



HAL
open science

Enseignement et apprentissage de la stéréochimie en terminale D au Bénin : raisonnements des élèves et points de vue des enseignants

Destin Mangane

► **To cite this version:**

Destin Mangane. Enseignement et apprentissage de la stéréochimie en terminale D au Bénin : raisonnements des élèves et points de vue des enseignants. Education. Université Paris-Diderot - Paris VII, 2014. Français. NNT : . tel-01010548

HAL Id: tel-01010548

<https://theses.hal.science/tel-01010548>

Submitted on 26 Jun 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE PARIS.

DIDEROT (Paris 7)

SORBONNE PARIS CITE

ECOLE DOCTORALE : Savoirs scientifiques : épistémologie, histoire des sciences,
didactique des disciplines - ED 400

Laboratoire de Didactique André Revuz

DOCTORAT

Didactique des disciplines

Option didactique des sciences physiques

Destin Judicaël MANGANE NSAYI

Enseignement et apprentissage de la stéréochimie en terminale D au
Bénin : raisonnements des élèves et points de vue des enseignants

Thèse dirigée par Isabelle KERMEN

Soutenue le 12 juin 2014

Jury

M. Jean-Marie BOILEVIN, Président

M. Alain DUMON, Rapporteur

Mme Laurence LECAMP, Rapporteur

Mme Cécile de HOSSON, Examineur

Mme Souad AMMAR-MERAH, Examineur

Mme Isabelle KERMEN, Directrice de thèse

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation.

J'adresse tout d'abord mes plus vifs remerciements à Isabelle KERMEN. En tant que Directrice de thèse, elle m'a guidé dans mon travail et m'a permis de le réaliser dans les meilleures conditions. Sa compétence et sa rigueur scientifique m'ont beaucoup appris. Elles ont été et resteront des moteurs de mon travail de chercheur.

Mes remerciements s'adressent ensuite à Monsieur Alain DUMON et Madame Laurence LECAMP. Ils m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de ma thèse et ont autorisé la soutenance.

J'exprime également mes sincères remerciements à :

- Monsieur Jean-Marie BOILEVIN, pour avoir accepté de présider le jury de mon mémoire ;
- Mesdames Souad AMMAR-MERAH et Cécile de HOSSON, pour avoir consenti à examiner mon travail.

J'adresse toute ma gratitude à Annie PRAXELLE. Bien que les recherches en didactique de la chimie lui soient peu familières, elle a consacré son temps précieux à la relecture attentive du manuscrit.

Je témoigne mon affection aux deux Etres qui ont fait que « je sois ce que je suis aujourd'hui », en particulier à ma mère, Hélène MIANDZOUKOUTA, qui a toujours été là pour moi, n'épargnant ni santé ni efforts, et à mon épouse, Sandra PRAXELLE, qui m'a encouragé, soutenu et donné une jolie petite fille, Elena MANGANE, dans ces années de durs labeurs. Leur tendresse et leur amour me portent et me guident tous les jours. Qu'elles veuillent trouver ici, l'hommage de ma profonde reconnaissance.

Enfin, mes remerciements vont aussi aux autres membres de ma famille et à mes amis qui, avec cette question itérative, « quand est-ce que tu soutiens ta thèse ? », bien qu'aterrante en période fréquente de doutes, m'ont permis de ne jamais dévier de mon objectif final. Merci à Nadèch MANGANE, Cyr MANGANE, Pichou MANGANE, Prince MANG-EGRI, Fiacre MANGANE, Guy PRAXELLE, Joël PRAXELLE, Jérémy BIGEON, Alexia PRAXELLE,

Christiane PRAXELLE, Nathalie MORLET, Marie-Thérèse PRAXELLE, Sophie et Tony ELHAMI, David et Emmanuelle MWONGERA, Claudio et Carla DE OLIVEIRA, pour leur estime maintes fois renouvelée.

Table des matières

Introduction	10
I. Contexte de l'étude et objectifs	10
II. Pourquoi la stéréochimie en terminale D ?	11
III. Questions principales de recherche	12
IV. Organisation de la thèse	14
Chapitre 1 : Systèmes sémiotiques et modèles moléculaires en stéréochimie.....	16
I. Systèmes sémiotiques.....	16
I.1. Définition	16
I.2. Exemples de systèmes sémiotiques	18
I.2.1. Systèmes de formules	18
I.2.1.1. Système de formule brute	18
I.2.1.2. Système des formules développées.....	19
I.2.1.3. Système des formules semi-développées.....	21
I.2.2. Systèmes de projection	23
I.2.2.1. Système de Cram	23
I.2.2.2. Système de la perspective	27
I.2.2.3. Système de Newman.....	30
I.3. Chaîne de conversion inter système.....	32
I.4. Coordination des registres sémiotiques	35
II. Système de modèles moléculaires	36
III. Conclusion.....	40
Chapitre 2 : Analyse de programmes et du manuel.....	41
I. Cadre d'analyse	42
I.1. Objectifs pédagogiques	42
I.2. Compétence et capacité.....	44
II. Analyse du manuel scolaire	45
II.1. Présentation et structuration du manuel scolaire	45
II.2. Place des systèmes sémiotiques et des modèles moléculaires dans le manuel.....	48

