questions dirigées pour leur faire admettre que certains produits, qu'ils pensent a priori être inorganiques, font en fait partie de la chimie organique, ou vice versa. Les seules réponses rapides sont associées à des produits déjà étudiés en classe avec leur professeur.

Voici par exemple un dialogue avec un élève persuadé que l'eau est organique :

*« LVO : Est-ce que l'eau c'est organique?*

*Ben oui.*

*LVO : C'est vivant?*

*Non*

*LVO : Est-ce qu'il y a du carbone dedans?*

*Je crois.*

*LVO : Tu sais écrire la molécule d'eau?*

*H<sub>2</sub>O*

*LVO : Est-ce qu'il y a du carbone dedans?*

*Non. » - E10*

Suite à cet échange, l'élève a accepté que l'eau ne soit donc pas une molécule organique.

De manière similaire, un autre élève pensait que les polymères ne sont pas organiques. En lui demandant la composition d'un polymère, nous avons pu constater que, malgré une définition correcte de la chimie organique, l'élève n'avait pas réellement compris cette définition ; pour cet élève, les composés organiques ne peuvent contenir que du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'azote. Les polymères pouvant être également composés d'autres atomes, l'élève avait donc écarté les polymères de la chimie organique.

*« Ben déjà, tout ce qui est polymère et tout ça c'est pas de la chimie organique. ... si?*

*LVO : Tu sais ce qu'il y a comme molécule dans des polymères? Ou comme atomes?*

*C'est un enchaînement de plein de petits trucs qui sont... euh, non. Mais je sais que c'est pas de la chimie organique, enfin, comment je raisonnerais logiquement, ça serait pas de la chimie organique, les polymères.*

*LVO : Il y a plein de carbone dans les polymères.*

*Mais il n'y a pas que du carbone il y a aussi d'autres trucs!*

*LVO : Du carbone, de l'oxygène, de l'hydrogène, de l'azote...*

*Ah ouais, y a pas d'autres trucs?*

*LVO : Il peut y avoir parfois d'autres trucs en plus, mais dans la chimie organique il peut y avoir certains autres atomes que ces quatre-là. C'est principalement ces quatre-là.*

*Ok. Donc les polymères c'est de la chimie organique? (j'acquiesce) » - E13*

Les élèves n'ont pas toujours les connaissances pour déterminer si un composé de la vie de tous les jours est organique ou non. Ils ont beaucoup de mal à savoir de quoi est composé ce qui les entoure ou à réfléchir à la manière dont les différents produits qu'ils citent sont obtenus, afin de pouvoir déterminer s'ils sont organiques ou pas.

*« LVO : Est-ce que le bois c'est de la chimie organique?*

*Non, le bois non. Le métal... le métal je dirais, je dirais plus que non, le papier non plus. » - E06*

*« Est-ce qu'à ton avis la blouse, ou les vêtements, c'est de la chimie organique?*

*Je pense que non... C'est fait en général de tissu et tout. » - E06*

Certains élèves ont l'idée de réfléchir à l'origine des produits cités. Leur réflexion est de se dire que tout produit qui dérive de quelque chose qui a été vivant autrefois peut être considéré comme organique. C'est le cas par exemple de tous les dérivés du pétrole, si l'on considère que le pétrole est formé à la base par la décomposition de matières animales et végétales.

*« Les plastiques à la base c'était animal. Enfin le pétrole qu'on prend de la terre pour après le transformer en plastique vient de, enfin c'est des animaux, il me semble, c'est des organismes qui sont en décomposition sous la terre à grosse pression et température, qui petit à petit se transforment, il me semble que c'est ça. [...] C'est fait à partir d'un dérivé de quelque chose qui avant était vivant. » -*

*E04*

Ce raisonnement présente des limites, il pourrait induire en erreur les élèves dans certains cas (les arbres vont produire de l'eau durant la nuit, mais l'eau n'est pas organique). Cependant, dans la majorité des cas, il permet aux élèves d'acquérir une bonne base de réflexion pour déterminer si un produit est organique ou non.

### **Les élèves citent uniquement des produits liés au vivant**

Plusieurs élèves ne donnent comme exemples que des produits liés directement au vivant. L'association entre chimie organique et chimie du vivant est intéressante à faire, puisqu'historiquement, la chimie organique était en effet associée directement à ce qui est vivant, mais il est important de préciser que cette ancienne définition a évolué pour englober énormément de produits ou de molécules qui ne sont pas associés au vivant. Cet amalgame induit les élèves en erreur, ils confondent ainsi la chimie organique avec la biochimie.

*« Déjà il y a tout ce qui est acides aminés, protéines et tout, enfin qui sont des polymères, des macromolécules. Donc déjà il y a tout ce qui touche au corps humain, il y a la photosynthèse aussi à mon avis c'est de la chimie organique, euh... en fait chaque fois qu'il y a... enfin le cycle de la vie en fait, tout ce qui est aussi la décomposition, les champignons et tout ça, c'est aussi pour moi de la chimie organique. » - E03*

On voit ici la nécessité d'insister sur la différence entre biochimie et chimie organique, étant donné que plusieurs élèves considèrent encore que ces deux matières n'en forment qu'une seule, excluant ainsi certains composés organiques de leur raisonnement.

### **Les élèves citent des produits inorganiques**

Une fois la définition correcte de la chimie organique imprimée chez l'élève, nous lui avons demandé un exemple de quelque chose d'inorganique. Le seul exemple qu'ils ont alors été capables de donner est le métal et tout ce qui est métallique.

*« LVO : Alors est-ce que tu sais me dire ce qui n'est pas organique? »*

*« Qu'est-ce qui ne serait pas organique? Euh... Le métal? Enfin tout ce qui est métallique. Oui, vu que le carbone c'est pas un métal. Tout ce qui est métallique, par exemple la clé qui est là, la poignée de porte... ce qui est métallique. » - E09*

### **Les élèves estiment la quantité de produits organiques autour de nous**

La suite logique était donc de leur demander la place de la chimie organique dans notre monde, par rapport à la chimie inorganique. Bien qu'ils viennent de réfléchir à nous donner un exemple de quelque chose d'inorganique, et que la seule chose qu'ils ont trouvée était le métal, l'idée qu'il puisse y avoir au moins autant de produits faisant partie de la chimie organique dans notre quotidien que de produits n'en faisant pas partie est loin d'être évidente chez eux.

L'un des raisonnements menés par un élève est qu'il y a beaucoup d'éléments dans le tableau périodique, et que la chimie organique n'est centrée que sur un seul élément, par conséquent il est difficile d'envisager qu'il puisse y avoir plus de molécules formées autour d'un seul élément que de molécules formées sur la base de tous les autres éléments.

*« LVO : Donc pour toi, dans le monde, est-ce qu'il y a plus de chimie organique ou plus de chimie inorganique? »*

*« C'est compliqué parce que dans... par déduction dans le tableau de Mendeleïev il y a beaucoup plus de métaux que de non-métaux, du coup moi je dirais qu'il y a plus de chimie non organique, mais »*

*concrètement... enfin, moi je dirais qu'il y a plus de chimie organique, même si sur le tableau de Mendeleïev il y a plus d'éléments métalliques. » - E09*

### **Q6 – Préfères-tu un médicament naturel ou synthétique ?**

Avec certains élèves, nous avons eu le temps d'aborder une dernière question concernant les médicaments. Une conception assez répandue parmi la population est que la chimie et les « produits chimiques » ont une connotation négative, alors que ce qui est « naturel » est vu comme positif. Nous avons donc demandé aux élèves leur avis sur la question, en partant de la synthèse des médicaments.

Pour commencer, nous avons demandé aux élèves si les médicaments font partie de la chimie organique ou non. Les différents élèves avec lesquels nous avons parlé des médicaments ont tous été capables de dire qu'ils font partie de la chimie organique.

Ensuite, nous leur avons demandé comment sont fabriqués les médicaments. Ils ont tous leur idée là-dessus, certains étant plus proches de la réalité que d'autres.

*« Je pense qu'on met du sucre... enfin je pense qu'il y a du sucre dedans. » - E08*

*« On va d'abord chercher dans la nature des molécules qui réagissent et puis on essaie de les copier. Et en fait d'isoler la molécule active, qui va permettre par exemple d'éliminer le mal de tête, [...] et après on essaie de la répliquer le mieux possible. » - E11*

Pour les élèves ne sachant pas exactement comment sont produits les médicaments, nous leur avons rapidement expliqué qu'il est possible de les fabriquer au départ de plantes, ou entièrement en laboratoire.

### **Les élèves choisissent un médicament naturel ou synthétique**

Nous leur avons ensuite présenté un choix : en supposant qu'un médicament puisse être fabriqué par les deux méthodes proposées (en laboratoire et issu de la nature), quel médicament choisiraient-ils ? La majorité des élèves préfère le médicament issu de la nature, mais sans réel argument derrière.

*« Techniquement celui des plantes, puisqu'il y a moins d'éléments chimiques dedans, et donc c'est plus naturel. [...] Je préférerais quand même la plante puisque c'est naturel et que, ben les médicaments, l'homme a travaillé dessus et il y a souvent des effets secondaires. [...] Je prendrais quand même la plante pour, question de morale. » - E12*

*« Je pense que je prendrais plus les plantes parce que c'est naturel. [...] Je préférerais ça plutôt que quelque chose qui est fait en laboratoire, j'aurais plus confiance. » - E06*

Certains sont conscients qu'il n'y a aucune différence dans l'efficacité du médicament, mais le « naturel » l'emporte.

*« Je préfère la nature parce que c'est plus "swag". Mais je préférerais la nature parce que genre, laboratoire il y a toujours ce truc genre "c'est pas naturel". [...] Psychologiquement ça fonctionne, moi je préfère avec la nature, mais ça change rien. Pour moi je pense pas que ça change grand-chose, mais... psychologiquement moi je préfère. » - E11*

Pour d'autres, le médicament issu d'un laboratoire serait même « plus perfectionné », mais ils préfèrent toujours celui issu de la nature.

*« Je dirais à partir de la nature. [...] Je préfère quand c'est naturel mais après c'est peut-être moins efficace et moins perfectionné. » - E10*

Un seul élève choisirait le médicament fabriqué en laboratoire, pour son efficacité qui serait supérieure.

*« Laboratoire je pense. Parce que pour moi il sera mieux fait, plus réfléchi et s'il a été fait en laboratoire et qu'il est vendu, c'est qu'il a déjà été testé et que ça a marché du coup je fais plus confiance à ça. » - E08*

Certains élèves ont cependant un bon argument pour choisir le médicament issu de la nature. Leur enseignant leur a parlé des différents isomères possibles pour une molécule et des effets secondaires que peut avoir un isomère et pas l'autre. Un exemple connu de médicament ayant posé ce genre de problème est la thalidomide, dont la forme lévogyre a des effets anti-nauséeux, tandis que la forme dextrogyre a des effets tératogènes. Le fait d'obtenir un médicament en l'extrayant d'une plante permet d'éviter ce genre de soucis étant donné que la plante ne produit qu'un seul isomère.

*« Je prendrais plutôt celui de la plante, parce que... On avait parlé des [...] isoméries de structure, et par exemple dans les médicaments, dépendant de l'isomérisation justement, dans quel sens sont agencées les molécules, [...] les effets du médicament ne seront pas forcément les mêmes, de là les effets secondaires qu'il peut y avoir, parfois. Alors que dans une plante, s'il y a telle molécule dont on a besoin dans un médicament, la molécule sera toujours composée [...] dans le même sens. » - E04*

N'oublions pas que ce n'est qu'un cas possible parmi d'autres. En effet, la nature pourrait ne produire que le mauvais isomère. De plus, certains médicaments ne sont pas issus de la nature et il n'est donc pas possible de les obtenir en dehors d'un laboratoire.

## **Conclusion**

Le but premier de ces entretiens semi-dirigés est d'essayer de mettre en évidence les problèmes de compréhension liés aux réactions organiques, et d'évaluer le niveau de compréhension des élèves face à ces réactions.

Nous avons constaté que la notion même de réaction pose énormément de problèmes, avant même de nous attaquer à la notion de réaction organique. Il serait donc nécessaire d'effectuer un travail complet sur la notion de réaction, et nous ne pourrions malheureusement pas nous attaquer à cette problématique au sein de ce travail. Nous choisissons donc, pour la suite de ce travail, de nous focaliser sur la notion de synthèse organique plutôt que sur les réactions à proprement parler. Nous n'écrivons donc pas de réactions sous la forme «  $A + B \rightarrow C + D$  ». Nous faisons le choix de présenter aux élèves une autre manière d'appréhender les réactions organiques comme étant un moyen de transformer une fonction organique en une autre fonction organique.

Le deuxième constat principal que nous pouvons faire suite à ces entretiens concerne la définition de la chimie organique et sa place dans notre quotidien. À l'instar de nos questionnaires écrits, nous

observons que les élèves n'ont pas une définition correcte de ce qu'est la chimie organique, beaucoup d'élèves l'assimilant à la chimie du vivant. Dérivant de cela, ils ne savent pas donner une grande variété d'exemples de produits organiques dans la vie quotidienne, à l'exception des exemples qu'ils ont vus précédemment au cours. Ils sont donc incapables de déterminer si un produit « nouveau » est organique ou non, sans un certain guidage de notre part.

# Chapitre V : Conceptions alternatives présentes chez les apprenants

Suite à l'analyse des réponses des élèves à notre premier questionnaire à réponses ouvertes, à notre questionnaire de type QCM ainsi qu'aux entretiens semi-dirigés, nous sommes désormais capables de pointer les conceptions alternatives majoritairement présentes chez les élèves de 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> année du secondaire à propos de la chimie organique. Nous présentons ci-après nos résultats, classés par thèmes. Chaque conception alternative (CA) est suivie par des propositions de pistes permettant d'éviter leur persistance dans l'esprit des élèves. Certaines de ces propositions seront testées sur le terrain au cours de la quatrième partie de notre travail tandis que d'autres propositions proviennent de la littérature lorsqu'il existe déjà des données sur le sujet.

## **Thème 1 : Questions générales et se rapportant à la vie quotidienne**

### **CA1 : La chimie organique est la chimie du vivant**

Le premier concept que nous considérons comme important à comprendre pour les élèves est la définition même de ce qu'est la chimie organique. Or, nous constatons qu'une majorité d'entre eux ne donne pas une définition correcte de la chimie organique.

*« La chimie organique, c'est tout ce qui est la chimie du vivant. » - E04*

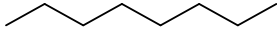
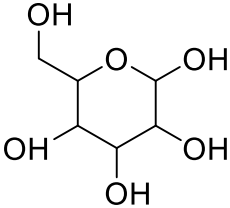
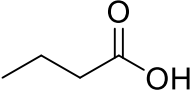
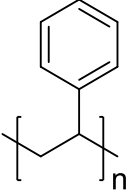
Lors de notre premier questionnaire, 14% des élèves utilisent spontanément le terme « vivant » pour nous expliquer ce qu'est la chimie organique. Lors de notre QCM, le nombre d'élèves identifiant la chimie organique à la chimie du vivant monte jusqu'à 27%, indiquant ainsi que cette définition erronée est fortement présente dans l'esprit des élèves. Cette définition, correcte dans un premier temps de l'histoire, a évolué et n'est plus d'actualité. Il est important que les élèves comprennent cette différence et intègrent la définition qui est actuellement acceptée dans le monde scientifique, à savoir que la chimie organique représente la chimie du carbone.

Au cours de nos entretiens semi-dirigés, beaucoup d'élèves utilisent le mot « vivant » pour expliquer ce qu'est la chimie organique. Nous constatons que cette définition n'a cependant pas franchi la barrière de la réflexion. Lorsque nous confrontons les élèves à des exemples de produits qu'ils savent être organiques, mais qui ne sont pas vivants (tels que le plastique), un conflit se forme dans l'esprit des élèves, et la majorité d'entre eux finissent par comprendre que leur définition est incomplète, puisqu'elle exclut certains produits organiques.

Cependant, savoir que la chimie organique est fortement liée à la chimie du vivant leur permet d'identifier beaucoup de molécules organiques présentes dans le corps humain, tel que l'ADN. Il est donc important de faire ce lien dans une certaine mesure.

### Comment éviter cette conception alternative ?

- ➔ Profiter de l'histoire de la chimie organique pour mettre en avant l'évolution constante des définitions en sciences et insister sur la définition actuelle de la chimie organique en appuyant fortement sur la présence d'atomes de carbone dans toutes les molécules organiques. Nous pouvons ainsi présenter aux élèves les origines de la chimie organique, en leur expliquant que la première définition de la chimie organique était la chimie du vivant, que l'on croyait très différente de la chimie inorganique et impossible à synthétiser en laboratoire. Les scientifiques se sont petit à petit aperçus que ce n'était pas correct, et en sont progressivement venus à la définition actuelle de la chimie organique en constatant qu'il n'y avait pas de distinction entre les molécules constituant le vivant et les autres. La chimie organique a donc été étendue à toutes les molécules contenant du carbone (à quelques exceptions près).
- ➔ Utiliser des exemples représentatifs pour mettre les élèves face à leur erreur, par exemple le plastique qui est organique mais qui ne compose pas les êtres vivants. L'enseignant peut ainsi proposer aux élèves un exercice reprenant divers produits ou molécules et demander à l'élève, pour chacun d'entre eux, s'il est un composant du vivant ou non, et s'il est organique ou non.

	Composant du vivant ?	Organique ?
 Essence (octane)		
 Sucre (glucose)		
Na Cl Sel (chlorure de sodium)		
 Beurre (acide butanoïque)		
 Plastique (polystyrène)		
$\text{H}-\text{O}-\text{H}$ Eau		



## **CA2 : L'eau est une molécule organique**

Cette conception alternative découle fortement de la première. En effet, l'eau est associée à la vie dans beaucoup d'esprits, il est donc logique pour les élèves de l'identifier comme étant une molécule organique, s'ils pensent que la chimie organique est la chimie du vivant.

Lors de notre premier questionnaire, 10% des élèves ont identifié l'eau comme étant une molécule organique. Lors de notre QCM, ce nombre grimpe jusqu'à 26%. Les élèves identifiant l'eau comme étant organique sont également les élèves qui indiquent que la chimie organique est la chimie du vivant.

Au cours de nos entretiens semi-dirigés, plusieurs élèves proposent spontanément l'eau lorsqu'on leur demande ce qui est organique dans la vie de tous les jours. Chez d'autres élèves, nous leur demandons directement si l'eau est organique, et ils affirment sans hésiter que c'est le cas.

*« LVO : Est-ce que l'eau c'est organique?  
Ben oui. » - E10*

L'eau est une molécule pourtant très étudiée au cours de chimie, durant les années précédentes. Nous ne doutons pas de la connaissance de la structure de l'eau par les élèves, qui sont tous capables, à ce stade de leurs études, de dire que l'eau est une molécule d' $H_2O$ , et qu'elle ne contient donc effectivement pas de carbone. Cependant, il semble manquer une étape dans leur réflexion pour leur permettre de dire que l'eau, vu qu'elle ne contient pas de carbone, n'est pas organique. Il semble nécessaire que nous les accompagnions verbalement pour arriver à cette conclusion.

### ***Comment éviter cette conception alternative ?***

- ➔ Insister sur la définition actuelle de la chimie organique en appuyant fortement sur la présence d'atomes de carbone dans toutes les molécules organiques. Ceci peut être effectué en parallèle à la CA1 en expliquant aux élèves l'origine de la chimie organique et donc l'évolution de sa définition.
- ➔ Demander aux élèves d'expliquer pourquoi une molécule est organique ou non (insister sur la présence d'atomes de carbone). Lors de l'exercice proposé pour éviter la CA1 (tableau à compléter), l'enseignant peut demander à l'élève de justifier chacune de ses réponses, la justification attendue étant qu'une molécule est organique car elle contient du carbone, et qu'elle n'est pas organique car elle n'en contient pas.
- ➔ Favoriser la réflexion des élèves pour identifier des molécules organiques plutôt que l'apprentissage « par cœur » d'une liste de produits organiques. Ainsi, l'enseignant peut indiquer à ses élèves une « marche à suivre » afin d'identifier si quelque chose est organique : il s'agit tout d'abord de vérifier si le composé en question contient du carbone, et seulement si cette information n'est pas disponible (si l'élève ne connaît pas la structure de la molécule), alors il s'agit de se demander quelle est l'origine du produit. Si le produit a été fabriqué à partir de quelque chose qui a été vivant, alors il peut être considéré comme étant organique.

## **CA3 : L'ADN n'est pas une molécule organique**

De manière analogue à la conception alternative précédente, la molécule d'ADN semble poser problème auprès des élèves lorsqu'il s'agit de la classer dans les molécules organiques ou inorganiques.

Lors de notre premier questionnaire, seulement 28% des élèves l'identifient correctement comme étant organique. Il y a donc plus de 7 élèves sur 10 qui ne savent pas que l'ADN est organique.

Encore une fois, cette conception alternative peut être corrélée avec l'idée que l'élève se fait de la définition de la chimie organique. Cette fois, ce sont les élèves qui associent la chimie organique avec la chimie du vivant qui répondent correctement, alors que les élèves donnant une autre réponse sont majoritairement incapables de reconnaître l'ADN comme étant organique. Ceci illustre le fait qu'il est important d'associer le vivant à la chimie organique et qu'il ne faut pas totalement oublier les bases historiques de la chimie organique. Cette définition, bien que fautive de nos jours, permet aux étudiants d'inclure certaines molécules dont ils ne connaissent pas forcément la composition au sein des molécules organiques.

#### ***Comment éviter cette conception alternative ?***

- ➔ Insister sur le lien étroit qui existe entre chimie organique et chimie du vivant, tout en veillant à bien distinguer les deux pour ne pas retomber dans la première conception alternative que nous avons vue. De nouveau, nous pouvons nous aider des pistes proposées pour contrer les CA1 et CA2 en introduisant l'ADN dans les exemples présentés aux élèves.
- ➔ S'appuyer sur le cours de biologie pour rappeler aux élèves ce qu'est l'ADN, quelle est sa structure, et quels sont les atomes qui le composent, en dessinant une partie de la structure de l'ADN en indiquant les différents atomes présents. Une collaboration avec l'enseignant de biologie peut également s'avérer utile afin de coordonner les deux cours si cela est possible.

#### **CA4 : Le pétrole est un polymère naturel**

Lorsque nous demandons aux élèves de citer un polymère naturel, la réponse majoritairement donnée par les élèves au cours de notre premier questionnaire à réponses ouvertes est le pétrole. Lors de notre QCM, 59% des élèves ont indiqué que le pétrole était un polymère (16% pensent que c'est un polymère synthétique et 43% pensent qu'il s'agit d'un polymère naturel). Seulement 13% des élèves ont pu affirmer que le pétrole n'était pas un polymère.

Le thème du pétrole est pourtant longuement abordé en classe par le biais de la distillation du pétrole. Cette conception alternative peut cacher plusieurs problèmes : les élèves ne connaissent pas réellement la composition du pétrole, et pensent qu'il s'agit effectivement d'un polymère d'alcane, ou alors les élèves ne savent pas ce qu'est un polymère. Nous constatons que ces deux possibilités sont pertinentes au vu des réponses des élèves lorsqu'on leur demande d'expliquer le principe de la distillation du pétrole (seulement 14% d'entre eux y arrivent) et lorsqu'on leur demande la définition d'un polymère (voir conception alternative suivante).

#### ***Comment éviter cette conception alternative ?***

- ➔ Insister auprès des élèves sur la définition correcte de polymère en distinguant clairement les polymères des autres molécules par leur notation. Si, lorsque l'on rencontre un polymère en classe, celui-ci est systématiquement noté sous la forme « [monomère]<sub>n</sub> », cela permettra aux élèves de facilement déterminer s'ils ont affaire à un polymère.
- ➔ Construire des modèles moléculaires et montrer aux élèves la structure des différentes molécules présentes dans le pétrole. Si les élèves ont la possibilité de « voir » et de « toucher » les molécules composant le pétrole, et de constater que celles-ci ne sont que de simples

chaines d'hydrocarbures, de taille et de nature diverses, nous pensons qu'il sera plus évident pour eux de distinguer ces molécules des polymères, qui sont très difficiles à représenter entièrement par des modèles moléculaires, vu leur grande taille.

#### **CA5 : Un polymère est une très longue molécule ou un produit composé de beaucoup de molécules**

Lorsque nous demandons aux élèves ce qu'est un polymère dans notre QCM, ils sont seulement 33% à choisir la réponse correcte, qui est qu'un polymère est une molécule composée d'une unité de base qui se répète. Près d'un tiers d'entre eux pense qu'il s'agit d'un produit composé de beaucoup de molécules, ce qui est cohérent avec l'exemple du pétrole proposé précédemment, et 18% des élèves pensent qu'il s'agit simplement d'une très longue molécule. Nous constatons donc que la notion de polymère est très loin d'être acquise.

#### ***Comment éviter cette conception alternative ?***

- ➔ Insister auprès des élèves sur la définition correcte de ce qu'est un polymère, en utilisant des exemples visuels. Par exemple, nous pouvons faire construire aux élèves des chaînes de « polymères » en utilisant des trombones ou des élastiques : chaque trombone ou élastique représente un monomère et la chaîne de trombone représente le polymère.
- ➔ Utiliser la notation  $[\text{monomère}]_n$  pour familiariser les élèves avec cette représentation des polymères qui met en avant sa composition : un seul monomère que l'on répète un nombre  $n$  de fois. Si cette notation est utilisée systématiquement lorsque nous étudions un polymère, nous pensons que cela permettra d'aider les élèves à faire la distinction entre les polymères et les autres molécules avec plus de facilité.

#### **CA6 : Un médicament synthétisé en laboratoire est moins « bien » qu'un médicament naturel, bien qu'il soit plus efficace.**

Lors de nos entretiens semi-dirigés, nous demandons aux élèves s'ils préfèrent utiliser un médicament fabriqué uniquement à partir de plantes ou un médicament équivalent fabriqué en laboratoire. La grande majorité d'entre eux optent pour le médicament « naturel », bien qu'ils n'aient aucun argument scientifique les poussant dans cette direction. Le médicament « naturel » est simplement « mieux ». Les élèves font ce choix même lorsqu'ils affirment que le médicament synthétique doit avoir une efficacité supérieure au médicament « naturel », étant donné qu'il est fabriqué en laboratoire.

Nous constatons ici un manque de confiance en l'industrie chimique, une conception que l'on retrouve dans une grande partie de la population. Nous constatons également que les élèves ne comprennent pas que, si le médicament est constitué de la même molécule, même si celle-ci est fabriquée de deux manières différentes, il aura la même efficacité.

#### ***Comment éviter cette conception alternative ?***

- ➔ Utiliser des exemples concrets de médicaments existants aujourd'hui, comme l'aspirine par exemple, indiquer la structure de la « molécule d'aspirine » et la comparer avec la molécule contenue dans la plante qui l'a inspirée afin de mettre en avant les avancées que peut permettre l'industrie chimique en termes d'efficacité du médicament et de disponibilité à travers le monde.

- ➔ Effectuer en classe, avec les élèves, un débat sur les différences entre les « produits chimiques » et les « produits naturels », afin qu'ils se rendent compte des avantages et inconvénients de chacun de ces deux mondes.
- ➔ Travailler sur des exemples de composés présents dans la nature mais étant très toxiques ou dangereux afin de rappeler aux élèves qu'un produit « naturel » n'est pas forcément à associer à un produit bénéfique et que la nature peut tout autant produire des molécules qui nous sont bénéfiques que des molécules qui sont toxiques.

## **Thème 2 : Questions se rapportant à la structure des molécules organiques**

Dans les questionnaires écrits, plusieurs questions se rapportent à la notion d'isomère, que ce soit à travers sa définition, la reconnaissance d'isomères ou encore l'écriture d'isomères. Quel que soit le sens dans lequel la question est orientée, nous constatons qu'il y a énormément de soucis avec cette notion.

Nous avons constaté que beaucoup d'élèves savent identifier des paires d'isomères alors qu'ils ne savent pas donner la définition correcte d'un isomère. De la même façon, tous les élèves qui donnent la définition correcte d'un isomère ne savent pas pour autant identifier des isomères. Il semble donc que la définition d'un isomère soit apprise « par cœur » par beaucoup d'élèves, sans comprendre les implications de cette définition. Les conceptions alternatives suivantes découlent de cette incompréhension.

### **CA7 : Un alcène cis et son isomère trans sont la même molécule**

Lorsque deux isomères de type cis/trans sont présentés aux élèves, seuls 28% d'entre eux les identifient effectivement comme étant isomères. La majorité des élèves (65%) pense que ces deux molécules sont parfaitement identiques. La figure 3.60 donne un exemple de deux isomères du butène que les élèves considèrent majoritairement comme étant deux molécules identiques.

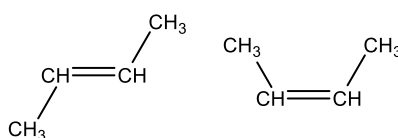


Figure 3.60 : Exemple d'isomères cis et trans du butène.

### ***Comment éviter cette conception alternative ?***

- ➔ Utiliser des modèles tridimensionnels pour représenter des alcènes et montrer aux élèves que, comme la rotation autour de la double liaison est impossible, on obtient deux molécules différentes lorsqu'on est en présence d'isomères cis et trans.
- ➔ Illustrer ce concept par un exemple concret, par exemple les acides gras insaturés, qui présentent des propriétés différentes en fonction du diastéréoisomère présent. En effet, les acides gras cis et les acides gras trans ont une métabolisation différente. La consommation d'acides gras cis est indispensable à notre bonne santé, mais celle des acides gras trans n'est

pas recommandée ; ceux-ci étant moins fluides, ils augmentent le risque de maladies cardiovasculaires

### **CA8 : Deux molécules contenant des fonctions différentes ne peuvent pas être isomères**

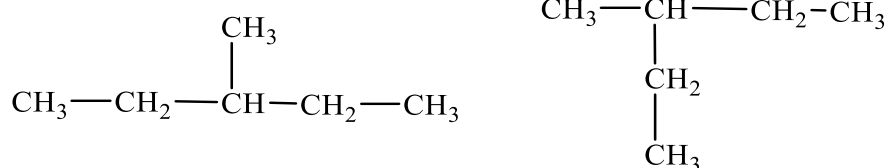
Lorsque deux isomères de fonction sont présentés aux élèves (dans notre cas, un alcool et un éther), seulement 25% des élèves les identifient comme étant effectivement des isomères. La majorité des élèves (64%) pense que ces deux molécules n'ont aucun lien l'une avec l'autre. Cette conception alternative a déjà été observée précédemment.[134]

#### ***Comment éviter cette conception alternative ?***

- ➔ Intégrer rapidement des isomères de fonction lors de l'introduction du concept d'isomérisation et ne pas se cantonner à des alcanes isomères d'alcanes, des alcènes isomères d'alcènes, etc... Nous pensons qu'il est important de ne pas associer un concept à une fonction organique car les élèves sont par la suite influencés par cette première association et ont du mal à s'en détacher. De ce fait, nous pensons que le fait de leur présenter, dès la première introduction du concept d'isomères, des paires d'isomères de fonctions variées leur permettrait d'éviter cette association erronée.
- ➔ Décomposer un exercice d'identification d'isomères en demandant aux élèves de dénombrer les différents éléments présents dans deux molécules avant de leur demander finalement si celles-ci sont isomères. En effet, nous avons constaté qu'en ajoutant l'étape supplémentaire de demander la formule moléculaire des deux molécules présentées aux élèves, ceux-ci ont plus de facilité ensuite à déterminer correctement si ces deux molécules sont isomères ou non, car la définition d'isomère qui leur est donnée (deux molécules ayant une même formule moléculaire mais une représentation différente) peut alors être directement appliquée, la formule moléculaire des molécules étant sous leurs yeux.

### **CA9 : Deux molécules dessinées différemment sont des isomères**

Lorsque nous demandons aux élèves de dessiner tous les isomères correspondant à une formule moléculaire, il n'est pas rare de voir un élève dessiner deux fois la même molécule, mais en l'orientant de manière différente. Lors de notre premier questionnaire, nous avons demandé aux élèves de dessiner tous les isomères de l'hexane ( $C_6H_{14}$ ). Nous constatons avec surprise que 28% d'entre eux dessinent plusieurs fois la même molécule en étant persuadés qu'ils sont en train de dessiner des isomères différents. La figure 3.61 présente les représentations de « doublons » les plus fréquemment retrouvés parmi les réponses des élèves. L'erreur la plus fréquente est la représentation du 3-méthylpentane selon différentes orientations (35% des erreurs), suivie par le n-hexane (27%) et le 2-méthylpentane (14%).



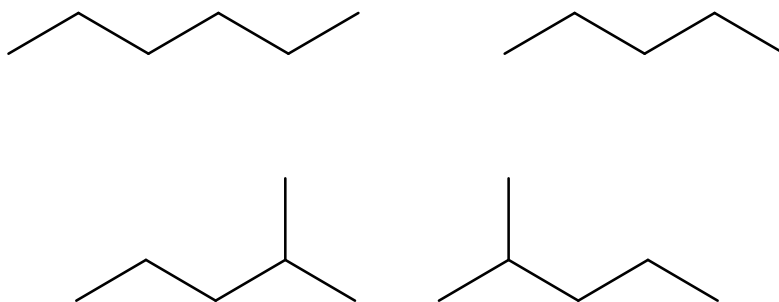


Figure 3.61 : Exemple de paires de molécules présentées par les élèves comme étant isomères.

### ***Comment éviter cette conception alternative ?***

- ➔ Utiliser des modèles tridimensionnels pour montrer aux étudiants qu'une molécule peut bouger dans l'espace et ainsi leur prouver que ce qu'ils dessinent comme étant deux molécules différentes sont en réalité une seule et même molécule. De la même manière, nous pouvons également utiliser des programmes de représentation des molécules en trois dimensions afin de multiplier les visualisations.
- ➔ Demander aux élèves de nommer les deux molécules qu'ils pensent être isomères, mais qui sont en réalité une seule et même molécule. S'ils ont bien assimilé les règles de nomenclature, ils vont arriver exactement au même nom pour les deux molécules, ce qui permet de mettre en avant que ces molécules sont identiques.

De plus, nous pensons que la plupart des conceptions alternatives concernant l'isomérisie, et plus largement la compréhension de la structure des molécules, peuvent être contrées par l'utilisation de modèles moléculaires que les élèves peuvent manipuler, que ce soit directement avec leurs mains ou grâce à l'outil informatique, par le biais de différentes vidéos, simulations ou animations.[137]

### **CA10 : Un alcool primaire est une molécule contenant un groupement –OH et un alcool secondaire est une molécule contenant deux groupements –OH**

Lorsque l'on aborde les alcools, il est important que les élèves puissent différencier les alcools primaires, les alcools secondaires et les alcools tertiaires, car ces trois types d'alcool ne subissent pas le même type d'oxydation.

Lors de notre premier questionnaire, seuls 36% des élèves sont capables de donner un exemple d'alcool primaire, secondaire et tertiaire. Le QCM que nous avons élaboré permet de mieux appréhender pourquoi si peu d'élèves ont répondu correctement à cette question. Ainsi, nous constatons que 59% des élèves assimilent les alcools primaires à des molécules contenant un seul groupement –OH, et que 41% des élèves identifient un alcool secondaire comme comportant deux groupements –OH. Nous constatons ainsi qu'il existe une conception alternative présente chez énormément d'élèves quant à la manière d'identifier correctement le type d'alcool. En effet, les élèves se basent sur le nombre de groupements –OH alors qu'ils doivent en réalité se baser sur le nombre de carbones liés au carbone porteur du groupement –OH afin de savoir si un alcool est primaire, secondaire, ou tertiaire.

### **Comment éviter cette conception alternative ?**

- Insister sur la définition des alcools primaires, secondaires et tertiaires.
- Présenter et discuter d'un alcool primaire comportant plusieurs groupements –OH ou d'un alcool secondaire ne comportant qu'un seul groupement –OH. Utiliser ce genre d'exemple lors d'exercices de reconnaissances des différents types d'alcools afin de confronter directement l'élève à des molécules lui permettant d'ancrer la définition correcte de chaque type d'alcool.
- Proposer aux élèves des exercices de reconnaissance d'alcools combinés à des exercices d'oxydation de ces mêmes alcools afin de créer un conflit cognitif chez l'élève s'il essaie d'oxyder un alcool secondaire contenant un seul groupement –OH, que l'élève verrait alors comme un alcool primaire, en un aldéhyde, qu'il est impossible de dessiner au centre d'une chaîne de carbones (voir figures 3.62 et 3.63 pour des exemples).

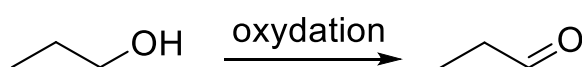


Figure 3.62 : Oxydation d'un alcool primaire en aldéhyde, obligatoirement en bout de chaîne.

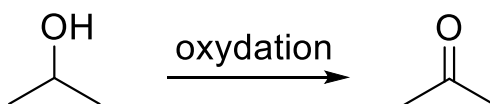


Figure 3.63 : Oxydation d'un alcool secondaire en cétone, obligatoirement en milieu de chaîne.

### **Thème 3 : Questions sur les propriétés des molécules**

Les différentes conceptions alternatives mises en évidence ci-après l'ont été en regard à des molécules organiques, mais elles sont également applicables à des molécules inorganiques, étant donné qu'elles concernent les propriétés physico-chimiques des molécules. Les références de la littérature peuvent donc aussi bien être tirées d'articles portant sur la chimie générale que d'articles consacrés uniquement à l'étude de molécules organiques, étant donné que la conception alternative est équivalente quelle que soit la molécule utilisée.

#### **CA11 : N'importe quel hydrogène peut être utilisé pour faire une liaison hydrogène**

Les liaisons hydrogène représentent un type de liaison particulier que les élèves doivent maîtriser afin de comprendre toute une série de concepts, aussi bien en chimie générale qu'en chimie organique. Afin de vérifier leur compréhension, les élèves ont dû identifier la définition correcte d'une liaison hydrogène et déterminer si les molécules qui leur sont présentées sont capables de faire des liaisons hydrogène ou non. Seuls 22% des élèves retrouvent la définition correcte d'une liaison hydrogène.

Plusieurs types d'erreurs sont commis par les élèves :

- 37% des élèves pensent qu'une liaison hydrogène se fait au sein d'une molécule et non pas entre deux molécules (sauf exception) ;

- 41% des élèves pensent que n'importe quel hydrogène peut être utilisé pour faire une liaison hydrogène et oublient que cet hydrogène doit être lié à un élément fortement électro-négatif ;
- Seulement 47% des élèves identifient la molécule d'eau comme étant capable de faire des liaisons hydrogène ;
- Seulement 20 à 32% des élèves identifient correctement les fonctions alcool, amine et acide carboxylique qui leur sont présentées comme étant capables de faire des liaisons hydrogène ;
- 42 à 45% des élèves pensent qu'un alcène ou un aldéhyde est capable de faire une liaison hydrogène, alors que ce n'est pas le cas dans les molécules proposées.

La notion de liaison hydrogène ne semble pas réellement comprise comme on peut le voir suite à ces nombreuses erreurs commises par les élèves. Cette problématique a déjà été identifiée auparavant et n'est donc pas surprenante. [4], [56], [135], [138]

### ***Comment éviter cette conception alternative ?***

- ➔ Revoir la définition des liaisons hydrogène lorsque l'on aborde les propriétés des molécules organiques avec les élèves. Cette définition est a priori découverte par les élèves en quatrième, c'est-à-dire l'année précédent les chapitres concernant la chimie organique. Il serait probablement pertinent de reprendre avec les élèves quelques généralités sur ce qu'est une liaison hydrogène afin de mieux ancrer cette notion.
- ➔ Insister sur les deux conditions nécessaires à la formation d'une liaison hydrogène : la présence d'un hydrogène lié à un élément fortement électro-négatif et la présence d'un doublet non liant disponible sur un élément fortement électro-négatif. Les trois éléments fortement électro-négatifs permettant de faire des liaisons hydrogène sont le fluor, l'oxygène et l'azote, un moyen mnémotechnique qui peut être transmis aux élèves est de dire « ils FON des liaisons hydrogène », insistant ainsi sur la nécessité de la présence d'un F, d'un O ou d'un N.
- ➔ Rappeler qu'une liaison hydrogène relie plusieurs molécules entre elles, et qu'il s'agit donc d'une liaison intermoléculaire et non intramoléculaire (sauf cas particulier). Les élèves ont découvert précédemment qu'il existe plusieurs types de liaisons au sein d'une molécule (les liaisons covalentes pures, covalentes polarisées et ioniques). La liaison hydrogène peut être abordée comme étant un nouveau type de liaison, qui ne peut pas être rangé dans la même catégorie que ces trois types de liaisons. En effet, les liaisons covalentes et ioniques permettent de relier des atomes afin de former des molécules, alors que les liaisons hydrogène permettent de lier différentes molécules.
- ➔ Utiliser des expériences interactives sur ordinateur afin de montrer aux élèves ce que représente une liaison hydrogène[139] : une équipe de chercheurs aux États-Unis a développé un outil de simulation des liaisons hydrogène en milieu aqueux permettant aux élèves d'améliorer leur niveau de compréhension de la liaison hydrogène. Ce genre d'outil pourrait être transposé à l'enseignement secondaire francophone afin d'en faire profiter nos élèves.

### **CA12 : La température d'ébullition d'une molécule dépend du nombre de liaisons au sein de cette molécule**

Lorsque l'on demande aux élèves pourquoi l'alcool a une température d'ébullition plus élevée que l'alcane correspondant, une autre des justifications proposées par les élèves lors de notre premier questionnaire est qu'il y a plus de liaisons dans la molécule d'alcool que dans la molécule d'alcane, et



que donc il faut plus d'énergie pour casser ces liaisons. Cette explication a été reprise comme distracteur lors de notre QCM et 30% des élèves ont choisi cette réponse. De plus, 22% des élèves pensent qu'il suffit de rompre les liaisons hydrogène pour changer d'état. Bien que n'étant pas totalement fausse, cette réponse est à relativiser au vu de la faible compréhension de la notion de liaison hydrogène par les élèves, comme nous l'avons vu juste avant. En effet, il est fort probable que, parmi les élèves ayant opté pour cette réponse, certains ont enregistré une définition erronée des liaisons hydrogène et qu'ils l'assimilent à n'importe quelle liaison que peut faire un hydrogène, augmentant ainsi le pourcentage d'élèves qui pensent qu'il faut rompre les liaisons au sein de la molécule afin de la faire passer en phase gazeuse. Dans la littérature, nous retrouvons d'ailleurs une étude[118] qui a effectivement mis en avant que les élèves ont effectivement compris qu'il existe un lien entre les forces intermoléculaires et la température d'ébullition, mais que les élèves assimilent les forces intermoléculaires aux forces au sein d'une molécule et non pas entre plusieurs molécules.

Nous voyons ici que les élèves n'ont pas compris que ce ne sont pas les liaisons dans la molécule qu'il faut casser pour passer de l'état liquide à l'état gazeux, mais que ce sont bien les forces intermoléculaires, entre les molécules, qu'il faut rompre. Cette conception alternative est déjà largement documentée dans la littérature[56], [140], et les élèves de l'éducation belge ne font donc pas exception.

#### ***Comment éviter cette conception alternative ?***

- Utiliser des schémas, des dessins, des modèles moléculaires ou des simulations vidéo pour montrer aux élèves ce qu'il se passe au cours d'un changement d'état, en représentant les molécules en phase liquide et en phase gazeuse, permettant aux élèves de visualiser que les molécules restent identiques quelle que soit la phase considérée.
- Montrer un contre-exemple à cette conception alternative en comparant une petite molécule, contenant peu de liaisons, à une grande molécule, contenant beaucoup de liaisons, mais dont la température d'ébullition est plus basse que celle de la petite molécule, par exemple l'eau ( $T_{\text{éb}} = 100^{\circ}\text{C}$ ) et le diéthyléther ( $T_{\text{éb}} = 35^{\circ}\text{C}$ ) ou le benzène ( $T_{\text{éb}} = 80^{\circ}\text{C}$ ).
- Utiliser une séquence d'apprentissage développée et testée par une chercheuse aux États-Unis et qui a prouvé son efficacité [141] : les élèves démarrent la séquence par un laboratoire leur permettant de mesurer la température d'ébullition de différents liquides. Ensuite, il leur est demandé de classer différentes molécules en fonction de leur température d'ébullition (un tableau reprenant les températures d'ébullition ainsi que la structure condensée d'une quinzaine de molécules leur est fourni) et de déterminer quels liens existent entre la structure d'une molécule et sa température d'ébullition.