III. Analyse du programme par objectifs (1995).....	55
III.1. Présentation du programme et son commentaire	55
III.2. Place des systèmes sémiotiques et des modèles moléculaires dans le programme. 57	
IV. Programme et manuel : quelques points de repère	65
V. Programme par objectifs (1995) et programme par compétences (2011), quel lien? ..	68
V.1. Présentation du programme par compétences et du guide d'accompagnement.....	68
V.2. Lien entre programme par objectifs et programme par compétences	72
VI. Conclusion.....	74
Chapitre 3 : Raisonnements et difficultés des élèves.....	76
I. Cadre d'analyse	76
I.1. Visualisation mentale des représentations sémiotiques	76
I.2. Les gestes	78
II. Recherches antérieures sur les difficultés des étudiants et des élèves	80
III. Etudes réalisées	83
III.1. Etude 1.....	83
III.1.1. Questions spécifiques de recherche (QSR)	84
III.1.2. Instrument de collecte de données	85
III.1.3. Collecte des données	88
III.1.4. Méthodologie d'analyse des données.....	89
III.1.5. Analyse des réponses d'élèves	90
III.1.5.1. Sur la signification de la représentation de Cram	90
III.1.5.2. Sur les conversions inter registres	93
III.1.5.2.1. Formule semi-développée-Cram	93
III.1.5.2.2. Conversion inter registres Cram-Newman	96
III.1.5.3. Sur la reconnaissance de stéréoisomères de conformation dans le registre de Newman.....	103
III.1.6. Conclusion partielle.....	108
III.2. Etude 2.....	110
III.2.1. Questions spécifiques de recherche (QSR)	110

III.2.2. Instrument de collecte des données	112
III.2.3. Collecte des données	120
III.2.4. Méthodologie d'analyse des données.....	120
III.2.5. Analyse des réponses d'élèves	121
III.2.5.1. Sur la méthode de la double permutation (MDP).....	121
III.2.5.2. Sur le passage d'une conformation de molécule à une autre dans le registre de Cram	124
III.2.5.3. Sur la reconnaissance de stéréoisomères de conformation dans le registre de Cram	130
III.2.5.4. Sur la conversion inter registre Cram-Newman	136
III.2.6. Conclusion partielle.....	148
III.3.Etude 3.....	152
III.3.1. Questions spécifiques de recherche (QSR)	152
III.3.2. Instrument de collecte de données	154
III.3.3. Collecte des données	157
III.3.4. Méthodologie d'analyse des données.....	158
III.3.4.1. Les productions gestuelles	158
III.3.4.2. Les productions écrites	159
III.3.4.3. Les productions verbales	159
III.3.5. Analyse des réponses d'élèves	161
III.3.5.1. Sur la signification d'une représentation de Cram et des renseignements qu'on peut en tirer	161
III.3.5.2. Sur la conversion inter registre Cram Newman	168
III.3.5.3. Sur la visualisation des positions des traits de liaison.....	175
III.3.5.4. Sur le passage d'une conformation de molécule à une autre dans le registre de Cram	183
III.3.5.5. Sur la manipulation et l'interprétation d'un modèle moléculaire.....	188
III.3.6. Conclusion partielle.....	191

IV. Conclusion	195
Chapitre 4 : PCK et connaissances du contenu disciplinaire des enseignants	198
I. Cadre d'analyse	198
I.1. PCK (Pedagogical Content Knowledge)	198
I.1.1. Les différents modèles	198
I.1.2. Les composants	202
I.1.2.1. Les orientations de l'enseignement des sciences	202
I.1.2.2. Connaissances sur le programme d'enseignement de la stéréochimie	205
I.1.2.3. Connaissances sur l'évaluation de l'apprentissage de la stéréochimie	206
I.1.2.4. Connaissances sur les stratégies d'enseignement de la stéréochimie	207
I.1.2.5. Connaissances sur la compréhension de la stéréochimie par les élèves	208
I.2. Connaissances du contenu disciplinaire	209
II. Questions spécifiques de recherche	209
III. Approche méthodologique	210
III.1. Protocole d'entretien	211
III.1.1. Questions portant sur les composants de PCK	212
III.1.2. Questions complémentaires portant sur les PCK et les connaissances du contenu disciplinaire	213
III.2. Passation de l'entretien	214
III.3. Méthodologie de traitement des données et d'analyse	217
IV. Analyse des réponses d'enseignants	218
IV.1. PCK des enseignants	218
IV.1.1. PCK/programme	218
IV.1.1.1. Objectifs de l'enseignement de la stéréochimie	218
IV.1.1.2. Ressources documentaires et matérielles nécessaires à l'enseignement de la stéréochimie	221
IV.1.2. PCK/stratégies	224
IV.1.2.1. Stratégies générales	225
IV.1.2.2. Stratégies spécifiques	225

IV.1.3. PCK/évaluation	228
IV.1.3.1. Résultats de l'apprentissage importants à évaluer	228
IV.1.3.2. Méthodes d'évaluations	234
IV.1.4. PCK/compréhension	235
IV.1.4.1. Aspects de la stéréochimie compris par les élèves.....	236
IV.1.4.2. Difficultés des élèves	237
IV.2. Description complémentaire des PCK et connaissances du contenu disciplinaire des enseignants	242
IV.2.1. Sur la stéréoisométrie de conformation.....	242
IV.2.2. Sur la rotation autour de l'axe C—C, la conversion inter registre Cram-Newman, et l'identification de stéréoisomères de conformation.....	244
IV.2.2.1. Présentation des consignes.....	244
IV.2.2.2. Résultats globaux	250
IV.2.2.3. Raisonnements des enseignants	251
IV.2.3. Sur la méthode de la double permutation (MDP)	258
IV.2.4. Sur la représentation des traits de liaison gras et hachuré.....	265
IV.2.5. Synthèse	266
IV.2.5.1. Connaissances du contenu disciplinaire stéréochimie	266
IV.2.5.2. PCK des enseignants	269
IV.3. Profils PCK des enseignants	271
V. Conclusion.....	276
Conclusion générale et perspectives	282
I. Retour sur les questions principales de recherche.....	282
II. Limites de notre étude	289
III. Quelques pistes sur l'enseignement et la formation des enseignants.....	290
Bibliographie.....	293
Annexe	303
Questionnaire élève 1	303
Questionnaire élève 2	305