#### **CA13 : Une molécule polaire est une molécule composée uniquement de liaisons polarisées**

Outre les liaisons hydrogène et l'évaporation des molécules, le troisième concept de chimie générale posant problème lors de son application à des molécules organiques est la notion de polarité. Il existe déjà un certain nombre d'études qui ont mis en avant la présence de conceptions alternatives concernant la polarité des molécules, dont celle que nous retrouvons chez les élèves belges.[118], [142] Nous confirmons ici que ce concept n'est pas suffisamment intégré par les élèves pour être appliqué correctement aux molécules organiques.

Pour commencer, lors de notre QCM, nous demandons aux élèves de sélectionner la définition correcte d'une molécule polaire. Ensuite, nous proposons plusieurs molécules aux élèves et leur demandons d'identifier les molécules polaires. Seuls 22% des élèves choisis la définition correcte et, sans grande surprise, les résultats ne sont pas meilleurs pour la deuxième étape.

La majorité des élèves (55%) pense que la totalité des liaisons au sein d'une molécule doivent être polarisées afin que la molécule soit polaire. Ainsi, la seule molécule qui est correctement identifiée par les élèves comme étant polaire est la molécule d'eau, qui correspond à « leur » définition d'une molécule polaire, puisque toutes ses liaisons sont polarisées. Cependant, pour les différentes molécules organiques proposées, seuls 45 à 51% des élèves identifient correctement l'alcool, l'aldéhyde et l'acide carboxylique comme étant polaires, et 35 à 58% des élèves identifient également l'alcane, l'alcène et l'amine proposés comme étant polaires, alors qu'ils ne le sont pas. Nous voyons ici que les pourcentages sont tous très similaires et qu'il n'y a donc pas de réelle compréhension de la manière de déterminer si une molécule est effectivement polaire ou non.

#### ***Comment éviter cette conception alternative ?***

- ➔ Cette conception alternative combine de nombreuses erreurs possibles et semble donc difficile à contrer simplement. En effet, l'élève peut mal interpréter beaucoup de choses ou ne pas avoir compris une des nombreuses étapes permettant de déterminer si une molécule est polaire. Nous renvoyons donc le lecteur vers d'autres études plus approfondies sur le sujet.[143], [144]

Les trois conceptions alternatives reprises dans ce thème ont déjà été largement étudiées dans la littérature et ont fait l'objet d'une thèse de doctorat à Montréal en 2014.[143] Une analyse beaucoup plus détaillée ainsi que des propositions concrètes permettant aux enseignants de contourner ces conceptions alternatives sont reprises dans cette thèse québécoise et dans un manuel scolaire de Chimie Organique coécrit par l'auteure de cette thèse.<sup>3</sup>

#### **Thème 4 : Questions se rapportant aux réactions**

Peu de conceptions alternatives sont présentes sur le thème des réactions chimiques malgré le grand nombre de questions posées aux élèves sur le sujet. En effet, nous constatons que les élèves répondent correctement ou ne savent pas répondre du tout. Le taux de réponses correctes est très faible, mais nous pouvons voir comme point positif que les élèves savent qu'ils ne comprennent pas, ce qui ne laisse que peu de place aux conceptions alternatives.

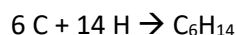
Les différentes conceptions alternatives ne sont pas confinées au domaine de la chimie organique. En effet, lors des entretiens semi-dirigés, presque tous les élèves ont commencé par nous parler de réactions de chimie inorganique. Il semble donc que la source des différentes conceptions alternatives concernant les réactions chimiques soit le cours de chimie minérale donné précédemment au cours de chimie organique. Dans de telles circonstances, il semble utopiste d'imaginer que les élèves puissent appréhender correctement la réactivité des molécules organiques.

---

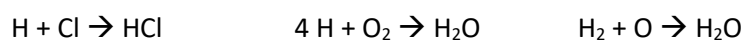
<sup>3</sup> Manuel de Chimie Organique disponible en ligne : [http://issuu.com/editionscec/docs/chimie\\_organique?e=6391216/4876443](http://issuu.com/editionscec/docs/chimie_organique?e=6391216/4876443)

**CA14 : Pour fabriquer une molécule, il suffit de faire réagir tous les éléments qui la composent**

Dans le premier questionnaire, nous demandons aux élèves d'imaginer une réaction permettant de fabriquer un alcane (hexane) ou un alcène (butène). Dans les deux cas, la réponse incorrecte revenant chez le plus grand nombre d'élèves est le fait de faire réagir tous les éléments composant la molécule entre eux. Ainsi, pour 37% des élèves ayant répondu à la question, la réaction que nous devrions faire pour obtenir de l'hexane est la suivante :



Ce genre de réflexion se trouve également présente dans le discours des élèves lors des entretiens semi-dirigés. En effet, ils sont plusieurs à proposer ce type de réaction de formation d'un composé au départ de ses éléments lorsque nous leur demandons un exemple de réaction. Voici par exemple certaines réactions proposées par les élèves :



Notons également la réponse de certains élèves, lors de notre premier questionnaire, à la question concernant la fabrication des alcools. Il semble tout à fait évident aux élèves qu'une réponse satisfaisante est qu'il faut « rajouter OH » pour fabriquer un alcool. Encore une fois, cette réponse indique que l'élève pense que la fabrication d'une molécule s'effectue de manière similaire à la construction d'un puzzle, pièce après pièce (atome après atome) et non pas selon un mécanisme plus complexe.

**CA15 : Une réaction chimique est une transformation magique de choses en d'autres choses, et l'explication du processus de transformation des réactifs en produits peut se faire, au choix, grâce à toute une série de notions**

Lorsque nous demandons aux élèves, au cours d'entretiens semi-dirigés, d'expliquer ce qu'est une réaction chimique, puis de donner des exemples, nous constatons que cette notion n'est que très vaguement intégrée par les élèves. En effet, pour beaucoup d'élèves, une réaction chimique semble être un phénomène extrêmement compliqué à décrire. Les termes utilisés par les élèves ne sont pas corrects et les raisons qu'ils invoquent pour qu'un tel phénomène se produise sont très variables d'un élève à l'autre. Nous n'identifions pas une conception alternative bien précise, mais plutôt un flou total quant à la définition d'une réaction chimique.

Beaucoup d'élèves mentionnent d'une manière ou d'une autre des liaisons qu'il faut casser et former, mais les notions retenues par les élèves pour expliquer pourquoi et comment on casse certaines liaisons pour en reformer d'autres sont variées ; la règle de l'octet, la valence des atomes, l'électronégativité, la stabilité des composés, les électrons, l'énergie nécessaire à la réaction, l'équilibre de la réaction ou encore la polarité des molécules.

**CA16 : Si une molécule est stable, elle ne peut pas servir de réactif dans une réaction**

Lors des entretiens semi-dirigés, nous avons constaté que beaucoup d'élèves sont perturbés lorsqu'ils trouvent une molécule qu'ils considèrent comme « stable » dans les réactifs d'une réaction. Leur manière d'évaluer une molécule comme étant stable consiste toujours à appliquer la règle de l'octet

et à vérifier que la valence de chaque atome est respectée. Si ces conditions sont respectées, alors la molécule est considérée comme stable, et elle ne devrait donc plus réagir, selon eux.

Nous constatons ici que les élèves se représentent la notion de stabilité de manière dichotomique : soit une molécule est instable, et alors elle va réagir, soit elle est stable, et elle ne va plus réagir. Il leur manque donc la notion d'échelle de stabilité des molécules (qui est effectivement inversement proportionnelle à l'échelle de réactivité de la molécule). En effet, une molécule peut être suffisamment stable que pour exister, mais si une réaction chimique permet d'obtenir une molécule encore plus stable, alors la réaction peut effectivement avoir lieu.

### ***Comment éviter ces conceptions alternatives ?***

Nous pensons que l'éradication de ces différentes conceptions alternatives concernant les réactions est fortement compliquée par l'interdiction de faire appel aux mécanismes. En effet, les mécanismes réactionnels donnent, réaction par réaction, le « pourquoi » du déroulement de la réaction en question. Il nous semble donc très compliqué, à ce niveau, de faire comprendre aux élèves les règles qui régissent les réactions en chimie organique. Une possibilité serait de faire appel à des simulations représentant les molécules au cours d'une réaction, sans entrer dans les détails du mécanisme, afin de donner un aperçu général de ce que peut être un mécanisme réactionnel. Mais ceci devrait probablement être l'objet d'une autre thèse, et ce problème ne sera pas traité dans ce travail.

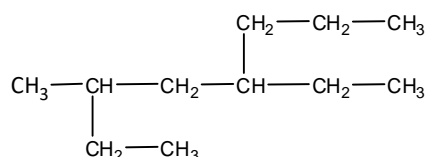
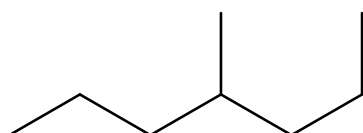
De ce fait, nous avons choisi d'attaquer le problème sous un autre angle pour la suite de ce travail, en abordant les réactions organiques sous une forme nouvelle, en insistant sur la transformation d'une fonction organique en une autre fonction afin de donner aux élèves une idée globale de ce qu'est la synthèse organique.

## **Thème 5 : Questions de nomenclature**

Les exercices de nomenclature proposés aux élèves au cours de nos questionnaires concernent principalement les alcanes, les conceptions alternatives mises en avant ci-après concerneront donc uniquement les alcanes.

### **CA17 : La chaîne principale est la chaîne horizontale**

La conception alternative la plus souvent retrouvée chez les élèves devant nommer un alcane est de mal identifier la chaîne principale lorsqu'elle n'est pas placée horizontalement. Beaucoup d'élèves considèrent alors que les carbones qui ne font pas partie de la chaîne horizontale sont des ramifications. Par exemple, beaucoup d'élèves (37%) identifient la première molécule représentée ci-dessous comme étant un diméthylhexane et non un méthylheptane. Lorsque plusieurs « ramifications » font en réalité partie de la chaîne principale, le pourcentage d'erreur est encore plus élevé : 61% des élèves font cette erreur lorsqu'on leur demande le nom de la deuxième molécule, dont la chaîne principale contient 8 carbones.



Ceci pointe vers une autre conception alternative qui est qu'une molécule est figée, qu'elle ne peut être représentée que d'une seule manière.

***Comment éviter cette conception alternative ?***

- Utiliser de nombreux exemples de molécules dont la chaîne horizontale n'est pas la chaîne principale lors de l'explication de cette règle ainsi que dans les exercices proposés aux élèves et ne pas attendre que les élèves fassent l'association « chaîne principale = chaîne horizontale » en leur montrant trop d'exemples confirmant cette conception alternative.
- Utiliser un modèle moléculaire tridimensionnel représentant une molécule et demander aux élèves de représenter en deux dimensions la molécule qu'il représente, en faisant bouger le modèle moléculaire afin que les élèves dessinent la molécule de plusieurs manières, la chaîne principale étant aléatoirement horizontale ou non. Ceci permettrait à l'élève de se rendre compte que le dessin d'une molécule n'est qu'une des représentations bidimensionnelles possibles de cette molécule, mais qu'il en existe une très grande variété.

**CA18 : Lorsqu'il y a plusieurs ramifications différentes, on les écrit en commençant par celle portant le chiffre le plus petit**

La règle stipulant de noter les différentes ramifications dans l'ordre alphabétique ne semble pas être intégrée par tous les élèves. En effet, pour nommer la molécule reprise dans la conception alternative précédente, qui est le 5-éthyl-3-méthyl-octane, nous écrivons la ramification « éthyl » avant le « méthyl », respectant ainsi la règle de l'ordre alphabétique. Beaucoup d'élèves ont au contraire placé les ramifications dans l'ordre croissant de leur numéro, nommant ainsi cette molécule le 3-méthyl-5-éthyl-octane.

***Comment éviter cette conception alternative ?***

- Utiliser de nombreux exemples de molécules où l'application de la règle correcte donne un résultat différent de l'application de la conception alternative des élèves tôt dans l'apprentissage des différentes règles de nomenclature.

**CA19 : Lorsque les élèves utilisent l'écriture topologique, ils associent une « barre » tracée avec un carbone, ils écrivent donc un carbone de trop.**

Lorsqu'on écrit une molécule sous forme topologique, on ne dessine pas les carbones, il faut donc faire bien attention à représenter le bon nombre de carbones. L'erreur la plus souvent retrouvée chez les élèves, que ce soit au cours de notre premier questionnaire ou lors du QCM, est de représenter la molécule avec un carbone de trop (jusqu'à 19% des élèves). Ceci vient probablement du fait que le premier « trait » que l'on fait pour dessiner une molécule représente une liaison entre deux carbones, et les « traits » suivants ajoutent chacun un seul carbone (nos observations lors des séquences d'apprentissage et nos propres enseignements le confirment). Les élèves doivent donc dessiner en intégrant le fait que le premier trait correspond à deux carbones, puis en ajoutant un carbone à chaque « trait » supplémentaire. Il est facile pour les élèves d'oublier ce détail et de se tromper dans leur compte.

### ***Comment éviter cette conception alternative ?***

- ➔ Lors des premiers exercices au cours desquels une molécule doit être écrite sous forme topologique, compter tout haut le nombre de carbones que l'on ajoute en insistant sur le début de la molécule.
- ➔ Encourager les élèves à compter le nombre de carbones que contient la molécule après l'avoir dessinée afin de vérifier qu'il n'y a pas d'erreur.
- ➔ Les faire jongler simultanément avec les différentes représentations (développée, semi-développée et topologique).

### **Conclusion**

Nous constatons qu'il existe une grande variété de conceptions alternatives présentes dans l'esprit des élèves à travers chacun des thèmes que nous avons explorés. Pour la suite de notre travail, nous ne pourrions pas travailler sur chacune de ces conceptions alternatives. Nous avons donc fait le choix de nous concentrer sur les deux thèmes qui nous semblent primordiaux, à savoir le thème concernant la place de la chimie organique dans la vie quotidienne (thème 1) et celui consacré à la réactivité des molécules organiques (thème 4). En effet, nous considérons que ce sont les deux thèmes où les étudiants commettent le plus d'erreurs et développent le plus grand nombre de conceptions alternatives.

Premièrement, les résultats de notre premier questionnaire indiquent que le thème 1 présente une moyenne globale de réussite de seulement 27%, avec de grandes disparités en fonction des questions, et nous pensons qu'il y a un réel problème dans l'enseignement de la chimie organique si les élèves ne sont pas capables de définir correctement ce qu'est la chimie organique, ni de reconnaître la place de la chimie organique dans la vie quotidienne.

Deuxièmement, les questions portant sur les réactions mènent à un taux de réussite extrêmement bas dès qu'il ne s'agit plus de simple restitution (22% pour de l'application et 10% pour du transfert). En combinant ces résultats avec les dires des élèves lors des entretiens semi-dirigés au sujet de la réaction chimique, nous constatons qu'il est urgent de préparer des séquences d'apprentissage permettant aux enseignants belges de donner le goût de la synthèse organique à leurs étudiants, malgré la contrainte de ne pas avoir recours aux mécanismes réactionnels. Signalons en outre que cette contrainte empêche les enseignants belges d'utiliser les résultats des recherches menées dans d'autres pays à ce sujet.

Finalement, nous estimons que les conceptions alternatives mises en évidence dans les trois autres thèmes sont plus simples à contrer. En effet, un grand nombre d'études ont déjà été effectuées au sujet des propriétés des molécules (thème 3) [135], [136], [139], [141], [143]–[145] et ces recherches peuvent également s'appliquer aux propriétés des molécules organiques. Il semble déjà exister plusieurs solutions relativement simples à mettre en œuvre pour contrer les différentes conceptions alternatives concernant la structure des molécules (thème 2) [73], [137], [142], [146]–[149] et la nomenclature (thème 5) [73], [150], [151]. Nous avons donc fait le choix de laisser ces sujets sur le côté pour la dernière partie de ce travail.

### **Proposition de réorganisation du savoir à enseigner**

Face au constat de manque de cohérence et d'inefficacité de l'organisation du savoir à enseigner tel qu'il est actuellement présenté aux élèves de secondaire, nous pensons que cet enseignement devrait être réorganisé. Nous pensons que la structuration uniquement par fonction est en décalage avec les objectifs avancés par le Ministère et qu'il est nécessaire de la modifier si nous voulons espérer améliorer les choses.

Nous imaginons qu'une approche simultanée de toutes les fonctions organiques (vues en secondaire) est envisageable et devrait permettre aux élèves de mieux s'approprier les différentes fonctions. Nous voudrions introduire directement la dizaine de fonctions utiles en secondaire afin de ne pas les aborder selon un critère de difficulté, en démarrant des fonctions les plus simples et en élaborant vers les fonctions les plus compliquées. Nous pensons que les élèves peuvent apprendre directement à reconnaître toutes les fonctions organiques. Nous abordons ainsi la chimie organique par le thème « Généralités », en discutant de la chimie organique de manière générale, sans se focaliser directement sur une fonction particulière et en découvrant les groupements caractéristiques de chaque fonction, au départ d'une variété de molécules organiques présentes dans notre vie quotidienne. Ceci permettrait également aux élèves d'imaginer la part importante que la chimie organique prend dans notre quotidien.

La nomenclature peut également être abordée de manière transversale puisque les règles de nomenclature sont identiques pour toutes les fonctions organiques, à l'exception de la terminaison du nom de la molécule qui change selon la fonction organique présente. Elle est indispensable pour nommer les différentes molécules que nous rencontrerons dans la suite du cours et intervient donc rapidement dans le chapitre de chimie organique. Les différentes règles peuvent ainsi être abordées et entraînées par quelques exercices. Par la suite, la nomenclature peut être constamment revue à chaque fois qu'une molécule est rencontrée.

Nous aborderions ensuite les propriétés des molécules organiques. Le fait d'avoir déjà introduit une variété de fonctions organiques permet d'utiliser plusieurs fonctions organiques, par exemple lors d'une séance de laboratoire, afin d'observer directement certaines propriétés liées à celles-ci. Nous pouvons proposer aux élèves de simples expériences de miscibilité, de détermination de température de fusion ou d'ébullition, avec des molécules que l'on trouve dans notre vie quotidienne, par exemple l'éthanol, le sel, le sucre, le vinaigre, l'acétone, l'huile, etc... ou encore avec des « séries » de molécules, en comparant, d'une part, différentes fonctions organiques contenant le même nombre de carbones (éthanol, éthanamine, éthanal, acide éthanoïque, etc...) et d'autre part, une même fonction organique mais avec une chaîne carbonée variée (éthanol, propanol, butanol, pentanol, hexanol, etc...). Ces petites expériences permettent de mettre en évidence les différences de propriétés physiques en fonction de la longueur de la chaîne carbonée et de la fonction organique présente.

Nous pouvons ensuite aborder la structure des molécules et la notion d'isomérisation. Le lien peut aisément être fait en comparant une propriété de deux molécules a priori « identiques », mais qui expriment une propriété clairement différente (la couleur ou l'odeur par exemple). D'où vient cette différence ? De la structure des molécules, qui n'est pas exactement la même. On peut alors expliquer aux élèves la notion d'isomères, en utilisant à nouveau une variété de fonctions organiques et en détaillant les différents types d'isomères possibles.

Enfin, les réactions sont d'autant plus intéressantes à étudier puisqu'elles incluent toujours plusieurs fonctions organiques différentes au sein d'une même réaction. Ayant déjà vu une grande variété de fonctions organiques, nous pourrions aborder un plus grand nombre de réactions organiques afin de permettre aux élèves d'avoir un aperçu de ce qu'est la synthèse organique. Nous imaginons présenter les différents grands types de réactions aux élèves de manière générale (addition/élimination, substitution, condensation/hydrolyse, oxydation/réduction) avec leurs caractéristiques principales. Nous pourrions ensuite déterminer, avec les élèves, quel type de réaction est nécessaire pour transformer une fonction en une autre fonction organique.

Cette approche globale nous permettrait d'ajouter certains éléments-clés de synthèse organique, tels que le rendement d'une réaction organique, la nécessité de séparer différentes molécules à la fin d'une réaction sur base de leurs propriétés, etc... Toutes ces nouveautés permettraient aux élèves d'aborder la chimie organique d'une manière beaucoup plus semblable aux problèmes qu'un chimiste organicien peut se poser de nos jours, sans cloisonner la matière selon différentes fonctions, en revoyant constamment les notions de nomenclature, de structure, de propriétés et d'identification des fonctions grâce aux choix des réactions les plus adéquates.

Au cours de la dernière partie de ce travail, nous avons élaboré deux séquences d'apprentissage en nous basant sur cette nouvelle organisation du savoir à enseigner. Nous avons ainsi élaboré une première séquence d'introduction à la chimie organique permettant d'aborder directement toutes les fonctions organiques nécessaires en secondaire, ainsi qu'une deuxième séquence permettant de clôturer le chapitre de la chimie organique en réorganisant le savoir des élèves autour des différentes réactions qu'ils auront précédemment vues (et d'en ajouter quelques nouvelles).

### **Proposition de modification des évaluations**

Les évaluations utilisées actuellement par les enseignants sont construites en suivant la structure du cours de chimie organique qui, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, se découpe en suivant les différentes fonctions organiques, par ordre croissant de difficulté. En accord avec notre proposition de réorganisation du savoir à enseigner en chimie organique, nous proposons également une modification des évaluations. Notre nouvelle structuration du savoir à enseigner par thème invite les évaluations à être élaborées de la même façon. Nous présentons ci-après une liste d'« évaluations types » suivant la ligne de conduite de notre proposition de réorganisation du savoir à enseigner.

Premier type d'évaluation : à la suite de l'introduction à la chimie organique et aux différentes fonctions, après avoir étudié la nomenclature de certaines fonctions organiques, mais pas d'autres.

- Questions de restitution concernant les Généralités de fonctions variées, le nom commun de certaines molécules, la composition de certains produits.
- Questions d'application concernant la Nomenclature de fonctions organiques variées, la reconnaissance des fonctions organiques, la classification de molécules en organiques ou non, le passage d'une représentation à l'autre (développée, semi-développée, topologique).
- Questions de transfert concernant la classification de produits de la vie quotidienne en organiques ou non, la Nomenclature de fonctions organiques n'ayant pas encore été vue, sur base de documents.



Deuxième type d'évaluation : à la suite de l'étude des Propriétés des molécules organiques.

- Questions de restitution concernant la définition d'une molécule polaire ou d'une liaison hydrogène.
- Questions d'application concernant la classification de diverses molécules sur base d'une propriété particulière, en utilisant des fonctions organiques variées.
- Questions de transfert sur base d'une expérience effectuée devant les élèves ou d'un compte-rendu d'expérience donné aux élèves, à propos d'une propriété déjà étudiée mais concernant une fonction organique nouvelle (par exemple, expliquer la différence de température d'ébullition entre un aldéhyde et un acide carboxylique comportant le même nombre de carbones, l'élève devant faire appel à la notion de liaison hydrogène).

Nous pouvons constamment faire appel à des notions de Nomenclature vue précédemment à propos de n'importe quelle fonction en indiquant le nom de la molécule à la place de sa structure, ou en demandant de nommer chaque molécule présente dans les exercices.

Troisième type d'évaluation : à la suite de l'étude des Structures particulières de diverses fonctions organiques.

- Questions de restitution concernant la définition d'un isomère ou des différents types d'isomères, la marche à suivre pour déterminer le type d'isomères présents, la géométrie d'un carbone.
- Questions d'application concernant la distinction entre molécules isomères, molécules identiques et molécules différentes, la recherche de tous les isomères associés à une formule brute.
- Questions de transfert proposant un nouveau type d'exercice demandant à l'élève d'identifier une molécule sur base de plusieurs rapports d'expériences, avec explications de techniques nouvelles si nécessaire. Par exemple, nous pouvons rapidement présenter aux élèves ce qu'un spectromètre de masse ou un spectromètre infrarouge permet d'obtenir comme information, sans aborder les spectres réellement obtenus mais uniquement en abordant les données finales que l'on peut obtenir (la masse de la molécule et la présence de certains groupements organiques). Ces informations pourront permettre à l'élève d'identifier une molécule parmi plusieurs molécules proposées lors d'un nouveau type d'exercice.

À nouveau, nous pouvons réutiliser certaines notions vues précédemment, par exemple des Propriétés que l'on utilise au sein de questions de transfert, de la Nomenclature permettant d'identifier les molécules utilisées et de la reconnaissance de fonctions organiques.

Quatrième type d'évaluation : à la suite des grands types de Réactions et de quelques premières Réactions particulières.

- Question de restitution concernant la définition des types de réactions, les conditions concernant les réactifs.
- Questions d'application concernant la synthèse d'une fonction particulière ou d'une molécule particulière, l'écriture d'une réaction au départ de réactifs dont on précise la structure ou le nom.

- Questions de transfert demandant aux élèves d'imaginer de nouvelles réactions sur base des connaissances acquises en classe (par exemple, comment obtenir un alcyne alors que la réaction de déshydrogénation d'un alcène n'a pas été vue, contrairement à la déshydrogénation d'un alcane, ou encore effectuer une condensation entre un acide carboxylique et une amine alors que les élèves n'ont vu que la condensation entre un alcool et un acide carboxylique en classe).

Ces évaluations permettent de contrer certains des défauts présents au sein des évaluations actuellement utilisées par les enseignants :

- Nous retrouvons des questions de restitution portant sur tous les thèmes abordés.
- Les questions d'application ne sont plus concentrées sur les Réactions et la Nomenclature mais touchent tous les thèmes.
- La répartition entre les questions de restitution, d'application et de transfert est plus homogène au sein de chaque thème.
- Des questions sont posées de manière équilibrée sur tous les thèmes et l'évaluation ne se focalise plus simplement sur la Nomenclature et les Réactions.
- Les questions peuvent porter sur toutes les fonctions organiques dès le début, permettant ainsi une meilleure répartition.

Partie 4 :  
Développement de deux  
séquences d'apprentissage

---



# Introduction

Dans la quatrième partie de ce travail, nous avons élaboré et testé deux séquences d'apprentissage basées sur les deux thèmes sélectionnés précédemment, dans le but de répondre aux deux dernières questions de recherche que nous rappelons brièvement :

**QR2** « *Quelles activités didactiques concevoir afin d'éviter l'émergence de conceptions alternatives chez les apprenants ?* »

**QR3** « *Comment les séquences d'apprentissage développées influencent-elles les réponses des apprenants lors d'un questionnaire portant sur la chimie organique ?* »

Les deux séquences d'apprentissage ont évolué au cours des différents tests effectués dans les écoles. La version que nous présentons ici est la version finale, contenant les différentes améliorations que nous lui avons apportées. Bien entendu, de nombreuses améliorations sont encore envisageables et certaines sont proposées sans pour autant avoir été testées sur le terrain. Pour éviter l'émergence des conceptions alternatives mises en évidence, la construction de ces séquences repose sur des choix didactiques que nous présentons rapidement ici.

➔ Présenter de manière globale les différentes fonctions organiques

Nous pensons que l'apprentissage des différentes fonctions, partie de la chimie organique qui est au cœur même de tout le processus historique de cette chimie particulière, peut être amené d'une manière plus globale aux élèves, en leur présentant directement l'ensemble des fonctions organiques au travers de composés de la vie quotidienne qui font sens auprès d'eux, et non pas en découpant de manière abstraite le cours de chimie organique fonction par fonction, comme c'est le cas actuellement.

➔ Utiliser l'écriture topologique pour représenter les molécules organiques

Sur base des réponses aux questionnaires, nous pensons que les élèves sont tout à fait capables d'intégrer l'écriture topologique, qui est l'écriture la plus répandue dans le monde de la chimie organique, ce qui nous permet de jongler facilement avec des molécules beaucoup plus grandes que ce qui est généralement abordé en secondaire.

➔ Utiliser un grand nombre d'exemples de molécules présentes dans la vie quotidienne

Pour permettre un apprentissage qui fasse sens pour les élèves, nous proposons également de positionner la chimie organique dans le monde réel, en utilisant des molécules réellement présentes autour de nous, et non pas des exemples de molécules simples mais non pertinentes dans le cadre d'une mise en contexte de la chimie organique. En effet, une grande majorité de composés organiques qui nous entourent est constituée de molécules complexes qui ne sont en général pas présentées aux élèves.

→ Aborder la synthèse organique par des synthèses multi-étapes

Une fois que les élèves auront intégré les différentes fonctions organiques, nous prenons le pari qu'ils seront capables d'appréhender la synthèse organique dans sa globalité, et nous voudrions donc construire avec eux un diagramme reliant par des réactions toutes les fonctions organiques vues. Nous ne leur demanderons pas de comprendre en détail chacune de ces réactions, mais nous leur demanderons d'être capables d'imaginer une voie de synthèse d'une molécule comprenant une fonction donnée au départ d'une autre molécule comprenant une fonction différente. L'utilisation de diagrammes semblables a déjà été étudiée dans d'autres pays au niveau de l'enseignement secondaire, avec des résultats positifs.[71], [74], [94]

→ Favoriser la compréhension et minimiser la restitution

Nous préférons évaluer les élèves sur leur capacité à identifier des fonctions dans des molécules complexes plutôt que de leur faire uniquement apprendre par cœur l'unité de base de chaque fonction. De même, nous préférons éviter que les élèves apprennent à restituer une réaction chimique apprise par cœur. Nous estimons plus constructif qu'ils aient un avant-goût de ce que peut représenter la synthèse organique avant d'aborder plus concrètement les mécanismes réactionnels lors de potentielles études supérieures.

Puisque nous souhaitons que nos séquences d'apprentissage soient utilisées à l'avenir dans le cadre de l'enseignement secondaire de Belgique, nous devons respecter certaines **contraintes** définies par le référentiel de compétences ou le contexte réel d'enseignement dans les écoles :

- Contrainte de temps : les séquences développées ne devront pas prendre plus de temps que ce que la matière occupe déjà actuellement.
- Contrainte de matériel : il n'y a pas de laboratoire dans toutes les écoles, nous préférons donc nous baser sur le matériel minimum disponible dans toutes les écoles, à savoir un tableau et des craies.
- Contrainte de contenu : si nous voulons que les résultats de cette recherche soient ensuite utilisés dans les écoles, nous ne pouvons faire référence aux mécanismes réactionnels.

Cependant, nous prendrons quelques **libertés** par rapport au référentiel de compétences :

- Nombre de fonctions : nous utiliserons la plupart du temps plus de fonctions organiques que celles prévues par le référentiel, telles que les amines ou les aromatiques qui n'étaient pas présents dans les anciens référentiels de compétences ou encore les aldéhydes et les cétones, qui ne sont plus présentes au sein des nouveaux référentiels de compétences terminales votés par la communauté française, mais qui s'y trouvaient précédemment.
- Nombre de réactions : nous aurons besoin d'un plus grand nombre de réactions que celles enseignées dans la majorité des écoles si nous voulons construire un diagramme de réactivité reliant toutes les fonctions abordées.
- Représentation des molécules : nous aborderons avec les élèves l'écriture topologique, qui n'est pas prévue dans le référentiel mais qui est déjà utilisée par certains enseignants.

# Séquence I : Aborder la chimie organique par la vie quotidienne et découvrir la variété des fonctions organiques

## Élaboration de la séquence d'apprentissage

Comme nous l'avons vu précédemment dans ce travail, il semble que la majorité des élèves n'ont aucune vue d'ensemble de ce qu'est réellement la chimie organique. Ils se contentent de relier la chimie organique à sa définition, et donc de considérer qu'il s'agit de la chimie du carbone, ou encore de l'associer erronément avec la chimie du vivant. Cette simple définition limite fortement leur image de la chimie organique. Les élèves ne réalisent pas l'implication que peut avoir la chimie organique dans le monde et la part énorme de chimie organique présente dans leur vie quotidienne. Il nous semble donc important d'essayer de remédier à cette vision très parcellaire en modifiant la façon dont la chimie organique leur est présentée. C'est dans ce but que la séquence d'apprentissage suivante a été développée.

Nous avons eu l'occasion, très tôt au cours de cette thèse, de nous retrouver face à une classe de secondaire, d'option Sciences de Base, avec comme mission de leur présenter l'entièreté de la chimie organique. Nous avons donc rapidement pu constater les difficultés et les motivations des élèves face à cette matière. Leur enseignant nous ayant laissé carte blanche, nous avons dès lors posé les prémices de cette séquence d'apprentissage.

Par la suite, nous avons concentré nos efforts sur l'introduction à la chimie organique en proposant une séquence de quatre périodes de cours déclinable dans toutes les écoles. Nous avons testé cette séquence auprès de plusieurs classes, dans différentes écoles, avec une liberté totale laissée par les enseignants qui ont collaboré avec nous, ce qui a permis de proposer exactement la séquence imaginée. Au fur et à mesure des essais, nous avons ajusté la séquence en fonction des retours des élèves et des enseignants, pour finalement aboutir à la séquence d'apprentissage détaillée dans la partie « Déroulement de la séquence » qui apparaîtra plus loin dans ce chapitre.

## Objectifs de la séquence d'apprentissage

- Appréhender la chimie organique en partant de ce qui nous entoure dans la vie quotidienne et reconnaître la place de la chimie organique autour de nous
- Donner une définition claire de ce qu'est la chimie organique et éviter l'amalgame « chimie organique = chimie du vivant »
- Découvrir la représentation des molécules organiques (développée, semi-développée, topologique) et être capable de passer d'une représentation à l'autre
- Découvrir toutes les fonctions organiques nécessaires à l'enseignement de la chimie organique en secondaire et être capable les reconnaître

### **Bref aperçu de la séquence d'apprentissage**

La séquence d'apprentissage complète et finale est présentée plus loin au cours de ce chapitre. Nous allons néanmoins présenter un résumé succinct de la séquence d'apprentissage afin d'obtenir un aperçu général de son déroulement, permettant d'aborder les différentes évolutions de la séquence.

La séquence démarre d'un document distribué aux élèves, composé par l'enseignant sur base de produits « chimiques » de la vie quotidienne proposés par les élèves. Ce document reprend de nombreuses molécules, organiques ou non, représentées sous forme topologique. Les élèves ne savent donc pas « lire » correctement ces molécules, ce qui permettra la découverte des trois grands types de représentations des molécules organiques. L'utilisation de l'écriture topologique fait découvrir l'atome central de la chimie organique, le carbone, et avec lui la définition de la chimie organique.

Ensuite, toutes les fonctions présentes dans les différentes molécules du document initial sont abordées. Après avoir joué quelques instants à reconnaître et identifier les différentes fonctions, les élèves identifient les molécules représentées sur le document grâce à une série d'indices (telle molécule contient telle(s) fonction(s)). Pour terminer, les élèves regardent ce qui nous entoure dans la classe et nous déterminons ensemble si ces produits sont organiques ou non.

À la suite de la séquence, une évaluation est proposée directement aux élèves, sans nécessité d'étudier par cœur ce qui a été découvert. Les exercices recouvrent les différents objectifs de la séquence :

- Donner la définition de la chimie organique
- Passer d'une représentation de molécules organiques à l'autre
- Identifier des fonctions organiques
- Déterminer si des produits quotidiens ou des molécules sont organiques

### **Évolutions de la séquence d'apprentissage**

Au cours des différents tests, nous avons fait évoluer notre séquence d'apprentissage en fonction des retours des élèves et des enseignants présents. Voici les modifications les plus importantes que nous avons effectuées.

#### ***Création de la séquence initiale***

Les prémisses de cette séquence d'apprentissage ont été imaginées lorsqu'un professeur m'a laissé carte blanche pour enseigner l'entièreté du chapitre de chimie organique à sa classe de sciences de base. Nous avons ainsi pu poser les premiers jalons de nos deux séquences d'apprentissage et constater directement auprès d'élèves ce qui pourrait fonctionner et ce qui risquait de poser le plus de problèmes. Cette première ébauche couvrait une matière beaucoup plus large que les deux thèmes sur lesquels nous nous sommes focalisés par la suite ; ceci nous a également permis de confirmer notre choix de thèmes cibles pour la suite de notre travail.



### ***Reconnaissance des fonctions organiques***

Afin de proposer une évaluation ne comprenant pas de restitution, nous avons modifié la question d'identification des fonctions organiques. Au départ, nous avons simplement repris la question utilisée lors des QCM, qui présente une grande molécule et demande aux élèves d'identifier les fonctions organiques entourées. L'évaluation finale proposée comporte trois grandes molécules au sein desquelles toutes les fonctions abordées sont présentes. Les élèves doivent identifier toutes les fonctions qu'ils voient sur ces molécules mais ils disposent cette fois d'un tableau reprenant les diverses fonctions vues au cours de la séquence pour faire cet exercice.

Nous avons cependant laissé la question initiale, qui est présente dans la deuxième partie de l'évaluation pour laquelle les élèves n'ont cette fois plus le tableau des fonctions, afin de déterminer si la première partie de l'évaluation permet aux élèves d'apprendre certaines fonctions de manière plus performante que par une étude « par cœur » à domicile, tel que nous l'avions évalué dans les questionnaires.

Nous avons par contre enlevé une question présente lors de la première version de l'évaluation, également reprise de notre QCM, qui demande aux élèves d'identifier quelle fonction organique est présente au sein des produits quotidiens qui leur sont proposés. En effet, nous considérons que cette question est basée sur de la restitution.

### ***Questions de préparation à la séquence***

Lors des premiers tests de cette séquence d'apprentissage, nous posions trois questions de préparation aux élèves :

- Qu'est-ce que la chimie ?
- Pour toi, qu'est-ce que la chimie organique ?
- Cite 5 produits quotidiens qui sont pour toi de la chimie.

Notre but était de faire émerger les éventuelles préconceptions des élèves sur ce qu'est la chimie organique, et d'identifier de ce qu'ils associent au terme « chimie ». Nous avons rapidement constaté que très peu d'élèves avaient déjà entendu le terme « chimie organique » et n'avions donc aucune réponse pour la deuxième question, à l'exception d'un ou deux élèves par classe, parfois. Nous avons également retiré la première question afin de ne pas accorder un temps précieux à une question ouverte qui laisse souvent les élèves assez perplexes, et qui ne touche pas directement au sujet de cette thèse.

La dernière version de cette séquence d'apprentissage se focalise donc uniquement sur la dernière question, dont les réponses des élèves servent de base à la confection de l'outil principal utilisé au cours de cette séquence. De plus, nous évitons également ainsi de possibles biais en ne mentionnant pas le terme « chimie organique » lors de la question précédente, ce qui pourrait inciter un élève, sachant ce qu'est la chimie organique, à proposer des « produits organiques » et non des « produits chimiques » lors de la dernière question.

### ***Exercices de représentation de grandes molécules***

Au fur et à mesure des différents tests auprès des élèves, nous avons adapté les différentes molécules proposées durant les exercices de passage d'une représentation à l'autre. Ces exercices sont fortement dépendants du niveau global de la classe à laquelle la séquence est proposée. De manière générale, nous avons constaté que, pour la majorité des élèves, une fois que la manière de faire est bien assimilée, l'exercice de base avec des molécules assez petites et simples est trop répétitif et ne présente plus réellement de défi. Nous avons donc adapté les molécules proposées aux élèves en intégrant des molécules beaucoup plus grandes. Ces molécules ont été improvisées directement au tableau en fonction des difficultés rencontrées par les élèves (présence de fonctions oxygénées s'il y a des soucis avec la représentation des oxygènes, présence de doubles ou triples liaisons, voire de cycles aromatiques si ce sont les différents types de liaisons qui posent problème, etc...).

De plus, lorsque les élèves semblent se lasser de l'écriture développée, qui prend beaucoup de temps à écrire et beaucoup de place, nous avons décidé de continuer l'exercice en utilisant uniquement la représentation semi-développée et l'écriture topologique, après discussion et en accord avec les élèves. Ceci permet de nous focaliser sur les écritures a priori les plus compliquées tout en utilisant des exemples de molécules similaires aux plus grandes molécules présentes sur le document distribué aux élèves en début de séquence.

### ***Reconnaitre les produits organiques autour de nous***

Au départ, la séquence d'apprentissage se terminait après avoir identifié toutes les molécules présentes sur le document distribué aux élèves. Ce sont des questions posées par des élèves qui nous ont poussés à compléter la séquence, puisque le temps le permettait, par une discussion autour de la façon de déterminer si un produit présent dans l'environnement quotidien fait partie de la chimie organique. Les élèves sont rapidement arrivés à la conclusion qu'il est presque impossible de savoir si les molécules composant un produit comportent du carbone ou non, à moins d'avoir déjà rencontré ces molécules. Nous leur avons donc proposé une méthode qui fonctionne dans la majorité des cas, qui est simple à mettre en place, qui fait réfléchir les élèves et leur permet de trouver eux-mêmes la réponse à la question « est-ce organique ? ». Lorsqu'on se demande si un produit est organique, il est utile de se demander comment il est fabriqué, d'où il vient. Si la provenance d'un produit peut être liée à quelque chose qui a été vivant un jour, c'est généralement que le produit en question contient de la matière organique. Par exemple, le papier est fabriqué à partir des arbres, et les arbres sont vivants, donc le papier contient des molécules organiques.

L'enseignant doit cependant rester prudent en faisant cette association entre le monde vivant et la chimie organique, il ne faudrait pas retourner dans l'amalgame « chimie organique = chimie du vivant » que nous voulons justement éviter. Nous avons constaté que cette association n'imprègne pas les élèves si nous présentons suffisamment d'exemples de produits qui ne sont pas vivants mais qui contiennent des molécules organiques (le plastique, le bois, l'essence...).

### ***Construire le tableau des fonctions organiques***

Deux façons de construire le tableau des différentes fonctions avec les élèves ont été testées. La première façon est d'amener les élèves à proposer des critères permettant de classer les différentes

molécules organiques en catégories. Parmi les critères proposés par les élèves, nous espérons qu'ils pensent aux types d'atomes présents, à la présence de doubles liaisons ou non, etc... ce qui nous permet d'aboutir aux différentes fonctions. Cette manière de faire a bien fonctionné dans certaines écoles, mais n'a absolument rien donné dans d'autres écoles. Nous supposons qu'elle est fortement dépendante de l'habitude qu'ont les élèves à participer eux-mêmes activement aux cours et à proposer spontanément des idées, ce qui n'est pas forcément mis en avant dans toutes les écoles.

La deuxième manière de faire a donc été adaptée au départ de ce classement proposé par les élèves eux-mêmes. Nous avons nous-mêmes indiqué certaines molécules du document distribué aux élèves pour induire certains critères de classement. Par exemple, nous avons utilisé la molécule d'octane et la vitamine A, pour inciter les élèves à dire que la différence entre ces deux molécules est la présence de doubles liaisons ou non. Un autre critère souvent proposé par les élèves est le critère de taille des molécules. Nous avons éliminé ce critère en expliquant aux élèves qu'il n'est pas dichotomique, qu'il faut choisir une frontière arbitraire entre une « grande » et une « petite » molécule, et qu'il faut plutôt établir un critère clair qui permette dès le premier coup d'œil dire si une molécule appartient à telle catégorie ou non.

Cette dernière façon de procéder est reprise dans la séquence d'apprentissage finale, car elle semble plus adaptée à la majorité des écoles. Cependant, nous ne pouvons qu'inciter les enseignants à utiliser la première méthode développée si leurs élèves ont l'habitude de ce genre d'enseignement.

## Déroulement de la séquence d'apprentissage

Nous allons maintenant découvrir en détail le déroulement complet de la séquence d'apprentissage. Cette séquence est à préparer avec les élèves durant 10 minutes lors d'un cours précédent, et s'étale sur environ 4 périodes de cours. Elle a été conçue pour débiter le chapitre sur la chimie organique avec des élèves n'ayant jamais eu la moindre notion de chimie organique.