Protocole d'entretien élève	308
Protocole d'entretien enseignant	310

Introduction

I. Contexte de l'étude et objectifs

Les développements rapides de la recherche en didactique des disciplines scientifiques en général, et de la chimie en particulier, ont permis de susciter diverses réflexions sur la nature des obstacles à l'acquisition de connaissances par les élèves, et comme le soulignent Raynal et Rieunier (1998, p. 109), « *de dénouer le fil de ces savoirs qui, de connaissance scientifique en transposition didactique, et de transposition didactique en enseignement, ont peut-être perdu un peu de leur identité originelle* ». Les recherches en didactique des sciences ouvrent des perspectives, apportent des informations sur la faisabilité et les effets de différents types de démarches d'enseignement (Méheut, 2006). Par le biais de ces recherches, les conditions d'apprentissage pour les élèves sont améliorées, des connaissances nouvelles sur le système d'enseignement des séances, sur les modalités et les conditions de son fonctionnement sont produites; les résultats et les acquis de la didactique des sciences sont également utilisés à des fins formatives : ils sont des composantes de la formation initiale et continue des enseignants (Astolfi et al., 2008).

Alors que le bien-fondé des recherches en didactique des sciences est reconnu de façon évidente dans la plupart des pays, y compris au Bénin, on constate qu'à ce jour, des études didactiques sur l'enseignement des disciplines scientifiques en général, et sur la chimie en particulier au Bénin, sont quasi-inexistantes. Par conséquent, la conception des programmes de formation initiale et continue des enseignants, des programmes d'études dans l'enseignement primaire, secondaire et supérieur, le choix des stratégies d'enseignement et d'apprentissage... sont fortement influencés par les résultats des études en didactique des sciences réalisés dans des pays, autres que le Bénin, plus particulièrement ceux de l'espace francophone dit développé (France, Belgique, Canada, Suisse). Il sied de rappeler que les conclusions ou les solutions dérivant des recherches menées dans un pays ne sont pas forcément les mêmes que celles menées dans un autre pays. En France par exemple, le nombre d'élèves dans les classes n'est pas pléthorique, les laboratoires de travaux pratiques sont également assez bien équipés, ce qui n'est pas le cas au BENIN : classe pléthorique en nombre d'élèves (plus de 50), laboratoires de travaux pratiques rarement équipés, voire inexistants... Par conséquent, transposer au Bénin des contraintes didactiques rencontrées en France, est plus ou moins absurde, d'autant plus que les programmes de formation initiale et continue, les pratiques des enseignants ou leurs connaissances professionnelles ne sont pas toujours les mêmes. On peut

simplement s'inspirer des résultats des recherches menées en France pour orienter de nouvelles recherches dans un contexte purement béninois.

Une recherche didactique en chimie au Bénin s'avère nécessaire.

Cette étude vise à faire un état des lieux de l'enseignement/apprentissage, au Bénin, à propos d'un aspect de la chimie organique en terminale D: la stéréochimie. Nous cherchons par-là à :

- mettre en évidence les capacités, les conceptions et les difficultés des élèves ;
- reconstituer certains composants des connaissances pédagogiques du contenu (Pedagogical Content Knowledge, PCK, Shulman, 1986a, 1986b, 1987, Magnusson et al., 1999) mobilisées par les enseignants pour enseigner le cours de stéréochimie;
- inférer les connaissances disciplinaires des enseignants sur le contenu de stéréochimie.

Les résultats obtenus nous permettront de proposer des pistes de solutions susceptibles de résoudre les problèmes rencontrés par les enseignants et les élèves pendant l'enseignement et l'apprentissage de la stéréochimie.

II. Pourquoi la stéréochimie en terminale D ?

Le programme de chimie en terminale D comprend trois parties: la chimie générale, la chimie organique et la cinétique chimique. La partie chimie organique exige un plus grand nombre de travaux pratiques et un temps d'enseignement plus important que les deux autres. Le savoir à enseigner de chimie organique en terminale D est plus vaste que celui des autres classes de l'enseignement secondaire général (terminale C, premières C et D, troisième). Il permet de couvrir la plupart des savoirs enseignés en chimie organique dans les classes de l'enseignement secondaire général. Le savoir de chimie organique enseigné en terminale C par exemple, est inclus dans celui de la terminale D (la réciproque n'étant pas vraie). Or, d'une manière générale, la chimie organique est reconnue comme difficile à enseigner et à apprendre (Lafarge, 2010, Loumouamou, 1998). Une grande partie de l'enseignement introductif de cette discipline repose sur la stéréochimie, c'est-à-dire l'étude de l'arrangement spatial des atomes dans une molécule, car l'étude de la réactivité des molécules organiques dans toute séquence pédagogique est conditionnée par la connaissance préalable de la géométrie de la molécule (Pellegrin et al., 2003), et de la stéréoisomérisation de conformation (Barlet & Plouin, 1997) ou de configuration. Cette place introductive qu'occupe la stéréochimie dans l'enseignement de la chimie organique implique, en cas d'échec dans son apprentissage, que l'élève soit freiné tout au long de l'étude de la chimie organique. Ceci est l'une des raisons pour lesquelles nous avons choisi la stéréochimie.

Notre choix s'est aussi porté sur cette partie du programme afin, d'une part, de limiter l'étendue de notre étude et de garantir sa faisabilité, d'autre part, de respecter l'ordre imposé par les instructions officielles et, par la suite, de procéder à l'étude des parties restantes dans nos recherches futures.

III. Questions principales de recherche

Nous organisons notre recherche autour de deux axes :

- les raisonnements et les difficultés des élèves en stéréochimie;
- les connaissances professionnelles des enseignants (PCK et connaissances du contenu disciplinaire).

➤ **Raisonnements et difficultés des élèves en stéréochimie**

L'étude de la stéréochimie en terminale D repose principalement sur l'utilisation et l'interprétation des représentations sémiotiques de Cram et de Newman, et des modèles moléculaires. Les questions principales de recherche qui se dégagent s'organisent autour de ces deux systèmes de représentations des structures géométriques de molécules (systèmes sémiotiques et modèles moléculaires) :

- quels raisonnements utilisent les élèves béninois de terminale D pour résoudre les problèmes de stéréochimie ?
- quelles sont les difficultés rencontrées par les élèves béninois de terminale D lors de l'utilisation et l'interprétation des représentations sémiotiques et des modèles moléculaires en stéréochimie ?