### Cours 0 : Préparation du matériel de cours avec les élèves (10 minutes)

Durant une séance de cours précédant le chapitre de la chimie organique, demander aux élèves de répondre à la question suivante par écrit (le nom des élèves n'est pas nécessaire, ils peuvent le faire de manière anonyme) :

➔ Donne 5 exemples issus de la vie quotidienne et qui sont de la chimie

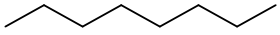
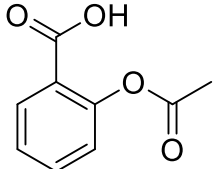
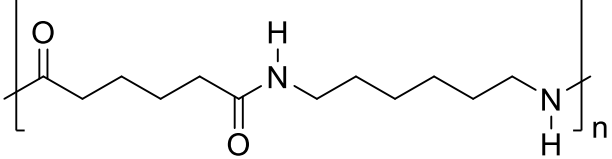
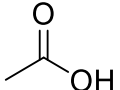
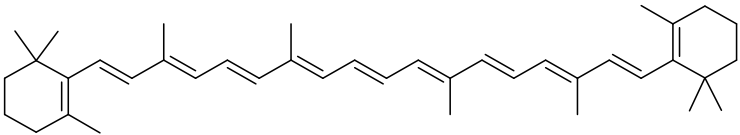
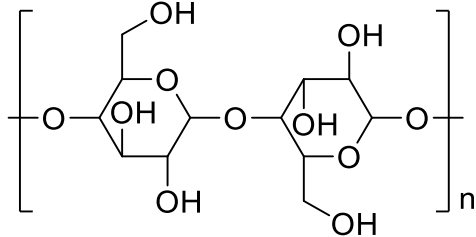
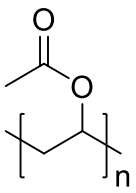
L'enseignant va ensuite réunir toutes les réponses des élèves et regrouper celles qui font partie d'une même « classe » de réponses si nécessaire (par exemple, les élèves peuvent citer plusieurs types de boissons, ou plusieurs nourritures différentes que l'enseignant peut résumer en une seule). Il devra ensuite identifier une molécule représentative pour chacun des exemples proposés par l'élève et préparer pour le prochain cours un document récapitulatif de toutes ces molécules, à distribuer aux élèves. Les molécules seront représentées en écriture topologique et numérotées pour plus de facilité, mais sans indiquer quelle molécule correspond à quel produit.

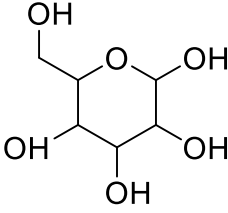
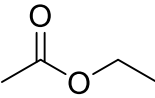
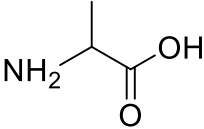
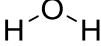
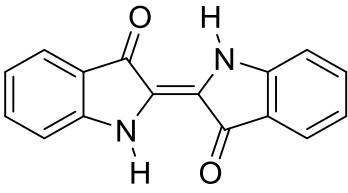
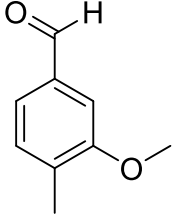
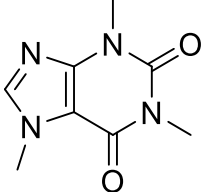
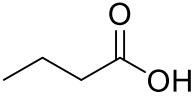
La figure 4.1 présente quelques exemples de réponses d'élèves :

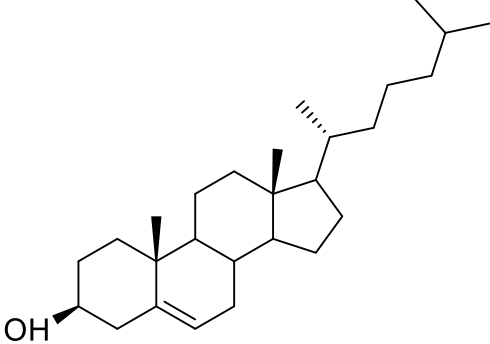
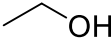
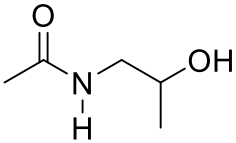

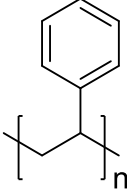
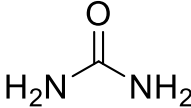
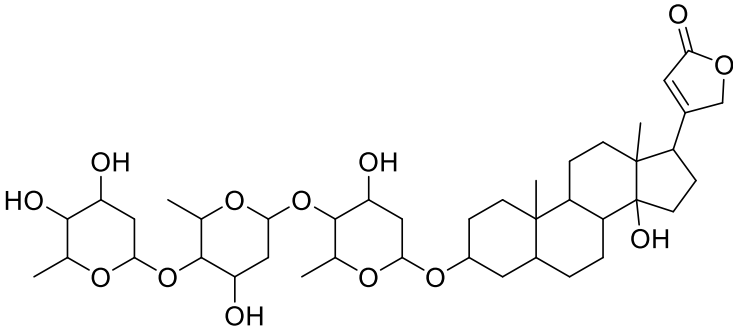


Figure 4.1 : Exemples de réponses d'élèves à la question « Donne 5 exemples issus de la vie quotidienne et qui sont de la chimie »

Ci-après, le tableau 4.1 propose une série de molécules associées à une liste non exhaustive d'exemples pouvant être proposés par les élèves.

Exemples des élèves	Exemple de molécule correspondante
Essence, diesel, pétrole	 <p>Octane</p>
Médicaments, pilules	 <p>Aspirine</p>
Vêtement, tissu, laine, nylon, coton	 <p>Nylon</p>
Vinaigre	 <p>Vinaigre</p>
Aluminium, cuivre et autres métaux	<p>Al Aluminium</p>
Sel de cuisine et autres sels minéraux	<p>NaCl Sel</p>
Nourriture, vitamine, complément alimentaire	 <p>Vitamine A</p>
Papier, carton, bois, sciure, arbre, feuille	 <p>Papier</p>
Colle, vernis	 <p>Colle</p>

<p>Sucre, glucose</p>	 <p>Sucre</p>
<p>Parfum, déodorant, désodorisant</p>	 <p>Parfum</p>
<p>Protéines, acides aminés, molécules biologiques</p>	 <p>Acide aminé</p>
<p>Gaz, méthane, gaz naturel</p>	<p>CH<sub>4</sub></p> <p>Gaz</p>
<p>Eau, coca, soda, boissons diverses</p>	 <p>Eau</p>
<p>Teinture pour vêtements</p>	 <p>Indigo</p>
<p>Nourriture, glace, arômes</p>	 <p>Vanilline</p>
<p>Café, thé</p>	 <p>Caféine</p>
<p>Beurre, huile, gras</p>	 <p>Beurre</p>

Graisse, cholestérol	 <p>Cholestérol</p>
Boisson à base de fermentation, bière, Jack Daniels, boissons diverses	 <p>Alcool</p>
Shampoing, déodorant et autres produits cosmétiques, produit pour laver le linge, Vanish, savon, gel douche, savon vaisselle, produits ménagers	 <p>Shampoing</p>
Air, oxygène, atmosphère	 <p>Dioxygène</p>
Plastique, polystyrène, PVC	 <p>Polystyrène</p>
Salive, urée, urine	 <p>Urée</p>
Poison, curare, digitaline, tabac, drogue	 <p>Digitaline</p>

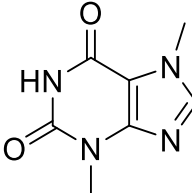
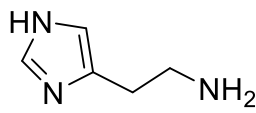
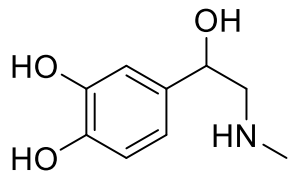
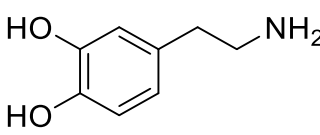
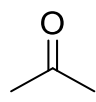
Chocolat	 Théobromine
Neurotransmetteurs	 Histamine
Neurotransmetteurs, adrénaline, hormone	 Adrénaline
Neurotransmetteurs, hormone, dopamine	 Dopamine
Dissolvant, acétone	 Acétone

Tableau 4.1 : Exemples de molécules associées à une liste non exhaustive de produits pouvant être proposés par les élèves

Cette liste est à compléter et améliorer en fonction des idées des élèves. Les molécules proposées ne sont que des exemples, les enseignants peuvent évidemment choisir d'utiliser d'autres molécules.

Voici un exemple de document initial utilisé pour donner une séquence dans une école. Celui-ci est facilement réalisé en utilisant un programme de dessin de molécules tel que ChemDraw. D'autres exemples de document similaires utilisés dans les écoles au cours de ce travail sont disponibles dans l'Annexe 5.



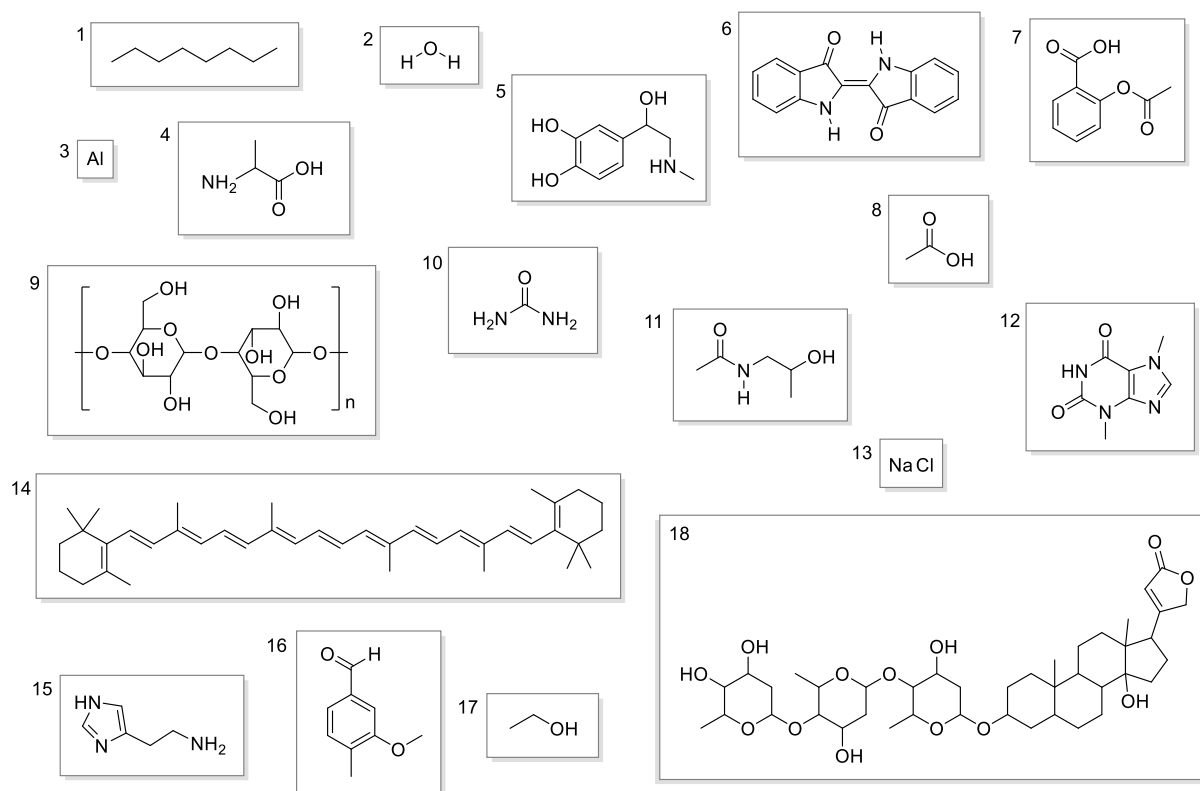


Figure 4.2 : Exemple de document reprenant 18 molécules utilisé pour démarrer la séquence d'apprentissage

En préparant ce document, qui sera l'outil de travail principal durant toute cette séquence d'apprentissage, l'enseignant doit faire attention à plusieurs choses :

- Toutes les fonctions qu'il désire aborder par la suite doivent être présentes, il faudra donc parfois rajouter quelques molécules non citées par les élèves pour y arriver
- Au moins un polymère doit être présent afin de présenter ce type de molécule aux élèves
- Faire attention à ne représenter aucun carbone sur l'entièreté de la feuille
- Veiller à mettre quelques toutes petites molécules telles que l'octane, l'éthanol, l'acide acétique ou l'acétone afin de faciliter les exercices de représentation

Cours 1 : Les représentations des molécules (environ deux périodes de cours)

- Discussion avec les élèves, sans cahier (10 minutes)

Commencer par expliquer aux élèves que ce qu'ils ont répondu à la question précédente est tout à fait correct, puisque tout est de la chimie. Expliquer ensuite le processus suivi par l'enseignant à partir de leurs réponses pour arriver à un document reprenant un ensemble de molécules. Distribuer ensuite aux élèves le document en question. Les molécules sont représentées en écriture topologique, une écriture a priori non vue par les élèves auparavant. Demander aux élèves s'ils reconnaissent certaines molécules. Ils reconnaissent probablement quelques composés minéraux (eau, sel, dioxygène, métal). Identifier ces molécules en indiquant leur nom à côté du numéro correspondant.

Pourquoi ne reconnaissent-ils pas les autres ? Est-ce qu'il y a un point commun entre toutes les autres ? Plusieurs réponses sont possibles de la part des élèves :

- ➔ Ils ne connaissent pas la molécule qu'il y a dans le produit : leur dire que dans de l'alcool, il y a de l'éthanol, que dans l'essence, il y a de l'octane, que dans le sucre, il y a du glucose, dans le vinaigre, il y a de l'acide acétique, etc... Ce type de réponse pointe vers un problème de nomenclature. Ce n'est pas la réponse la plus courante parmi les élèves.
- ➔ Ils ne « voient » pas les atomes qu'il y a dans les molécules, ils ne savent pas « lire » les molécules : mène à un problème de représentation. Pour dessiner des molécules, on n'a besoin que de quelques règles faciles à apprendre, et c'est ce que nous allons voir par la suite.

- Écrire au tableau et leur faire prendre des notes (25 minutes)

Expliquer **les règles de représentation** des chimistes organiciens oralement, en faisant participer les élèves pour qu'ils comprennent d'où viennent ces règles :

- Partir de la formule développée :

Dessiner les trois molécules organiques les plus simples de la feuille distribuée (l'octane, l'éthanol et l'acide acétique par exemple).

Quels sont les éléments présents ? On observe du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène. Pour ajouter l'azote à cette liste, demander aux élèves s'ils voient d'autres éléments sur les molécules représentées sur le document qu'on leur a distribué parmi toutes les molécules qu'ils n'ont pas su identifier. On arrive ainsi aux quatre éléments qui sont les principaux composants de la chimie organique.

Rappeler la valence de ces éléments. Dans un coin du tableau, noter et encadrer  $C = 4$ ,  $N = 3$ ,  $O = 2$ ,  $H = 1$  afin que les élèves aient toujours l'information sous les yeux.

Dans cette représentation, on voit tous les atomes et toutes les liaisons.

- Dessiner la formule semi-développée :

Redessiner les trois mêmes molécules en formule semi-développée. Quelle est la différence par rapport à ce qu'on a dessiné avant ? On ne dessine pas les liaisons C-H.

Demander s'ils reconnaissent quelles molécules de la feuille sont dessinées au tableau. Si oui, quelle est la différence avec ce qui est écrit au tableau ?

- Arriver jusqu'à l'écriture topologique :

Les séquences testées en classe montrent qu'il y a de grandes chances pour que certains élèves repèrent quelles molécules ont été dessinées au tableau. Si ce n'est pas le cas, on leur indique quelles molécules sont représentées. Dans tous les cas, on représente au tableau les trois molécules sous forme topologique. On a ainsi trois molécules écrites chacune de trois façons différentes.

Les élèves vont découvrir eux-mêmes les règles permettant de passer d'une formule semi-développée à une écriture topologique par comparaison des deux représentations : les carbones et les hydrogènes liés aux carbones ne sont plus représentés. On arrive ainsi aux règles de l'écriture topologique :

- Les carbones ne sont plus représentés
- Les hydrogènes liés aux carbones ne sont plus représentés. On déduit mentalement combien on doit mettre d'hydrogène autour de chaque carbone sachant que la valence du carbone est de 4

Le tableau 4.2 présente le tableau récapitulatif expliquant les différentes représentations organiques aux élèves.

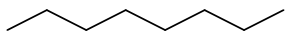
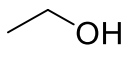
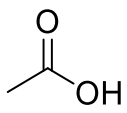
<u>Développée</u>	<u>Semi-développée</u>	<u>Topologique</u>
$  \begin{array}{cccccccc}  \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\    &   &   &   &   &   &   &   \\  \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\    &   &   &   &   &   &   &   \\  \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H}  \end{array}  $	$\text{CH}_3 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{CH}_3$	
$  \begin{array}{c}  \text{H} & \text{H} \\    &   \\  \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{H} \\    &   \\  \text{H} & \text{H}  \end{array}  $	$\text{CH}_3 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{OH}$	
$  \begin{array}{c}  \text{H} & \text{O} \\    &    \\  \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{H} \\    \\  \text{H}  \end{array}  $	$  \begin{array}{c}  \text{O} \\     \\  \text{CH}_3 \cdot \text{C}-\text{OH}  \end{array}  $	
Tous les atomes et toutes les liaisons sont représentés	On ne représente plus les liaisons aux hydrogènes	On ne représente plus les carbones, les hydrogènes liés aux carbones et les liaisons aux hydrogènes

Tableau 4.2 : Représentation des molécules organiques

À partir de la règle principale de l'écriture topologique, on peut arriver à ce qu'est la chimie organique :

Le carbone est l'élément central de la chimie organique

Toutes les molécules qu'ils n'ont pas reconnues contiennent du carbone, ce sont des molécules organiques. Les autres molécules ne sont pas organiques, elles sont minérales. On arrive ainsi à la définition de la chimie organique. **La chimie organique est la chimie du carbone.**

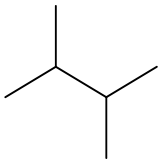
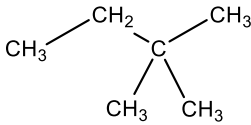
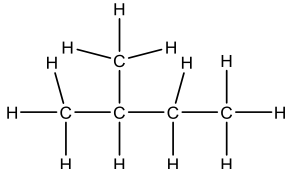
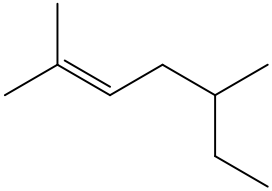
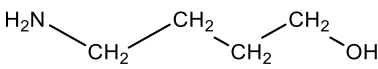
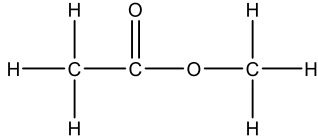
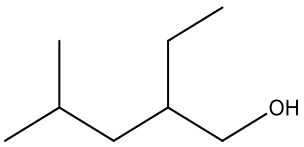
- Séance d'exercices (45 minutes)

Reprendre le même tableau que le tableau récapitulatif, avec trois colonnes pour les trois représentations. Dessiner quelques molécules et leur faire compléter le tableau. Dessiner quelques exemples avec eux si besoin. Attention à faire l'exercice dans tous les sens ! Correction collective en envoyant les élèves au tableau après leur avoir laissé un temps de travail individuel ou en duo.

C'est l'occasion pour l'enseignant de circuler dans la classe, de vérifier si les élèves ont bien compris comment passer d'une représentation à l'autre et de donner plus d'explications aux élèves en ayant besoin. L'enseignant peut également prévoir des exercices supplémentaires pour les élèves ayant compris plus vite que les autres, en leur proposant des molécules plus difficiles et en prévoyant une feuille d'autocorrection.

Les pages suivantes présentent quelques exemples pouvant servir d'exercices, ainsi que les correctifs de ces exercices (tableaux 4.3 à 4.6). Libre à l'enseignant d'en proposer d'autres aux élèves. Remarquons que, lors de cette séquence, nous n'insistons pas sur les angles entre les différentes liaisons au sein d'une molécule, et nous acceptons donc des représentations aux angles variés.

- Molécules simples :

<u>Formule développée</u>	<u>Formule semi-développée</u>	<u>Écriture topologique</u>
		
		
		
		
		
		
		

	$  \begin{array}{c}  \text{CH}_3 \quad \text{CH} \\  \diagdown \quad / \\  \text{C} = \text{C} \\  / \quad \diagdown \\  \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3  \end{array}  $	
$  \begin{array}{cccc}  & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\  &   &   &   \\  \text{H} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{C} & - \text{N} & - \text{H} \\  &   &   &   &   \\  & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H}  \end{array}  $		

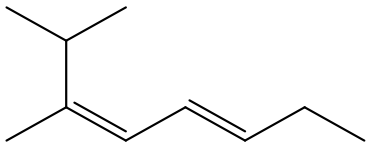
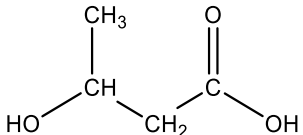
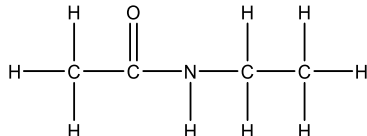
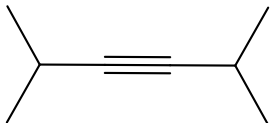
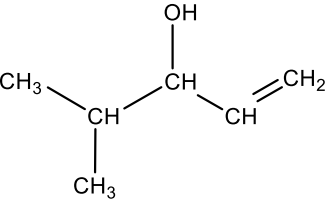
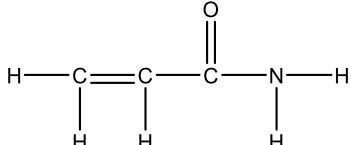
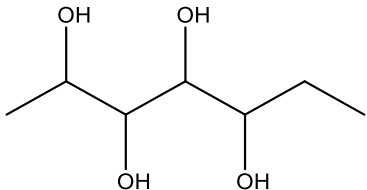
Tableau 4.3 : Exercices simples de représentation organique

Correction :

<u>Formule développée</u>	<u>Formule semi-développée</u>	<u>Écriture topologique</u>
	$  \begin{array}{c}  \text{CH}_3 \\    \\  \text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH}_3 \\    \\  \text{CH}_3  \end{array}  $	
	$  \begin{array}{c}  \text{CH}_3 \quad \text{CH}_2 \quad \text{CH}_3 \\  \diagdown \quad / \quad \diagdown \\  \text{C} \\  / \quad \diagdown \\  \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3  \end{array}  $	
	$  \begin{array}{c}  \text{CH}_3 \\    \\  \text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3  \end{array}  $	
	$  \begin{array}{c}  \text{CH}_3 \\    \\  \text{CH}_3 - \text{C} = \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_3 \\    \\  \text{CH}_2 - \text{CH}_3  \end{array}  $	


Tableau 4.4 : Correction des exercices simples de représentation organique

- Molécules plus difficiles :

<u>Formule développée</u>	<u>Formule semi-développée</u>	<u>Écriture topologique</u>
		
		
		
		
		
		
		



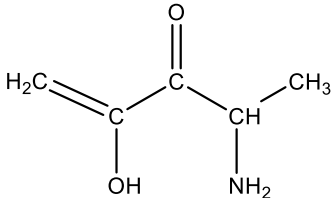
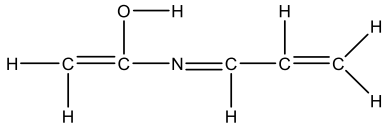
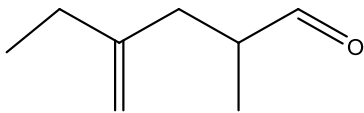
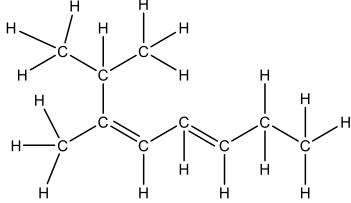
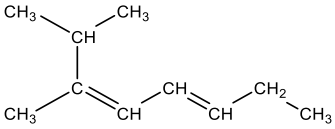
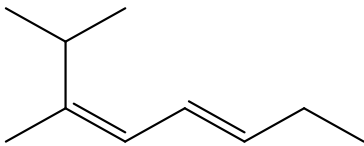
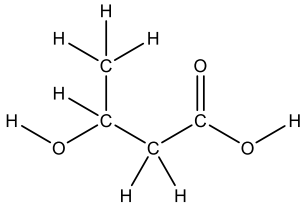
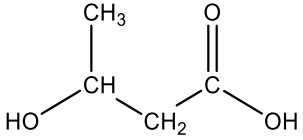
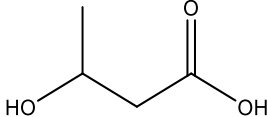
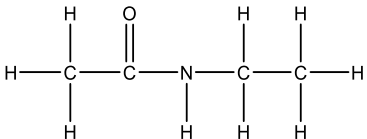
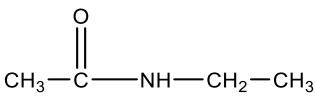
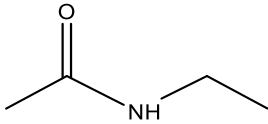
		
		
		

Tableau 4.5 : Exercices plus difficiles de représentation organique

Correction :

<u>Formule développée</u>	<u>Formule semi-développée</u>	<u>Écriture topologique</u>
		
		
		

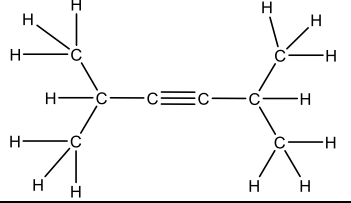
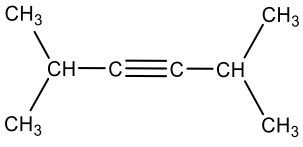
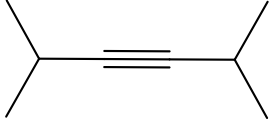
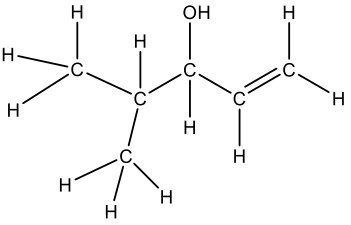
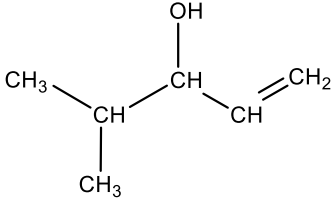
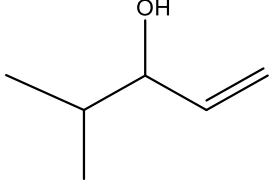
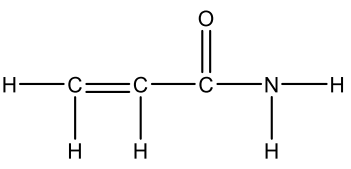
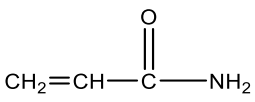
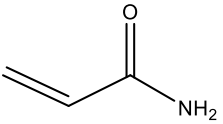
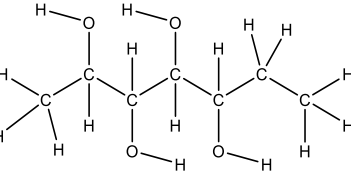
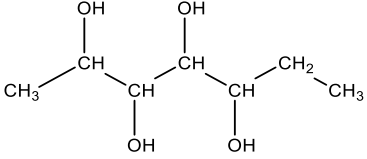
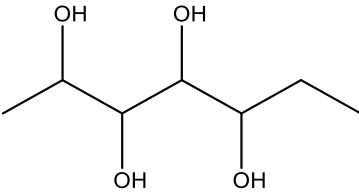
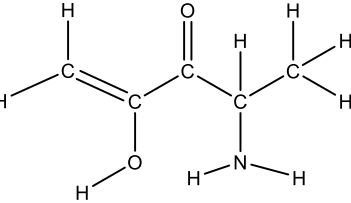
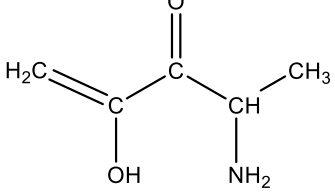
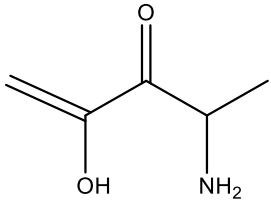
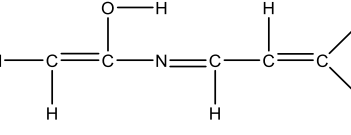
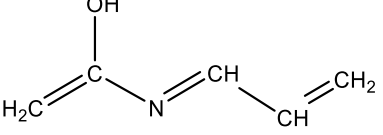
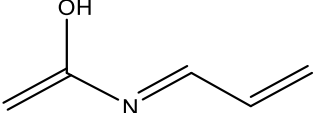
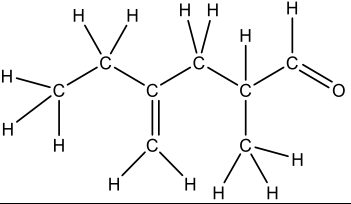
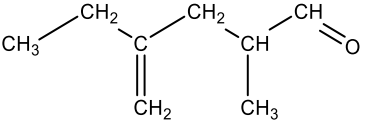
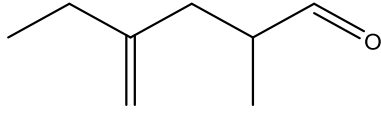
		
		
		
		
		
		
		

Tableau 4.6 : Correction des exercices plus difficiles de représentation organique

En fonction du niveau global de la classe, il peut être intéressant de terminer avec des molécules beaucoup plus grandes et proposées par l'enseignant, afin de montrer aux élèves que la taille de la molécule ne change en rien le niveau de l'exercice. Cela permet également aux élèves de réellement comprendre qu'un des gros avantages de l'écriture topologique est de représenter des grandes molécules beaucoup plus rapidement et en prenant beaucoup moins de place. Nous pouvons alors nous limiter à la représentation topologique et à la représentation semi-développée, en laissant de côté la représentation développée qui est généralement maîtrisée plus rapidement par les élèves, mais qui se prête moins aux grandes molécules.

Une autre variante permettant de tester les connaissances des élèves est de représenter une molécule selon la représentation semi-développée, mais en commettant quelques erreurs, et de demander aux élèves de repérer les erreurs commises.

Il n'est pas nécessaire de traiter tous ces exemples avec les élèves, certaines molécules peuvent être données en devoir aux élèves et corrigées ensuite, individuellement ou collectivement. Il est cependant important de prendre suffisamment de temps en classe pour que les élèves soient familiers avec les trois écritures, spécifiquement avec l'écriture topologique puisque c'est elle qui sera utilisée pour la suite de la séquence d'apprentissage.

- *Discussion de clôture (10 minutes)*

Pour terminer sur les différentes représentations, les avantages et les inconvénients de chaque représentation sont alors discutés. L'enseignant commence par demander l'avis des élèves avec ces quelques questions :

- Quelle est l'écriture que vous préférez ?
- Quelle est l'écriture la plus pratique ? la plus facile ?
- Pourquoi les chimistes organiciens utilisent-ils l'écriture topologique plutôt que les autres ?

Tous les élèves n'auront probablement pas le même avis sur chaque type d'écriture. Ils peuvent à tout moment changer d'écriture s'ils en ont besoin, et repasser à une écriture développée ou semi-développée si celle-ci est plus facile pour eux, mais ils doivent pouvoir lire chaque écriture.

Les chimistes organiciens utilisent l'écriture topologique car la chimie organique comporte beaucoup de grandes molécules. Plus les molécules sont grandes, plus il devient compliqué de les représenter en formule développée ou semi-développée. Pour illustrer ce propos, proposer aux élèves d'écrire une des grosses molécules du document distribué en formule développée !

À la fin du cours, l'élève sait ce qu'est la chimie organique (la chimie du carbone) et connaît la représentation des molécules (formule développée, semi-développée et écriture topologique + passage de l'une à l'autre).

## Cours 2 : Les différentes fonctions organiques (environ deux périodes de cours)

- Discussion avec les élèves, sans cahier (10 minutes)

Maintenant que l'on sait dessiner les molécules, il faut trouver une manière de nommer chaque molécule, et donc savoir de quelle molécule on parle sans devoir la dessiner. Ici, les molécules ont été numérotées, mais comment faire pour parler ensemble de la même molécule si on a juste le dessin ? Plusieurs approches sont possibles.

### Possibilité n°1 :

Dessiner le pentane au tableau et demander aux élèves comment « expliquer » quelle est cette molécule (adapter en fonction des réponses des élèves).

Réponses possibles des élèves et comment y rebondir :

- ➔ C'est une molécule qui contient des C et des H : dessiner une molécule comprenant une double liaison (pentène) pour montrer que ces seuls éléments de réponses ne suffisent pas, il faut aussi faire attention au type de liaison.
- ➔ C'est une molécule qui contient cinq carbones : dessiner un isomère du pentane. Le nombre de carbones ne suffit pas, il faut aussi dire comment ils sont agencés les uns par rapport aux autres.
- ➔ Dessiner une molécule qui contient une autre fonction (pentanol) : s'il y a d'autres éléments, le nombre de carbones et le type de liaison ne suffisent pas, il faut caractériser la fonction organique présente.

Quel que soit l'ordre des réponses des élèves ou les molécules choisies pour rebondir sur les réponses, les discussions et échanges doivent être poursuivis jusqu'à ce que les élèves comprennent qu'une molécule va être caractérisée par le type d'atomes qui la composent, le nombre d'atomes de chaque type, l'ordre dans lequel ces atomes sont agencés et le type de liaison entre tous ces atomes.

La somme de ces quatre caractéristiques permet de définir des « groupes caractéristiques », que l'on appelle les **fonctions organiques**. Chaque fonction organique est un « motif d'atomes et de liaisons » qu'il faut connaître et pouvoir identifier. Ces différentes fonctions organiques ont des propriétés différentes et peuvent faire des réactions chimiques particulières.

### Possibilité n°2 :

Choisir deux molécules présentes sur le document distribué aux élèves et demander quelles sont les différences entre ces molécules. Au départ, il faut veiller à choisir des molécules très similaires, par exemple l'octane et la vitamine A, l'une étant un alcane et l'autre contenant des doubles liaisons, mais aucune des deux ne contenant d'autres atomes que du carbone et de l'hydrogène. La différence entre ces deux molécules est donc la présence de doubles liaisons ou non. Cette différence permet d'établir un premier critère de classification des molécules organiques : la présence ou non de doubles liaisons.

Ensuite, nous pouvons par exemple comparer les molécules d'octane et d'éthanol, qui ne comportent que des simples liaisons, mais dont l'une contient de l'oxygène et l'autre pas. Un second critère de classification est ici mis en évidence : la présence ou non d'oxygène. En comparant ensuite l'éthanol

et la vanilline, nous constatons qu'ils contiennent tous les deux de l'oxygène, mais que ces oxygènes ne sont pas entourés des mêmes atomes. Progressivement, nous arrivons ainsi à définir différentes fonctions organiques. Nous retrouvons le motif « -OH » dans plusieurs molécules. Ce groupement est associé à une fonction organique que nous nommons un alcool. Si ce groupement « -OH » est accolé à un groupement « C=O », alors c'est un autre groupe de molécules que l'on appelle acides carboxyliques. Petit à petit, les différents motifs présents dans les molécules représentées sur le document qui leur a été distribué sont ainsi explorés.

- Écrire au tableau et leur faire prendre des notes (5 minutes)

Expliquer aux élèves oralement l'importance de reconnaître une fonction organique (les fonctions organiques présentes sur une molécule vont donner ses propriétés physiques et chimiques à la molécule) et la marche à suivre pour reconnaître une fonction organique :

La première chose à faire lorsque l'on est face à une molécule, c'est de se demander à quelle famille de molécules elle appartient, quelle est la (ou les) fonction(s) qui se trouve(nt) dans cette molécule. Pour repérer une fonction organique, on peut entourer la partie de la molécule qui contient autre chose que des carbones et des hydrogènes simplement liés. Dès que l'on voit une double liaison ou un autre élément chimique que le carbone ou l'hydrogène, on se trouve en présence d'une fonction organique. S'il n'y a rien d'autre que des carbones et des hydrogènes simplement liés, on est alors en présence de ce qu'on appelle un alcane, qui est le squelette de base en chimie organique.

Détailler un exemple avec les élèves en dessinant au tableau une grande molécule du document distribué, et entourer les différentes fonctions présentes sur la molécule. On peut partir de cette molécule-là pour commencer à explorer les différentes fonctions.

- Identifier les différentes fonctions organiques (15 minutes)

À partir des molécules simples dessinées au tableau, puis des molécules du document distribué au premier cours, explorer toutes les fonctions organiques présentes pour arriver au tableau récapitulatif suivant :



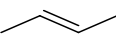

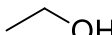



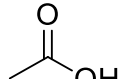
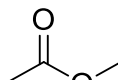

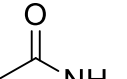
	Simplees liaisons		Doublees liaisons			
<b>CH</b>	Alcane 	Cycloalcane 	Alcène 	Aromatique 		
<b>CHO</b>	Alcool 	Éther 	Aldéhyde 	Cétone 	Acide carboxylique 	Ester 
<b>CHON</b>	Amine 		Amide 			

Tableau 4.7 : Les différentes fonctions organiques (CH : fonctions obtenues uniquement avec du carbone et de l'hydrogène ; CHO : fonctions obtenues en ajoutant l'oxygène ; CHON : fonctions obtenues en ajoutant l'azote).

Le tableau 4.7 est à adapter en fonction des produits proposés par les élèves et des molécules sélectionnées par l'enseignant. On ne distinguera pas à ce stade les alcools ou amines primaires, secondaires et tertiaires. On n'abordera pas de noyaux aromatiques différents du groupe phényle.

L'enseignant peut procéder de plusieurs façons pour repérer toutes les fonctions organiques :

- ➔ Partir d'une molécule et demander aux élèves quels « groupes d'atomes » ils repèrent
- ➔ Partir d'une fonction que les élèves n'ont pas réussi à repérer seuls et leur demander dans quelle molécule elle est présente

L'enseignant va petit à petit dresser la liste de toutes les fonctions au tableau, en dessinant le groupe caractéristique de chaque fonction accompagné du nom de la fonction. Les élèves prennent note, ou l'enseignant peut préférer distribuer le tableau récapitulatif de toutes les fonctions aux élèves en fin de cours, afin d'être sûr que les élèves n'auront pas noté quelque chose d'erroné. Distribuer le tableau permet également aux élèves de rester attentifs lors de l'identification des fonctions car ils ne doivent pas recopier le tableau en même temps.

Un dernier type de molécules non présent dans le tableau reste à aborder : les **polymères**. Un polymère n'est pas à proprement parler une fonction organique, il ne peut donc pas figurer dans le tableau des différentes fonctions organiques. Cependant, les élèves auront probablement proposé un ou plusieurs produits quotidiens contenant un polymère, il est donc nécessaire de leur expliquer rapidement ce qu'est un polymère. Les polymères peuvent contenir n'importe quelle fonction organique, mais c'est toujours le même « motif » qui va se répéter un très grand nombre de fois. Ce nombre peut varier. Pour ne pas dessiner l'entièreté de la molécule, on représente uniquement le motif qui se répète, le « monomère » (il s'agit en fait du monomère modifié par la polymérisation, ayant, par exemple, perdu sa double liaison), en indiquant qu'il se répète une quantité « n » de fois. Ceci étant expliqué et intégré, les élèves sont à présent capables de « lire » toutes les molécules présentes sur le document distribué.

Une fois les différentes fonctions écrites au tableau, on peut repartir de toutes les molécules de deux manières : soit donner une fonction et demander dans quelle molécule on la trouve, soit donner une molécule et demander quelles fonctions s'y trouvent. Pour familiariser les élèves avec les différentes fonctions, on passe un temps à leur demander dans quelle molécule ils voient telle fonction, et à l'inverse quelles fonctions ils voient dans telle molécule. Cette double approche permet aux élèves de bien s'approprier le concept de fonction organique.

Il est important de bien prendre le temps (au moins 15 minutes) de faire l'exercice de reconnaissance de fonctions suffisamment longtemps pour que les élèves s'habituent à utiliser le tableau des fonctions organiques et qu'ils se familiarisent avec elles, même si l'exercice semble quelque peu répétitif. Il n'est cependant pas demandé aux élèves d'apprendre par cœur les différentes fonctions organiques.

- Identifier les molécules (15 minutes)

On peut ensuite identifier les différentes molécules présentes sur le document distribué au départ. Ceci peut être réalisé soit sous forme de jeu individuel ou par deux, soit tous ensemble, en fonction du temps dont on dispose. L'idée est de fournir différents indices aux élèves sur les fonctions contenues dans chaque produit quotidien, afin qu'ils puissent associer chaque molécule représentée avec un produit.

Rappelons que les fonctions acétal ou cétal ne sont pas enseignées dans le secondaire et que ceux-ci sont dès lors assimilés à des éthers. De même, les phénols n'étant pas abordés, ils sont assimilés à des alcools et des cycles aromatiques.

Voici un exemple de liste d'indices à donner aux élèves :

- L'**essence** est un alcane
- L'**aspirine** comporte un noyau aromatique, un acide carboxylique et un ester
- Le **nylon** est un polymère contenant un amide
- Le **vinaigre** est un acide carboxylique dont la chaîne est plus courte que celle du beurre
- Le **crayon** est composé d'une suite de cycles
- La **vitamine A** est une longue molécule contenant des alcènes conjugués
- Le **papier** est un polymère contenant des alcools et des éthers
- La **colle** est un polymère formé à partir d'esters
- Le **sucre** représenté est le glucose, qui contient plusieurs alcools et un éther
- Les **parfums** sont composés d'esters
- Les **acides aminés** contiennent toujours une amine et un acide carboxylique
- Le **dentifrice** comporte une chaîne d'hydrocarbures au bout de laquelle se trouve un noyau aromatique
- Le **gaz** de chauffage le plus courant est le méthane, l'alcane le plus petit
- La **teinture indigo** est une molécule symétrique comportant deux noyaux aromatiques, deux cétones et deux amines reliées entre elles par un alcène
- La **vanilline** est formée autour d'un noyau aromatique et comporte un aldéhyde et un éther
- La **caféine** comporte des amides et des amines
- Le **beurre** contient un acide carboxylique dont la chaîne est plus longue que celle du vinaigre
- Le **cholestérol** est une grande molécule comportant plusieurs cycles, un alcool et un alcène
- L'**alcool** que l'on trouve dans les boissons alcoolisées est l'éthanol
- Le **savon** est une molécule dont l'extrémité est un ester auquel on a enlevé sa chaîne alkyle afin d'en faire une extrémité chargée négativement
- Le **shampooing** contient un amide et un groupement alcool
- Le **polystyrène** est un polymère contenant un cycle aromatique
- L'**urée** est une petite molécule formée d'un amide et d'une amine côte à côte
- La **digitaline** est un poison composé de beaucoup d'alcools et d'éthers, et se terminant par un ester cyclique
- Le **chocolat** est très proche de la caféine et se compose donc d'amides et d'amines, mais il comporte un groupement  $-CH_3$  en moins
- L'**histamine** est un neurotransmetteur composé d'une amine en bout de chaîne, et de deux amines prises dans un cycle

- L'**adrénaline** se compose de plusieurs alcools sur un cycle aromatique, d'un autre alcool et d'une amine
- La **dopamine** est une hormone composée d'un cycle aromatique sur lequel se trouvent deux alcools ainsi que d'une amine en bout de chaîne
- L'**acétone** est utilisée comme dissolvant et est la plus petite cétone possible

Cette liste est à adapter en fonction des différentes molécules présentées aux élèves. Il faut veiller à ce que chaque molécule soit identifiable sur base de l'indice fourni aux élèves et qu'ils ne puissent pas confondre deux molécules entre elles. Il faut également veiller à ce que chaque fonction organique que l'on désire étudier soit présente dans au moins une molécule. La plupart du temps, les élèves le font individuellement.

Terminer par une correction générale si l'exercice a été réalisé par écrit.

- *Discussion de clôture (10 minutes)*

Pour clôturer cette partie, en fonction du temps dont l'enseignant dispose, il est demandé aux élèves de regarder dans la classe ce qui les entoure, et de voir ce qui est organique ou pas. Il peut aussi leur être demandé de manière générale des exemples de produits organiques, puis de produits inorganiques dans la pièce. L'enseignant peut aussi indiquer telle ou telle chose et demander si c'est organique ou pas. On en arrive à établir une proportion grossière de ce qui est organique ou non dans la vie de tous les jours. Cette phase permet à l'élève de mieux se rendre compte de la place énorme qu'occupe la chimie organique dans notre environnement.