Pour répondre à ces questions, nous prenons en compte les activités cognitives (Duval, 1993) que permettent les représentations sémiotiques et les modèles moléculaires : la communication, le traitement (opération intra registre) et la conversion (opération inter registre). Deux séries de questions secondaires se rapportant à ces trois activités cognitives sont alors construites.

La première série se rapporte aux activités cognitives que permettent les représentations sémiotiques de Cram et de Newman.

- Activité cognitive de communication :
 - Quelles connaissances les élèves ont-ils de la signification de la représentation sémiotique de Cram?
- Activités de traitement (opération intra registre sémiotique) et de conversion (opération inter registre sémiotique):

- Dans quelle mesure les élèves de terminale D du Bénin maîtrisent-ils les opérations intra registres de Cram et de Newman, et inter registre Cram-Newman?
- Quels sont les obstacles à l'acquisition d'une compréhension permettant une utilisation de ces représentations conforme à leur signification ?

La deuxième série se rapporte aux activités cognitives que permettent les modèles moléculaires. Nous nous sommes interrogés, d'une part, sur le degré de maîtrise des élèves concernant la manipulation d'un modèle moléculaire, et, d'autre part, sur leur raisonnement à propos du passage d'un modèle moléculaire à une représentation sémiotique de Cram:

- Dans quelle mesure les élèves de terminale D du Bénin maîtrisent-ils les opérations intra registre de modèle moléculaire et inter registre modèle moléculaire - Cram?
- Quels sont les obstacles à l'acquisition d'une compréhension permettant une utilisation du modèle moléculaire conforme à sa signification ?

L'analyse des résultats permettra de prendre connaissance des difficultés des élèves en stéréochimie et à partir de là, enrichir les PCK des enseignants sur les difficultés réelles des élèves et proposer une méthodologie appropriée pour résoudre leurs difficultés sur ce point précis.

➤ **Connaissances professionnelles (PCK et connaissances du contenu disciplinaire) des enseignants**

Le deuxième axe de notre recherche concerne les connaissances professionnelles des enseignants en relation avec la stéréochimie.

Nous cherchons dans un premier temps, à analyser et décrire certains composants des connaissances pédagogiques du contenu (PCK) mobilisées par les enseignants pour enseigner le cours de stéréochimie, particulièrement leurs connaissances du programme d'enseignement de la stéréochimie, de la compréhension de la stéréochimie par les élèves, de l'évaluation, et des stratégies d'enseignement (Magnusson et al., 1999). Dans un deuxième temps nous cherchons à caractériser leurs connaissances du contenu disciplinaire stéréochimie. Les questions principales se posent en ces termes :

- Quelle est la nature des PCK des enseignants béninois à propos de la stéréochimie?
- Quel est leur degré de maîtrise du contenu disciplinaire stéréochimie ?

IV. Organisation de la thèse

Nous organisons notre travail de thèse autour de quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, les systèmes sémiotiques et les systèmes de modèles moléculaires utilisés en stéréochimie sont définis selon le cadre théorique des systèmes sémiotiques et des registres sémiotiques développés par Duval (1993) en didactique des Mathématiques. Nous explicitons les activités cognitives qu'ils permettent.

Dans le deuxième chapitre, le programme d'enseignement de la stéréochimie en terminale D, son commentaire et le manuel scolaire sont analysés. Il s'agit d'établir:

- l'adéquation entre le manuel scolaire, qui est un manuel conçu selon le programme d'enseignement français de 1989, et le programme d'enseignement de stéréochimie, qui, lui, est mis en place plus tard, en 1995;
- la place occupée par les systèmes sémiotiques et les modèles moléculaires dans le contenu de stéréochimie à enseigner;
- le lien entre le contenu de stéréochimie prescrit, les objectifs pédagogiques, et les capacités attendues des élèves.

L'application d'un nouveau programme d'enseignement de la stéréochimie en terminale D, est intervenue à la rentrée scolaire 2011-2012, alors que nous travaillions avec des données (réponses d'élèves à des questionnaires papier-crayon) collectées l'année scolaire précédente. Nous avons jugé nécessaire de réaliser un examen comparatif de l'ancien et du nouveau programme, du point de vue du contenu à enseigner et des capacités attendues des élèves. Ceci, dans le but de voir si cela aurait des incidences sur nos analyses des raisonnements et difficultés des élèves, et des connaissances professionnelles des enseignants.

Le troisième chapitre porte sur les raisonnements et les difficultés des élèves à propos des systèmes sémiotiques et des modèles moléculaires. L'analyse du contenu de stéréochimie à enseigner (programme et manuel) et la prise en compte de résultats de recherches antérieures révèlent que les différentes activités cognitives, que permettent les systèmes sémiotiques et les modèles moléculaires, peuvent susciter des difficultés de visualisation mentale chez les élèves. Nous orientons nos enquêtes (questionnaires papier-crayon et entretiens individuels d'élèves) autour de ces difficultés.

Le quatrième chapitre porte sur les connaissances professionnelles des enseignants. Sur le plan empirique, un protocole d'entretien individuel permet de recueillir des données. Nous analysons et décrivons, d'une part, certains composants des PCK (Magnusson et al., 1999) mobilisés par ces enseignants pour transmettre le cours de stéréochimie et, d'autre part, nous mettons en évidence leurs connaissances du contenu disciplinaire stéréochimie.

Dans chaque chapitre, nous présentons le cadre d'analyse choisi, les questions spécifiques de recherche, l'approche méthodologique que nous avons suivie pour collecter et analyser les données, et les résultats. Une conclusion partielle y est également réalisée.