Pour déterminer si quelque chose (une substance, un matériau, un objet ou une partie d'objet...) est organique, l'idée principale à intégrer par les élèves est de se demander comment est fabriqué l'objet en question, d'où provient cette matière. Si on peut remonter à une origine animale ou végétale, à quelque chose de vivant ou qui a été vivant, alors on peut en conclure que c'est organique. Cette explication constitue une approximation grossière, mais elle permet dans la grande majorité des cas d'établir une distinction correcte entre un produit d'origine organique ou minérale.

À la fin de la séquence, l'élève sait reconnaître les principales fonctions organiques dans les molécules et a établi le lien avec divers produits de la vie quotidienne. Il réalise la place importante de la chimie organique dans la vie quotidienne.



### Évaluation de la séquence d'apprentissage

Afin d'évaluer les acquis des élèves à la suite de cette séquence d'apprentissage, nous leur avons proposé une évaluation en fin de cours, à la suite de la séquence (en fonction du temps disponible, l'évaluation a pu être proposée aux élèves durant la même période de cours que la fin de la séquence d'apprentissage, ou à l'heure de cours suivante). Nous avons choisi de poser des questions provenant des questionnaires utilisés les années précédentes afin de pouvoir comparer les réponses des élèves ayant suivi la séquence d'apprentissage ou non. Nous avons également ajouté une seconde partie à cette évaluation qui se focalise sur la reconnaissance des fonctions organiques au sein de grandes molécules, avec l'aide du tableau de fonctions.

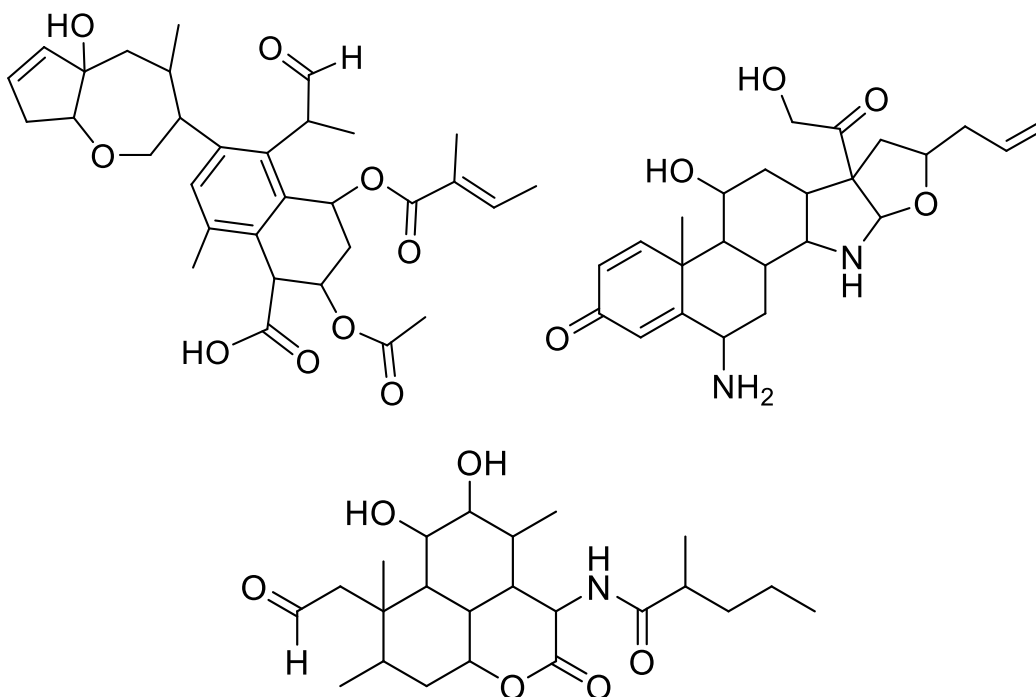
Nous avons voulu vérifier que les différents objectifs de la séquence d'apprentissage ont bien été atteints, à savoir :

- Définir la chimie organique
- Représenter les molécules organiques (formule développée, semi-développée, écriture topologique et passage de l'une à l'autre)
- Identifier les différentes fonctions organiques
- Déterminer si une molécule est organique ou inorganique
- Déterminer si un produit quotidien est formé à base de substances organiques ou inorganiques

Les différentes questions posées aux élèves sont reprises ci-dessous :

#### Première partie : réalisée par les élèves avec un tableau des fonctions organiques

Voici plusieurs molécules organiques. Identifie toutes les fonctions présentes dans ces molécules en entourant la fonction et en donnant son nom.

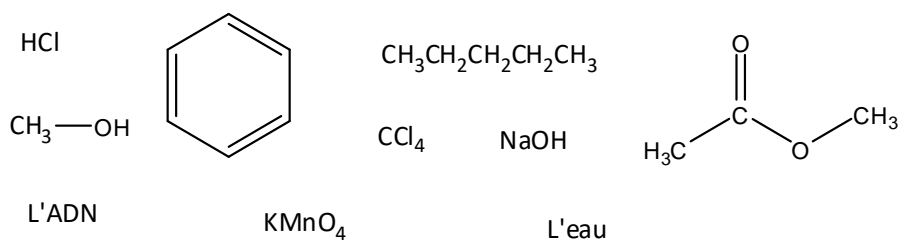


Deuxième partie : réalisée par les élèves sans aucun support

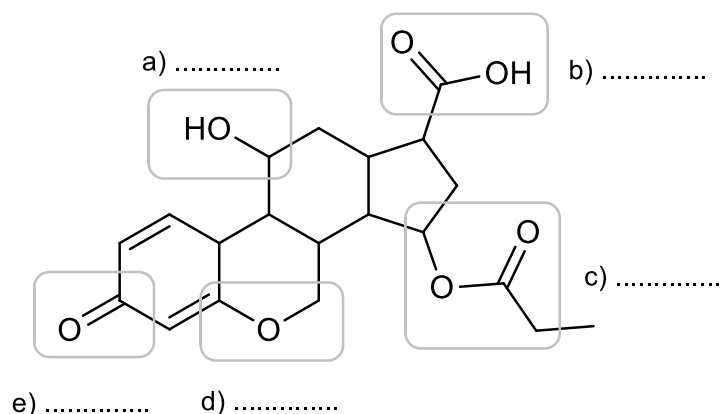
1) La chimie organique est :

- a) La chimie du vivant
- b) La chimie du carbone
- c) La chimie des éléments « CHON »
- d) La chimie des molécules organiques

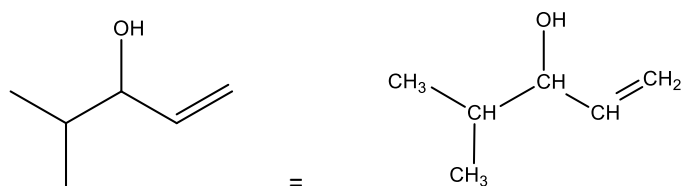
2) Parmi ces différentes molécules, entourez les molécules organiques :



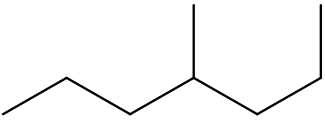
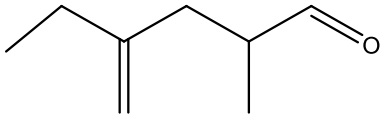
3) Voici une molécule organique. Identifie les différentes fonctions qui ont été entourées.



4) Les chimistes organiciens utilisent le plus souvent l'écriture topologique pour représenter les molécules organiques. Cette écriture ne représente pas les carbones ni les hydrogènes liés aux carbones, elle ne montre que les liaisons entre carbones, et les autres éléments. Sachant que :



Complète le tableau suivant :

Écriture topologique	Formule semi-développée
	
	$  \begin{array}{ccccccc}  & & & & \text{CH}_2 & - & \text{CH}_2 & - & \text{CH}_3 \\  & & & &   & & & & \\  \text{CH}_3 & - & \text{CH} & - & \text{CH}_2 & - & \text{CH} & - & \text{CH}_2 & - & \text{CH}_3 \\  & &   & & & & & & & & \\  & & \text{CH}_2 & - & \text{CH}_3 & & & & & &   \end{array}  $
	
	$  \begin{array}{ccc}  & \text{CH}_3 & \text{O} \\  &   &    \\  \text{HO} & - & \text{CH} & - & \text{CH}_2 & - & \text{C} & - & \text{OH} \\  & & & & & & & &   \end{array}  $

5) Voici une liste de produits de la vie quotidienne. Entoure ceux qui font partie de la chimie organique.

- |              |                          |                      |
|--------------|--------------------------|----------------------|
| - Savon      | - Papier                 | - Bière              |
| - Sel        | - Dentifrice             | - Arômes             |
| - Sucre      | - Colle                  | - Verre              |
| - Médicament | - Vinaigre               | - Armoire métallique |
| - Essence    | - Bouteille en plastique | - Pull en laine      |
| - Shampoing  | - Eau                    | - Boite en carton    |

6) Un polymère est :

- Une très longue molécule
- Un produit composé de beaucoup de molécules
- Une molécule constituée d'une unité de base qui se répète un grand nombre de fois
- Une molécule fabriquée par l'homme

## **Tests de la séquence dans les écoles**

Afin d'éprouver la séquence d'apprentissage que nous avons développée, nous avons contacté un grand nombre d'enseignants pour avoir la possibilité de venir dans les écoles et de tester nous-mêmes la séquence d'apprentissage auprès d'élèves.

### **Échantillon**

Cette séquence d'apprentissage a été testée par moi-même auprès de 144 élèves de 5<sup>ème</sup> secondaire, ce qui représente 10 classes réparties dans 6 écoles.

En outre, certains enseignants ont été d'accord de tester eux-mêmes la séquence en la donnant à leurs élèves à ma place. Cet échantillon représente 102 élèves répartis dans 5 classes et 3 écoles différentes. Cette deuxième phase de test a permis de déterminer si cette séquence est facile à appréhender du point de vue de l'enseignant et si la séquence se déroule globalement de la même manière lorsque c'est l'enseignant dont les élèves ont l'habitude qui met en œuvre la séquence d'apprentissage.

### **Difficultés rencontrées par les élèves**

Les difficultés principales que nous avons recensées chez les élèves au cours de la séquence d'apprentissage sont reprises ci-après. Ces difficultés revenant régulièrement au sein des différentes classes, nous avons porté une attention particulière à leur résolution au cours de la séquence.

#### ***Erreurs commises lors des exercices de représentation***

Au cours des exercices de représentation de molécules organiques, nous avons noté plusieurs erreurs commises par les élèves. Voici certaines erreurs qu'il nous semble important de pointer :

- Un azote qui fait 4 liaisons ;
- Un carbone qui ne porte pas assez d'hydrogènes ;
- Écriture d'un « C » sur une écriture topologique ;
- Un oxygène représenté en dehors d'une molécule.

#### ***Difficultés en matière de doubles liaisons***

Dans certaines classes, l'introduction des doubles (et des triples) liaisons perturbe fortement les élèves lors des exercices de représentation des molécules organiques. Certains élèves ont du mal à assimiler le fait qu'un carbone est capable de faire deux liaisons avec un autre élément, que ce soit un autre carbone ou un oxygène. La présence de doubles liaisons vient perturber le compte des liaisons autour de chaque carbone et nous avons pu observer à plusieurs reprises que la valence du carbone n'est alors pas respectée par les élèves.

#### ***Processus d'identification des fonctions***

Lors de l'identification des différentes fonctions présentes dans une molécule, nous avons remarqué que donner une procédure bien précise pour y arriver facilite les choses pour les élèves. Nous avons donc rapidement fait le choix de recopier entièrement au tableau une molécule du document distribué aux élèves, et de les accompagner tout au long du répertoriage des fonctions en entourant clairement chaque fonction présente sur la molécule. L'exercice peut être considéré comme terminé lorsque toutes les doubles (et triples) liaisons et tous les hétéroatomes sont entourés. S'il reste une double (ou triple) liaison ou un atome qui n'est pas du carbone qui n'est pas encore entouré, c'est qu'une fonction n'a pas encore été identifiée.

### ***Difficulté à différencier les fonctions porteuses du groupement C=O***

Pour la majorité des élèves, les fonctions qui sont les plus difficiles à distinguer sont toujours les quatre fonctions comprenant un carbonyle (groupement C=O), à savoir les cétones, les aldéhydes, les acides carboxyliques et les esters. Il est donc important de bien insister sur la manière de les différencier, et de proposer suffisamment de molécules comprenant ces fonctions. Les amides ne semblent pas poser cette difficulté en raison de la présence d'un atome d'azote qui les distingue clairement des quatre autres fonctions.

### **Remarques**

Nous avons également noté plusieurs remarques, qui ne sont pas des difficultés de compréhension de la part des élèves mais des points qui pourraient constituer des éléments perturbateurs durant la séquence d'apprentissage. Ces différents éléments ont été gérés de la manière suivante.

### ***Lien avec la biologie***

Dans certaines classes, les élèves ont déjà rencontré certaines grandes molécules organiques au cours de biologie. Ceci permet de faciliter la manipulation de ces nouvelles molécules, et permet également d'insister sur le lien entre la chimie organique et la chimie du vivant. Il faut cependant faire attention à ne pas trop insister sur ce lien afin de ne pas faire émerger la conception alternative que nous avons observée chez beaucoup d'élèves lors de nos tests préliminaires, à savoir que la chimie organique serait la chimie du vivant.

### ***Élèves déjà familiers avec la chimie organique***

Dans certaines classes, il peut arriver qu'un élève ou deux soient déjà familiers avec ce qu'est la chimie organique, ou avec certaines molécules représentées sur le document distribué. C'est particulièrement le cas lorsque des doubleurs, qui ont déjà eu un cours de chimie organique l'année précédente, sont présents. Il s'agit alors de s'adapter, de comprendre comment ils ont déjà ces connaissances (acquises à domicile ou l'année précédente à l'école, par exemple) et d'embrayer en se basant sur les connaissances de la majorité des élèves.

Dans certaines écoles, une initiation à la chimie organique est proposée en 4<sup>ème</sup> année du secondaire. La séquence que nous avons développée est donnée uniquement à des élèves de 5<sup>ème</sup> année car c'est dans cette année-là que l'introduction à la chimie organique est prévue par le référentiel de compétences. Nous n'avons cependant constaté aucun effet négatif à proposer la même séquence à des élèves ayant déjà eu quelques notions de chimie organique en 4<sup>ème</sup> étant donné qu'ils n'en gardent pratiquement aucun souvenir. Certains termes sont ressortis rapidement, tels que méthyl, éthyl, alcool, mais sans aucune notion de ce que veulent dire ces termes. Nous avons donc enchaîné avec la séquence de manière similaire aux autres écoles.

### ***Propriétés des molécules***

Certains élèves ont posé des questions concernant les propriétés des molécules, et si elles sont liées aux différentes fonctions qu'elles contiennent. Nous avons rapidement répondu en indiquant que la présence de fonctions identiques confère aux molécules des propriétés similaires. Par exemple, toutes les molécules contenant une fonction amine ont tendance à avoir des odeurs fortes, et pas forcément agréables, les molécules contenant une fonction ester ayant quant à elles souvent des odeurs de fruit ou de fleur.

### ***Représentation favorite des élèves***

Dans la plupart des écoles, nous avons posé la question aux élèves de leur préférence quant aux différentes manières de représenter les molécules organiques, juste après avoir terminé les exercices sur cette matière. Il est intéressant de noter que ces préférences sont très variables d'une école à l'autre, mais que, globalement, environ la moitié des élèves porte sa préférence vers l'écriture topologique. Cette écriture, qui n'est pas imposée par le référentiel, mais qui est la plus utilisée dans le monde de la chimie organique, a donc clairement sa place dans les écoles secondaires.

Dans certaines classes, nous observons que pratiquement aucun élève ne porte sa préférence sur la représentation développée, tandis que dans d'autres classes, près d'un tiers des élèves choisissent celle-ci car avec elle, « on ne peut pas faire d'erreur ».

### ***Gestion des exceptions***

Pour être tout à fait complets, nous devrions parler des molécules contenant du carbone mais qui ne font pas partie de la chimie organique, comme le CO, le CO<sub>2</sub>, les carbonates, les cyanures et les carbures inorganiques. Dans certaines classes, des élèves ont posé une question qui nous a permis de rapidement aborder ces exceptions. Dans le cas contraire, nous avons fait le choix de ne pas en parler.

## Analyse des résultats des élèves

### Analyse de l'évaluation de fin de séquence d'apprentissage

Nous présentons dans cette partie les résultats des élèves à l'évaluation proposée à la suite de la séquence d'apprentissage. L'échantillon se compose de 144 élèves ayant assisté à la séquence d'apprentissage et ayant ensuite répondu à l'évaluation. Les réponses des élèves sont indiquées en foncé sur les différents graphiques. Les élèves ont reçu comme consigne pour répondre à ce questionnaire de sélectionner la réponse qui leur semble la plus correcte. Si plusieurs réponses leur semblent correctes, il ne faut en cocher qu'une seule ; la plus pertinente.

En parallèle, nous allons comparer les résultats face aux différentes questions de l'évaluation pour les élèves ayant suivi la séquence d'apprentissage et pour d'autres élèves n'ayant pas suivi la séquence d'apprentissage. Nous comparons ainsi les réponses des 144 élèves ayant suivi la séquence d'apprentissage avec les 201 élèves ayant répondu à notre QCM (voir partie 3 de ce travail) à la suite du chapitre de chimie organique donné par leur propre enseignant. Les réponses des élèves sont indiquées en clair sur les différents graphiques. Nous sommes conscients que les conditions de passation du questionnaire ne sont pas identiques pour les deux cohortes d'élèves ; les élèves n'ayant pas suivi la séquence d'apprentissage ont été testés sur leurs connaissances avec un délai plus grand entre le cours et l'évaluation.

#### Q1) La chimie organique est :

- a) La chimie du vivant
- b) La chimie du carbone (\*)
- c) La chimie des éléments « CHON »
- d) La chimie des molécules organiques

La première question porte sur la définition de la chimie organique. Nous constatons sur la figure 4.3 que plus de 80% des élèves répondent correctement et que la conception alternative qui associe chimie organique et chimie du vivant n'est pratiquement plus présente (3%).

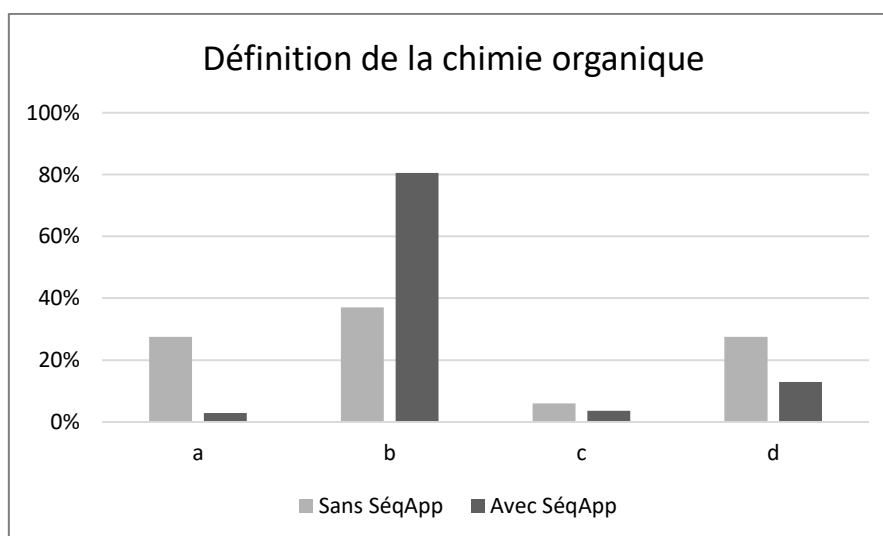
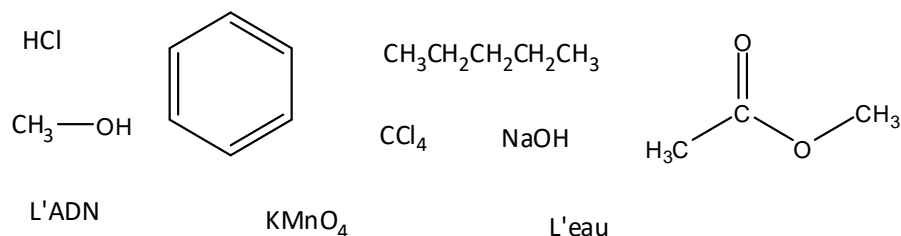


Figure 4.3 : Répartition des réponses des élèves n'ayant pas suivi la séquence d'apprentissage (clair) et ayant suivi la séquence d'apprentissage (foncé)

Nous constatons que le pourcentage de réponses correctes a plus que doublé (de 37% à 81%) lorsque les élèves ont suivi la séquence d'apprentissage proposée, tandis que les différentes conceptions alternatives disparaissent presque totalement. En effet, nous passons de 27% des élèves associant chimie organique et chimie du vivant à seulement 3% des élèves faisant cette association.

**Q2) Parmi ces différentes molécules, entourez les molécules organiques :**



Ensuite, nous demandons aux élèves d'identifier quelles sont les molécules organiques parmi les molécules représentées. Nous constatons (voir Figure 4.4) que pas loin de la totalité des élèves identifient le CH<sub>3</sub>OH, le benzène, le pentane et l'ester proposés. Environ la moitié des élèves identifient l'ADN et le CCl<sub>4</sub>. Presque aucun élève, heureusement, n'identifie HCl, KMnO<sub>4</sub>, NaOH et l'eau comme étant organiques.

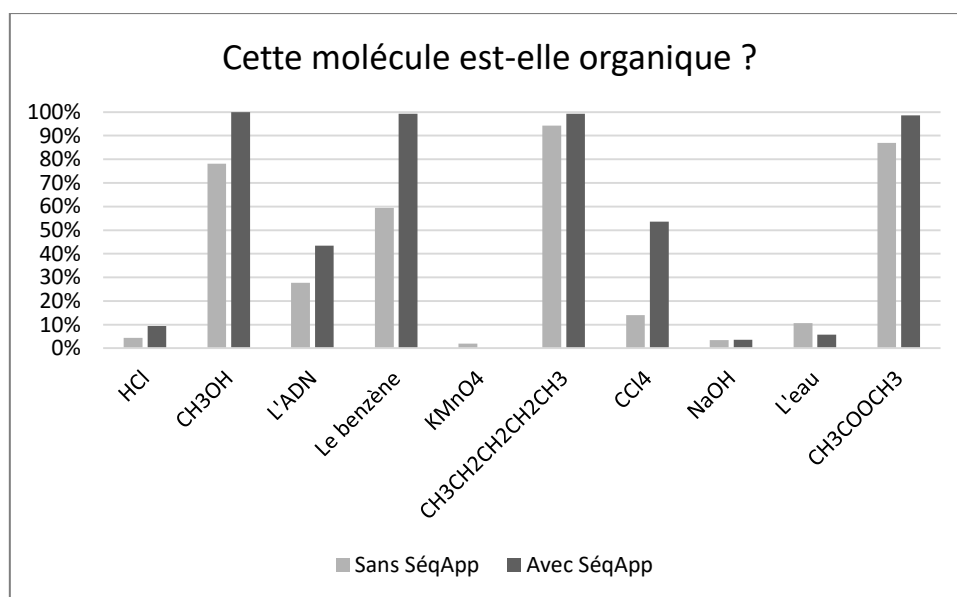


Figure 4.4 : Pourcentage d'élèves identifiant les composés proposés comme faisant partie de la chimie organique, n'ayant pas suivi la séquence d'apprentissage (clair) et ayant suivi la séquence d'apprentissage (foncé)

Nous observons que les différentes molécules organiques sont identifiées par un plus grand pourcentage d'élèves après avoir suivi la séquence d'apprentissage.

Le méthanol, le benzène, le pentane et l'ester proposés sont identifiés par 99% des élèves. Les deux molécules posant encore quelques problèmes malgré une belle amélioration sont l'ADN et le CCl<sub>4</sub>.

Les molécules inorganiques (HCl, KMnO<sub>4</sub>, NaOH et l'eau) n'étaient déjà globalement pas reconnues comme étant organiques et ne le sont toujours pas après la séquence d'apprentissage, avec des pourcentages toujours inférieurs à 10%.



**Q3) Voici une liste de produits de la vie quotidienne. Entoure ceux qui font partie de la chimie organique.**

- |              |                          |                      |
|--------------|--------------------------|----------------------|
| - Savon      | - Papier                 | - Bière              |
| - Sel        | - Dentifrice             | - Arômes             |
| - Sucre      | - Colle                  | - Verre              |
| - Médicament | - Vinaigre               | - Armoire métallique |
| - Essence    | - Bouteille en plastique | - Pull en laine      |
| - Shampoing  | - Eau                    | - Boite en carton    |

À l’instar de la question précédente, nous demandons aux élèves d’entourer les différents produits qu’ils pensent être organiques dans la liste présentée ci-dessus. Tous les produits n’ont pas forcément été abordés en classe, le but de cet exercice est donc de déterminer si les élèves sont capables de réfléchir à la provenance de produits de tous les jours et d’en déduire s’ils font partie de la chimie organique ou non.

Nous constatons sur la figure 4.5 que les quatre produits inorganiques (le sel, l’eau, le verre et le métal) sont identifiés comme étant organiques par 4 à 13% des élèves. En ce qui concerne les produits organiques, les pourcentages varient de 51 à 99% d’identifications correctes. Nous pouvons classer les produits organiques en différentes catégories en fonction du taux de bonnes réponses :

- Entre 50% et 65% de réponses correctes : le sucre, le carton, la colle et le dentifrice
- Entre 65% et 80% de réponses correctes : la bière, le savon, les arômes et la laine
- Plus de 80% de réponses correctes : le papier, l’essence, le shampoing, le vinaigre, les bouteilles en plastique et les médicaments

Ceci permet de mettre en évidence les produits avec lesquels les élèves sont moins familiers. Il serait dès lors intéressant, par la suite, d’insister plus fortement en classe sur l’origine organique des produits identifiés comme organiques par le moins d’élèves.

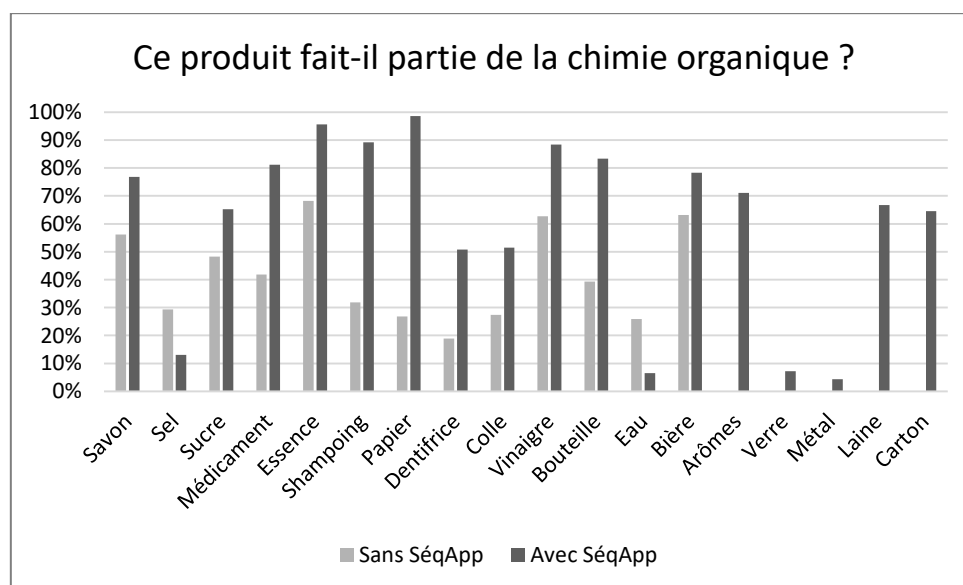
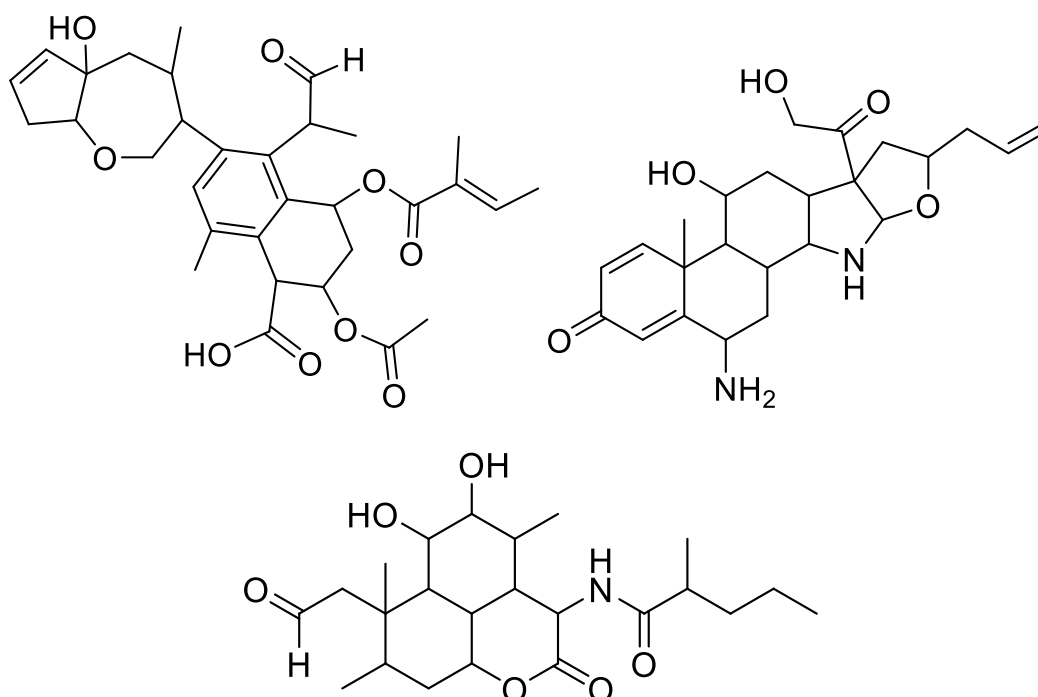


Figure 4.5 : Pourcentage d’élèves identifiant les composés proposés comme faisant partie de la chimie organique, n’ayant pas suivi la séquence d’apprentissage (clair) et ayant suivi la séquence d’apprentissage (forcé)

De manière similaire à la question précédente, nous observons ici une augmentation du taux de reconnaissance correcte de tous les produits organiques présents, ainsi qu'une diminution d'identifications erronées concernant les produits inorganiques (le sel et l'eau).

Nous ne pouvons effectuer de comparaison pour les cinq derniers produits (arômes, verre, métal, laine, carton) étant donné que nous avons ajouté ces produits à l'évaluation de la séquence d'apprentissage que nous avons développée mais qu'ils n'étaient pas présents au sein de notre QCM.

**Q4) Voici plusieurs molécules organiques. Identifie toutes les fonctions présentes dans ces molécules en entourant la fonction et en donnant son nom (avec tableau des fonctions)**



Pour répondre à cette question, les élèves avaient à leur disposition une copie du tableau des fonctions organiques vues en cours. Il s'agit donc simplement de pouvoir reconnaître les différentes fonctions grâce à un tableau d'identification mais sans devoir les apprendre par cœur préalablement. La très grande majorité des élèves réussit presque parfaitement cette question, les pourcentages de réponses correctes étant presque toujours compris entre 90 et 100%.

Nous voulions déterminer si certaines fonctions posent plus de difficultés que d'autres pour être reconnues. La figure 4.6 indique le pourcentage d'erreur pour chaque fonction. Nous avons encodé deux types d'erreurs :

- L'oubli d'une fonction : l'élève a oublié d'entourer une fonction et n'a donc donné aucune réponse la concernant
- L'identification erronée d'une fonction : l'élève a entouré une fonction mais n'a pas donné le nom correct

Nous constatons que les alcènes et les alcools sont fréquemment oubliés par les élèves (respectivement 18% et 11% d'oublis). Les taux d'oublis pour les autres fonctions sont négligeables

(maximum 3%). Les pourcentages d'identifications erronées sont tous inférieurs à 5%. Nous pouvons donc en conclure que les élèves savent tous utiliser correctement un tableau d'identification des différentes fonctions organiques.

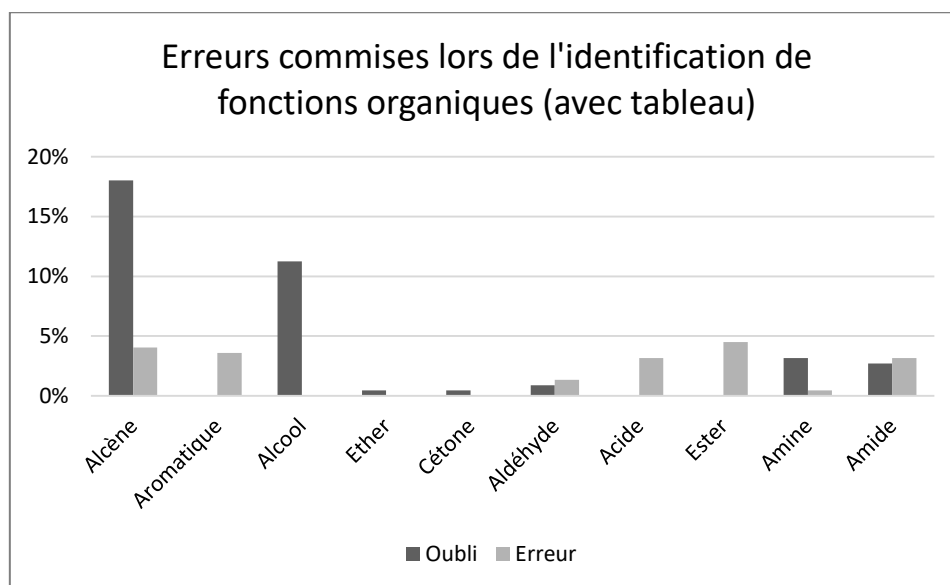
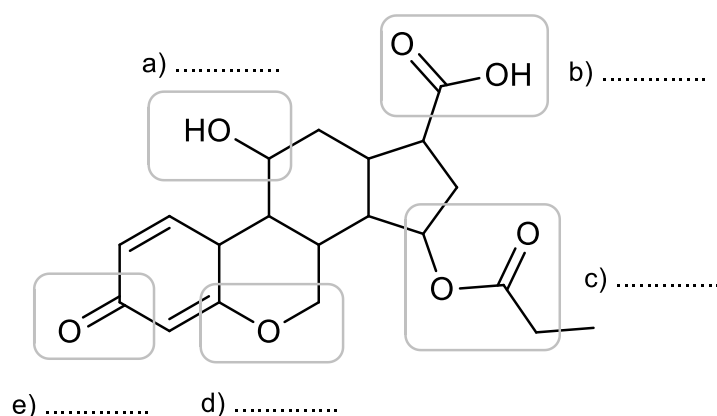


Figure 4.6 : Pourcentage d'élèves commettant un oubli ou une erreur lors de l'identification des différentes fonctions organiques sur les molécules proposées pour chacune des fonctions vues en cours

Cette question étant inédite lors de notre évaluation de la séquence d'apprentissage, il n'y a pas de comparaison possible avec des élèves y ayant répondu sans avoir suivi la séquence d'apprentissage.

**Q5) Voici une molécule organique. Identifie les différentes fonctions qui ont été entourées.**



À l'instar de la question précédente, nous demandons aux élèves d'identifier les différentes fonctions entourées sur cette molécule. La différence notable par rapport à la question précédente est que les élèves n'ont cette fois plus accès au tableau d'identification des fonctions. Ils n'ont cependant pas étudié par cœur ces fonctions et la réussite de cette question dépend donc uniquement de leur apprentissage au cours de la séquence d'apprentissage et lors du début de cette évaluation.

Nous constatons sur la figure 4.7 que plus de la moitié des élèves identifie correctement chacune des fonctions présentes, et ce malgré une absence totale d'étude « par cœur ». De plus, pas loin de 9 élèves

sur 10 savent identifier correctement la fonction alcool, ce qui représente un résultat impressionnant. Les autres fonctions présentes dans cet exercice sont choisies parmi les différentes fonctions oxygénées, fonctions qui, comme nous l'avons mis en évidence lors de la première partie de cette thèse, sont les plus fréquemment mélangées par les élèves. Entre 56 et 71% des élèves identifient correctement la cétone, l'acide carboxylique, l'ester et l'éther présents sur la molécule proposée.

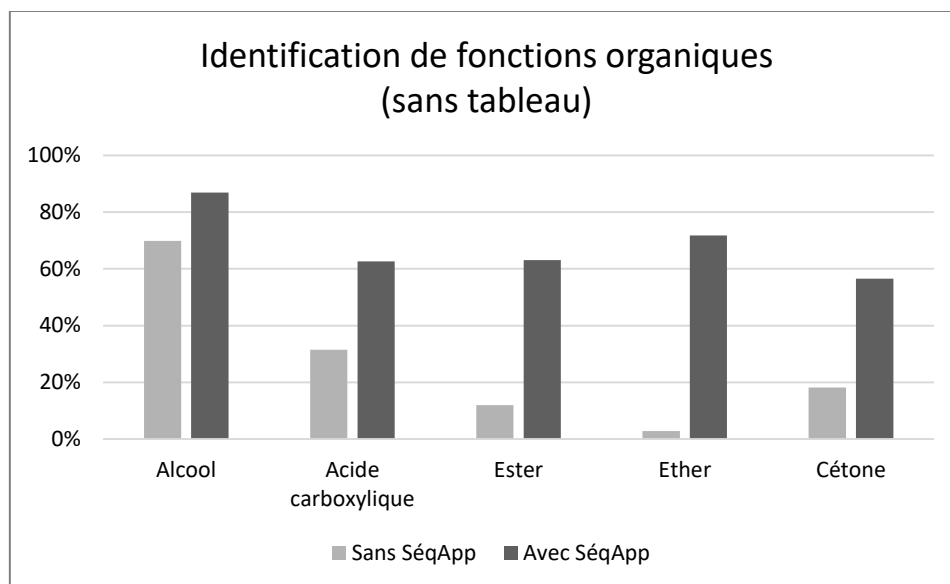
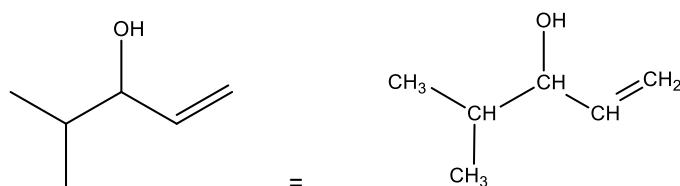


Figure 4.7 : Pourcentage d'élèves identifiant correctement chacune des fonctions entourées, n'ayant pas suivi la séquence d'apprentissage (clair) et ayant suivi la séquence d'apprentissage (foncé)

Nous constatons une augmentation générale du taux d'identification correcte pour chacune des fonctions présentes. Cette augmentation est la plus importante pour les fonctions ester et éther. Il est à noter que l'augmentation est biaisée par le fait que les éthers ne sont que rarement vus dans les écoles. Par contre, nous notons une nette amélioration dans l'identification de fonctions souvent confondues entre elles, à savoir les différentes fonctions contenant une double liaison C=O (ici l'acide carboxylique, l'ester et la cétone).

Il est intéressant de noter que la méthode d'apprentissage des différentes fonctions est différente pour les deux cohortes d'élèves représentés ici. Ceux n'ayant pas eu la séquence d'apprentissage ont eu l'occasion d'apprendre « par cœur » chacune des fonctions organiques vues précédemment au cours. Ils ont déjà eu des contrôles ou examens précédemment à notre QCM où cette compétence de reconnaissance des fonctions a été évaluée. Ils n'ont pas été prévenus du QCM et n'ont donc pas réétudié pour notre venue. En comparaison, les élèves ayant suivi la séquence d'apprentissage n'ont pas eu l'occasion d'apprendre « par cœur » les différentes fonctions, mais ils ont dû identifier par eux-mêmes, à l'aide d'un tableau de reconnaissance des fonctions, 24 fonctions organiques présentes dans de grandes molécules, pendant une dizaine de minutes, juste avant de répondre à cette question, pour laquelle ils n'avaient alors plus accès à leur tableau de fonctions. Il nous semblerait intéressant de reposer cette même question en fin d'année aux élèves ayant suivi la séquence d'apprentissage afin de prendre la mesure de leur apprentissage sur le long terme, et de pouvoir ainsi déterminer si cette méthode d'apprentissage semble plus efficace qu'un apprentissage de type « par cœur ».

**Q6) Les chimistes organiciens utilisent le plus souvent l'écriture topologique pour représenter les molécules organiques. Cette écriture ne représente pas les carbones ni les hydrogènes liés aux carbones, elle ne montre que les liaisons entre carbones, et les autres éléments. Sachant que :**



Complète le tableau suivant :

	Écriture topologique	Formule semi-développée
M1		
M2		
M3		
M4		

Nous avons choisi pour cette question de nous concentrer sur les écritures topologiques et semi-développées, en rappelant brièvement leur correspondance aux élèves, qui ont ensuite dû compléter le tableau avec les représentations manquantes.

La figure 4.8 présente le pourcentage de représentations correctes pour chacune des quatre molécules proposées, ainsi que la moyenne globale de réussite. Les molécules « M1 » et « M3 » sont des représentations sous forme semi-développée tandis que les molécules « M2 » et « M4 » correspondent à des écritures topologiques. Nous constatons qu'il n'y a pas de sens préféré pour effectuer ces exercices de représentation, les résultats n'étant pas significativement meilleurs pour les molécules M1/M3 ou M2/M4. Nous constatons également qu'il n'y a pas de différence significative entre les molécules sans oxygène (M1/M2) et les molécules oxygénées (M3/M4), ce qui indique que

la présence d'un oxygène ne perturbe pas les élèves. De manière générale, nous constatons que les élèves sont en moyenne 80% à donner une réponse correcte.

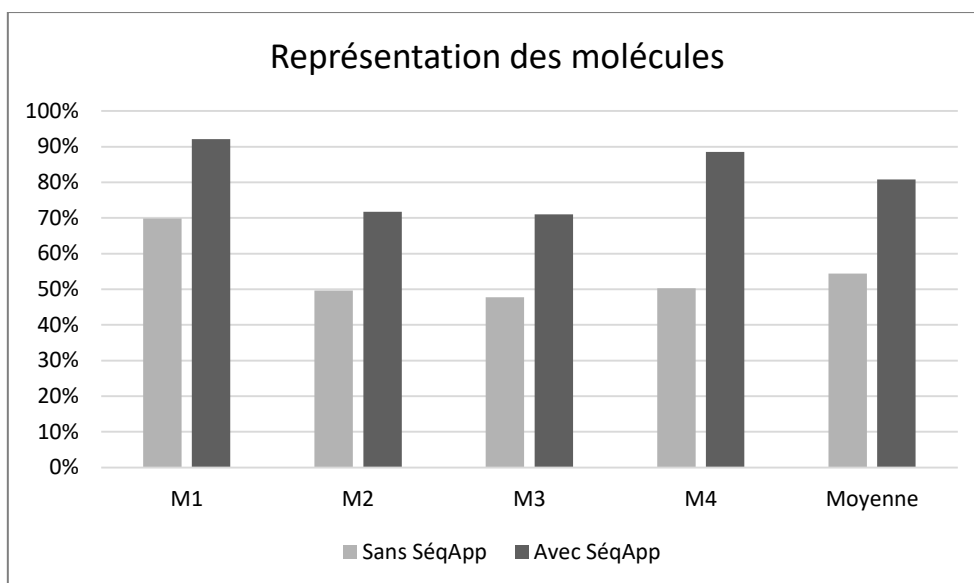


Figure 4.8 : Pourcentage d'élèves ayant effectué correctement la transformation d'une représentation à l'autre, pour les quatre molécules proposées, n'ayant pas suivi la séquence d'apprentissage (clair) et ayant suivi la séquence d'apprentissage (foncé)

Une fois de plus, nous constatons une élévation globale du taux de réponses correctes pour les élèves ayant suivi la séquence d'apprentissage développée plus haut. Cette augmentation est très semblable pour les trois premières molécules, avec une élévation d'environ 22% de réponses correctes. L'élévation la plus spectaculaire concerne la dernière molécule avec une augmentation de bonnes réponses de 38%.