La partie relative à la conclusion générale et aux différentes recommandations qui se dégagent de l'analyse des différents résultats obtenus vient clore le travail.

Chapitre 1 : Systèmes sémiotiques et modèles moléculaires en stéréochimie

Les représentations sémiotiques sont au cœur du processus d'enseignement/apprentissage de la science en général, et de la Chimie en particulier (Gilbert, 2010). Les chimistes les utilisent pour comprendre les propriétés moléculaires et les processus chimiques, les molécules et leurs propriétés n'étant pas disponibles à la perception directe (Kozma et al., 2000). Les représentations sémiotiques permettent de présenter des informations, qui ne pourraient être facilement comprises autrement (Larkin & Simon, 1987; Kozma et al., 2000; Wu & Shah, 2004), en l'occurrence les notions de stéréoisomérisation conformationnelle et de stéréoisomérisation configurationnelle en stéréochimie. Outre les représentations sémiotiques, l'enseignement/apprentissage de la stéréochimie s'appuie également sur des objets matériels qui permettent des activités cognitives presque similaires : les modèles moléculaires.

Nous nous fondons sur le cadre théorique des systèmes et registres sémiotiques proposé par Duval (1993) dans le cadre de la didactique des mathématiques, pour caractériser les systèmes sémiotiques en stéréochimie. Bien qu'un modèle moléculaire ne soit pas un système sémiotique, nous essayons de spécifier les activités cognitives qu'il peut permettre en nous référant au même cadre théorique.

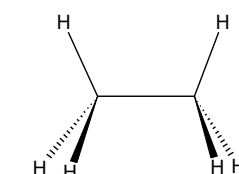
I. Systèmes sémiotiques

I.1. Définition

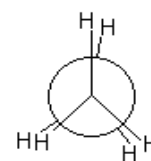
Selon Duval (1993) *"les représentations sémiotiques sont des productions constituées par l'emploi de signes appartenant à un système de représentation qui a ses contraintes propres de signification et de fonctionnement"*. Ces représentations sont en deux dimensions.

Un système sémiotique est appelé registre sémiotique, s'il permet les trois activités cognitives suivantes :

- la formation d'une représentation conforme aux règles de formation de ses signes propres au registre sémiotique (activité de communication). Par exemple, dans le registre de Cram, la représentation 1 est



représentation 1



représentation 2

conforme, mais pas la représentation 2. La représentation 1 est celle de la structure spatiale d'un objet conceptuelle : la molécule d'éthane.

- le traitement de cette représentation par les seules règles propres au système, de façon à obtenir un apport de connaissance par rapport à la représentation initiale. C'est une transformation interne au registre (Duval, 1993). Par exemple, dans le registre de Cram, deux représentations différentes peuvent correspondre à la même molécule d'éthane. La notion de rotation autour de l'axe de la liaison simple C—C justifie cette information.

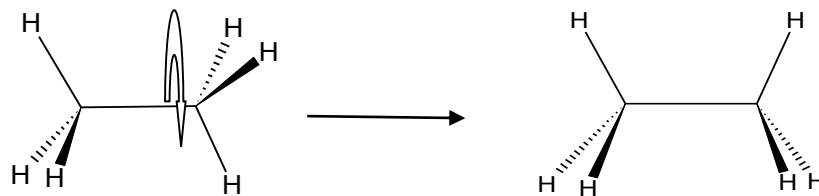


Figure 1: exemple d'activité de traitement de la représentation de Cram

- la conversion d'une représentation du registre dans un autre, de telle façon que cette dernière permette de clarifier d'autres significations relatives à ce qui est représenté. C'est une transformation externe au registre de départ (Duval, 1993). Par exemple dans le registre de Cram, la représentation 1 citée précédemment, se convertit en représentation 2 dans le registre de Newman.

Duval distingue plusieurs types de systèmes sémiotiques : symbolique, langage naturel... Ces systèmes existent également en chimie.

- le langage naturel : en mathématiques comme en chimie, un texte, qu'il soit écrit ou lu, est basé sur ce système sémiotique.
- le système symbolique : un signe peut renvoyer à son objet conformément à une loi, une règle ; un tel signe est dit symbole. Par exemple, CH_4 peut symboliser la molécule de méthane.

I.2. Exemples de systèmes sémiotiques

Pour représenter dans le plan les molécules, qui sont des entités tridimensionnelles, les chimistes utilisent principalement quatre systèmes conventionnels de projection : système de Cram, système de la perspective, système de Newman et système de Fischer (Eliel & Basolo, 1969/1971). Au départ, ils ont employé des systèmes de représentation plane n'ayant pas un caractère tridimensionnel (formule développée par exemple). Les recherches dans le domaine de la réaction chimique les ont vite persuadés « *de l'utilité d'une représentation spatiale des molécules, voire de sa nécessité, comme cela est le cas par exemple pour distinguer entre eux les isomères dextro- et lévo- de l'acide tartrique* » (Dumon & Luft, 2008, p.127). C'est partant de là qu'ont émergé les systèmes de la perspective, de Cram, de Newman et de Fischer.

Nous ne développons pas le système de Fischer, car il n'est pas abordé dans le programme de stéréochimie et n'est pas l'objet de notre travail. Les exemples d'activités cognitives présentés ne sont pas exhaustifs, il s'agit de ceux qui peuvent être liés à l'enseignement de la stéréochimie en terminale D au Bénin. Pour mieux comprendre les activités cognitives qu'impliquent ces systèmes de projection, en l'occurrence l'activité de conversion, nous estimons nécessaire de présenter en premier lieu les systèmes de formules auxquels ils se réfèrent parfois. Nous exposons quelques-unes des activités cognitives qu'ils permettent.

I.2.1. Systèmes de formules

Nous distinguons trois systèmes de formules : formule brute, formule développée, et formule semi-développée.