**Q7) Un polymère est :**

- a) Une très longue molécule
- b) Un produit composé de beaucoup de molécules
- c) Une molécule constituée d'une unité de base qui se répète un grand nombre de fois (\*)
- d) Une molécule fabriquée par l'homme

La dernière question de cette évaluation porte sur la définition d'un polymère. Nous constatons sur la figure 4.9 que près de 95% des élèves répondent correctement. La notion de polymère semble donc bien assimilée par les élèves.

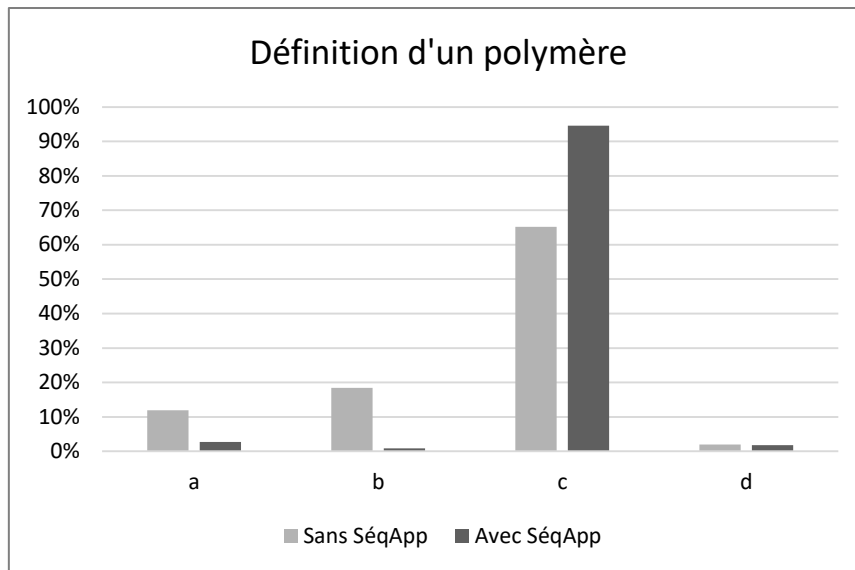


Figure 4.9 : Répartition des réponses des élèves n'ayant pas suivi la séquence d'apprentissage (clair) et ayant suivi la séquence d'apprentissage (foncé)

Nous constatons que le pourcentage de réponses correctes a bien augmenté suite à la séquence d'apprentissage (passage de 65% à 95%) tandis que les conceptions alternatives sont presque réduites à néant. En effet, il n'y a plus que 3% des élèves qui pensent qu'un polymère est une très longue molécule, alors que 12% des élèves présentent cette conception alternative sans avoir suivi la séquence d'apprentissage. De même, moins de 1% des élèves associent les polymères avec un produit composé de beaucoup de molécules contre 18% des élèves n'ayant pas suivi la séquence d'apprentissage.

### Séquence donnée par l'enseignant habituel des élèves

Certains enseignants ont testé eux-mêmes la séquence auprès de leurs élèves. Nous avons ainsi pu tester si la séquence rédigée telle quelle est compréhensible par les enseignants et si la séquence se déroule de manière similaire lorsque l'enseignant habituel des élèves la leur présente.

De manière globale, nous constatons que les enseignants se sont parfaitement débrouillés pour dispenser la séquence d'apprentissage au départ des documents que nous leur avons fournis. Bien entendu, chaque enseignant a légèrement modifié la séquence en s'adaptant au retour de leurs élèves et aux points qui leur semblent plus ou moins importants, la séquence a donc été donnée de manière moins homogène que dans les autres classes. C'est pour cette raison que les résultats des élèves à qui nous avons personnellement présenté la séquence d'apprentissage n'ont pas été présentés en même temps que ceux des élèves à qui la séquence a été présentée par leur propre professeur.

Nous avons constaté que les résultats peuvent varier fortement d'une classe à l'autre (d'un enseignant à l'autre). Voici quelques exemples chiffrés de différences observées par rapport aux résultats présentés au début de ce chapitre avec deux « types » de classes :

Classe A :

- Tous les élèves donnent la définition correcte de la chimie organique.
- 20% des élèves se trompent lorsqu'il faut transformer une écriture topologique en formule semi-développée, tandis qu'ils sont presque tous capables de faire la transformation inverse.
- Seulement 20% des élèves identifient l'ADN et le  $\text{CCl}_4$  comme étant une molécule organique, et 15% des élèves identifient l'eau et le  $\text{NaCl}$  comme étant organiques.
- Très peu de produits quotidiens sont considérés comme étant organiques par les élèves. En moyenne, seulement 5 produits organiques sont indiqués par les élèves sur les 14 produits organiques proposés.

Classe B :

- 80% des élèves identifient correctement, sans tableau d'identification, la fonction ester, qui est identifiée par plus d'élèves que la fonction alcool (68%).
- Contrairement aux élèves de la classe A, ceux-ci ont tendance à considérer trop de produits quotidiens comme étant organiques. Ainsi, 56% des élèves pensent que le sel est organique et 72% pensent que l'eau est organique. Ils ne sont par contre que 36% et 44% à identifier l'ADN et le  $\text{CCl}_4$  comme étant organiques.
- En moyenne, 66% des élèves réussissent les exercices de passage d'une représentation à l'autre, sans préférence de sens.

Nous constatons que la « Classe A » a bien intégré la définition théorique de la chimie organique et maîtrise plutôt bien les exercices de représentations des molécules. Cependant, elle n'a pas compris comment déterminer si une molécule ou un produit fait partie de la chimie organique. Les élèves de la « Classe B » présentent d'autres difficultés : ils réussissent moins bien les exercices de représentation des molécules et ont tendance à assimiler certains produits inorganiques à la chimie organique. De plus, ces élèves sont les seuls à mieux reconnaître l'ester que l'alcool, fonction la plus reconnue parmi toutes les autres classes. Nous observons ici quelques-uns des effets de l'enseignement direct du



professeur. Par exemple, l'enseignant de la « Classe A » a passé moins de temps sur la fin de la séquence d'apprentissage, moment où l'on fait comprendre aux élèves comment déterminer si un produit quotidien est organique. Ceci explique donc les moins bons résultats des élèves à cette question. Le professeur de la « Classe B » a quant à lui passé moins de temps sur les exercices de représentation des molécules, et les résultats des élèves à cette question en ont été diminués.

Ces quelques résultats préliminaires nous confortent dans le choix d'avoir testé la séquence d'apprentissage nous-mêmes, dans un premier temps, afin de pouvoir comparer les résultats des élèves en éliminant le biais de l'enseignant. D'autre part, ces premiers tests nous rassurent quant à l'appropriation de la séquence par les enseignants. En effet, ce travail a aussi pour but d'être utilisé directement par les enseignants, il est donc indispensable que ceux-ci soient capables de s'approprier la séquence d'apprentissage pour la proposer à leur tour à leurs élèves.

### **Conclusions sur l'efficacité de la séquence d'apprentissage**

Revenons maintenant aux objectifs de la séquence d'apprentissage afin de vérifier si ceux-ci ont bien été atteints, en examinant les réponses des élèves aux questions correspondant à chacun de ces objectifs.

#### ***Objectif 1 : Appréhender la chimie organique en partant de ce qui nous entoure dans la vie quotidienne et reconnaître la place de la chimie organique autour de nous***

Cet objectif est vérifié par les questions Q2 et Q3 qui interrogent les élèves sur leur capacité à reconnaître les produits organiques parmi une liste de molécules (Q2) ou de produits quotidiens (Q3). Nous avons également pu tester de manière plus qualitative le ressenti des élèves quant à la place et l'importance de la chimie organique lors de la séquence d'apprentissage en discutant oralement avec le groupe classe. À la fin de la séquence d'apprentissage, nous demandions aux élèves si le monde qui nous entoure est globalement composé par la chimie minérale ou par la chimie organique. De manière globale, au moins la moitié des élèves pense que la chimie organique est plus présente autour de nous que la chimie minérale. Bien que nous n'attendions pas de réponse chiffrée, nous sommes très satisfaits de constater que la plupart des élèves semblent avoir intégré que la chimie organique a une place prépondérante dans notre quotidien.

De manière plus quantitative, nous pouvons observer que la grande majorité des élèves identifie correctement les molécules et produits organiques qui leur sont proposés. Identifier correctement ce qui est organique permet ensuite aux élèves de constater que la majorité des produits qu'ils utilisent quotidiennement n'existeraient pas sans chimie organique.

Ces différents résultats permettent ainsi d'affirmer que la séquence d'apprentissage a correctement rempli ce premier objectif.

#### ***Objectif 2 : Donner une définition claire de ce qu'est la chimie organique et éviter l'amalgame « chimie organique = chimie du vivant »***

Cet objectif se vérifie directement grâce à la première question (Q1) qui demande aux élèves de donner la définition de la chimie organique. Nous constatons que plus de 80% des élèves donnent la définition correcte de la chimie organique, alors qu'ils ne sont que 37% à la donner lorsque les élèves n'ont pas suivi la séquence d'apprentissage proposée.

De plus, la conception alternative majoritairement observée chez les élèves n'ayant pas suivi la séquence d'apprentissage, à savoir que la chimie organique est la chimie du vivant, n'est présente que chez 3% des élèves. Nous pouvons ainsi conclure que cette séquence d'apprentissage permet d'éviter de manière efficace la formation de cette association erronée dans l'esprit des élèves.

#### ***Objectif 3 : Découvrir la représentation des molécules organiques (développée, semi-développée, topologique) et être capable de passer d'une représentation à l'autre***

Cet objectif se vérifie grâce à la Q6 demandant aux élèves de passer d'une représentation topologique à une représentation semi-développée, et inversement. Nous n'avons pas d'évaluation quantitative

quant à la maîtrise de la représentation développée mais, ayant constaté lors des exercices effectués durant la séquence d'apprentissage que cette représentation est la mieux maîtrisée par les élèves, nous avons choisi de ne pas faire d'évaluation la concernant. En effet, elle prend énormément de temps et de place à écrire. De plus, nous avons constaté que les résultats des élèves sont similaires pour les représentations développée et semi-développée lors de notre tout premier questionnaire à réponses ouvertes.

En moyenne, nous constatons que plus de 80% des élèves répondent correctement à l'exercice concernant les représentations des molécules, tandis que seulement 54% des élèves réussissent cet exercice sans avoir suivi notre séquence d'apprentissage. Ainsi, nous pouvons considérer que cette séquence d'apprentissage semble efficace d'un point de vue de l'apprentissage des différentes représentations des molécules organiques.

***Objectif 4 : Découvrir toutes les fonctions organiques nécessaires à l'enseignement de la chimie organique en secondaire et être capable de les reconnaître***

Cet objectif se vérifie grâce aux deux questions de reconnaissance des fonctions organiques, avec (Q4) et sans (Q5) tableau. Nous ajoutons également la question concernant la définition d'un polymère (Q7) : bien que n'étant pas à proprement parler une fonction organique, nous abordons la notion de polymère en même temps que les différentes fonctions organiques au sein de la séquence d'apprentissage.

La question Q4 montre que les élèves sont tous capables de reconnaître les 12 fonctions organiques découvertes durant la séquence d'apprentissage, lorsqu'ils ont un tableau d'identification. Les erreurs sont négligeables (moins de 5% des élèves) et les oublis relativement rares (18% pour les alcènes, 11% pour les alcools et moins de 5% pour toutes les autres fonctions).

Les résultats sont un peu moins bons lorsque les élèves doivent identifier les différentes fonctions organiques lorsqu'ils n'ont pas le tableau d'identification. Ils ne sont alors plus que 56% à 87% à identifier correctement les fonctions présentées. Gardons cependant à l'esprit que ces résultats sont largement supérieurs à ceux des élèves n'ayant pas suivi cette séquence d'apprentissage. De plus, les élèves n'ont découvert ces fonctions que durant la période de cours précédent l'évaluation, ils n'ont donc pas encore passé plusieurs semaines à étudier spécifiquement chacune d'entre elles, ce qui, nous l'espérons, devrait améliorer leur identification par après.

En ce qui concerne la définition d'un polymère, plus de 95% des élèves choisissent la réponse correcte. Nous pouvons ainsi affirmer que la séquence d'apprentissage permet aux élèves d'assimiler correctement ce qu'est un polymère ainsi que de reconnaître correctement 12 fonctions organiques en présence d'un tableau d'identification. Il reste cependant une grande marge d'amélioration quant à l'identification des fonctions lorsque l'élève n'a pas de tableau d'identification pour l'aider. Nous notons également que certaines fonctions sont mieux reconnues que d'autres. Dès lors, il serait intéressant de concentrer nos efforts sur les fonctions les plus problématiques.

## Analyse des retours des élèves et des professeurs

Un point qui nous semble également important à évaluer est la façon dont la séquence d'apprentissage a été reçue par les élèves et les enseignants y ayant assisté ou, pour certains d'entre eux, ayant déjà eu l'occasion de donner eux-mêmes la séquence. Ainsi, nous avons demandé directement l'avis des élèves lors de l'évaluation de fin de séquence d'apprentissage. Nous avons ensuite récolté les avis des enseignants grâce à des discussions pendant et après avoir donné la séquence d'apprentissage, ainsi que par le biais d'un sondage envoyé aux enseignants par après.

### L'avis des élèves

À la fin de l'évaluation proposée aux élèves, nous leur laissons carte blanche pour nous donner leur avis sur la séquence qu'ils venaient de suivre. La consigne qui leur était donnée était de nous dire s'ils avaient trouvé la séquence intéressante, si elle était facile ou plutôt difficile, ce qu'ils avaient aimé ou pas et d'essayer de nous donner des points positifs et des points négatifs. Nous avons donc suivi ces grandes lignes pour analyser leurs réponses.

Pour commencer, voici un aperçu quantitatif sur le pourcentage d'élèves ayant noté que la séquence était intéressante, si elle était facile à comprendre ou s'ils avaient eu des difficultés pour tout ou pour des parties de la séquence, s'ils ont aimé la séquence ou noté des points positifs et s'ils ont indiqué des points négatifs. Notons qu'un échantillon total de 133 élèves a donné un avis.

	Nombre d'élèves	Pourcentage
<b>Séquence intéressante</b>	88	66%
<b>Séquence facile, simple</b>	109	82%
<b>Points difficiles à comprendre</b>	25	18%
<b>Séquence appréciée</b>	103	77%
<b>Points négatifs</b>	26	20%

Tableau 4.8 : Avis des élèves à propos de la séquence d'apprentissage

Nous remarquons que la majorité des élèves (66%) a indiqué que la séquence leur semble **intéressante**. Notons que deux élèves ont indiqué que le contenu de la séquence n'était pas intéressant et même plutôt ennuyant. Voici quelques extraits représentatifs des commentaires des élèves sur l'intérêt de la séquence d'apprentissage :

*« Le cours était intéressant. J'ai aimé la matière. »*

*« J'ai trouvé très intéressant le fait qu'énormément de choses appartenait à la chimie organique. »*

*« Je trouve la chimie organique plus intéressante que la minérale. »*

*« C'était intéressant et je trouve ça bien d'un peu savoir de quoi est fait tout ce qui nous entoure. »*

*« Le cours était intéressant, je ne me rendais pas compte que la chimie organique était aussi présente. »*

*« Le cours était intéressant, plus simple que ce que je pensais de la chimie organique. »*

*« J'ai trouvé le cours intéressant car on utilisait des cas de la vie quotidienne pour comprendre la théorie du cours, cela le rendait assez attractif. »*

*« J'ai trouvé le cours intéressant car il faisait des parallèles avec des choses de la vie quotidienne. »*

Globalement, nous pouvons affirmer que les élèves ont trouvé cette séquence d'apprentissage intéressante, ce qui est encourageant pour la suite du chapitre de chimie organique.

Nous sommes ravis de voir que la grande majorité des élèves (82%) indique que le contenu de la séquence n'est **pas compliqué**. Il est important de comprendre que les 18% d'élèves ayant indiqué qu'il y a des points difficiles à comprendre dans la séquence ne sont pas les élèves qui n'ont pas indiqué que la séquence est facile. Il y a au contraire toute une série d'élèves qui disent avoir trouvé la séquence globalement simple, mais que certains points sont compliqués. Il y a donc des élèves qui n'ont rien indiqué quant au niveau de difficulté de la séquence. Les points « difficiles » relevés par les élèves sont principalement l'écriture topologique ainsi que le nom de toutes les fonctions organiques. Plusieurs élèves ont également indiqué que la séquence semble compliquée au premier abord, mais qu'au final, elle est assez simple à comprendre une fois toutes les explications données. Voici quelques extraits de commentaires des élèves concernant le niveau de difficulté de la séquence :

*« Le cours était simple et facile à comprendre. »*

*« Oui, ça paraît compliqué au début mais une fois que tu comprends ça devient amusant. Ça nous apprend des choses sur ce qu'on utilise dans la vie de tous les jours. »*

*« Il y a certains points où j'ai encore des difficultés mais la plupart des choses sont assez simples à comprendre une fois que l'on s'entraîne. »*

*« J'ai eu quelques difficultés avec les écritures, surtout les écritures topologiques. À part ça j'ai tout compris ! »*

*« Grâce à votre cours, j'ai surtout compris que la chimie organique n'était pas compliquée du tout »*

*« Je trouve que les différentes notions sont faciles à intégrer. La seule difficulté, pour moi, c'est juste de retenir les différents types de molécules. Sinon, le cours était facile à comprendre. »*

*« Le contenu était facile à comprendre et le cours était bien donné et organisé (explications -> exercices). »*

*« Je pense que ce qui m'a bien aidé à comprendre c'est le fait d'avoir fait beaucoup d'exercices et de différentes sortes. »*

*« Les années avant pour moi la chimie était une matière incompréhensible. Et là j'ai tout compris, c'était clair et plus ou moins à notre rythme. »*

*« J'ai facilement compris et apprécié la chimie organique. »*

*« Le cours était très intéressant et gentiment amené, c'était très calmement amorcé pour tout ce qui était compliqué. »*

Notons qu'aucun élève n'a trouvé l'entièreté du cours compliquée. Certains points sont difficiles, mais globalement les élèves n'ont pas éprouvé de grosses difficultés à comprendre la matière. Leurs dires sont confirmés par les résultats de l'évaluation.

La majorité des élèves (77%) a également **apprécié** la séquence et a pointé des choses positives la concernant. En voici quelques-unes :

*« J'ai bien aimé ce cours. [...] J'ai également bien aimé l'idée de partir de produits de tous les jours et de découvrir leur composition. »*

*« Le cours était facile à comprendre et j'ai vraiment aimé y participer. »*

*« J'ai aimé l'idée de savoir distinguer les produits organiques des autres produits autour de moi. »*

*« J'ai bien aimé écrire les molécules en topologique. »*

*« J'ai bien aimé le cours, j'ai trouvé l'approche très intéressante, car comme c'était la première fois que je faisais de la chimie organique, c'était bien de nous faire participer et réfléchir. »*

*« J'ai bien aimé qu'il y ait beaucoup d'exercices à faire, ça nous a permis de comprendre rapidement la matière. »*

*« J'ai trouvé cette approche très pédagogique et très bien amenée. »*

*« Ce qui m'a donné envie d'apprendre, c'est qu'on soit partis de choses qu'on connaît, de la vie de tous les jours. »*

*« J'ai bien aimé les interactions, le fait de rien connaître au départ et de mieux comprendre petit à petit et d'y voir de plus en plus clair. »*

*« Oui, j'ai vraiment bien aimé le cours. Ça m'intéresse, j'aimerais en faire plus. »*

*« J'ai bien aimé. Je ne sais pas comment est donné ce genre de cours habituellement mais en tout cas avec cette manière j'ai facilement compris et apprécié la chimie organique. »*

*« C'était sympa d'apprendre la chimie organique 😊 »*

*« Ce cours était enrichissant car nous avons appris une « nouvelle science ». Ça changeait un peu de l'ordinaire car c'était un cours pratique avec peu voire pas de définitions. »*

Nous pouvons ainsi constater l'enthousiasme des élèves envers cette séquence d'apprentissage qui a permis de leur donner une première image de la chimie organique positive, ce qui, nous l'espérons, aura un impact positif sur la suite de leur apprentissage au sein de ce chapitre.

Les **points négatifs** que nous avons relevés sont ceux concernant la séquence d'apprentissage et non l'enseignant. En effet, certains élèves ont indiqué que l'enseignant parlait trop bas. Nous n'avons pas encodé ce genre de remarque comme étant quelque chose de négatif par rapport à la séquence

d'apprentissage. Ainsi, nous notons que 20% des élèves ont une remarque négative à faire au sujet de la séquence. Parmi les 26 élèves ayant fait une remarque, 6 d'entre elles portent uniquement sur l'évaluation (les élèves ne sont pas contents de ne pas avoir pu étudier avant l'évaluation). Les remarques portant directement sur la séquence d'apprentissage sont les suivantes :

- Séquence avançant trop lentement

*« Je trouve que ça aurait pu aller plus vite »*

*« Peut-être un petit peu trop lent. Certains points ont été fort vus, pendant longtemps et ce n'était pas vraiment nécessaire mais d'autres éléments furent complètement survolés. »*

*« Le cours était très progressif, peut-être un peu trop à mon goût. »*

- Séquence avançant trop rapidement

*« J'aurais aimé avec plus de temps sur l'identification des fonctions et pouvoir un peu plus étudier. »*

*« On a juste été un peu trop vite lorsqu'il fallait faire l'écriture topologique. »*

- Exercices trop répétitifs, trop de temps passé sur une même matière

*« Ça devient par moment un peu trop répétitif et lassant. »*

*« C'est très ludique comme cours mais c'est souvent la même chose. »*

*« On passe trop de temps sur une seule petite partie (la recherche des fonctions après les avoir apprises). »*

*« C'était un peu répétitif au niveau des différentes écritures d'une molécule. »*

- Matière pas intéressante, séquence ennuyante

*« J'ai trouvé le cours intéressant malgré le fait que je m'ennuyais quelquefois. »*

*« J'ai tout compris mais je ne trouvais pas cela très intéressant. »*

De manière générale, certains élèves auraient voulu passer plus de temps sur une partie de la séquence tandis que d'autres élèves auraient voulu aller plus vite. Au vu du faible pourcentage de remarques de ce genre, nous en concluons que nous allons globalement à une vitesse correcte pour l'ensemble de la classe.

Les retours des élèves sont majoritairement positifs, ils ont apprécié la séquence d'apprentissage, que ce soit son contenu ou la manière d'aborder ce contenu. Certains élèves ont indiqué qu'ils aimeraient aller plus en profondeur dans la matière ou ajouter une expérience si possible. Ainsi, nous ne pouvons qu'encourager les enseignants qui voudraient reproduire cette séquence d'apprentissage à l'avenir et qui en ont la possibilité d'intégrer l'une ou l'autre expérience à la séquence.

### L'avis des enseignants

Les enseignants nous ont fait part de leurs retours sur la séquence d'apprentissage directement après chaque séquence, de manière informelle et spontanée. Par la suite, nous avons demandé aux enseignants de remplir un sondage afin d'avoir un avis plus rigoureux sur la question.

Le **retour direct** des enseignants nous a beaucoup aidés pour adapter la séquence d'apprentissage au fur et à mesure des tests que nous avons effectués dans les écoles. De manière générale, les retours sont positifs et encourageants. Nous avons observé deux points d'intérêt particulier dans le discours des enseignants, que nous exposons ci-dessous.

Tout d'abord, la grande majorité des enseignants ayant participé à cette phase de notre travail ont été agréablement surpris de voir que cette séquence d'apprentissage fonctionne bien auprès de leurs élèves, et qu'ils sont attentifs et motivés par la matière que nous leur proposons. Au premier abord, certains enseignants étaient très dubitatifs quant à l'utilisation de beaucoup de grandes molécules, d'autant plus si elles sont présentées sous forme topologique. En effet, leur cours habituel de chimie organique se déroule généralement en démarrant de petites molécules et de représentations plus simples, telles que les représentations développée et semi-développée. Certains enseignants abordent l'écriture topologique par la suite, mais c'est loin d'être le cas de tous. Cependant, à la suite de la séquence d'apprentissage, les enseignants ont constaté que leurs élèves étaient effectivement capables d'appréhender de relativement grandes molécules représentées directement sous forme topologique.

L'autre particularité de la séquence d'apprentissage est de présenter directement toutes les fonctions organiques aux élèves. Le cours habituel de chimie organique aborde les fonctions l'une après l'autre, en approfondissant les propriétés, la nomenclature ou encore la réactivité de chaque fonction, avant de passer à la fonction suivante. De plus, les différentes fonctions sont en général réparties sur des années différentes. Cette nouvelle approche semblait donc audacieuse pour la majorité des enseignants. À l'issue de la séquence, l'avis des enseignants était très majoritairement positif quant au fait de présenter autant de fonctions aux élèves et quant à l'avantage que cela peut leur procurer pour la suite du cours.

Enfin, voici quelques retours écrits de certains enseignants, repris tels quels, afin d'illustrer notre propos :

*« J'ai beaucoup apprécié cette approche d'apprentissage et mes élèves ont accroché à la matière. »*

*« Merci pour ces séquences qui comme en témoignent les résultats furent très profitables aux élèves et instructives pour nous en termes de pédagogie ! »*

*« Je pense que ton intervention a permis très vite d'être dans le sujet et de relativiser la difficulté d'une nouvelle chimie... Je changerai certainement mon approche une autre année. »*

*« Ils ont bien aimé la manière dont tu as abordé la chimie organique. Ils étaient beaucoup plus attentifs pour la suite. »*



Le **sondage** proposé aux enseignants quelques mois après avoir présenté la séquence d'apprentissage à leur classe nous a permis de mettre en avant que :

- Tous les enseignants sont d'accord de dire que la séquence d'apprentissage est applicable auprès de leurs élèves.
- Un seul enseignant pense que la séquence d'apprentissage prend trop de temps par rapport au contenu qu'elle délivre aux élèves.
- Tous les enseignants pensent que leurs élèves ont été intéressés par le contenu de la séquence d'apprentissage et qu'elle ne les a pas perturbés par rapport à leur cours habituel.
- À l'exception d'un enseignant, tous pensent que la séquence d'apprentissage est utilisable aussi bien en option Sciences Générales que pour des élèves de Sciences de Base.
- Un enseignant pense qu'il y a trop de fonctions différentes présentes dans la séquence d'apprentissage.
- Un enseignant pense que la séquence d'apprentissage n'est pas très différente de son cours de chimie organique habituel, mais tous les autres la trouvent fort différente. Ils pensent tous qu'elle présente un intérêt supplémentaire à leur cours de chimie organique habituel.
- Tous les enseignants ont trouvé la séquence d'apprentissage intéressante.
- Un enseignant a trouvé la séquence d'apprentissage trop compliquée pour la donner lui-même à ses élèves dès l'année prochaine.
- Presque tous les enseignants pensent que la séquence d'apprentissage permet à leurs élèves de mieux comprendre ce qu'est la chimie organique.
- La séquence d'apprentissage correspond bien au programme de chimie organique pour tous les enseignants, sauf un.
- La séquence d'apprentissage présente un niveau de difficulté similaire à l'enseignement que proposent tous les enseignants, sauf un qui estime qu'elle a un niveau de difficulté inférieur à son cours habituel.
- Tous les enseignants pensent que leurs élèves ont apprécié la séquence d'apprentissage.
- Certains enseignants sont prêts à donner la séquence d'apprentissage à leurs élèves telle quelle, mais la moitié des enseignants préfère y apporter de légères modifications (en prenant d'autres exemples de molécules en fonction des intérêts du professeur, de ceux des élèves et des connaissances personnelles de l'enseignant). Un enseignant préfère ne pas utiliser la séquence d'apprentissage afin de respecter le programme.

En résumé, nous estimons que la grande majorité des enseignants ayant collaboré avec nous ont été ravis de la séquence proposée à leurs élèves. Ils comptent l'utiliser pour modifier légèrement ou complètement leur cours d'introduction à la chimie organique à l'avenir.

## **Perspectives pour l'enseignement de la séquence**

Cette première séquence d'apprentissage semble être bien aboutie. Nous avons eu l'occasion de la tester auprès d'un large panel d'élèves et d'enseignants, qui l'ont accueillie de manière très positive. Les résultats de l'évaluation terminant la séquence indiquent que les savoirs enseignés aux élèves ont été correctement acquis. Les différents retours, que ce soit des élèves ou des enseignants, nous confirment dans l'idée que cette séquence permet aux élèves d'aborder le chapitre de chimie organique sur des bases solides, en ayant découvert l'intégralité des fonctions organiques qui seront nécessaires pour parcourir toute la chimie organique de secondaire.

Une notion que nous avons pour l'instant laissée de côté, mais qui pourrait être intégrée à notre séquence d'apprentissage, est le lien entre la structure d'une molécule et ses propriétés. De plus, certains élèves n'ont pas hésité à poser des questions à ce propos, ce qui confirme déjà la curiosité des élèves à ce sujet. Nous suggérons donc aux enseignants qui souhaitent utiliser cette séquence d'apprentissage d'intégrer une partie supplémentaire permettant aux élèves d'associer une propriété à une structure particulière. La notion de « propriété » doit ici être considérée au sens large. Voici par exemple une liste d'association structure/propriété envisageable :

<b>Structure</b>	<b>Propriété</b>
Ester	Sentir bon (parfum)
Amine	Sentir mauvais
Alcane	Utilisé comme combustible

Bien sûr, la présence de plusieurs fonctions différentes au sein d'une même molécule complique les choses. Nous pensons néanmoins que cette première association entre la structure d'une molécule et ses propriétés peut être introduite lors de cette séquence d'apprentissage aux élèves.

# Séquence II : Clôturer l'enseignement de la chimie organique par la synthèse des médicaments

## Élaboration de la séquence d'apprentissage

Après analyse des différents questionnaires proposés précédemment aux élèves et des interviews menées avec les élèves et les enseignants, nous avons constaté qu'un des points les plus compliqués à comprendre pour les élèves concerne la réactivité des composés organiques. À l'école secondaire, les quelques réactions abordées sont la plupart du temps apprises par cœur par les élèves, et bien vite oubliées après l'interrogation ou l'examen. Ils n'abordent pas réellement la chimie organique telle que les chimistes organiciens peuvent la concevoir, c'est-à-dire comme un moyen de synthèse, de transformation d'une fonction organique en une autre afin de fabriquer de nouvelles molécules. Cette séquence a donc été conçue dans le but de présenter aux élèves une version simplifiée de ce que peuvent faire les chimistes organiciens : imaginer un moyen de synthétiser une molécule au départ d'une autre. Les réactions vues lors de cette séquence seront volontairement simplifiées, le but n'étant pas ici d'apprendre aux élèves une grande variété de réactions organiques mais plutôt de leur donner le goût de la synthèse organique.

Cette deuxième séquence d'apprentissage a été imaginée pour clôturer le chapitre consacré à la chimie organique en secondaire. Elle est à travailler avec les élèves après avoir abordé toutes les fonctions organiques ainsi que les réactions entre elles. Les différents enseignants n'ayant pas enseigné exactement la même matière dans toutes les écoles, cette séquence a été fortement adaptée en fonction du savoir enseigné préalablement aux élèves.

Nous avons été tester cette séquence auprès de plusieurs classes, dans différentes écoles, avec une liberté totale laissée par les enseignants qui ont collaboré avec nous, ce qui nous a permis de proposer exactement la séquence imaginée. Au fur et à mesure des essais, nous avons ajusté la séquence en fonction des retours des élèves et des enseignants, pour finalement aboutir à la séquence d'apprentissage détaillée dans la partie « Déroulement de la séquence », ci-après.

## Objectifs de la séquence d'apprentissage

- Être capable d'identifier les différentes fonctions organiques présentes dans une molécule
- Construire et utiliser un tableau de réactivité reliant les différentes fonctions organiques
- Utiliser différentes réactions organiques afin d'imaginer une synthèse simplifiée de diverses molécules
- Comprendre que les réactions en chimie organique sont, pour la plupart, réversibles

## Bref aperçu de la séquence d'apprentissage

La séquence d'apprentissage complète et finale est présentée plus loin au cours de ce chapitre. Nous allons tout d'abord présenter un résumé succinct de cette séquence d'apprentissage afin d'obtenir un aperçu général de son déroulement, ainsi que pour aborder les différentes évolutions de la séquence.

La séquence démarre par une discussion entre l'enseignant et les élèves afin de déterminer le niveau de connaissance de la classe. Le but de cette discussion est de rappeler aux élèves ce qu'est la chimie organique et sa place dans la vie quotidienne. Nous demandons ensuite aux élèves des exemples de produits quotidiens qui contiennent des molécules organiques, dans le but d'arriver aux médicaments. Nous voyons ensuite brièvement comment les médicaments sont fabriqués.

Nous distribuons aux élèves deux documents complémentaires, reprenant des structures de molécules organiques représentées sous forme topologique. Un document contient des structures de médicaments et de vitamines, tandis que l'autre document présente des structures de molécules « précurseurs ». Chaque précurseur correspond à un médicament ou une vitamine. Nous demandons aux élèves de déterminer quel précurseur correspond à chaque médicament/vitamine, et quelles différences existent entre chaque paire de molécules. Ceci permet de réviser les différentes fonctions organiques.

Nous construisons ensuite ensemble un tableau de réactivité reprenant les différentes fonctions organiques, ainsi que les réactions transformant une fonction en une autre. Nous utilisons les réactions déjà travaillées en classe et complétons le tableau avec quelques nouvelles réactions si nécessaire. Nous demandons ensuite aux élèves d'établir la liste des réactions nécessaires pour transformer chaque précurseur en sa molécule cible.

À la suite de la séquence, une évaluation est proposée directement aux élèves, sans nécessiter d'étudier par cœur ce qui vient d'être travaillé. Les exercices, effectués à l'aide du tableau de réactivité construit ensemble, sont les suivants :

- Identifier les fonctions organiques à modifier dans le précurseur et à synthétiser dans la molécule cible
- Expliquer les différentes réactions nécessaires à la transformation d'un précurseur en une molécule cible (pour une molécule cible déjà vue et pour une nouvelle molécule cible)
- Imaginer un précurseur possible pour une molécule cible donnée
- Imaginer deux voies de synthèses différentes pour une même molécule cible
- Déduire, par comparaison avec des fonctions étudiées en classe, les réactions nécessaires pour obtenir une fonction non vue en classe

### **Évolutions de la séquence d'apprentissage**

Au cours des différents tests, nous avons fait évoluer la séquence d'apprentissage en fonction des retours des élèves et des enseignants présents. Les modifications les plus importantes que nous avons effectuées sont reprises ci-dessous.

#### ***Première version : le jeu de cartes***

La première version de la séquence d'apprentissage était très différente de celle présentée dans cette thèse. Nous avons imaginé un jeu de cartes à plusieurs niveaux, chaque carte reprenant la synthèse d'une molécule (médicament ou vitamine) au départ d'un précurseur. Nous demandions aux élèves de repérer les différentes fonctions organiques présentes dans la molécule initiale et dans la molécule cible, puis de déterminer les réactions nécessaires pour transformer chacune des fonctions. Nous

voulions faire travailler les élèves de manière assez autonome en leur faisant chercher dans leur cours les différentes fonctions et réactions organiques nécessaires. Une fois que les élèves ont réussi la synthèse de plusieurs cartes de difficulté croissante, ils ont retrouvé les différentes réactions abordées dans leur cours. Nous aurions ensuite construit le tableau de réactivité à partir des réactions retrouvées.

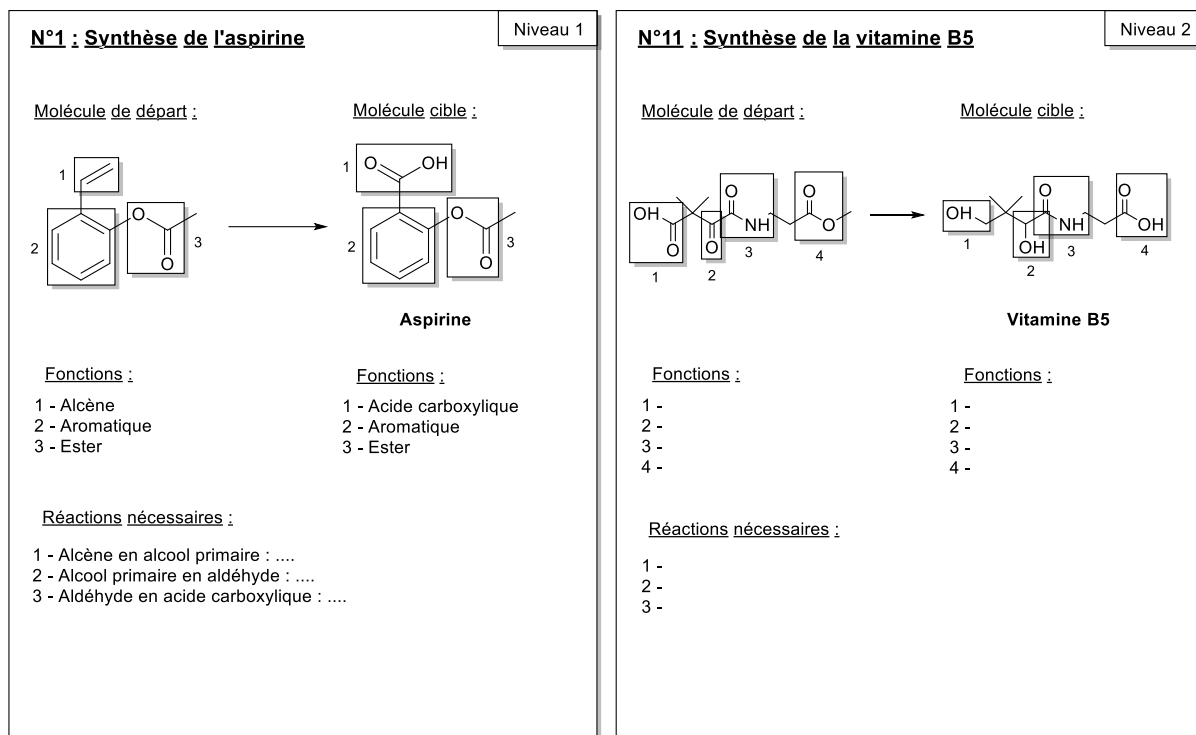


Figure 4.10 : Exemples de cartes imaginées pour la première version de la séquence d'apprentissage

Ce déroulement de la séquence d'apprentissage fut impossible à mettre en place dans la première classe où nous nous sommes rendus pour tester la séquence étant donné le nombre très limité de réactions de synthèse vues par les élèves. Nous avons donc décidé d'inverser la séquence d'apprentissage afin de pouvoir introduire quelques réactions supplémentaires lors de la construction du tableau de réactivité. Cette façon de faire nous ayant semblé beaucoup plus facilement adaptable au niveau de chaque classe que notre première idée, nous l'avons conservée par la suite.

### ***Expliquer les grands types de réactions organiques***

Lors des premiers tests, nous nous basions sur les souvenirs des élèves quant aux réactions organiques pour construire le tableau de réactivité. Ainsi, lorsqu'une réaction n'avait pas été vue par les élèves, ou lorsqu'ils ne s'en souvenaient pas, nous l'introduisons directement nous-mêmes, en donnant les fonctions impliquées.

Par la suite, nous avons décidé de laisser les élèves imaginer eux-mêmes certaines réactions. Par exemple, les réactions d'addition de petites molécules ( $H_2$  ou  $H_2O$ ) sont facilement imaginables par les élèves. En effet, il suffit de regarder les formules moléculaires des réactifs et des produits de ces réactions pour constater que l'on ajoute deux hydrogènes (dans le cas de l'addition de  $H_2$ ) ou deux hydrogènes et un oxygène (dans le cas de l'addition de  $H_2O$ ). Ainsi, ce sont les élèves eux-mêmes qui

sont capables de déterminer le type de réaction permettant de relier les alcanes aux alcènes, et les alcènes aux alcools. Ceci nous a menés à expliquer les différents grands types de réactions, en expliquant tout d'abord en quoi consistent les additions et les éliminations, puis en étendant nos explications aux oxydations et aux réductions, ainsi qu'aux condensations et aux hydrolyses. Cette généralisation est nécessaire si nous voulons aller vers une autonomisation des élèves par rapport à la détermination de la réaction permettant de passer d'une fonction à l'autre.

### ***Augmenter le niveau de difficulté des exercices***

Les retours majoritaires des élèves étant que le niveau de difficulté des exercices et de l'évaluation est très bas, nous avons progressivement augmenté la difficulté des exercices. Lors des premiers tests, la différence entre un précurseur et sa molécule cible était presque toujours localisée en un seul endroit (une seule transformation à imaginer), et les fonctions initiales et finales étaient très proches dans le tableau de réactivité (une seule étape à effectuer la plupart du temps, deux étapes de temps en temps).

Par la suite, nous avons augmenté le nombre de différences entre chaque couple de molécules, et nous avons également augmenté le nombre d'étapes nécessaires pour effectuer chaque transformation. Nous avons testé auprès de deux classes le cas d'une molécule cible devant être synthétisée au départ de deux précurseurs différents (par condensation). Ce cas de figure a fortement perturbé les élèves, nous ne l'avons donc pas retenu pour la suite des tests. Cependant, il serait intéressant de développer plus d'exemples de synthèses au départ de deux molécules différentes par la suite afin d'augmenter la difficulté de cette séquence et de proposer aux élèves des cas de figure différents.

### ***Aller plus loin dans l'évaluation***

Lors de nos derniers tests, nous avons modifié une question de l'évaluation afin de tester la capacité des élèves à intégrer une nouvelle fonction qui n'est pas présente dans le tableau réactionnel et à imaginer une réaction la liant à une fonction connue. En décomposant le travail des élèves en différentes étapes, nous avons été agréablement surpris de voir qu'ils ont correctement réussi cette question, malgré leur réticence en la découvrant. Cette question est donc conservée dans l'évaluation que nous présenterons ci-après.

## **Déroulement de la séquence d'apprentissage**

Nous allons maintenant découvrir en détail le déroulement complet de la séquence d'apprentissage. Cette séquence s'étale sur environ 2 périodes de cours. Elle a été conçue pour clôturer le chapitre sur la chimie organique avec les élèves. Elle peut facilement servir de liaison vers un chapitre concernant les équilibres chimiques ou les réactions d'oxydoréduction.

Afin de préparer au mieux cette séquence d'apprentissage, nous demandons préalablement à l'enseignant des élèves de nous fournir une liste des fonctions organiques et des réactions abordées en classe. Ceci nous permet d'adapter correctement la séquence d'apprentissage aux élèves que nous aurons en face de nous. La séquence que nous détaillons ci-dessous est donc à adapter en fonction du savoir enseigné aux élèves.

Nous ne donnons pas d'indication de timing précis au cours de cette séquence d'apprentissage, celui-ci étant fortement dépendant de la quantité de fonctions et réactions organiques travaillées préalablement par les élèves.

### ***Rappels : chimie organique, fonctions organiques et médicaments***

Commencer par rappeler aux élèves ce qu'est la chimie organique par une série de questions permettant de remettre les élèves à niveau si nécessaire. Demander, par exemple :

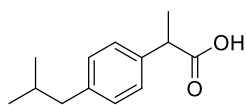
- Qu'est-ce que la chimie organique ?
- À quoi sert la chimie organique ?
- Que fait-on dans un laboratoire de chimie organique ?
- Que fait un chimiste organicien ?
- Quels produits sont organiques autour de nous ?

L'idée générale est de rappeler la définition de la chimie organique, sa place dans notre vie quotidienne, et d'arriver petit à petit à une des utilités de la chimie organique : la synthèse de molécules. On abordera celle-ci par la synthèse des médicaments. Si les élèves ne citent pas les médicaments comme exemples de produits organiques, l'enseignant cite cet exemple lui-même.