I.2.1.1. Système de formule brute

➤ Représentation

Dans ce système, on a la connaissance du nombre et de la nature des atomes¹ constituant une molécule. Les signes utilisés sont : les symboles des atomes et les chiffres (pour le nombre d'atomes). La formule brute C_2H_6 montre par exemple que la molécule d'éthane est constituée de deux atomes de carbone et de six atomes d'hydrogène, mais ne fournit pas d'indications sur l'agencement spatial des atomes et sur la nature des liaisons chimiques.

¹ Il s'agit en fait des noyaux entourés d'électrons des couches profondes, le mot atome aura ce sens tout au long de notre étude, et ce, pour se conformer aux usages.

➤ Activité de traitement

Aucune activité de traitement n'est réalisée dans ce système.

➤ Conversion

Partant de la formule brute d'une molécule donnée dont on connaît le nom ou l'enchaînement des atomes, il est possible d'obtenir la formule développée et la formule semi-développée. Par exemple, à partir de la formule brute de l'éthane C_2H_6 on peut écrire les formules développée et semi-développée, une représentation de Cram ou la représentation en perspective.

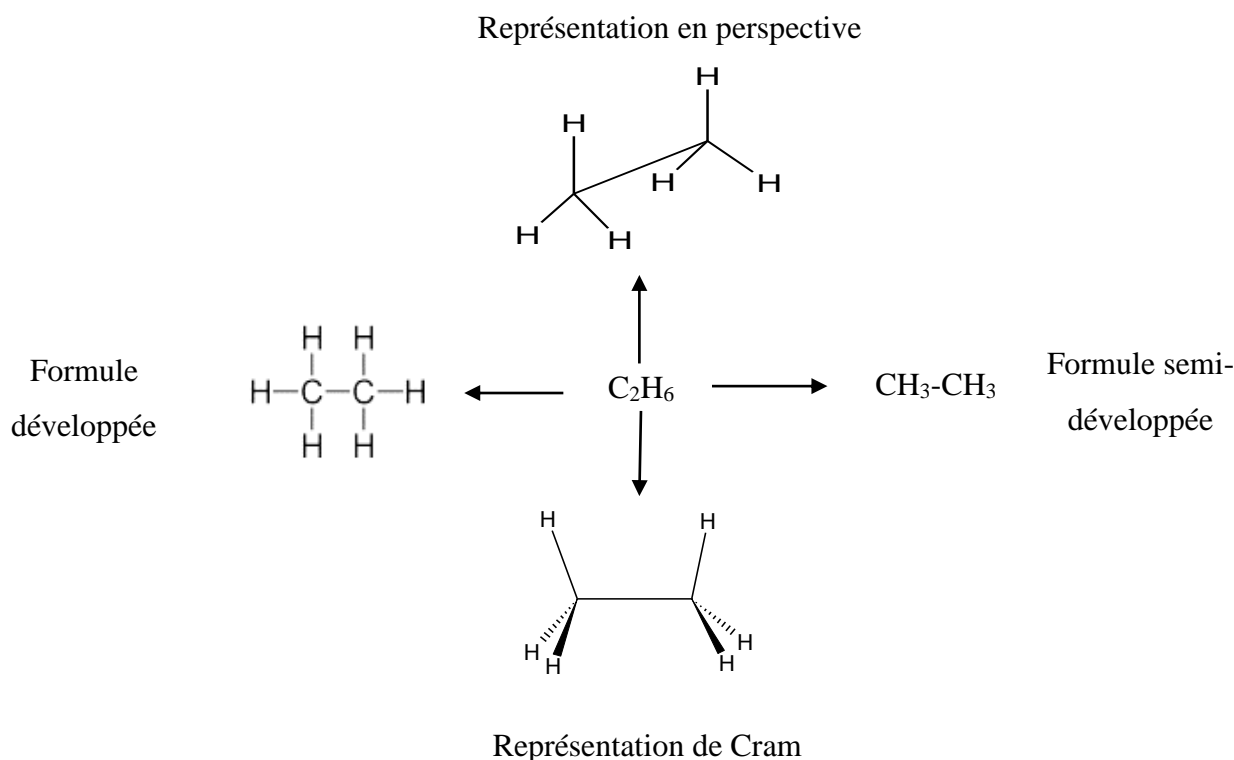
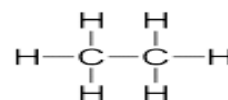


Figure 2: conversions de la formule brute de l'éthane

I.2.1.2. Système des formules développées

➤ Représentation

Dans ce système, on a la connaissance de l'enchaînement des atomes dans une molécule, le nombre et la nature des liaisons chimiques. Les signes utilisés sont : les symboles des atomes, un trait, deux ou trois traits juxtaposés (pour représenter les électrons de liaison²). Dans la formule ci-contre par



²Dans les systèmes de formules, les traits figurent des électrons de liaison, le mot liaison aura ce sens à chaque fois que nous nous référerons à ces systèmes

exemple, on peut voir que chaque atome de carbone est entouré de quatre traits signifiant que le carbone établit quatre liaisons simples.

➤ **Activité de traitement : mise en évidence de l'isomérisation**

A partir de la formule développée d'une molécule donnée (le butane par exemple) on peut obtenir une autre formule développée (méthylpropane). Les deux composés ont les mêmes formules brutes, mais des formules développées différentes : ce sont des isomères.

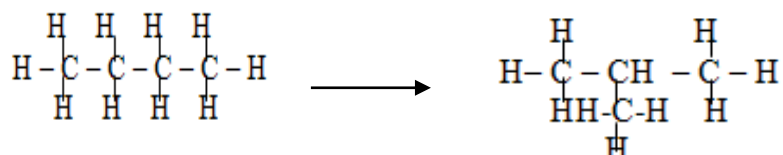


Figure 3: isomérisation de la molécule de butane

Le traitement dans le système des formules développées nous donne la connaissance des isomères d'une molécule donnée.