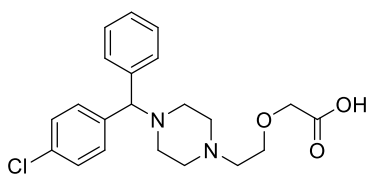
Demander aux élèves s'ils savent comment sont fabriqués les médicaments. Nous attendons ici deux réponses différentes qui, si elles ne sont pas fournies par les élèves, sont expliquées par l'enseignant. D'une part, les médicaments peuvent être issus de plantes ou d'animaux. On extrait le principe actif dont on a besoin au départ de la plante ou du tissu animal. D'autre part, les médicaments peuvent être synthétisés en laboratoire, au départ d'une autre molécule qui, par exemple, existe déjà dans la nature, et que l'on appelle un précurseur. Ces deux méthodes peuvent permettre de fabriquer le même médicament dans certains cas. Expliquer aux élèves que nous allons, au cours de cette séquence d'apprentissage, découvrir théoriquement et de manière grossière comment synthétiser des médicaments en laboratoire.

Distribuer aux élèves un document « Médicaments & Vitamines » et un document « Précurseurs ». Ces deux documents contiennent des molécules légèrement différentes en fonction des fonctions organiques et des réactions abordées préalablement dans la classe. Un exemple de ces deux outils de travail est présenté à la figure 4.11.

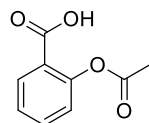
## Médicaments & Vitamines



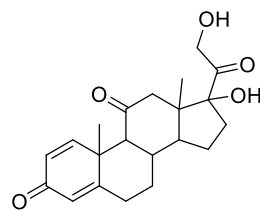
Ibuprofène



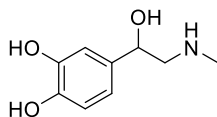
Cetirizine (Zyrtec)



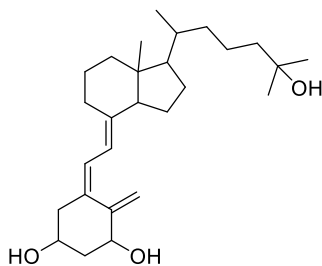
Aspirine



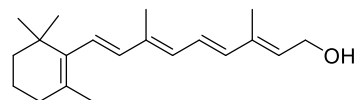
Prednisone



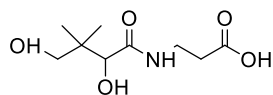
Adrénaline / Epinéphrine



Calcitriol (Vitamine D)

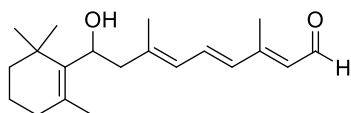


Rétinol (Vitamine A)

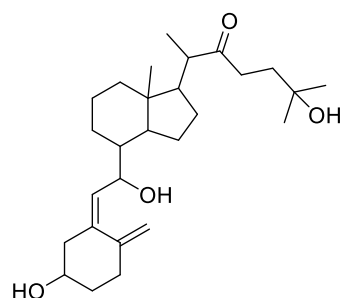


Acide pantothénique (Vitamine B5)

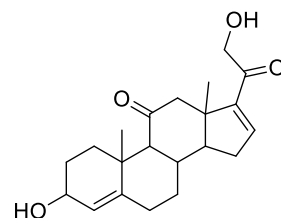
## Précurseurs



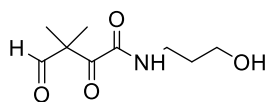
Molécule 1



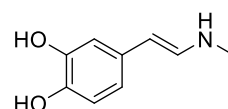
Molécule 4



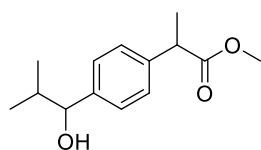
Molécule 6



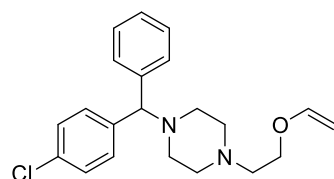
Molécule 2



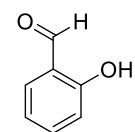
Molécule 7



Molécule 3



Molécule 5



Molécule 8

Figure 4.11 : Exemple de documents de travail distribués aux élèves



Lors de la mise au point de ces documents de travail, il est très important de vérifier que toutes les réactions nécessaires pour transformer chaque précurseur en sa molécule cible (médicament ou vitamine correspondant) aient été travaillées par les élèves précédemment. Certaines réactions peuvent être ajoutées si besoin, mais il est important qu'elles soient similaires à d'autres réactions déjà vues afin de ne pas transformer cette séquence d'apprentissage en un cours introduisant de nouveaux types de réactions.

Il convient également de vérifier que les élèves ont l'habitude de travailler avec des molécules représentées sous forme topologique.

Laisser quelques minutes aux élèves pour se familiariser avec les deux documents de travail. Leur demander s'ils peuvent imaginer quel précurseur permet de synthétiser chaque médicament et chaque vitamine. En général, les élèves font facilement l'association correcte entre chaque précurseur et chaque molécule cible, simplement en déterminant quelles molécules se ressemblent le plus. Vérifier que les associations établies par les élèves sont correctes en corrigeant collectivement et oralement ces associations. Pour l'exemple présenté à la page précédente, les associations sont les suivantes :

- Molécule 1 → Rétinol (Vitamine A)
- Molécule 2 → Acide pantothénique (Vitamine B5)
- Molécule 3 → Ibuprofène
- Molécule 4 → Calcitriol (Vitamine D)
- Molécule 5 → Cétirizine (Zyrtec)
- Molécule 6 → Prednisone
- Molécule 7 → Adrénaline / Épinéphrine
- Molécule 8 → Aspirine

Embrayer en demandant aux élèves quelle est la différence entre le précurseur et la molécule cible : il s'agit des fonctions organiques présentes sur la molécule. À partir de cette constatation, parcourir les différentes fonctions vues précédemment grâce aux fonctions présentes dans les différentes molécules. Ainsi, demander aux élèves, pour chaque couple précurseur/molécule cible, la fonction présente initialement sur le précurseur, et la fonction qui la remplace sur la molécule cible. Dans certains cas, plusieurs fonctions sont différentes, il convient alors de toutes les répertorier. Pour l'exemple présenté à la page précédente, les différentes fonctions sont présentées dans le tableau 4.9.

	<b>Fonction initiale</b>	<b>Fonction finale</b>
Molécule 1 → Rétinol (Vitamine A)	Alcool Aldéhyde	Alcène Alcool
Molécule 2 → Acide pantothénique (Vitamine B5)	Aldéhyde Cétone Alcool	Alcool Alcool Acide carboxylique
Molécule 3 → Ibuprofène	Alcool Ester	Alcane Acide carboxylique
Molécule 4 → Calcitriol (Vitamine D)	Alcane Alcool Cétone	Alcool Alcène Alcane

Molécule 5 → Cetirizine (Zyrtec)	Alcène	Acide carboxylique
Molécule 6 → Prednisone	Alcool Alcane Alcène	Cétone Alcène Alcool
Molécule 7 → Adrénaline / Epinéphrine	Alcène	Alcool
Molécule 8 → Aspirine	Alcool* Aldéhyde	Ester Acide carboxylique

Tableau 4.9 : Fonctions présentes au sein des précurseurs et des molécules cibles proposées dans la figure 4.11 (\*rappelons que les phénols ne sont pas vus en secondaire et sont donc assimilés à des alcools)

Les molécules choisies dans cet exemple présentent des transformations impliquant les fonctions suivantes :

- Alcane
- Alcène
- Alcool
- Aldéhyde
- Cétone
- Acide carboxylique
- Ester

Si les élèves ont abordé des réactions impliquant d'autres fonctions organiques, ou au contraire si les élèves n'ont pas vu certaines de ces fonctions organiques, l'enseignant modifiera la structure des précurseurs utilisés. La structure des molécules cibles ne peut être modifiée étant donné qu'il s'agit de structures réelles et correctes, mais l'enseignant peut décider d'utiliser d'autres médicaments ou vitamines si nécessaire. Les précurseurs ne sont que d'hypothétiques molécules utilisées pour servir l'exercice, ce ne sont pas les réels précurseurs utilisés pour synthétiser les molécules cibles.

Au cours de l'identification des fonctions organiques, lors de la première citation d'une fonction, l'enseignant indique cette fonction au tableau, par un exemple de molécule contenant cette fonction ainsi que par le nom de ladite fonction. Les différentes fonctions doivent être correctement agencées entre elles afin de pouvoir construire un tableau de réactivité reliant les fonctions grâce aux réactions organiques vues au cours. Attention donc à directement placer les fonctions organiques de manière réfléchie au tableau. Les exemples de molécules doivent tous être basés sur la même chaîne carbonée afin de pouvoir transformer chaque molécule en une autre molécule présente sur le tableau. Ainsi, si nous choisissons de représenter un alcane contenant trois carbones, toutes les autres molécules contiendront également une chaîne de trois carbones (à l'exception de l'ester qui en contiendra le double puisqu'il résulte de la condensation entre un alcool et un acide carboxylique ayant tous deux trois carbones). Il est nécessaire de représenter des molécules contenant au minimum trois carbones car il n'existe pas de cétone contenant moins de trois carbones.

Afin de mettre en évidence les différents types de réactions organiques, il est conseillé d'indiquer également la formule moléculaire de chaque molécule représentée. Demander aux élèves de compter le nombre d'atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène présents au sein de chaque molécule afin qu'ils arrivent d'eux-mêmes à la formule brute.

Voici un exemple de disposition et représentation des différentes fonctions nécessaires pour les molécules présentées dans l'exemple de la figure 4.11 :

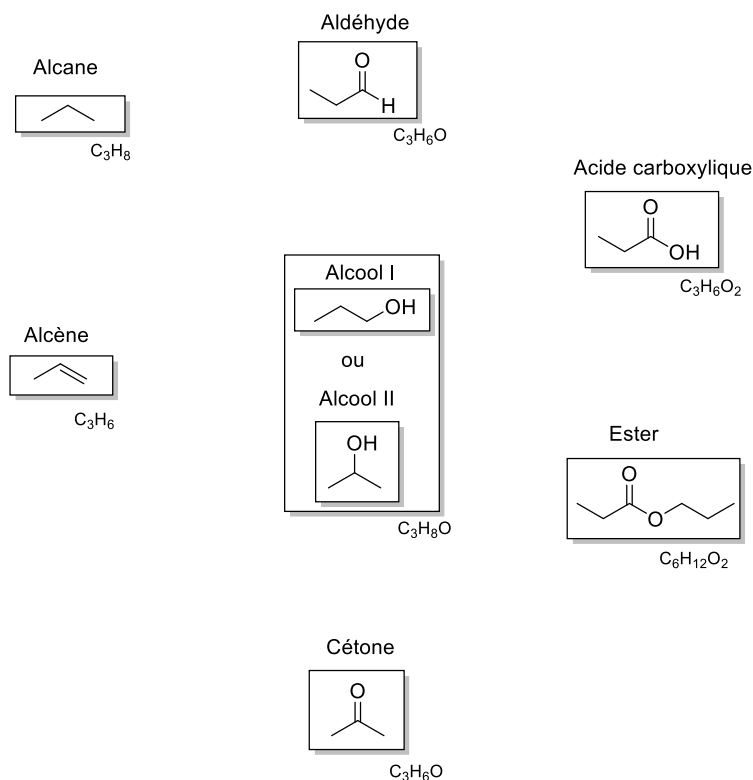


Figure 4.12 : Organisation et représentation des différentes fonctions organiques que l'on retrouve au sein des précurseurs et des molécules cibles, avec un exemple simple et la formule moléculaire correspondante

### **Construction d'un tableau de réactivité organique**

Une fois cette première partie de révision des différentes fonctions organiques terminée, il est temps de passer à la synthèse proprement dite en révisant les différentes réactions déjà vues, et en les complétant par d'autres réactions similaires si nécessaire.

Afin d'aborder les réactions, demander aux élèves comment on peut transformer une fonction organique en une autre fonction organique : en faisant une réaction. De là, repartir des réactions déjà vues précédemment en leur demandant simplement de quelles réactions ils se souviennent. Il s'agit alors de rebondir en fonction des réponses des élèves afin de construire un tableau de réactivité reprenant les différentes réactions qu'ils connaissent déjà. Le point le plus important ici est de faire comprendre aux élèves qu'une réaction organique, quelle qu'elle soit, transforme une fonction organique en une autre. Plusieurs cas de figure sont envisageables :

- **Les élèves citent une réaction et se souviennent des produits et réactifs**

Si les élèves proposent la réaction d'estérification lorsqu'on leur demande ce qu'ils ont abordé comme réaction, il ne s'agit pas de réécrire une réaction d'estérification comme ils ont eu l'habitude de le faire, mais de leur faire comprendre que cette réaction transforme un alcool et un acide carboxylique en un ester. La réaction produit également de l'eau, mais cette molécule étant un produit secondaire inorganique, il ne nous intéresse pas dans l'optique d'une synthèse de molécules cibles. Cette réaction

peut ainsi être schématisée sous forme de flèches reliant d'un côté les fonctions alcool et acide carboxylique, et de l'autre côté la fonction ester. Ainsi, nous pouvons commencer à compléter le tableau en ajoutant la flèche suivante :

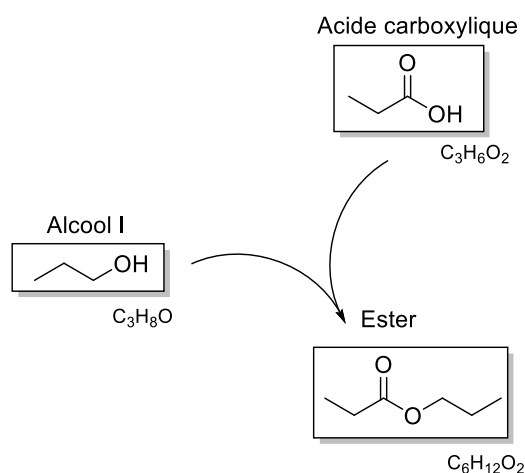


Figure 4.13 : Construction de la réaction d'estérification dans le tableau

Cette flèche représente la réaction d'estérification, qui nécessite deux réactifs (les origines de la flèche) et qui mène à un produit organique (à l'extrémité de la flèche).

- **Les élèves citent une réaction mais ne se souviennent pas des détails**

Si les élèves se souviennent du nom d'une réaction, mais pas des détails de cette réaction (les réactifs et les produits impliqués), il est nécessaire de reconstruire cette réaction avec eux. Par exemple, les élèves peuvent se souvenir de la réaction d'hydrogénation, du réactif nécessaire pour cette réaction (il faut ajouter  $H_2$ ), mais pas de la fonction initiale ou finale. Il s'agit alors de retrouver ces informations manquantes. Pour ce faire, on peut proposer aux élèves d'examiner les formules moléculaires des différentes molécules représentées au tableau. Si une réaction ajoute  $H_2$ , il devrait y avoir deux hydrogènes de plus dans la formule moléculaire finale par rapport à la formule moléculaire initiale. Ainsi, les élèves peuvent identifier que la fonction initiale est un alcène et que la fonction finale est un alcane, ce qui permet de tracer la flèche correspondant à l'hydrogénation entre ces deux fonctions, comme suit :

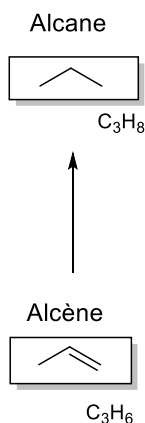


Figure 4.14 : Construction de la réaction d'hydrogénation dans le tableau

- ***Les élèves ne se souviennent pas d'une réaction***

Si les élèves ne se souviennent pas d'une réaction, on peut procéder de manière similaire à ci-dessus. En observant les formules moléculaires liées à différentes fonctions, imaginer quel réactif est nécessaire pour transformer une fonction en une autre fonction. Attention, ce genre de procédure très simplifiée ne fonctionne que dans certains cas, il convient donc de vérifier que les élèves peuvent effectivement identifier un réactif simple permettant d'effectuer la réaction. Les réactions d'addition se prêtent très bien à cette procédure (différence de 2 H pour une addition de H<sub>2</sub>, différence de 2 H et 1 O pour une addition de H<sub>2</sub>O). Par contre, les réactions d'oxydation ou de réduction risquent de poser un problème avec cette procédure étant donné que les réactifs utilisés pour les effectuer ne sont pas aussi simples, mais que la différence entre les deux formules moléculaires du réactif et du produit peut être très simple (différence de 2 H entre un alcool secondaire et une cétone, mais il ne faut pas « éliminer H<sub>2</sub> », différence de 1 O entre un aldéhyde et un acide carboxylique, mais il ne faut pas « additionner O »).

- ***Les élèves citent la réaction de combustion***

La réaction de combustion est un cas particulier qui ne nous intéresse pas dans le cadre de la synthèse organique. En effet, cette réaction, quelle que soit la fonction initiale considérée, détruit les liaisons entre les différents carbones afin de produire du CO<sub>2</sub> qui, bien que contenant du carbone, n'est pas une molécule organique. La réaction de combustion est donc une réaction qui permet de transformer diverses fonctions organiques en molécules inorganiques. Cette réaction est plutôt une réaction destructive de produits organiques et n'a donc pas sa place dans un tableau de synthèse organique.

En ajoutant progressivement les différentes réactions dont les élèves se souviennent, l'enseignant peut ainsi compléter le tableau par d'autres flèches reliant différentes fonctions. Il est important d'insister, pour chaque réaction, sur la fonction initiale (réactif) et la fonction finale (produit). Un exemple de tableau reprenant les réactions abordées dans la majorité des écoles est proposé à la figure 4.15.

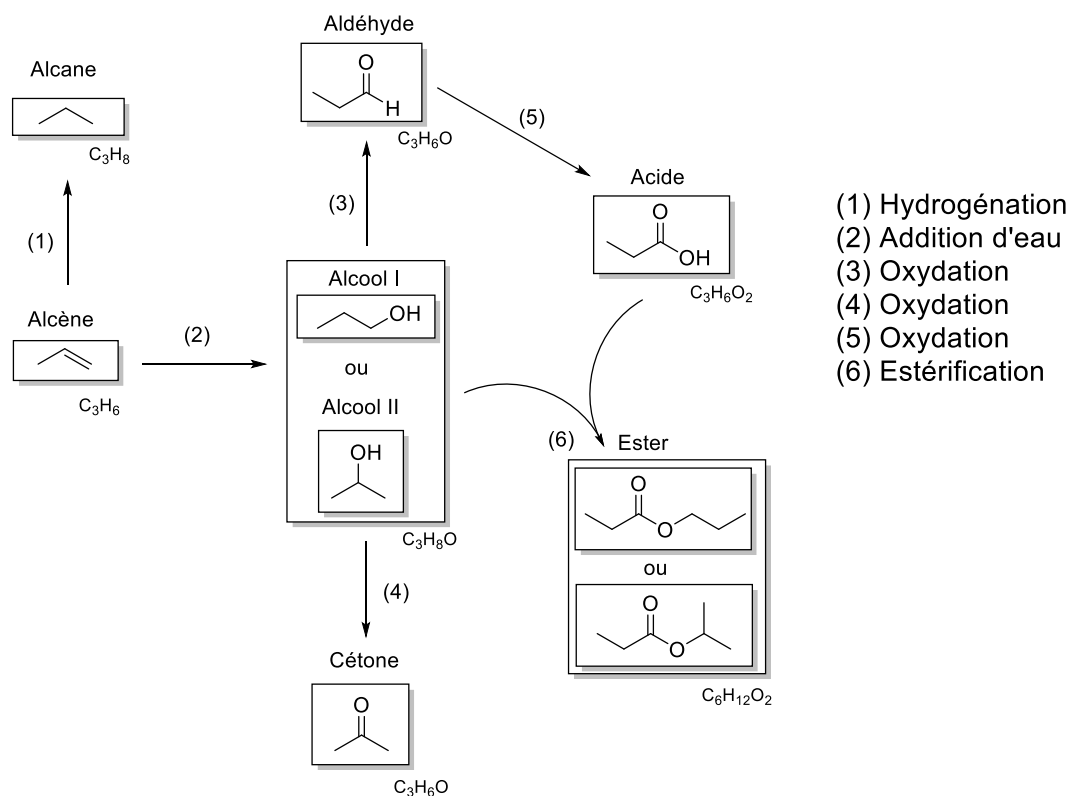


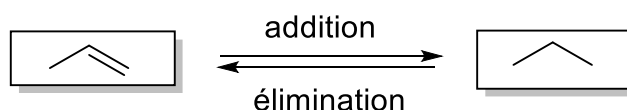
Figure 4.15 : Tableau reprenant les réactions organiques abordées dans la plupart des écoles secondaires de Belgique

Il est important d'expliquer ensuite aux élèves qu'il s'agit d'une toute petite liste de réactions, et qu'il en existe des milliers d'autres permettant de relier d'autres fonctions entre elles, ou de relier les mêmes fonctions, mais par un autre chemin.

Une manière très simple de doubler le nombre de réactions connues est de comprendre que l'on peut trouver une réaction inverse pour (presque) toutes les réactions organiques. Par exemple, si on peut transformer un alcène en alcool par une addition d'eau, on peut également faire l'inverse, c'est-à-dire transformer un alcool en alcène par une élimination d'eau.

Ceci mène à expliquer aux élèves que chaque grand type de réaction a sa réaction inverse :

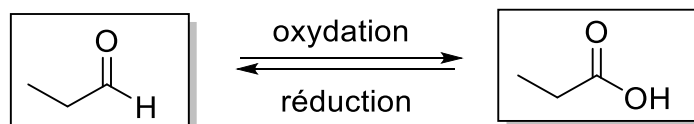
### Les additions et les éliminations



- Les réactions d'addition ajoutent une petite molécule sur une liaison double pour la transformer en une liaison simple (au niveau de l'enseignement secondaire).
- Les réactions d'élimination enlèvent une petite molécule d'une liaison simple pour la transformer en une liaison double (au niveau de l'enseignement secondaire).

*Comment les reconnaître* : une double liaison entre deux atomes de carbone devient une simple liaison entre deux atomes de carbone (ou inversement).

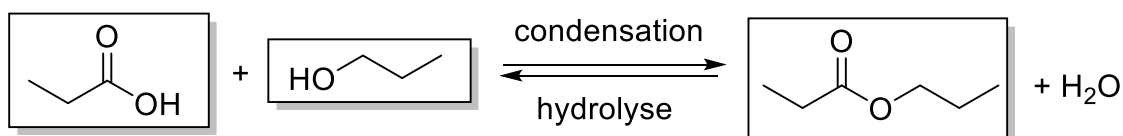
### Les oxydations et les réductions



- Les oxydations rajoutent des oxygènes, ou rajoutent une liaison supplémentaire vers un oxygène déjà présent, et/ou enlèvent des hydrogènes.
- Les réductions enlèvent des oxygènes, ou enlèvent des liaisons vers des oxygènes, et/ou rajoutent des hydrogènes.

*Comment les reconnaître* : il y a plus d'oxygènes ou plus de liaisons vers des oxygènes (ou l'inverse).

### Les condensations et les hydrolyses

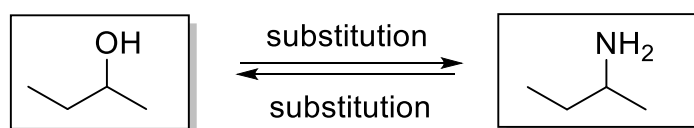


- Les condensations font réagir deux fonctions organiques entre elles pour donner une nouvelle fonction organique tout en éliminant une molécule d'H<sub>2</sub>O (un H venant d'une des fonctions initiales et un OH venant de l'autre fonction initiale). Il s'agit bien sûr d'une simplification pour l'enseignement secondaire, puisqu'une condensation peut s'accompagner du départ d'autres petites molécules.
- Les hydrolyses utilisent une molécule d'H<sub>2</sub>O pour casser une molécule contenant une fonction organique en deux molécules contenant deux nouvelles fonctions organiques.

*Comment les reconnaître* : deux molécules différentes se transforment en une molécule plus grande et une molécule d'eau (ou l'inverse).

Un quatrième grand type de réaction organique peut être nécessaire si les élèves ont abordé, par exemple, la fonction amine.

### Les substitutions



Les réactions de substitution combinent, en une seule réaction, une élimination d'une petite molécule (A) et une addition d'une autre petite molécule (B). La réaction inverse d'une substitution est donc également une substitution mais en éliminant l'autre petite molécule (B) et en ajoutant la première (A). Dans notre exemple, les deux petites molécules dont nous parlons sont H<sub>2</sub>O (molécule A) et NH<sub>3</sub> (molécule B). Le résultat d'une réaction de substitution est le remplacement (la substitution) d'une partie de molécule par une autre. Dans notre exemple, -OH est remplacé par -NH<sub>2</sub>.

*Comment les reconnaître* : un petit groupe d'atomes portés par un carbone est remplacé par un autre petit groupe d'atomes.

Une fois les grands types de réactions abordés, l'enseignant peut ajouter toutes les réactions inverses au tableau de synthèse organique afin d'obtenir le tableau final. La construction de ce tableau de réactions étant longue et demandant une certaine organisation du tableau par le professeur, il est suggéré à l'enseignant de préparer des photocopies du tableau complet à distribuer aux élèves pour la suite du cours. Ceci permet de dispenser les élèves du recopiage du tableau tout au long de sa construction, ce qui leur laisse la possibilité d'être plus attentifs et de participer activement à la séquence d'apprentissage sans la distraction de recopier ce qui est écrit au tableau. De plus, l'enseignant est alors sûr que chaque élève dispose d'un tableau correct et ne risque pas de commettre d'erreurs de recopiage.

La page suivante présente deux tableaux de réactivité correspondant à l'étude de fonctions différentes. Le premier reprend les fonctions et les réactions les plus courantes et suit l'exemple que nous indiquons depuis le début de cette séquence. Le second tableau propose des extensions reprenant d'autres fonctions organiques (alcynes, éthers, amines, amides) et les réactions qui leur sont associées. Ce deuxième tableau intègre le quatrième grand type de réaction, les réactions de substitution. Libre à l'enseignant d'utiliser un de ces deux tableaux, ou une adaptation d'un de ces tableaux afin de s'adapter au mieux à son enseignement.

Certaines réactions pourraient porter un autre nom lorsque les connaissances de l'élève évoluent en chimie organique, mais nous avons voulu garder une certaine cohérence par rapport aux savoirs des élèves du secondaire. Ainsi, les réactions reliant les alcools et les éthers (réactions 9 et 10 du tableau 4.17) sont en réalité des réactions de substitution nucléophile, mais nous les assimilons pour l'instant à des réactions de condensation/hydrolyse puisqu'elles correspondent aux définitions fournies aux élèves pour ce type de réaction.



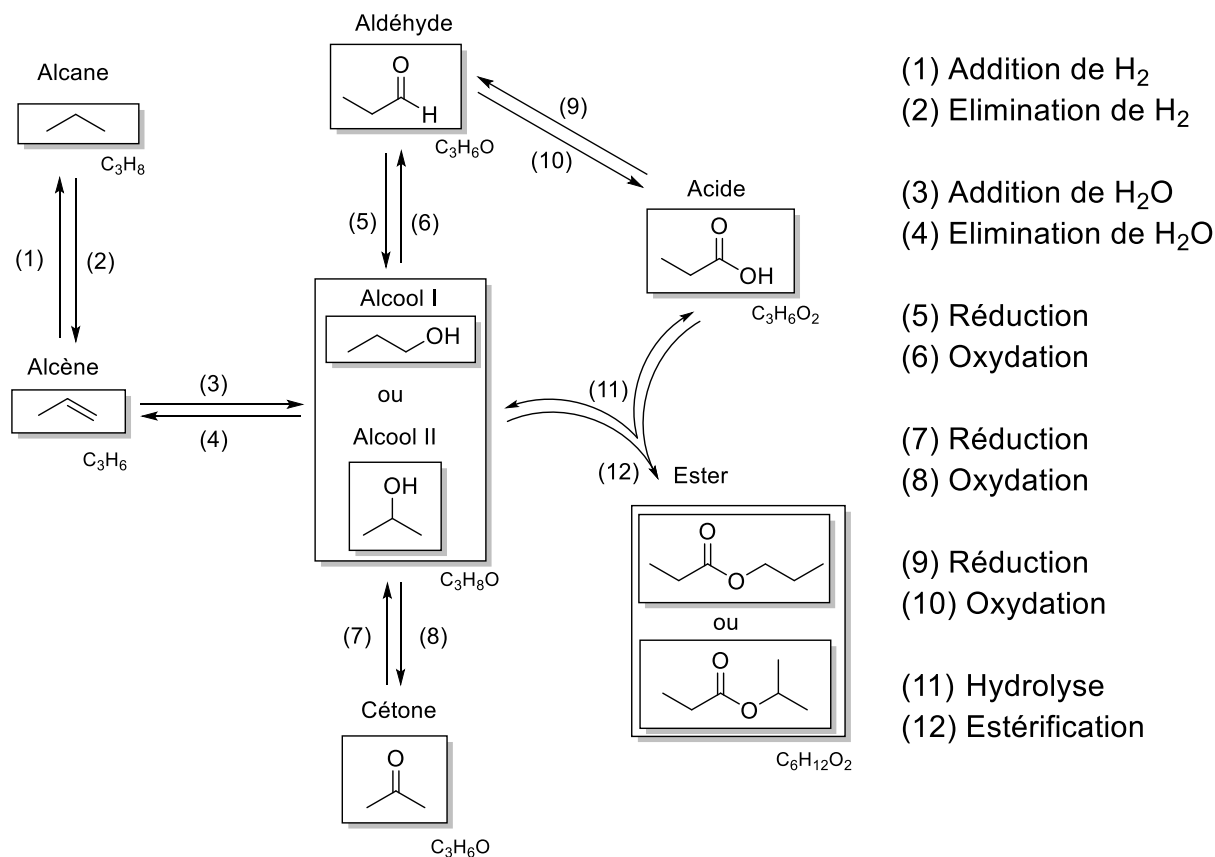


Figure 4.16 : Tableau de réactivité reprenant les fonctions organiques les plus courantes

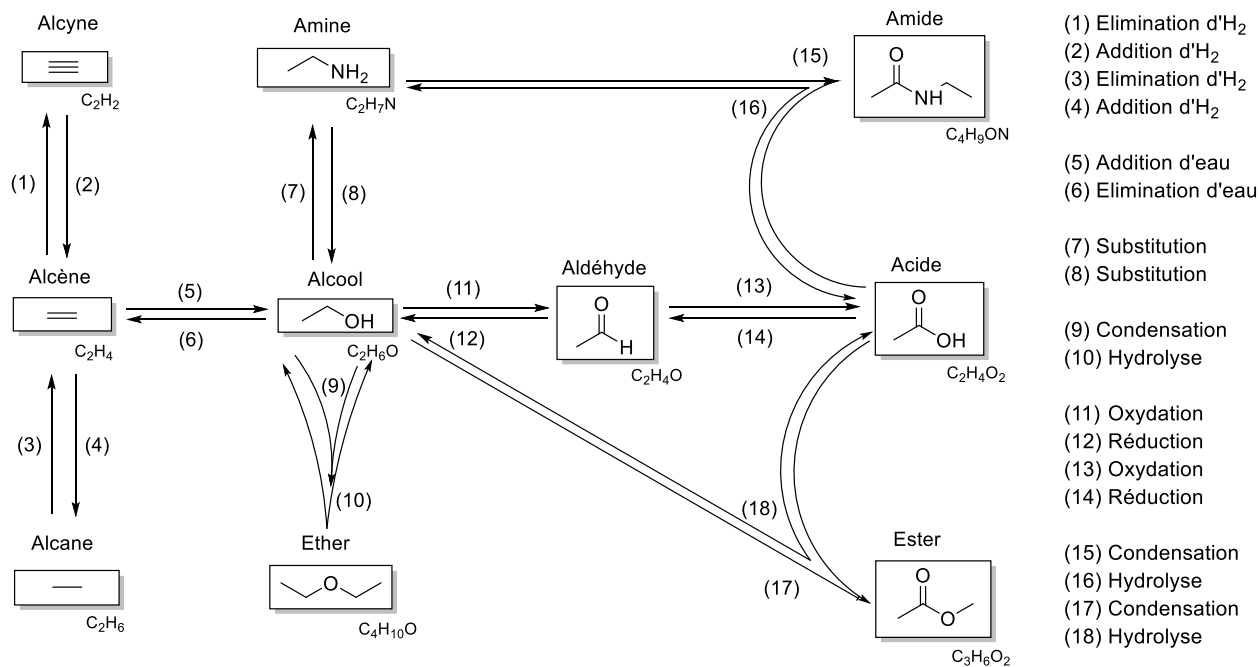


Figure 4.17 : Tableau de réactivité reprenant une plus grande variété de fonctions organiques

### ***Exercices de « synthèse théorique » de médicaments & vitamines***

L'enseignant peut ensuite revenir aux deux documents de travail afin de déterminer les différents chemins de synthèse à suivre pour transformer chaque précurseur en sa molécule cible. Il peut commencer par travailler sur un ou deux exemples avec les élèves afin de leur faire comprendre ce qu'on attend d'eux, puis laisser les élèves travailler individuellement sur les autres molécules. Durant tous les exercices, les élèves ont accès au tableau de réactivité. Le but des exercices n'est pas de leur faire apprendre par cœur le tableau de réactivité mais bien de leur apprendre à l'utiliser.

L'enseignant peut profiter de ce moment pour vérifier que chaque élève a bien compris comment procéder et n'a pas de questions ou de blocages. Une fois que les élèves ont eu le temps de réfléchir à chaque chemin de synthèse, l'enseignant corrige collectivement les molécules restantes. En fonction du niveau de la classe, une correction écrite et détaillée peut être nécessaire pour certaines ou pour toutes les molécules. L'enseignant peut préférer une correction orale rapide si les élèves semblent tous avoir compris comment faire ce genre d'exercice.

Voici la correction résumée pour les différentes molécules que nous avons prises en exemples jusqu'ici. Rappelons qu'il ne s'agit en rien de voies de synthèse réelles mais exclusivement d'une manière de « challenger » les élèves pour qu'ils réfléchissent et mettent en action les réactions vues dans le cadre de molécules qui font sens.

#### Molécule 1 → Rétinol (Vitamine A)

- Transformer l'alcool en alcène : élimination d'eau
- Transformer l'aldéhyde en alcool : réduction de l'aldéhyde

#### Molécule 2 → Acide pantothénique (Vitamine B5)

- Transformer l'aldéhyde en alcool : réduction de l'aldéhyde
- Transformer la cétone en alcool : réduction de la cétone
- Transformer l'alcool en acide carboxylique : double oxydation de l'alcool

#### Molécule 3 → Ibuprofène

- Transformer l'alcool en alcane : élimination d'eau pour former un alcène, puis addition de H<sub>2</sub> pour former l'alcane
- Transformer l'ester en acide carboxylique : hydrolyse de l'ester

#### Molécule 4 → Calcitriol (Vitamine D)

- Transformer l'alcane en alcool : élimination de H<sub>2</sub> pour former un alcène, puis addition d'eau pour former l'alcool
- Transformer l'alcool en alcène : élimination d'eau
- Transformer la cétone en alcane : réduction de la cétone pour former un alcool, puis élimination d'eau pour former un alcène, puis addition de H<sub>2</sub> pour former l'alcane

#### Molécule 5 → Cétirizine (Zyrtec)

- Transformer un alcène en acide carboxylique : addition d'eau pour former un alcool, puis oxydation de l'alcool pour former un aldéhyde et oxydation de l'aldéhyde pour former l'acide carboxylique (ou oxydation complète de l'alcool pour former directement l'acide carboxylique)

#### Molécule 6 → Prednisone

- Transformer l'alcool en cétone : oxydation de l'alcool
- Transformer l'alcane en alcène : élimination de H<sub>2</sub>
- Transformer l'alcène en alcool : addition d'eau

#### Molécule 7 → Adrénaline / Épinéphrine

- Transformer l'alcène en alcool : addition d'eau

#### Molécule 8 → Aspirine

- Transformer l'alcool en ester : rajout d'un acide carboxylique pour faire une condensation (ou estérification)
- Transformer l'aldéhyde en acide carboxylique : oxydation de l'aldéhyde

Ces exercices, a priori plutôt simples, sont déjà cependant très nettement plus élaborés que ce qui est proposé actuellement dans l'enseignement secondaire. Ils peuvent être complétés par la suite par d'autres exercices de synthèse plus complexes si besoin. L'idée de cette séquence d'apprentissage étant de faire découvrir le concept et l'approche générale de la synthèse organique, nous avons fait le choix de ne pas compliquer les exercices.

Il est évidemment important de terminer cette séquence d'apprentissage en expliquant bien aux élèves que ce n'est qu'un aperçu simplifié de la synthèse organique, qu'il existe des dizaines d'autres fonctions organiques et des milliers de réactions possibles pour passer d'une fonction à l'autre.

Si le temps le permet, nous ne pouvons qu'encourager les enseignants à s'avancer encore un peu dans la synthèse organique en proposant quelques cas de synthèse plus proches de la réalité, en discutant avec les élèves de l'utilisation de groupements protecteurs afin de pouvoir faire réagir une fonction organique sur une molécule tout en protégeant une autre fonction, ou encore de parler de la problématique de l'isolement des différents produits au terme d'une réaction organique.

#### **Évaluation de la séquence d'apprentissage**

Afin d'évaluer les acquis des élèves à la suite de cette séquence d'apprentissage, nous leur avons proposé une évaluation en fin de cours. Nous avons voulu vérifier que les différents objectifs de la séquence d'apprentissage ont bien été atteints, à savoir :

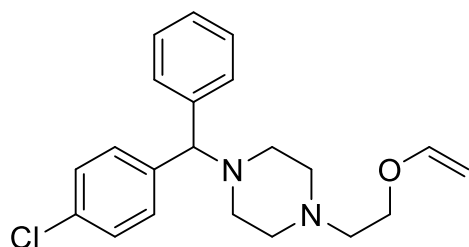
- Être capable d'identifier les différentes fonctions organiques présentes dans une molécule
- Construire et utiliser un tableau de réactivité reliant les différentes fonctions organiques

- Utiliser différentes réactions organiques afin d'imaginer une synthèse simplifiée de diverses molécules
- Comprendre que les réactions en chimie organique sont, pour la plupart, réversibles

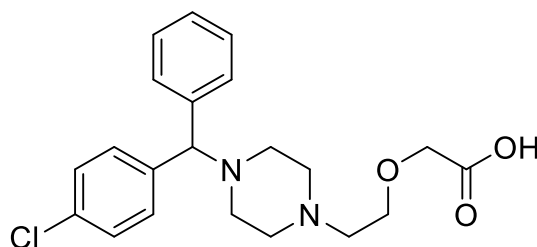
Les pages suivantes reprennent les différentes questions posées aux élèves dans le cadre de la mise en œuvre de cette séquence. Ces questions sont à adapter en fonction des réactions abordées en classe. Les questions présentées ci-après correspondent aux réactions reprises en exemple précédemment, les élèves n'ont donc pas abordé de réactions concernant les amines. Les élèves disposent du tableau de réactivité pour répondre à toutes ces questions.

### Question 1

Voici la structure de la Cétirizine ainsi que celle du précurseur permettant de la synthétiser.



Précurseur

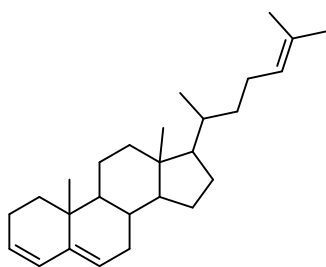


Cétirizine (Zyrtec)

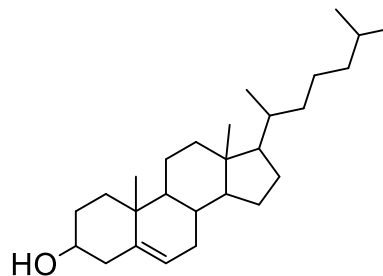
- Entoure et donne le nom de la fonction qui doit être modifiée dans le précurseur pour obtenir la Cétirizine.
- Entoure et donne le nom de la fonction qui doit être fabriquée dans la Cétirizine.
- Quelle(s) réaction(s) faut-il faire pour synthétiser la Cétirizine à partir du précurseur proposé ?

### Question 2

Voici la structure du cholestérol ainsi que celle d'un précurseur à partir duquel on peut le synthétiser.



Précurseur

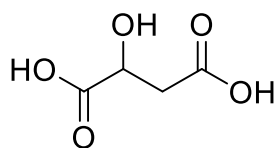


Cholestérol

Quelle(s) réaction(s) faut-il faire pour synthétiser le cholestérol à partir du précurseur ?

### Question 3

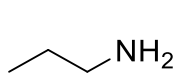
Voici la structure de l'acide malique. Imagine deux précurseurs qui permettraient de le synthétiser et dessine leur structure.



Acide malique

### Question 4

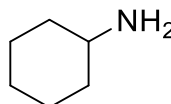
Les amines sont une famille de molécules organiques que tu as peut-être déjà rencontrée en biologie. Elles se trouvent par exemple dans les acides aminés et sont caractérisées par un groupement  $\text{NH}_2$ . Voici quelques exemples d'amines :



(a)

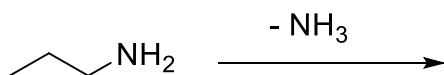


(b)

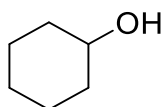


(c)

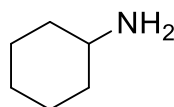
- Détermine la formule moléculaire de ces trois composés
- Écris la formule moléculaire et la structure de la molécule obtenue lors de la réaction suivante :



- Si nous faisons une élimination de  $\text{NH}_3$  sur une amine, quelle fonction va-t-on obtenir ?
- Quelle(s) réaction(s) dois-je faire si je veux fabriquer la molécule (c) au départ du précurseur proposé ci-dessous ?



Précurseur



(c)

## **Tests de la séquence dans les écoles**

### **Échantillon**

Afin d'éprouver cette deuxième séquence d'apprentissage, nous avons contacté un grand nombre d'enseignants afin d'avoir la possibilité de venir dans les écoles et de tester nous-mêmes la séquence d'apprentissage auprès des élèves. Seuls certains enseignants nous ont laissé la possibilité de tester la séquence d'apprentissage. Notre échantillon est donc moins grand que pour la première séquence d'apprentissage. Ceci est principalement dû à des contraintes horaires. De plus, nous n'avons pas été capables d'adapter la séquence à toutes les classes car nous avons besoin d'un minimum de réactions organiques pour pouvoir la donner dans de bonnes conditions.

Cette séquence d'apprentissage a été testée personnellement auprès de 111 élèves de 5<sup>ème</sup> ou 6<sup>ème</sup> secondaire, ce qui représente 9 classes réparties dans 4 écoles.

### **Difficultés rencontrées par les élèves**

Les difficultés principales que nous avons recensées chez les élèves au cours de la séquence d'apprentissage sont reprises ci-dessous. Ces difficultés revenant régulièrement au sein des différentes classes, nous avons porté une attention particulière à leur résolution au cours de la séquence.

### ***Traduire une réaction en fonctions initiale et finale***

La difficulté principale des élèves fut de « traduire » les réactions telles qu'ils ont l'habitude de les écrire (des réactifs se transforment en produits, en équilibrant la réaction) en termes de « fonction initiale » et « fonction finale ». En d'autres termes, si on leur donne le nom de deux réactifs, ils peuvent trouver le produit mais ils éprouvent beaucoup plus de difficultés si on leur demande d'imaginer un réactif permettant de transformer la molécule A en produit B. Ce passage d'une manière de noter les réactions à une autre a souvent été délicat dans les classes, il faut donc bien insister sur le fait que cette manière de procéder est une façon différente de noter les réactions chimiques, en indiquant simplement la fonction de départ, sur laquelle on effectue la réaction, et la fonction d'arrivée, qui est le produit de la réaction. La stœchiométrie n'est plus indiquée, et tous les réactifs et produits ne sont pas indiqués non plus. En effet, seules les fonctions organiques sont écrites tandis que les molécules inorganiques nécessaires pour effectuer la réaction ( $H_2$ ,  $H_2O$ , un réducteur ou un oxydant, etc...) ne sont pas précisées. Il est tout à fait possible de tout indiquer, mais nous faisons le choix dans notre tableau synthétique d'être minimalistes et d'indiquer uniquement les fonctions organiques et le type de réaction, plutôt que de prendre le parti d'indiquer un réactif fictif dont on sait qu'il ne permettra pas à la réaction d'avoir lieu.