➤ **Conversion**

Sans avoir besoin de connaître le nom de la molécule (ou l'enchaînement des atomes), une formule développée se convertit en formule brute et semi-développée, en représentation de Cram ou en représentation en perspective. Par exemple, à partir de la formule développée de l'éthane, on peut obtenir sa formule brute, sa formule semi-développée, une représentation en perspective et une représentation de Cram.

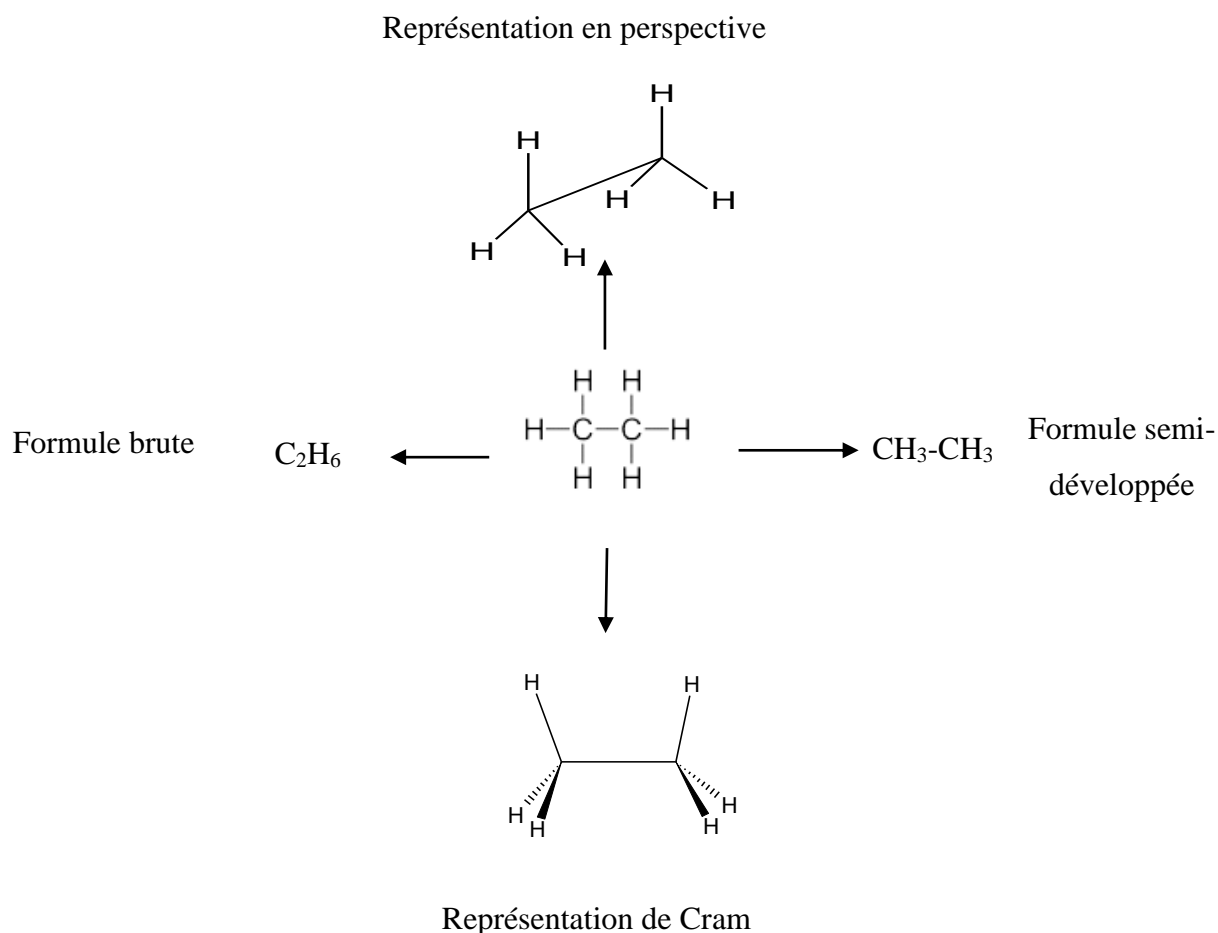


Figure 4 : conversions possibles de la formule développée de l'éthane

I.2.1.3. Système des formules semi-développées

➤ Représentation

Il s'agit d'une condensation de la formule développée. Les signes utilisés sont : les symboles des atomes, les chiffres, des traits simples, doubles et triples (pour les liaisons doubles ou triples). Dans la formule $\text{ClCH}_2\text{-CH=CH}_2$ par exemple, on peut voir qu'un atome du bout de la chaîne est lié à un atome de chlore, que les liaisons carbone-hydrogène sont condensées sous forme de CH_2 et CH , et qu'il existe à la fois une liaison simple et une liaison double entre les atomes de carbone.

➤ Activité de traitement : mise en évidence de l'isomérisation

A partir de la formule semi-développée d'une molécule (le butane par exemple) on peut obtenir une autre formule semi-développée (méthylpropane). Les deux composés ont la même formule brute, mais des formules semi-développées différentes : ce sont des isomères.



Figure 5: isomères de la molécule de butane

Comme dans le système des formules développées, le traitement dans le système des formules semi-développées nous donne également la connaissance des isomères d'une molécule.

➤ Conversion

Une formule semi-développée se convertit en formules brute et développée, en représentations de Cram et de Newman. Par exemple, à partir de la formule semi-développée de l'éthane $\text{CH}_3\text{-CH}_3$, on peut obtenir sa formule brute, sa formule développée, une représentation en perspective et une représentation de Cram.