### ***Utiliser des termes corrects***

En lien avec la difficulté précédente, nous avons noté que les élèves ont du mal à parler correctement des différentes réactions. Il faut donc être vigilant quant au vocabulaire utilisé. En effet, les élèves ne semblent pas faire la différence entre « additionner un alcène » et « additionner quelque chose à un alcène », par exemple. Il convient donc d'être attentif à ce qu'ils disent pour bien leur faire comprendre

qu'une réaction est à appliquer à une fonction particulière afin d'obtenir une autre fonction organique après la réaction.

### ***Comprendre la consigne***

Une difficulté récurrente et à laquelle nous n'avons pas pensé au départ est la compréhension de la consigne en ce qui concerne les exercices. Nous demandons aux élèves d'indiquer les différentes réactions nécessaires à la transformation du précurseur en molécule cible, en indiquant bien sur quelle fonction il faut effectuer chaque réaction. La consigne expliquée oralement ne semble pas suffire aux élèves qui ont besoin d'un exemple écrit pour être capables de se lancer ensuite dans les exercices de manière autonome. Il ne faut donc pas hésiter à écrire au tableau un ou deux exemples, en recopiant la structure de la molécule si besoin, et en écrivant toutes les réactions nécessaires.

### **Remarques**

Nous avons également noté plusieurs remarques, qui ne sont pas des difficultés de compréhension de la part des élèves mais des points qui pourraient constituer des éléments perturbateurs durant la séquence d'apprentissage. Ces différents éléments ont été gérés comme suit :

### ***Citer des produits/objets organiques***

Nous avons noté que les exemples de produits organiques cités par les élèves en début de séquence sont très variables d'une classe à l'autre. Certaines classes sont très silencieuses et ne citent presque rien, d'autres classes récitent les différents exemples typiquement vus en cours (le pétrole, le plastique, le savon, etc...) et d'autres classes, particulièrement celles ayant suivi la première séquence d'apprentissage que nous avons développée, sont beaucoup plus créatives et citent énormément d'exemples différents. Nous constatons aussi une différence importante quant à l'identification de l'appartenance aux produits organiques ou non, lorsque nous proposons nous-mêmes un produit aux élèves. Cette deuxième séquence d'apprentissage étant également là pour indiquer aux élèves que la chimie organique permet de synthétiser énormément de molécules présentes dans les produits qu'ils côtoient tous les jours, il nous semble important de prendre le temps d'insister sur la présence de molécules organiques dans leur quotidien, si cela n'a pas déjà été fait précédemment, ceci afin de ne pas associer uniquement l'exemple des médicaments à la chimie organique, mais de bien faire comprendre aux élèves que ce n'est qu'un exemple choisi parmi tant d'autres possibles.

### ***Trouver une réaction en comparant les formules moléculaires***

Nous avons fait le choix de partir des formules moléculaires liées à certaines fonctions organiques pour faire retrouver aux élèves certaines réactions qu'ils ont oubliées ou découvrir une réaction qu'ils n'ont tout simplement pas vue. Il convient d'insister auprès des élèves sur le fait que cette manière de procéder ne fonctionne que pour certaines réactions très simples (typiquement les additions et les éliminations, dans cette séquence d'apprentissage) et qu'il ne faut donc pas la généraliser à toutes les réactions en chimie organique, mais simplement aux réactions prévues par l'enseignant dans le cadre de ce cours.

### ***Curiosité des élèves***

Au sein de chaque classe, nous avons observé la présence de plusieurs élèves particulièrement curieux quant aux applications concrètes de la chimie organique. Nous avons donc régulièrement pris le temps de répondre aux questions qu'ils ont pu nous poser. En voici quelques-unes :

- Quelles sont les différences entre la théorie qu'on leur donne et la pratique réelle en laboratoire ?
- Seraient-ils capables eux-mêmes d'effectuer des réactions que l'on voit théoriquement dans la séquence?
- Comment fait-on pour savoir si la réaction a fonctionné ?

Nous avons également régulièrement abordé la grande variété de réactions organiques, même au sein d'une même transformation (il existe plusieurs façons différentes de réaliser l'oxydation d'un alcool, par exemple). Dans ce cas, nous avons aussi débattu de la nécessité de judicieusement choisir le réactif et les conditions expérimentales permettant de transformer une fonction particulière présente au sein d'une molécule sans affecter le reste de la molécule.

Nous encourageons donc les enseignants à ne pas hésiter à digresser lors de cette séquence d'apprentissage afin de donner le « goût » de la chimie organique aux élèves en leur présentant le mieux possible les implications réelles de la synthèse organique.



## Analyse des résultats des élèves

### Analyse de l'évaluation de fin de séquence d'apprentissage

Nous présentons dans cette partie les résultats des élèves à l'évaluation proposée à la suite de la séquence d'apprentissage. L'échantillon se compose de 111 élèves ayant assisté à la séquence d'apprentissage et ayant ensuite répondu à l'évaluation à l'aide du tableau de réactivité. Le nombre d'élèves ayant répondu à chaque question n'est cependant pas constant car nous avons légèrement modifié notre évaluation au fur et à mesure de l'enseignement dans les différentes écoles.

### Objet de la question 1 : identifier les fonctions initiale et finale (une transformation) et les réactions permettant de passer de l'une à l'autre dans des molécules vues au cours (N = 111)

Cette question consiste à demander aux élèves de résoudre un exercice totalement identique aux exercices effectués en classe. La molécule cible et son précurseur sont exactement les mêmes que ceux proposés aux élèves durant la séquence d'apprentissage. Les molécules ne sont pas toujours les mêmes en fonction des exemples utilisés dans chaque classe.

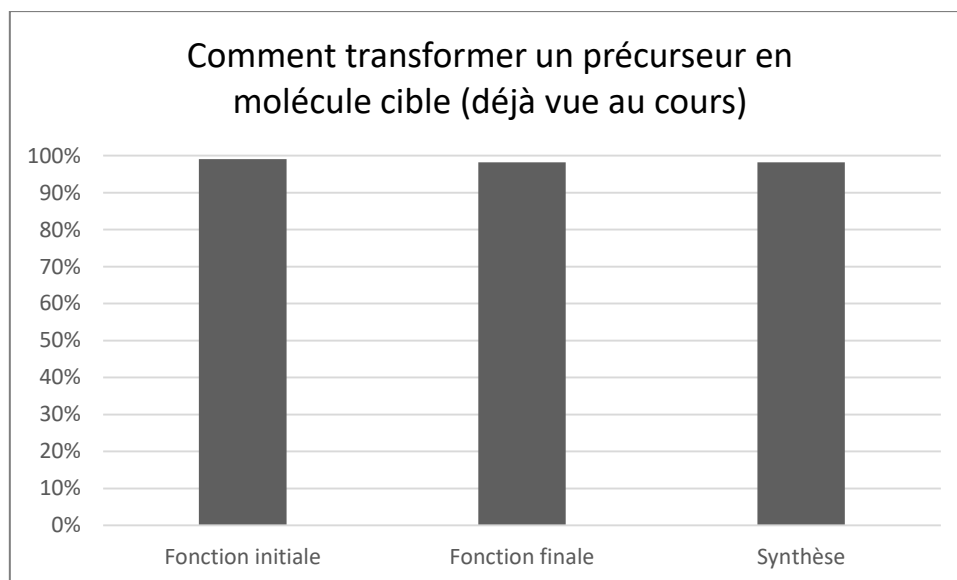


Figure 4.18 : Pourcentage d'élèves ayant correctement identifié les fonctions initiale et finale et donné la synthèse correcte pour passer de l'une à l'autre

Nous constatons sur la figure 4.18 que la presque totalité des élèves (98-99%) identifie correctement les fonctions initiale et finale et donne le chemin réactionnel (réaction ou suite de réactions) correct pour transformer la fonction initiale en la fonction cible, dans le cas où l'exercice a déjà été effectué en classe sur les mêmes molécules et pour la même transformation.

### Objet de la question 2 : identifier les fonctions initiales et finales (plusieurs transformations) et les réactions permettant de passer de l'une à l'autre dans des nouvelles molécules (N = 111 et N = 38)

Cette question est similaire à la précédente mais s'applique à une molécule cible et à un précurseur non vus par les élèves lors de la séquence d'apprentissage, les molécules sont donc inédites pour les

élèves. Le précurseur peut légèrement varier en fonction des réactions vues avec les élèves : les deux premières modifications (alcène vers alcool et alcène vers alcane) ont été proposées à tous les élèves alors que la troisième modification (amine vers alcène) n'a été proposée qu'aux élèves ayant déjà abordé les amines (N = 38 élèves). Nous proposons cette fois une synthèse nécessitant plusieurs étapes puisque plusieurs fonctions organiques doivent être modifiées.

Nous constatons sur la figure 4.19 que lorsque l'exercice est demandé sur un couple de molécules inédites (nouveau précurseur et nouvelle molécule cible), les réponses des élèves sont un peu moins bonnes que leurs réponses à la question précédente. La transformation de l'alcène en alcool est effectuée correctement par 91% des élèves (il s'agit d'une addition d'eau), celle de l'alcène en alcane est effectuée correctement par 84% des élèves (il s'agit d'une hydrogénation ou addition de H<sub>2</sub>) et celle de l'amine en alcène, qui comporte deux étapes, est effectuée correctement par 76% des élèves (il s'agit d'une substitution pour former un alcool, suivie d'une élimination d'eau). Bien que les résultats soient inférieurs à ceux de la question précédente, nous constatons que plus de trois quarts des élèves répondent correctement et ce, même lorsque deux réactions doivent être combinées pour effectuer la transformation totale. Signalons néanmoins que dans ce dernier cas, l'échantillon est plus réduit.

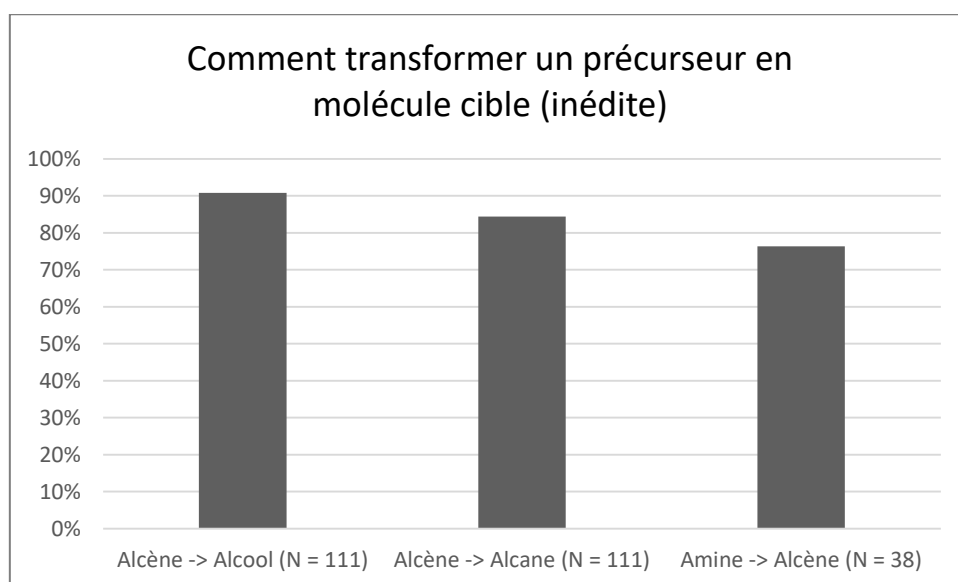
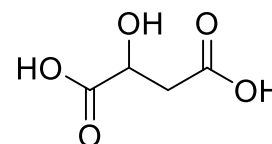


Figure 4.19 : Pourcentage d'élèves ayant proposé un chemin réactionnel correct pour la transformation indiquée

Objet de la question 3 : imaginer et dessiner la structure de deux précurseurs permettant de synthétiser une nouvelle molécule cible (N = 111)

Il est ici demandé aux élèves de dessiner la structure de deux précurseurs possibles pour une molécule donnée, non vue préalablement. Cette molécule cible est la même pour tous les élèves et contient deux acides carboxyliques et un alcool secondaire. Elle est représentée ci-contre.



Nous constatons sur la figure 4.20 que la majorité des élèves (60%) est capable de dessiner deux précurseurs corrects. Un quart des élèves (27%) ne représente qu'un seul précurseur correct, tandis que les 13% restants ne représentent aucun précurseur correct.

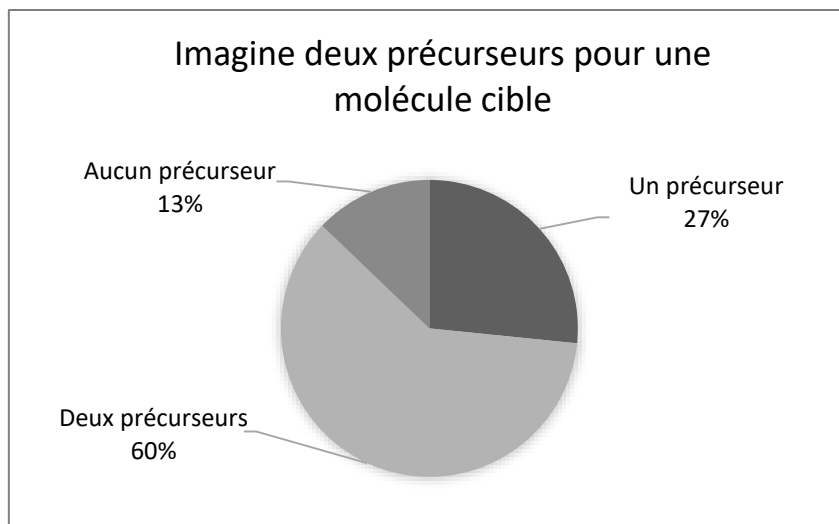


Figure 4.20 : Pourcentage d'élèves ayant représenté correctement un, deux, ou aucun précurseur de la molécule cible proposée

Nous nous sommes demandé si certaines fonctions étaient favorisées par les élèves lorsqu'ils proposent un précurseur. Dès lors, nous avons porté en graphique la répartition des différentes fonctions utilisées par les élèves dans leurs précurseurs (voir figure 4.21).

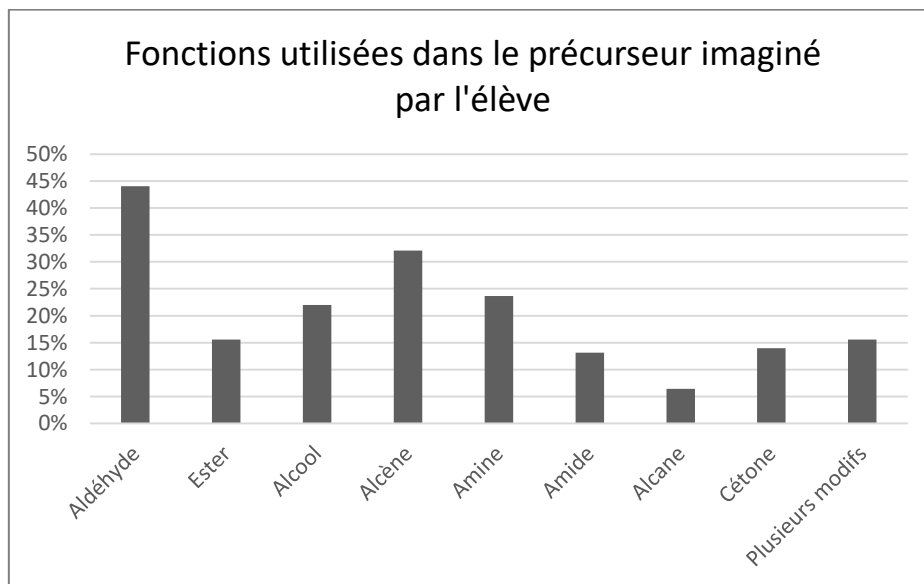


Figure 4.21 : Pourcentage d'élèves choisissant chacune des fonctions organiques citées pour imaginer un précurseur

La transformation rétrosynthétique la plus souvent utilisée par les élèves est de transformer l'un des acides carboxyliques (ou les deux) en aldéhyde et donc de choisir l'aldéhyde comme précurseur pour l'acide carboxylique. La seconde modification choisie par les élèves est la transformation de l'alcool en alcène. Nous notons également que, parmi les élèves ayant abordé la fonction amine, 24% choisissent de substituer l'alcool par une amine. 22% des élèves réduisent un des acides carboxyliques en alcool. 16% des élèves transforment un des acides carboxyliques en ester et 13% le transforment en amide. 14% des élèves oxydent l'alcool en cétone. Enfin, 6% des élèves choisissent de transformer une des fonctions en alcane. Notons qu'il y a 16% des élèves qui effectuent plusieurs modifications sur le même précurseur. Nous pouvons en conclure que la plupart des élèves imaginent des précurseurs pouvant

être transformés en la molécule cible par une seule réaction, bien que certaines élèves laissent aller leur imagination jusqu'à proposer un précurseur très différent de la molécule cible, ce qui nécessiterait plusieurs réactions afin d'obtenir la molécule cible au départ du précurseur imaginé.

Objet de la question 4 : concevoir un chemin réactionnel pour synthétiser une molécule contenant une fonction organique non vue (N = 43)

Cette question a été introduite lors des dernières évaluations afin de déterminer si les élèves sont capables d'extrapoler, à partir d'une réaction déjà abordée sur une fonction similaire, une nouvelle réaction sur une nouvelle fonction. Dans notre cas, nous souhaitons évaluer si les élèves sont capables de concevoir que l'élimination de  $\text{NH}_3$  sur une amine est une réaction similaire à celle de l'élimination de  $\text{H}_2\text{O}$  sur un alcool. Nous avons décomposé cette question en plusieurs étapes afin d'accompagner les élèves dans leur réflexion. La dernière étape demande d'appliquer la réaction inverse de l'élimination de  $\text{NH}_3$  sur une amine, c'est-à-dire de réaliser une addition de  $\text{NH}_3$ , afin de synthétiser une amine au départ d'un alcool. Voici les différentes étapes et les résultats des élèves à cette question.

- Première étape : déterminer la formule moléculaire de plusieurs amines

Pour commencer, nous demandons simplement aux élèves d'indiquer la formule moléculaire de trois amines représentées sous forme topologique. Comme nous pouvons le constater sur la figure 4.22, la majorité des élèves effectue cette étape correctement, bien que 14 à 16% d'entre eux n'utilisent pas une notation correcte pour indiquer la formule moléculaire ( $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NH}_2$  au lieu de  $\text{C}_6\text{H}_{13}\text{N}$  par exemple).

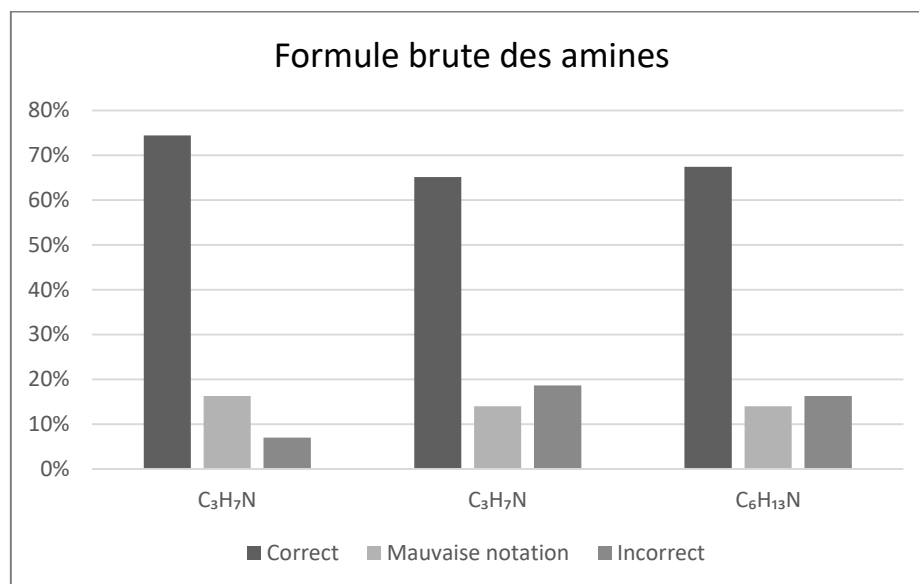


Figure 4.22 : Pourcentage d'élèves ayant donné une formule brute correcte, correcte mais avec une mauvaise notation, ou incorrecte, pour chaque amine proposée

- Deuxième et troisième étapes : déterminer la formule moléculaire, la structure et la fonction que l'on obtient lors de l'élimination de  $\text{NH}_3$  sur une amine (réaction non vue)

Lorsque nous demandons aux élèves ce qu'on obtient lorsqu'on effectue une élimination de  $\text{NH}_3$  sur une amine, ils sont 91% à comprendre que l'on obtient un alcène (voir figure 4.23). Ils sont 84% à donner la formule moléculaire correcte du produit obtenu et seulement 70% dessinent correctement la molécule obtenue.

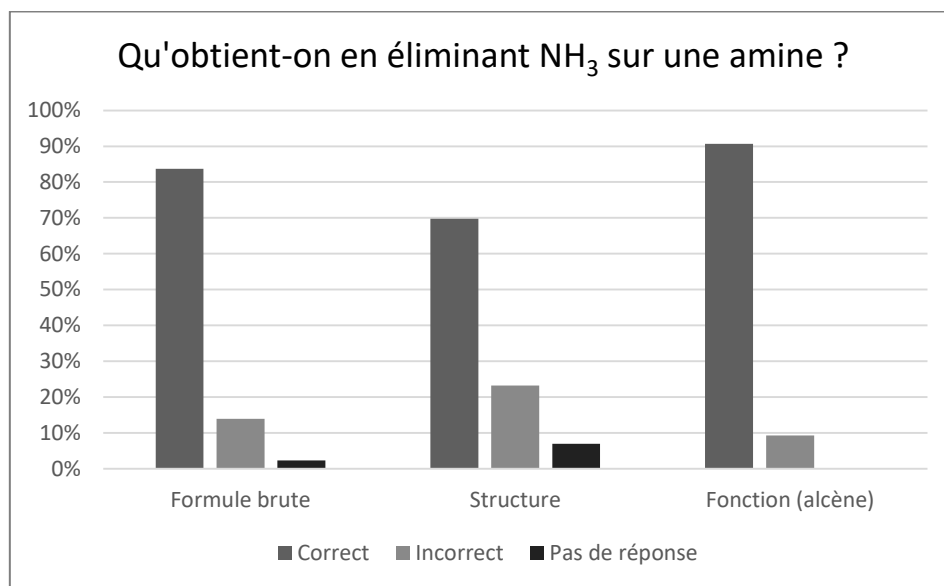
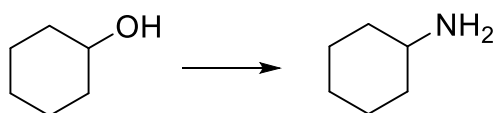


Figure 4.23 : Pourcentage d'élèves donnant la formule moléculaire, la structure et la fonction organique que l'on obtient lors de l'élimination de  $\text{NH}_3$  sur une amine

- Quatrième étape : déterminer le chemin réactionnel à suivre pour transformer un alcool en une amine

Nous demandons aux élèves de déterminer le chemin réactionnel permettant d'effectuer la transformation suivante :



Il s'agit donc d'effectuer tout d'abord une déshydratation de l'alcool (élimination d' $\text{H}_2\text{O}$ ) et ensuite d'effectuer une addition de  $\text{NH}_3$ . La première réaction est connue des élèves, et la deuxième réaction est à déduire de l'étape précédente de cette question. Nous constatons sur la figure 4.24 que 84% des élèves commencent effectivement par effectuer une déshydratation, et que 72% des élèves indiquent comme deuxième réaction l'addition de  $\text{NH}_3$ , ce qui est un résultat qui nous semble remarquable et montre une bonne intégration des concepts de synthèse organique.

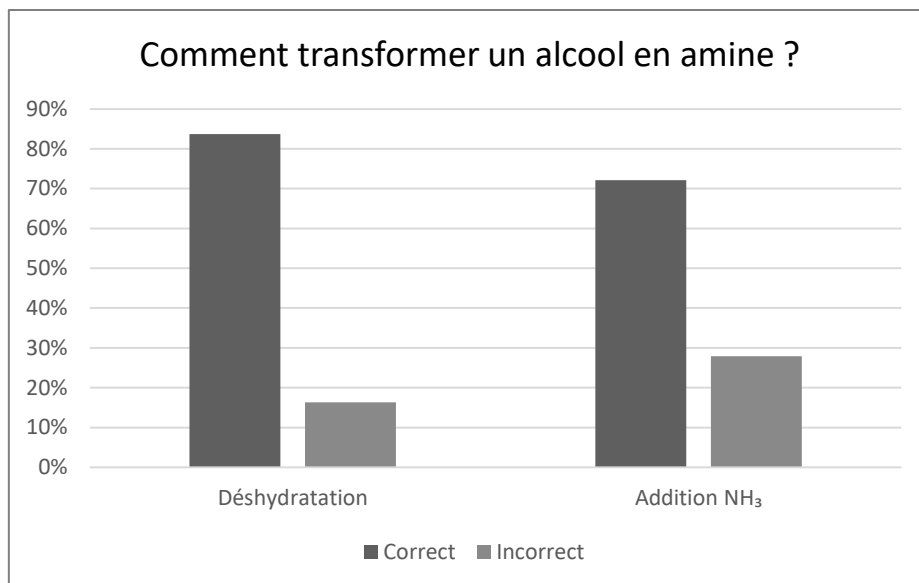


Figure 4.24 : Pourcentage d'élèves donnant l'une ou l'autre des deux étapes participant à la transformation d'un alcool en amine

Signalons que cet exercice a été proposé aux élèves n'ayant pas abordé la substitution, auquel cas ils auraient choisi simplement de réaliser la substitution de l'eau par l'ammoniac.

### **Conclusions sur l'efficacité de la séquence**

Revenons maintenant aux objectifs de cette séquence d'apprentissage afin de vérifier s'ils ont été atteints, en examinant les réponses des élèves aux questions correspondant à chacun de ces objectifs.

#### ***Objectif 1 : Être capable d'identifier les différentes fonctions organiques présentes dans une molécule***

L'identification des fonctions organiques est un prérequis nécessaire afin de pouvoir aborder les réactions. Il est donc indispensable de vérifier si les élèves sont capables de passer par cette étape sans commettre d'erreur afin de démarrer sur de bonnes bases pour la suite. Rappelons qu'il s'agit bien de reconnaître une fonction organique au sein d'une molécule avec l'aide d'un tableau de réactivité et pas de connaître les fonctions organiques par cœur.

Nous constatons lors de la question 1 que la (quasi) totalité des élèves identifie correctement les fonctions qui leur sont proposées. De plus, la réussite de la question 2 induit également une reconnaissance correcte des fonctions organiques présentes. Ce premier objectif, bien qu'étant préalablement travaillé par les élèves avant cette séquence d'apprentissage, semble donc acquis pour la plupart des élèves. Rappelons que les élèves ont à leur disposition un tableau de réactivité reprenant les différentes fonctions lors de cet exercice, il s'agit donc toujours d'identifier les fonctions en se basant sur une référence et non pas de les connaître par cœur.

#### ***Objectif 2 : Construire et utiliser un tableau de réactivité reliant les différentes fonctions organiques***

Nous avons vérifié que l'utilisation du tableau de réactivité est bien acquise par la mise au point d'un chemin réactionnel correct au départ de celui-ci, entre deux fonctions organiques présentes sur le tableau, ou encore par l'imagination d'un précurseur correct pour une molécule cible donnée. Nous vérifions ainsi, grâce à chaque question de l'évaluation, que les élèves maîtrisent correctement cet outil. En effet, toutes les questions de l'évaluation sont à effectuer à l'aide du tableau de réactivité ; elles permettent donc toutes de juger de la capacité des élèves à l'utiliser. Si nous effectuons la moyenne globale de toutes les évaluations, nous arrivons à un pourcentage de réponses correctes de 85%, ce qui confirme que les élèves ont bien compris comment utiliser un tableau de réactivité.

La compréhension du processus de construction du tableau peut s'évaluer grâce à la question 4 qui demande aux élèves d'ajouter une fonction organique nouvelle dans leur tableau (les amines). Cette question n'a pu être posée qu'à un nombre restreint d'élèves, mais nous pouvons d'ores et déjà affirmer que l'ajout de nouvelles fonctions et réactions similaires à celles déjà présentes au sein du tableau de réactivité semble être une tâche tout à fait abordable pour les élèves, puisque plus de 70% d'entre eux ont répondu correctement à cette question. Il conviendra par la suite d'améliorer la séquence d'apprentissage pour inclure de nouveaux exercices de ce genre au sein même de la séquence afin de mieux préparer les élèves à ce genre de question.

***Objectif 3 : Utiliser différentes réactions organiques afin d'imaginer une synthèse simplifiée de diverses molécules***

À travers cet objectif, nous voulons vérifier spécifiquement que les élèves sont capables d'imaginer un chemin réactionnel correct et cohérent entre un précurseur et sa molécule cible. Les questions 1 et 2 nous servent ici de référence.

Nous constatons qu'en moyenne, sur les différents chemins réactionnels demandés aux élèves, 87% d'entre eux répondent correctement. Ce troisième objectif d'apprentissage semble donc également tout à fait atteint.

***Objectif 4 : Comprendre que les réactions en chimie organique sont, pour la plupart, réversibles***

Le quatrième objectif est de faire comprendre aux élèves qu'à toute réaction organique peut s'associer une réaction inverse. En effet, toutes les réactions organiques vues en secondaire sont en général vues dans un sens unique. Cependant, chaque réaction peut trouver son équivalent inverse car la plupart de ces réactions sont en équilibre. La réaction d'estérification est d'ailleurs typiquement utilisée dans le nouveau référentiel de compétences pour introduire la notion d'équilibre. Il nous semble donc pertinent de présenter aux élèves chaque réaction inverse, quand cela est possible.

La seule question de l'évaluation permettant de réellement déterminer si les élèves sont capables de comprendre d'eux-mêmes qu'une réaction qu'ils découvrent peut également s'effectuer en sens inverse est la question 4, qui permet aux élèves de construire la réaction d'élimination de  $\text{NH}_3$  sur une amine, et qui leur demande ensuite d'utiliser la réaction inverse (addition de  $\text{NH}_3$  sur un alcène). Nous constatons que plus de 70% des élèves répondent correctement à cette question et ont donc assimilé le fait que cette nouvelle réaction a également sa réaction inverse.



## Analyse des retours des élèves et des professeurs

Un point qui nous semble également important à évaluer est la façon dont cette séquence d'apprentissage a été reçue par les élèves et les enseignants y ayant assisté ou, pour certains d'entre eux, ayant déjà eu l'occasion de donner eux-mêmes la séquence. Ainsi, nous avons demandé directement l'avis des élèves lors de l'évaluation de fin de séquence d'apprentissage. Nous avons ensuite récolté les avis des enseignants grâce à des discussions pendant et après avoir donné la séquence d'apprentissage, ainsi que par le biais d'un sondage envoyé aux enseignants par après.

### L'avis des élèves

À la fin de l'évaluation proposée aux élèves, nous leur laissons carte blanche pour nous donner leur avis sur la séquence à laquelle ils venaient de participer. La consigne qui leur était donnée était de dire s'ils avaient trouvé la séquence intéressante, si elle était facile ou plutôt difficile, ce qu'ils avaient aimé ou pas et d'essayer de nous donner des points positifs et des points à améliorer. Nous avons donc suivi ces grandes lignes pour analyser leurs réponses.

Pour commencer, voici un aperçu quantitatif sur le pourcentage d'élèves ayant noté l'intérêt de la séquence, si elle était facile à comprendre ou s'ils avaient eu des difficultés pour tout ou pour des parties de la séquence, s'ils ont aimé la séquence ou noté des points positifs et s'ils ont indiqué des points négatifs. Notons que nous avons un échantillon total de 106 élèves nous ayant donné un avis.

	Nombre d'élèves	Pourcentage
<b>Séquence intéressante</b>	64	60%
<b>Séquence facile, simple</b>	72	68%
<b>Points difficiles à comprendre</b>	8	8%
<b>Séquence appréciée</b>	77	73%
<b>Points négatifs</b>	24	23%

Nous remarquons que la majorité des élèves (60%) a indiqué que la séquence leur semble **intéressante**. Voici quelques extraits représentatifs des commentaires des élèves sur l'intérêt de la séquence d'apprentissage :

*« J'ai trouvé que le cours était intéressant. Pour moi, il s'agissait d'un résumé du cours qui a fait que j'ai mieux compris qu'avant. »*

*« J'ai trouvé intéressant d'apprendre l'utilité de la chimie organique dans la fabrication de médicaments. »*

*« J'ai trouvé que ce cours était assez intéressant et pratique car il m'a permis de revoir le cours sur la chimie organique de manière plus synthétique. »*

*« J'ai trouvé le cours très clair, le fait que beaucoup d'exemples soient tirés de la vie de tous les jours le rend intéressant et plus facile à retenir. »*

*« C'est intéressant de voir ce qui se passe dans un laboratoire pharmaceutique. »*

*« C'était un cours intéressant, surtout de voir les transformations qu'on doit faire pour arriver aux médicaments qu'on utilise. »*

*« Personnellement, oui, j'ai trouvé le cours vraiment intéressant. Très bien expliqué. J'ai bien aimé les exercices, c'est une autre façon d'apprendre la chimie. »*

*« Le cours est intéressant vu qu'on sait que ce qu'on apprend est vraiment utile (synthétiser des médicaments). »*

*« Le cours était intéressant car il a mis en avant des notions de la vie quotidienne (les médicaments par exemple) pour nous expliquer des notions plus complexes de chimie organique. Cela m'a permis de mieux comprendre la matière. »*

*« J'ai trouvé le cours intéressant dans la mesure où il y avait du concret, un rapport entre la chimie et la vie courante*

*« Je trouvais que le cours était intéressant, donné sous un angle différent. »*

De manière générale, nous pouvons affirmer que les élèves ont trouvé cette séquence d'apprentissage intéressante, principalement car elle leur permet d'avoir une vision plus globale du chapitre de chimie organique et de mettre le savoir en lien direct avec leur vie quotidienne, grâce à l'utilisation des médicaments comme exemple concret.

La majorité des élèves (68%) indique que le contenu de la séquence n'est **pas compliqué**, et seuls 8% des élèves ont indiqué qu'une partie de la séquence était difficile à comprendre. Plusieurs de ces élèves ont indiqué que la séquence semble compliquée au premier abord, mais qu'au final, elle est assez simple à comprendre une fois toutes les explications données. Voici quelques extraits de commentaires des élèves concernant le niveau de difficulté de la séquence :

*« Les informations données étaient très claires et c'était pas du tout difficile à comprendre. »*

*« J'ai tout compris, bon équilibre entre rappels de matière et nouvelles choses. Je m'attendais à quelque chose de plus difficile en fait. »*

*« J'ai trouvé le cours simple et clair. Le contenu n'était pas compliqué et les exercices étaient faciles. »*

*« J'ai bien compris tout le cours que vous avez donné. Le contenu aurait pu être plus compliqué à cause de l'ensemble des réactions qu'il y a mais grâce au schéma simplifié, c'était beaucoup plus simple car on pouvait se baser sur un tableau, ce qui est plus facile je pense. »*

*« Le cours était intéressant et nous avons tout compris je pense notamment grâce aux cours que nous avons eus durant la première période. Le contenu n'était pas compliqué. Ce cours a été bénéfique pour une compréhension totale de la matière qui nous entoure. »*

*« Je pense avoir tout compris et je me sens capable de faire les contrôles sans trop de difficultés. »*

*« J'ai bien compris car avant de connaître le nom de la réaction on savait à quoi elle servait. Donc on a mis un nom sur quelque chose que l'on connaissait plutôt que d'avoir un mot et ne pas directement*

*savoir ce qu'il signifiait. Je n'ai pas trouvé le contenu trop compliqué, mais pas trop facile pour autant. »*

*« La matière me semblait étrangement simple car facile à assimiler, et c'est toujours plus intéressant de faire un parallèle avec la matière à voir et son assimilation par après dans de vrais contextes qui peuvent nous concerner tous les jours. (C'est également un des seuls contrôles de chimie où je me sens aussi tranquille.) »*

*« Le cours n'était pas compliqué et je pense avoir tout compris mais je ne saurais pas faire les exercices sans le petit tableau. »*

*« J'ai tout compris, c'était assez simple à comprendre et à appliquer. Je ne pense pas que le contenu était dur. »*

*« Le cours a été très bien expliqué. Je pense avoir tout compris. Dès qu'on a fait plusieurs exercices, c'est devenu facile à faire. L'organisation du cours est aussi bonne, ça nous aide vraiment à comprendre petit à petit. »*

*« C'est vrai que le contenu est relativement compliqué, enfin ça va en fait, hahaha. »*

*« J'ai trouvé le cours très simple et très clair. Tout est compréhensible. Limpide comme de l'eau de roche ».*

*« C'était plus que compréhensible étant donné le contenu du cours pas trop compliqué. »*

*« J'ai tout compris. Le contenu était un peu flou jusqu'à la distribution du tableau qui est très clair et pratique. »*

*« Je pense avoir compris. Au départ c'est compliqué mais au fur et à mesure que l'on fait, on commence à comprendre et à le faire plus vite. »*

Nous constatons que presque aucun élève ne trouve le cours compliqué. Les élèves indiquant que quelque chose est compliqué indiquent que la matière est floue ou confuse au début de la séquence, mais que les choses s'éclaircissent à l'arrivée du tableau de réactivité. L'autre point difficile relevé par les élèves concerne la question 4 de l'évaluation. De manière générale, nous pouvons donc affirmer que le niveau de la séquence d'apprentissage n'est pas trop élevé pour les élèves.

La majorité des élèves (73%) a également **apprécié** la séquence et a pointé des choses positives la concernant. En illustration, voici quelques-uns de ces retours positifs :

*« J'ai beaucoup aimé ce cours, c'était très bien expliqué, on prenait le temps de comprendre et expliquer chaque point. Ça me donne encore plus envie de me lancer dans les études scientifiques. »*

*« J'ai trouvé le cours super bien donné. Ce qui m'a le plus plu a été le fait qu'on ait reçu un tableau avec toutes les réactions. Cela m'a permis de comprendre mieux le cours. »*

*« C'était une chance pour nous d'avoir la synthèse de notre cours de chimie organique. »*

*« J'ai bien aimé le fait de concrétiser directement en parlant de vitamines et d'autres molécules que l'on connaît et de voir l'application directe du chapitre. »*

*« J'ai apprécié le cours et trouvé la chimie organique très amusante. »*

*« J'ai trouvé ça chouette de parler de plusieurs réactions à partir des médicaments assez courants. »*

*« C'est assez amusant de « créer » des molécules. »*

*« C'était un cours intéressant, surtout de voir les transformations qu'on doit faire pour arriver aux médicaments qu'on utilise. C'était assez ludique d'utiliser le petit tableau »*

*« J'ai bien aimé les exercices, c'est une autre façon d'apprendre la chimie. »*

*« Le tableau est vraiment utile et permet de synthétiser le cours facilement. »*

*« Même si on avait déjà vu toutes ces réactions, c'était chouette de les mettre sous forme de tableau. C'est plus pratique. »*

*« J'ai apprécié le fait qu'on présente cela sous forme de tableau. Ça parle à tout le monde et c'est assez facile à lire et comprendre. »*

*« Le tableau est une bonne synthèse des réactions de la chimie organique, il rend les choses plus claires. »*

*« Le fait de réunir tous nos savoirs en un tableau m'a éclairci les idées et j'ai réussi à faire des liens jusqu'alors insoupçonnés. »*

*« J'aime beaucoup la façon de présenter les réactions et tous les liens entre les molécules. Cela permet de se faire une idée plus globale des possibilités et donc, au lieu de réfléchir étape par étape, on peut visualiser tout le chemin entre les molécules et mieux appréhender les étapes. »*

Nous constatons que la présentation sous forme de tableau récapitulatif de toutes les réactions parle à beaucoup d'élèves et permet de mieux ancrer le savoir relatif aux réactions organiques en le présentant autrement. La construction d'un tel tableau avec les élèves semble donc constituer un outil didactique intéressant. Les élèves mettent également en avant le lien avec la vie quotidienne et l'utilisation concrète des molécules et réactions prises en exemple lors de la séquence.

Les **points négatifs** que nous avons relevés sont ceux concernant la séquence d'apprentissage et non l'enseignant. Ainsi, nous notons que 23% des élèves mettent en avant des points qu'ils aimeraient voir changer au sujet de la séquence. Les remarques que nous retrouvons chez plusieurs élèves sont les suivantes :

- Séquence avançant trop lentement

*« Peut-être un peu trop lent car malgré le cours chouette on s'ennuie quand on a compris. »*

*« Le cours était intéressant, mais je le trouvais un peu lent. Ça aurait été mieux si on avait passé un peu moins de temps ou qu'il y avait des exercices ou variations d'exercices différents. »*

- Séquence avançant trop rapidement

*« On aurait peut-être pu avoir plus de temps pour les exercices. »*

*« Peut-être auriez-vous pu aller plus lentement au début (lorsqu'on synthétisait les premières molécules) car je n'ai pas eu vraiment le temps de comprendre à ce moment-là »*

- Matière pas vue en profondeur

*« Le seul point négatif c'est qu'on n'a qu'une seule chose et j'aurais voulu plus approfondir le sujet. »*

*« J'aurais aimé que ça aille plus loin (avec une expérience ou quelque chose de la sorte) »*

*« Peut-être juste le principe un peu trop simple, il faut suivre les flèches et écrire ce qu'il y a sur la légende quoi... »*

*« Je trouve qu'une approche plus profonde serait intéressante. »*

- Distribuer le tableau dès le départ

*« Mais je trouverais plus constructif de d'abord nous donner les schémas utiles pour faire les exercices, et puis ensuite nous les expliquer, pour peut-être avancer plus vite et voir plus de matière, au lieu de le réécrire au tableau et puis le donner. »*

*« Ce serait peut-être intéressant de donner les tableaux plus tôt afin de mieux visualiser ? »*

- Pas assez d'expériences

*« Peut-être plus d'observations pratiques, expériences ou quoi. »*

*« Saurait-on faire ces transformations en vrai ? Une expérience ? Quelque chose de plus interactif ? »*

*« Dommage qu'on n'ait pas eu plus de visuel (vidéo, expériences, ...). »*

De manière générale, certains élèves auraient voulu passer plus de temps sur une partie de la séquence tandis que d'autres élèves auraient voulu aller plus vite. Au vu du faible pourcentage de remarques de ce genre, nous en concluons que nous allons globalement à une vitesse correcte pour l'ensemble de la classe. Certains élèves ont indiqué qu'ils auraient voulu avoir le tableau de réactivité dès le départ, cependant nous restons persuadés que la construction du tableau fait partie intégrante de l'apprentissage des élèves, et leur permet de s'appropriier sa signification en étant plus actifs. Quelques élèves mentionnent également leur souhait d'une partie plus pratique.

En conclusion, nous constatons que les élèves donnent des avis majoritairement positifs. Ils ont apprécié la séquence d'apprentissage dans son fond et sa forme. La matière abordée les intéresse et certains élèves aimeraient l'aborder plus en profondeur. Si possible, il serait pertinent d'intégrer une expérience à la séquence d'apprentissage.

### L'avis des enseignants

Les enseignants nous ont fait part de leurs retours sur la séquence d'apprentissage directement après chaque séquence, de manière informelle et spontanée. Par la suite, nous avons demandé aux enseignants de remplir un sondage afin d'avoir un avis plus rigoureux sur la question.

Le **retour direct** des enseignants nous a aidés pour adapter notre séquence d'apprentissage au fur et à mesure des tests que nous avons effectués dans les écoles. De manière générale, les retours sont positifs et encourageants.

Le **sondage** proposé aux enseignants quelques mois après avoir présenté la séquence d'apprentissage à leur classe a permis de mettre en avant que :

- Tous les enseignants sont d'accord de dire que la séquence d'apprentissage est applicable auprès de leurs élèves.
- Un enseignant pense que la séquence d'apprentissage prend trop de temps par rapport au contenu qu'elle délivre aux élèves.
- Tous les enseignants pensent que leurs élèves ont été intéressés par le contenu de la séquence d'apprentissage et qu'elle ne les a pas perturbés par rapport à leur cours habituel.
- Un seul enseignant ne pense pas que la séquence d'apprentissage soit utilisable avec des élèves de Sciences de Base.
- Aucun enseignant ne pense qu'il y a trop de fonctions différentes présentes dans la séquence d'apprentissage.
- Tous les enseignants pensent que la séquence d'apprentissage est très différente de leur cours de chimie organique habituel. Ils pensent tous qu'elle présente un intérêt supplémentaire à leur cours de chimie organique habituel.
- Tous les enseignants ont trouvé la séquence d'apprentissage intéressante.
- Un enseignant a trouvé la séquence d'apprentissage trop compliquée pour la donner lui-même à ses élèves dès l'année prochaine.
- Tous les enseignants pensent que la séquence d'apprentissage permet à leurs élèves de mieux comprendre ce qu'est la chimie organique.
- La séquence d'apprentissage correspond bien au programme de chimie organique pour tous les enseignants, sauf un.
- La séquence d'apprentissage présente un niveau de difficulté similaire à l'enseignement que proposent tous les enseignants, sauf un qui estime qu'elle a un niveau de difficulté inférieur à son cours habituel.
- Tous les enseignants pensent que leurs élèves ont apprécié la séquence d'apprentissage.
- Certains enseignants sont prêts à donner la séquence d'apprentissage à leurs élèves telle quelle, mais la moitié des enseignants préfère y apporter de légères modifications. Un enseignant préfère ne pas utiliser la séquence d'apprentissage afin de respecter le programme.

Nous pouvons en conclure que la grande majorité des enseignants ayant collaboré avec nous ont été ravis de la séquence proposée à leurs élèves. Les contraintes imposées par l'école ou le référentiel de compétences empêchent certains enseignants d'utiliser cette séquence à l'avenir, mais d'autres enseignants ont déjà pu modifier leur cours, par exemple en incluant un tableau réactionnel.

## **Perspectives pour l'enseignement de la séquence**

Cette seconde séquence d'apprentissage semble avoir été bien accueillie par les élèves et par les enseignants. Les résultats de l'évaluation suivant la séquence indiquent que les élèves ont correctement intégré la matière que nous leur avons proposée. L'utilisation du tableau de réactivité est bien acquise et est appréciée des élèves, qui le considèrent comme un outil précieux pour mieux comprendre les connexions que les réactions organiques permettent de faire entre les différentes fonctions. Ainsi, les différents objectifs d'apprentissage visés par la séquence ont été atteints au sein de l'échantillon d'élèves que nous avons eu l'occasion de tester.

À l'avenir, nous aimerions cependant apporter quelques modifications à la séquence d'apprentissage. En effet, nous avons été agréablement surpris de constater que les élèves réussissent les exercices très rapidement et qu'ils sont demandeurs d'exercices différents, voire plus difficiles, ainsi que d'aborder la matière plus en profondeur. Nous encourageons donc les enseignants à développer d'autres exercices à effectuer à l'aide du tableau de réactivité, afin de « challenger » les élèves. Voici quelques exemples d'exercices possibles :

- Donner un précurseur et les différentes réactions qu'on réalise sur celui-ci, en précisant quelle fonction va réagir, et demander à l'élève de dessiner la molécule finale.
- Donner un tableau incomplet à l'élève et lui demander de le compléter (fonctions manquantes ou réactions manquantes). Les réactions peuvent être complétées par comparaison avec des réactions analogues et les fonctions peuvent être dessinées par application d'une réaction à une autre fonction, par exemple. Notre objectif n'est pas que l'élève complète le tableau parce qu'il l'a appris par cœur et qu'il est capable de le restituer.
- Ajouter une nouvelle fonction au tableau et demander à l'élève d'imaginer à partir de quelle fonction elle peut être synthétisée et par quelle réaction (par exemple, ajouter les alcynes qui peuvent être obtenus par déshydrogénation des alcènes, réaction similaire à la déshydrogénation des alcanes menant aux alcènes).
- Décrire une nouvelle réaction et demander à l'élève de dessiner la molécule résultante (par exemple, la condensation de deux alcools qui donne un éther, fonction qu'ils ne connaissent pas, ou encore la condensation d'une amine et d'un ester donnant un amide).

Nous imaginons introduire l'idée de « groupe protecteur » auprès des élèves afin de permettre d'effectuer des synthèses plus proches de la réalité. Jusqu'ici, nous ne prenions pas en compte le fait que plusieurs fonctions peuvent réagir simultanément lors d'une réaction. Par exemple, si nous effectuons une réduction sur une molécule comportant une cétone et un acide carboxylique, les deux fonctions peuvent réagir et nous obtiendrons ainsi deux alcools sur la molécule finale. Si nous ne voulons faire réagir que l'acide carboxylique et pas la cétone, il faudra donc protéger la cétone. Sans entrer dans les détails de la structure du groupement protecteur de la cétone, nous pouvons expliquer aux élèves qu'il faut protéger la fonction cétone afin de ne pas la réduire, effectuer la réduction de l'acide carboxylique, et ensuite déprotéger la cétone. Ce concept nouveau permettrait d'introduire un niveau supplémentaire aux exercices proposés.

Une amélioration possible de cette séquence serait d'y introduire, dans la mesure du possible, une expérience. En fonction du matériel disponible dans l'école, il serait pertinent de faire faire une petite synthèse organique simple aux élèves. Si l'école ne possède pas de laboratoire permettant de faire une synthèse, il serait intéressant d'emmener les élèves visiter un laboratoire afin de constater la différence entre la théorie, très simple, et la pratique, beaucoup plus complexe. La mise en situation concrète d'une synthèse organique est l'occasion d'introduire auprès des élèves de nouvelles problématiques propres au chimiste organicien :

- La séparation des molécules produites lors d'une réaction organique
- L'identification des molécules produites lors d'une réaction organique

Des méthodes de séparation simples peuvent être expliquées ou montrées aux élèves, par exemple la distillation ou la cristallisation. Certaines méthodes d'identification peuvent également être rapidement introduites auprès des élèves. Par exemple, un spectromètre de masse peut indiquer la masse d'un composé, un spectroscope infrarouge peut indiquer aux élèves la présence de certains types de liaisons au sein d'une molécule. L'introduction de ces méthodes d'analyse permettrait de proposer aux élèves d'autres types d'exercices nécessitant plus de réflexion.

Une autre approche possible serait de demander aux élèves d'effectuer un travail de groupe sur une synthèse plus complexe que celles vues en classe. Chaque groupe d'élèves se verrait attribuer une molécule et devrait rechercher comment synthétiser cette molécule. Cette approche permettrait aux élèves de se rendre compte de l'énorme diversité des réactions organiques possibles en plongeant directement dans la littérature organique.



## Conclusions & Perspectives

Le travail présenté dans cet ouvrage se base sur une constatation établie aussi bien suite à la lecture de la littérature que suite à une expérience professionnelle personnelle : face à l'apprentissage de la chimie organique, les apprenants tendent à favoriser la mémorisation plutôt que la compréhension, ce qui ne semble pas favorable à la maîtrise de la chimie organique. Ce travail de recherche a été effectué afin d'analyser les conceptions alternatives des élèves et de tenter de favoriser la compréhension au détriment de la mémorisation par le biais d'une réorganisation du contenu à enseigner ainsi que de propositions de nouvelles manières d'enseigner ce contenu. Nous avons ainsi cherché à répondre aux différentes questions de recherche par le biais de questionnaires, d'entretiens et de tests d'outils didactiques. Ces questions se résument à l'identification des conceptions alternatives présentes chez les apprenants, au sujet de la chimie organique, ainsi qu'au développement de deux séquences d'apprentissage permettant de les éviter.

Une analyse poussée des différents questionnaires et entretiens effectués avec un large panel d'élèves a permis de mettre en évidence une vingtaine de conceptions alternatives largement présentes chez les élèves. Au vu du grand nombre de conceptions alternatives à traiter, nous avons fait le choix de nous focaliser sur deux thèmes particuliers pour le reste de notre travail. Ces thèmes ont été sélectionnés sur base des résultats des élèves aux différents outils diagnostiques qui leur ont été présentés. Nous nous sommes ainsi focalisés sur la chimie organique dans sa définition même et dans sa présence dans notre vie quotidienne, ainsi que sur la synthèse de composés organiques, ce qui nous a menés à développer deux séquences d'apprentissage distinctes.

Nous avons ainsi proposé une réorganisation du savoir à enseigner, qui n'est plus structuré par fonction organique, mais que nous choisissons de structurer par thèmes, en abordant de front toutes les fonctions organiques. Cette proposition est accompagnée d'« évaluations types » s'adaptant à cette réorganisation.

Une première séquence d'apprentissage permet d'aborder la chimie organique par le biais de la vie quotidienne et de découvrir toutes les fonctions organiques nécessaires durant l'enseignement secondaire. La mise en œuvre de cette séquence permet aux élèves d'éviter certaines conceptions alternatives en les aidant à ancrer la définition correcte de la chimie organique et à reconnaître les molécules faisant ou ne faisant pas partie de la chimie organique. La séquence permet également aux élèves de comprendre ce qu'est un polymère et d'appréhender correctement les différentes fonctions organiques, leur reconnaissance étant grandement facilitée pour les élèves.

Certains enseignants ont testé cette séquence directement avec leurs élèves, dans le cadre de ce travail et en dehors du cadre de cette thèse, avec des résultats positifs, que ce soit par rapport à l'utilisation du support de préparation de cours fourni à l'enseignant ou par rapport à l'intérêt et à la compréhension des élèves. Ces premiers résultats sont donc encourageants pour une diffusion future de ce support de cours auprès des enseignants.

La deuxième séquence d'apprentissage développée permet de clôturer le chapitre de la chimie organique en abordant la synthèse organique par la « synthèse théorique » de médicaments, afin de faire découvrir aux élèves que les réactions chimiques peuvent être vues d'une manière différente de ce qu'ils ont vu jusque-là. Nous avons montré que les élèves sont tout à fait capables de comprendre

et d'utiliser un tableau de réactivité et que nous pourrions, à l'avenir, aller plus loin dans ce domaine en leur proposant plus de contenu et des exercices plus complexes. Certains tests ont déjà été effectués dans ce sens, hors du cadre de cette thèse, avec des résultats prometteurs.

De manière générale, ces deux séquences d'apprentissage montrent la pertinence de la réorganisation du savoir à enseigner telle que nous l'avons imaginée, c'est-à-dire en parcourant la chimie organique thème par thème et en étudiant toutes les fonctions organiques en parallèle. La littérature a déjà mis en avant la non-pertinence de la structuration par fonction dans l'enseignement supérieur ; nous confirmons ainsi que cette tendance devrait également être suivie dès l'enseignement secondaire.

Cette approche permet aux élèves de travailler avec un tableau de reconnaissance des fonctions organiques ainsi qu'un tableau de réactivité, ce qui les incite à comprendre comment utiliser ces outils plutôt que d'apprendre par cœur une série de définitions. L'utilisation de tels outils permet également d'approfondir la matière et d'aborder avec les élèves des problèmes de synthèse organique qui ne sont que très peu, voire pas du tout, abordés lors d'un enseignement plus classique.

Les perspectives possibles de ce travail sont variées. Nous allons en aborder quelques-unes dans les paragraphes suivants.

Nous avons établi, lors de notre revue de la littérature, qu'il existe trois grandes voies de recherche en didactique de la chimie organique. Notre travail se place dans le cadre d'une proposition de nouvelles manières d'enseigner ainsi que dans celui d'une modification du contenu à enseigner. La troisième voie explorée par les chercheurs est une approche basée sur les modes d'apprentissage et la compréhension des apprenants, voie que nous n'avons volontairement pas étudiée. Il serait intéressant d'effectuer une étude basée sur cet axe afin d'approfondir l'origine des différentes conceptions alternatives mises en évidence chez les élèves et de déterminer quels outils didactiques pourraient être les plus à même d'accompagner chaque élève face à ses propres conceptions alternatives.

Notre recherche s'étant focalisée sur les deux dernières années du secondaire, nous n'avons pas pu établir l'efficacité des outils didactiques développés à plus long terme. Ainsi, il nous semble pertinent de suivre des élèves sur une plus longue période afin de déterminer si les séquences d'apprentissage développées ont un impact positif à long terme, par exemple lors d'études universitaires scientifiques.

Les séquences d'apprentissages développées l'ont été selon un processus d'amélioration itératif, chaque test nous permettant d'améliorer la séquence. Ces séquences sont donc constamment améliorables, comme nous l'avons déjà précisé précédemment dans ce travail. Un ajout qui pourrait se révéler particulièrement pertinent serait celui d'une séance de laboratoire. En effet, nous trouvons dans la littérature de nombreuses études favorables à l'utilisation du laboratoire pour augmenter l'intérêt et la compréhension des élèves. Nous avons fait le choix de ne pas inclure de laboratoire dans les séquences proposées afin de rendre celles-ci utilisables dans toutes les écoles, quel que soit le matériel disponible. Cependant, nous pensons qu'il serait intéressant de développer une manipulation à effectuer avec les élèves au cours de chacune des séquences d'apprentissage proposées, et de tester leur influence sur la compréhension des élèves.

Nous nous sommes concentrés sur deux thèmes pour le développement des séquences d'apprentissage. Il serait tout à fait pertinent de construire des séquences d'apprentissage autour des autres thèmes, que nous n'avons pas eu le temps de traiter au cours de ce travail, afin de construire un cours cohérent autour des chapitres de la chimie organique. Le fait d'aborder l'entièreté des fonctions organiques dès le début nous permet d'introduire la nomenclature, la structure et les propriétés des molécules d'une manière également inédite afin de profiter des avantages de cette structure de cours au travers des autres thèmes abordés.

En parallèle à ces séquences d'apprentissage globales, il serait également intéressant de préparer des outils de remédiation plus ciblés autour de chaque conception alternative observée chez les élèves. En effet, les séquences développées n'ont pas permis d'éradiquer toutes les conceptions alternatives des élèves, certaines étant encore et toujours présentes. Des outils supplémentaires semblent donc nécessaires afin de permettre aux élèves présentant ces conceptions alternatives de les éliminer.

Pour terminer, une perspective, qui nous semble la plus importante, serait de rapidement diffuser ce travail auprès des enseignants. En effet, l'intérêt premier du développement de ces séquences d'apprentissage est que celles-ci soient utilisées par les enseignants auprès des élèves. Il nous semble donc important d'utiliser des moyens de communication et de formation utilisés par les enseignants pour faire connaître ces séquences au plus grand nombre.



## Bibliographie

- [1] D. Lafarge, « Analyse didactique de l'enseignement-apprentissage de la chimie organique jusqu'à bac+2 pour envisager sa restructuration », Thèse de Doctorat, Clermont Université - Université Blaise Pascal, 2010.
- [2] T. L. Anderson et G. M. Bodner, « What can we do about 'Parker'? A case study of a good student who didn't 'get' organic chemistry », *Chem. Educ. Res. Pr.*, vol. 9, n° 2, p. 93-101, 2008.
- [3] A. Z. Bradley, S. M. Ulrich, M. Jones Jr, et S. M. Jones, « Teaching the sophomore organic course without a lecture. Are you crazy? », *J. Chem. Educ.*, vol. 79, n° 4, p. 514, 2002.
- [4] J. M. Duis, « Organic Chemistry Educators' Perspectives on Fundamental Concepts and Misconceptions: An Exploratory Study », *J. Chem. Educ.*, vol. 88, n° 3, p. 346-350, mars 2011.
- [5] D. Lafarge, « L'actuel défi de la chimie organique : son enseignement », *Actual. Chim.*, vol. 385, p. 21-24, 2013.
- [6] P. Spindler, G. Meyer, et J. H. Meerburg, *Annalen der physik und chemie*, Zwölfter band., vol. 88. Leipzig, 1828.
- [7] D. Mckie, « Wöhler's "Synthetic" Urea and the Rejection of Vitalism: A Chemical Legend », *Nature*, vol. 153, n° 3890, p. 608-610, mai 1944.
- [8] P. J. Ramberg, « The Death of Vitalism and The Birth of Organic Chemistry: Wohler's Urea Synthesis and the Disciplinary Identity of Organic Chemistry », *Ambix*, vol. 47, n° 3, p. 170-195, nov. 2000.
- [9] J. Jacques, « Le vitalisme et la chimie organique pendant la première moitié du XIXème siècle. », *Rev. Hist. Sci. Leurs Appl.*, vol. 3, n° 1, p. 32-66, 1950.
- [10] S. Tomic, « Aux origines de la chimie organique - Méthodes et pratiques des pharmaciens et des chimistes (1785-1835) », Presses universitaires de Rennes, Collection Carnot, 2010.
- [11] S. Tomic, « Les origines de la chimie organique au-delà du mythe fondateur », *Comptes Rendus Chim.*, vol. 15, n° 7, p. 553-568, juill. 2012.
- [12] A. J. Roche, « The Quiet Revolution: Herman Kolbe and the Science of Organic Chemistry », University of California Press. Berkeley / Los Angeles / London, 1993.
- [13] A. Ladenburg, « Histoire du développement de la chimie depuis Lavoisier jusqu'à nos jours », Librairie scientifique A. Hermann et fils, Paris, 1909.
- [14] J.-B. Dumas, « Traité de chimie appliquée aux arts », Chez Béchét Jeune, Paris, 1835.
- [15] A.-F. Fourcroy, « Système des connaissances chimiques », Baudouin, Imprimeur de l'Institut national des Sciences, Paris, 1800.
- [16] J.-B. Dumas, « Leçons sur la philosophie chimique », Gauthier-Villars, Paris, 1836.
- [17] A.-L. Lavoisier, A.-F. Fourcroy, C.-L. Berthollet, et L.-B. Guyton de Morveau, « Méthode de nomenclature chimique », Chez Cuchet, Paris, 1787.
- [18] A. Bourgoin, « Principes de la classification des substances organiques », Librairie J-B Baillièrè et fils, Paris, 1876.
- [19] A. Colson, « Contribution à l'histoire de la chimie. A propos du livre de M. Ladenburg sur l'histoire du développement de la chimie depuis Lavoisier », Librairie scientifique A. Hermann et fils, Paris, 1910.
- [20] E. Chevreul, « Recherches chimiques sur les corps gras d'origine animale », Chez F. G. Levrault. Paris, 1823.
- [21] E. Chevreul, « Considérations générales sur l'analyse organique et sur ses applications », Chez F. G. Levrault, Paris, 1824.
- [22] Gay-Lussac et Arago, *Annales de chimie et de physique*, Masson et cie éditeurs., vol. 34, Paris, 1827.
- [23] Gay-Lussac et Arago, *Annales de chimie et de physique*, Masson., vol. 52, Paris, 1833.
- [24] Gay-Lussac et Arago, *Annales de chimie et de physiques*, Masson., vol. 58, Paris, 1835.
- [25] A.-F. Fourcroy, « Philosophie chimique ou vérités fondamentales de la chimie moderne », Chez Emmanuel Flon, Bruxelles, 1806.
- [26] A.-L. Lavoisier, « Traité élémentaire de chimie », Chez Cuchet, Paris, 1789.

- [27] Gay-Lussac et Arago, *Annales de chimie et de physique*, Masson., vol. 51. Paris, 1832.
- [28] L.-J. Thénard, « Traité de chimie élémentaire, théorique et pratique », Crochard Libraire-Editeur, Paris, 1835.
- [29] J.-B. Dumas et J. Liebig, « Notes sur l'état actuel de la chimie organique », *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, Bachelier Imprimeur-Libraire, Paris, 23 octobre 1837.
- [30] C. Gerhardt, « Recherche sur la classification des substances organiques », *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'académie des sciences*, Bachelier Imprimeur-Libraire, vol. 15. Paris, 1842.
- [31] C. Gerhardt, « Traité de chimie organique », Chez Firmin Didot Frères, Paris, 1853.
- [32] A. Wurtz, « Leçons de philosophie chimique », Hachette, Paris, 1864.
- [33] M. Berthelot, « La synthèse chimique », Germer Baillière, Paris, 1876.
- [34] W. Odling, « Remarks on the doctrine of equivalents », *Philosophical Magazine*, vol. 16, n° 104, p. 37-45, 1858.
- [35] M. Delacre, « Histoire de la chimie », Gauthier-Villars et Cie éditeurs, Paris, 1920.
- [36] E. Chevreul, J.-B. Dumas, T.-J. Pelouze, J.-B. Boussingault, H. V. Regnault, et H. De Senarmont, *Annales de chimie et de physique*, Masson., vol. 53. Paris, 1858.
- [37] Gay-Lussac et Arago, *Annales de chimie et de physique*, Masson., vol. 47, Paris, 1831.
- [38] L. Pasteur, « Leçons de chimie », Hachette, Paris, 1861.
- [39] J. Van't Hoff, « La chimie dans l'espace », Seconde édition sous le titre : « Dix années dans l'histoire d'une théorie », Bazendyk, Rotterdam, 1874.
- [40] G. M. Richardson, « The foundations of stereo chemistry : Memoirs by Pasteur, Van't Hoff, Lebel and Wislicenus », American Book Co. New York, 1901.
- [41] A. Kékulé, « Sur la constitution des substances aromatiques », *Bulletin de la Société chimique de Paris*, p. 98, Hachette, Paris, 1865.
- [42] A. Kékulé, « Untersuchungen uber aromatische Verbindungen », *Ann. Chem. Pharm.*, vol. 137, n° 2, p. 129-196, 1866.
- [43] M. Berthelot, « Chimie Organique fondée sur la synthèse », *Mallet-Bachelier, Imprimeur-Libraire*, Paris, 1860.
- [44] C. Gerhardt, « Untersuchungen über die wasserfreien organischen Säuren », *Liebigs Ann.*, vol. 87, n° 2, p. 149-179, 1853.
- [45] V. Fuster et J. Sweeny, « Aspirin : A historical and contemporary therapeutic overview », *Contemp. Rev. Cardiovasc. Med.*, vol. 123, n° 7, p. 768-778, 2011.
- [46] R. B. Woodward, F. Sondheimer, et D. Taub, « THE TOTAL SYNTHESIS OF CHOLESTEROL », *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 73, n° 7, p. 3548-3548, juill. 1951.
- [47] A. G. Khan et S. V. Eswaran, « Woodward's synthesis of vitamin B12 », *Resonance*, vol. 8, n° 6, p. 8-16, 2003.
- [48] R. B. Woodward, « The total synthesis of vitamin B12 », *direct transcript of a lecture presented on 12 February 1972*, Harvard University, Cambridge, p. 145-177.
- [49] R. A. Holton, C. Somoza, H. B. Kim, F. Liang, R. J. Biediger, P.D. Boatman, M. Shindo, C. C. Smith, S. Kim, « First total synthesis of taxol. 1. Functionalization of the B ring », *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 116, n° 4, p. 1597-1598, février 1994.
- [50] R. A. Holton, C. Somoza, H. B. Kim, F. Liang, R. J. Biediger, P.D. Boatman, M. Shindo, C. C. Smith, S. Kim, « First total synthesis of taxol. 2. Completion of the C and D rings », *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 116, n° 4, p. 1599-1600, février 1994.
- [51] K. C. Nicolaou, Z. Yang, J. J. Liu, H. Ueno, P. G. Nantermet, R. K. Guy, C. F. Clairborne, J. Renaud, E. A. Couladouros, K. Paulvannan, E. J. Sorensen, « Total synthesis of taxol », *Nature*, vol. 367, n° 6464, p. 630-634, février 1994.
- [52] R. D. Rossi, « What Does the Acid Ionization Constant Tell You? An Organic Chemistry Student Guide », *J. Chem. Educ.*, vol. 90, n° 2, p. 183-190, février 2013.
- [53] N. P. Grove, M. M. Cooper, et E. L. Cox, « Does Mechanistic Thinking Improve Student Success in Organic Chemistry? », *J. Chem. Educ.*, vol. 89, n° 7, p. 850-853, juin 2012.

- [54] N. P. Grove, J. W. Hershberger, et S. L. Bretz, « Impact of a spiral organic curriculum on student attrition and learning », *Chem. Educ. Res. Pract.*, vol. 9, n° 2, p. 157–162, 2008.
- [55] M. A. Hass, « Student-directed learning in the organic chemistry laboratory », *J Chem Educ*, vol. 77, n° 8, p. 1035, 2000.
- [56] J. Henderleiter, R. Smart, J. Anderson, et O. Elian, « How Do Organic Chemistry Students Understand and Apply Hydrogen Bonding? », *J. Chem. Educ.*, vol. 78, n° 8, p. 1126, 2001.
- [57] L. C. Hodges et L. C. Harvey, « Evaluation of Student Learning in Organic Chemistry Using the SOLO Taxonomy », *J. Chem. Educ.*, vol. 80, n° 7, p. 785, 2003.
- [58] G. T. Rushton, R. C. Hardy, K. P. Gwaltney, et S. E. Lewis, « Alternative conceptions of organic chemistry topics among fourth year chemistry students », *Chem Educ Res Pr.*, vol. 9, n° 2, p. 122-130, 2008.
- [59] T. Platt, V. Roth, et J. A. Kampmeier, « Sustaining change in upper level courses: peer-led workshops in organic chemistry and biochemistry », *Chem Educ Res Pr.*, vol. 9, n° 2, p. 144-148, 2008.
- [60] B. G. Bowman, J. M. Karty, et G. Gooch, « Teaching a Modified Hendrickson, Cram, and Hammond Curriculum in Organic Chemistry », *J. Chem. Educ.*, vol. 84, n° 7, p. 1209, 2007.
- [61] M. Taagepera et S. Noori, « Mapping Students' Thinking Patterns in Learning Organic Chemistry by the Use of Knowledge Space Theory », *J. Chem. Educ.*, vol. 77, n° 9, p. 1224, 2000.
- [62] A. L. Raymond Le Goaller, « Les statuts du savoir et la transposition didactique en chimie organique », *Actual. Chim.*, p. 27-31, 2000.
- [63] P. Chaquin et F. Fuster, « Enseigner la Chimie Organique avec les orbitales. Présentation d'une base de données d'orbitales moléculaires », *Actual. Chim.*, p. 37-44, 2012.
- [64] S. David, « Pour un enseignement de la chimie organique sans formules de Lewis ni orbitales hybrides », *Actual. Chim.*, p. 19-24, 1999.
- [65] S. David, « La théorie de la mésomérie telle qu'on l'enseigne - Vers une « révision déchirante » », *Actual. Chim.*, n° 275, p. 29-32, 2004.
- [66] A. N. Loumouamou, « Contribution à l'étude de la transposition didactique en chimie organique », Thèse de Doctorat, Université de Grenoble 1, 1998.
- [67] X. Bataille, « Comment enseigner la chimie organique ? », *Actual. Chim.*, vol. 396, p. 16-18, 2014.
- [68] A. K. Hassan, R. A. Hill, et N. Reid, « Ideas underpinning success in an introductory course in organic chemistry », *Univ. Chem. Educ.*, vol. 8, n° 2, p. 40–51, 2004.
- [69] R. Bucat, « Pedagogical content knowledge as a way forward: applied research in chemistry education », *Chem Educ Res Pr.*, vol. 5, n° 3, p. 215-228, 2004.
- [70] J. Perna et M. Aksela, « Learning Organic Chemistry through a Study of Semiochemicals », *J. Chem. Educ.*, vol. 88, n° 12, p. 1644-1647, déc. 2011.
- [71] T. Vachliotis, K. Salta, P. Vasiliou, et C. Tzougraki, « Exploring Novel Tools for Assessing High School Students' Meaningful Understanding of Organic Reactions », *J. Chem. Educ.*, vol. 88, n° 3, p. 337-345, mars 2011.
- [72] A. O' Dwyer, P. E. Childs, N. Hanly, « Difficulties with Organic Chemistry at Third-Level - Perspectives of Irish students and lecturers », *4th Eurovariety in Chemistry Education Conference*, 2011.
- [73] A. O' Dwyer et P. E. Childs, « Organic Chemistry in Action! Developing an Intervention Program for Introductory Organic Chemistry To Improve Learners' Understanding, Interest, and Attitudes », *J. Chem. Educ.*, vol. 91, n° 7, p. 987-993, juillet 2014.
- [74] T. N. Hrin, D. D. Milenković, et M. D. Segedinac, « The Effect of Systemic Synthesis Questions [SSynQs] on Students' Performance and Meaningful Learning in Secondary Organic Chemistry Teaching », *Int. J. Sci. Math. Educ.*, vol. 14, n° 5, p. 805-824, juin 2016.
- [75] L. E. Slocum et E. K. Jacobsen, « Organic Chemistry in the High School Curriculum », *J. Chem. Educ.*, vol. 87, n° 4, p. 348–349, 2010.
- [76] J. Liebermann Jr, « Introductory organic chemistry with instrumental analysis: A third year high school chemistry course », *J Chem Educ*, vol. 62, n° 4, p. 321, 1985.

- [77] I. D. Reingold, « Bioorganic First: A New Model for the College Chemistry Curriculum », *J. Chem. Educ.*, vol. 78, n° 7, p. 869, 2001.
- [78] R. D. Libby, « Piaget and organic chemistry: The equilibrium-kinetic approach for teaching introductory organic chemistry », *J. Chem. Educ.*, vol. 68, n° 8, p. 634, 1991.
- [79] R. D. Libby, « Piaget and Organic Chemistry: Teaching Introductory Organic Chemistry through Learning Cycles », *J. Chem. Educ.*, vol. 72, n° 7, p. 626, 1995.
- [80] S. Murov, « Reaction-map of organic chemistry », *J Chem Educ*, vol. 84, n° 7, p. 1224, 2007.
- [81] P. H. Scudder, « Database vs. Expert System Teaching Paradigms: Using Organic Reaction Mechanisms To Teach Chemical Intuition », *J. Chem. Educ.*, vol. 74, n° 7, p. 777, 1997.
- [82] N. Graulich, « The tip of the iceberg in organic chemistry classes: how do students deal with the invisible? », *Chem Educ Res Pr.*, vol. 16, n° 1, p. 9-21, 2015.
- [83] G. Ourisson, « Le langage universel de la chimie : les idéogrammes. Ambiguïtés et laxismes », *Actual. Chim.*, vol. 1-2, p. 41-46, 1986.
- [84] M. L. Zieba, « Teaching and Learning About Reaction Mechanisms In Organic Chemistry », Thèse de Doctorat, University of Western Australia, 2004.
- [85] S. Agrebi, « De la représentation symbolique au langage lors de l'apprentissage des mécanismes en chimie organique dans l'enseignement supérieur », Thèse de Doctorat, Université Lumière Lyon 2 - Université de Tunis, 2004.
- [86] Barlet, Alagui, Bouab, et Mahrouz, « Un exemple de la transposition didactique en chimie organique dans l'enseignement expérimental : étude critique de la régiosélectivité de l'addition de HBr aux alcènes dissymétriques », *Actual. Chim.*, vol. 217, p. 26-29, 1999.
- [87] P. S. Bailey Jr et C. A. Bailey, « A program for relevant organic chemistry in high school », *J Chem Educ*, vol. 48, n° 4, p. 263, 1971.
- [88] E. Lopez, J. Kim, K. Nandagopal, N. Cardin, R. J. Shavelson, et J. H. Penn, « Validating the use of concept-mapping as a diagnostic assessment tool in organic chemistry: implications for teaching », *Chem Educ Res Pr.*, vol. 12, n° 2, p. 133-141, 2011.
- [89] W. Beasley, « High school organic chemistry studies: Problems and prospects », *J Chem Educ*, vol. 57, n° 11, p. 807, 1980.
- [90] E.-I. Ochiai, « Organic chemistry in high school », *J. Chem. Educ.*, vol. 65, n° 7, p. 604, 1988.
- [91] K. B. Offei-Koranteng, « Improving senior high school students' performance in organic chemistry using laboratory based method », University of education, Winneba, Ghana, 2013.
- [92] J. E. Howell, « Especially for High School Teachers », *J. Chem. Educ.*, vol. 77, n° 3, p. 281, 2000.
- [93] P. D. L. Rosa, K. A. Azurin, et M. F. Z. Page, « Soybean Oil: Powering a High School Investigation of Biodiesel », *J. Chem. Educ.*, vol. 91, n° 10, p. 1689-1692, oct. 2014.
- [94] T. Vachliotis, K. Salta, et C. Tzougraki, « Meaningful Understanding and Systems Thinking in Organic Chemistry: Validating Measurement and Exploring Relationships », *Res. Sci. Educ.*, vol. 44, n° 2, p. 239-266, avr. 2014.
- [95] J. P. Hagen, « Flow charting leaving group reactions », *J. Chem. Educ.*, vol. 65, n° 7, p. 620, 1988.
- [96] C. Benezra, « La chimie des flèches ou la notion d'agresseur et d'agressé en chimie organique », *Actual. Chim.*, vol. 22, p. 21, 1975.
- [97] D. A. Vosburg, « Teaching Organic Synthesis: A Comparative Case Study Approach », *J. Chem. Educ.*, vol. 85, n° 11, p. 1519, 2008.
- [98] D. R. Paulson, « Active Learning and Cooperative Learning in the Organic Chemistry Lecture Class », *J. Chem. Educ.*, vol. 76, n° 8, p. 1136, 1999.
- [99] L. T. Tien, V. Roth, et J. A. Kampmeier, « Implementation of a peer-led team learning instructional approach in an undergraduate organic chemistry course », *J. Res. Sci. Teach.*, vol. 39, n° 7, p. 606-632, sept. 2002.
- [100] J. K. Heeren, « Teaching chemistry by the Socratic method », *J. Chem. Educ.*, vol. 67, n° 4, p. 330, 1990.
- [101] J. W. Ellis, « How Are We Going To Teach Organic If the Task Force Has Its Way? Some Observations of an Organic Professor », *J. Chem. Educ.*, vol. 71, n° 5, p. 399, 1994.



- [102] R. R. Chamala, R. Ciochina, R. B. Grossman, R. A. Finkel, S. Kannan, et P. Ramachandran, « EPOCH: An Organic Chemistry Homework Program That Offers Response-Specific Feedback to Students », *J. Chem. Educ.*, vol. 83, n° 1, p. 164, 2006.
- [103] J. J. Esteb, J. R. Magers, L. McNulty, et A. M. Wilson, « Projects That Assist with Content in a Traditional Organic Chemistry Course », *J. Chem. Educ.*, vol. 83, n° 12, p. 1807, 2006.
- [104] G. M. Bodner, « Why changing the curriculum may not be enough », *J. Chem. Educ.*, vol. 69, n° 3, p. 186, 1992.
- [105] J. J. Mullins, « Six Pillars of Organic Chemistry », *J. Chem. Educ.*, vol. 85, n° 1, p. 83, 2008.
- [106] D. L. Lafarge, L. M. Morge, et M. M. Méheut, « A New Higher Education Curriculum in Organic Chemistry: What Questions Should Be Asked? », *J. Chem. Educ.*, vol. 91, n° 2, p. 173-178, févr. 2014.
- [107] C. W. Bowen, « Representational systems used by graduate students while problem solving in organic synthesis », *J. Res. Sci. Teach.*, vol. 27, n° 4, p. 351–370, 1990.
- [108] Ministère de la Communauté Française, « Compétences terminales et savoirs requis en sciences », 2001.
- [109] Ministère de la Communauté Française, « Compétences terminales et savoirs requis en sciences générales - Humanités générales et technologiques », 2015.
- [110] G. Bodner, M. Klobuchar, et D. Geelan, « The many forms of constructivism », *J. Chem. Educ.*, vol. 78, p. 1107, 2001.
- [111] K. S. Taber, « The significance of implicit knowledge for learning and teaching chemistry », *Chem Educ Res Pr.*, vol. 15, n° 4, p. 447-461, 2014.
- [112] K. S. Taber, « An alternative conceptual framework from chemistry education », *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 20, n° 5, p. 597-608, juin 1998.
- [113] K. S. Taber, « Multiple frameworks?: Evidence of manifold conceptions in individual cognitive structure », *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 22, n° 4, p. 399-417, avr. 2000.
- [114] K. S. Taber, « Constructing chemical concepts in the classroom?: Using research to inform practice », *Chem. Educ. Res. Pract.*, vol. 2, n° 1, p. 43–51, 2001.
- [115] J. K. Gilbert, « The study of student misunderstandings in the physical sciences », *Res. Sci. Educ.*, vol. 7, n° 1, p. 165–171, 1977.
- [116] S. Novick et J. Menis, « A study of student perceptions of the mole concept », *J. Chem. Educ.*, vol. 53, n° 11, p. 720, nov. 1976.
- [117] S. R. Krishnan et A. C. Howe, « The Mole Concept: Developing an Instrument To Assess Conceptual Understanding », *J. Chem. Educ.*, vol. 71, n° 8, p. 653, août 1994.
- [118] R. F. Peterson et D. F. Treagust, « Grade-12 students' misconceptions of covalent bonding and structure », *J. Chem. Educ.*, vol. 66, n° 6, p. 459, 1989.
- [119] M. W. Hackling et P. J. Garnett, « Misconceptions of chemical equilibrium », *Eur. J. Sci. Educ.*, vol. 7, n° 2, p. 205-214, avr. 1985.
- [120] A. E. Wheeler et H. Kass, « Student misconceptions in chemical equilibrium », *Sci. Educ.*, vol. 62, n° 2, p. 223-232, avr. 1978.
- [121] L. Tyson, D. F. Treagust, et R. B. Bucat, « The Complexity of Teaching and Learning Chemical Equilibrium », *Sci. Educ.*, vol. 76, n° 4, p. 554-558, 1999.
- [122] M. F. Granville, « Student misconceptions in thermodynamics », *J. Chem. Educ.*, vol. 62, n° 10, p. 847, oct. 1985.
- [123] V. Kind, « Beyond appearances: students' misconceptions about chemical ideas », *R. Soc. Chem.*, 2<sup>nd</sup> edition, London, 2004.
- [124] C. Horton, « Student Alternative Conceptions in Chemistry », *Calif. J. Sci. Educ.*, vol. 7(2), 2007.
- [125] J. M. Duis, « Acid/base chemistry and related organic chemistry conceptions of undergraduate organic chemistry students », University of Northern Colorado, School of Chemistry and Biochemistry, Greeley, CO, 2008.
- [126] L. M. McClary et S. L. Bretz, « Development and Assessment of A Diagnostic Tool to Identify Organic Chemistry Students' Alternative Conceptions Related to Acid Strength », *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 34, n° 15, p. 2317-2341, oct. 2012.

- [127] D. D. Milenković, T. N. Hrin, M. D. Segedinac, et S. Horvat, « Development of a Three-Tier Test as a Valid Diagnostic Tool for Identification of Misconceptions Related to Carbohydrates », *J. Chem. Educ.*, vol. 93, n° 9, p. 1514-1520, sept. 2016.
- [128] O. B. Topal G. et M. Özden, « University and Secondary School Students' Misconceptions about the Concept Of "Aromaticity" in Organic Chemistry », *Int. J. Environ. Sci. Educ.*, vol. 2, p. 135-143, 2007.
- [129] L. Choon., H. Bryan, « Identifying students' misconceptions in "A-level" organic chemistry » Innova Junior College, 2007.
- [130] J. T. Wasacz, « Organic chemistry preconceptions and their correlation to student success », Thèse de Doctorat, University of northern Colorado, 2010.
- [131] G. Şendur, « Prospective Science Teachers' Misconceptions in Organic Chemistry: The Case of Alkenes », *J. Turk. Sci. Educ.*, vol. 9, p. 186-190, 2012.
- [132] G. Şendur et M. Toprak, « An Analysis of Prospective Teachers' Understanding Levels and Misconceptions in The Subjects of Organic Chemistry: The Case of Alcohols », *Necatibey Eğitim Fakültesi Elektronik Fen Ve Mat. Eğitimi Derg.*, vol. 7, n° 1, p. 264-301, juin 2013.
- [133] U. Zoller, « Students' misunderstandings and misconceptions in college freshman chemistry (general and organic) », *J. Res. Sci. Teach.*, vol. 27, n° 10, p. 1053–1065, 1990.
- [134] H.-J. Schmidt, « Conceptual difficulties with isomerism », *J. Res. Sci. Teach.*, vol. 29, n° 9, p. 995–1003, 1992.
- [135] K. Taber, « Chemical misconceptions: prevention, diagnosis and cure », Cambridge: Royal Soc. of Chemistry, 2002.
- [136] W. C. Galley, « Exothermic Bond Breaking: A Persistent Misconception », *J. Chem. Educ.*, vol. 81, n° 4, p. 523, 2004.
- [137] S. A. Fleming, « Teaching Tools for Organic and Bio-Organic Chemistry », in *Pedagogic Roles of Animations and Simulations in Chemistry Courses*, vol. 1142, J. P. Suits et M. J. Sanger, Éd. Washington, DC: American Chemical Society, 2013, p. 389-409.
- [138] M. M. Cooper, L. C. Williams, et S. M. Underwood, « Student Understanding of Intermolecular Forces: A Multimodal Study », *J. Chem. Educ.*, vol. 92, n° 8, p. 1288-1298, août 2015.
- [139] J. P. Suits et N. Srisawasdi, « Use of an Interactive Computer-Simulated Experiment To Enhance Students' Mental Models of Hydrogen Bonding Phenomena », in *Pedagogic Roles of Animations and Simulations in Chemistry Courses*, vol. 1142, J. P. Suits et M. J. Sanger, Éd. Washington, DC: American Chemical Society, 2013, p. 241-271.
- [140] M. M. Cooper, L. M. Corley, et S. M. Underwood, « An investigation of college chemistry students' understanding of structure-property relationships: students' understanding of structure-property », *J. Res. Sci. Teach.*, vol. 50, n° 6, p. 699-721, août 2013.
- [141] M. Ogden, « An Inquiry Experience with High School Students To Develop an Understanding of Intermolecular Forces by Relating Boiling Point Trends and Molecular Structure », *J. Chem. Educ.*, vol. 94, n° 7, p. 897-902, juill. 2017.
- [142] J. P. Birk et M. J. Kurtz, « Effect of Experience on Retention and Elimination of Misconceptions about Molecular Structure and Bonding », *J. Chem. Educ.*, vol. 76, n° 1, p. 124, janv. 1999.
- [143] C. Cormier, « Étude des conceptions alternatives et des processus de raisonnement des étudiants de chimie du niveau collégial sur la molécule, la polarité et les phénomènes macroscopiques », Thèse de Doctorat, Université de Montréal, 2014.
- [144] M. J. Sanger, « Using Computer-Based Visualization Strategies to Improve Students' Understanding of Molecular Polarity and Miscibility », *J Chem Educ*, vol. 8, n° 10, p. 1412-1416, 2001.
- [145] R. Naija, « Apprentissage des réactions acido-basiques : mise en évidence et remédiation des difficultés des étudiants lors d'une séquence d'enseignement expérimental », Thèse de Doctorat, Université Lumière Lyon 2, 2004.
- [146] J. Winter, M. Wentzel, et S. Ahluwalia, « Chairs!: A Mobile Game for Organic Chemistry Students To Learn the Ring Flip of Cyclohexane », *J. Chem. Educ.*, vol. 93, n° 9, p. 1657-1659, sept. 2016.

- [147] M. L. Eastwood, « Fastest Fingers: A Molecule-Building Game for Teaching Organic Chemistry », *J. Chem. Educ.*, vol. 90, n° 8, p. 1038-1041, août 2013.
- [148] M. M. Cooper, N. P. Grove, R. Pargas, S. P. Bryfczynski, et T. Gatlin, « OrganicPad: an interactive freehand drawing application for drawing Lewis structures and the development of skills in organic chemistry », *Chem Educ Res Pr.*, vol. 10, n° 4, p. 296-301, 2009.
- [149] H.-K. Wu, J. S. Krajcik, et E. Soloway, « Promoting understanding of chemical representations: Students' use of a visualization tool in the classroom », *J. Res. Sci. Teach.*, vol. 38, n° 7, p. 821–842, 2001.
- [150] J. Palacios, « Octachem Model: Organic Chemistry Nomenclature Companion », *J. Chem. Educ.*, vol. 83, n° 6, p. 890, 2006.
- [151] M. Angelin et O. Ramström, « Where's Ester? A Game That Seeks the Structures Hiding Behind the Trivial Names », *J. Chem. Educ.*, vol. 87, n° 4, p. 406-407, avr. 2010.