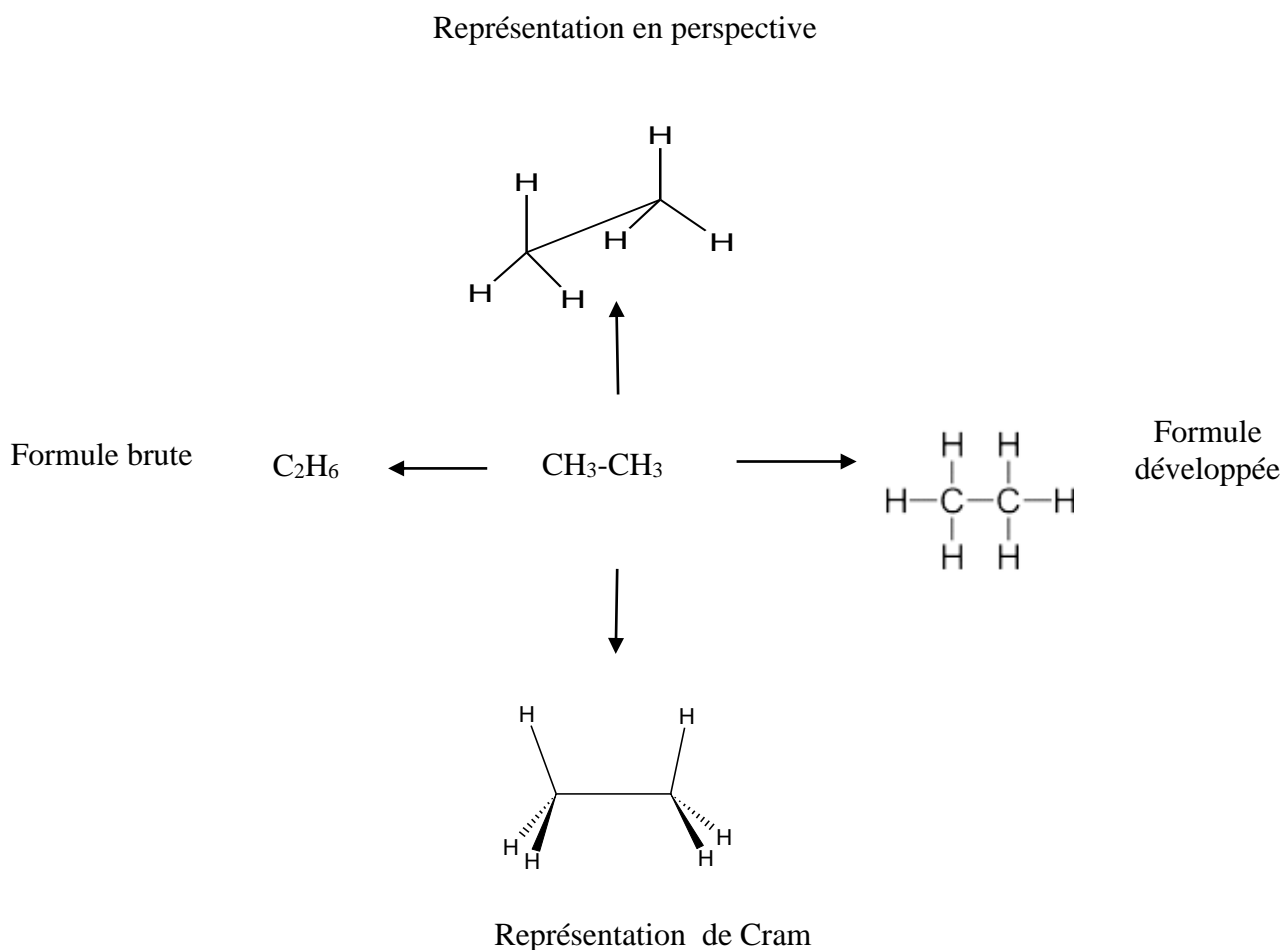


Figure 6 : conversions possibles de la formule semi-développée de la molécule d'éthane

I.2.2. Systèmes de projection

Nous distinguons le système de Cram, le système de la perspective et le système de Newman. Ces systèmes permettent la représentation bidimensionnelle de molécules à structure tridimensionnelle.

I.2.2.1. Système de Cram

➤ Représentation

Dans ce système, on a la connaissance de la représentation spatiale d'une molécule : autour de l'atome de carbone, deux liaisons situées dans le plan de la feuille sont représentées par un trait normal³ (—); une liaison pointant hors du plan de la feuille vers l'observateur, est représentée par un triangle gras (▲); une autre liaison en arrière du plan de la feuille, est représentée par un triangle hachuré (▨). Cette représentation est faite de telle sorte que les symboles des atomes liés au carbone soient au sommet d'un tétraèdre, les angles entre les traits de liaison valent environ 109°. Outre les signes déjà cités, on utilise également les symboles des atomes et quelquefois des chiffres pour indiquer leur nombre.

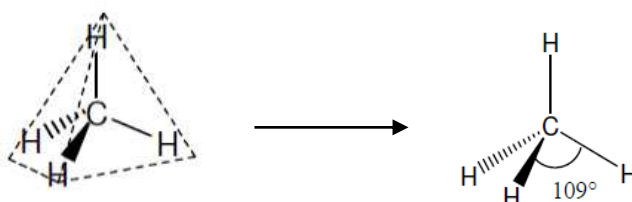


Figure 7: représentation de Cram de la molécule de méthane

La représentation de Cram est également appelée représentation spatiale ou représentation en coin volant.

➤ Activités de traitement

- **Mise en évidence de la stéréoisomérisie de conformation**

Des molécules ayant la même formule brute et un enchaînement d'atomes dans le même ordre, peuvent différer par la disposition spatiale de leurs atomes ; elles sont dites alors stéréoisomères.

³Dans les systèmes de projection, les traits représentent en fait les axes passant par les centres de deux atomes (axes internucléaires), le mot liaison aura ce sens à chaque fois que nous nous référerons à ces systèmes.

Dans une molécule, les noyaux et électrons sont en mouvement perpétuel. Ils occupent des positions relatives différentes au cours du temps, ce qu'on représente par l'idée de rotation de groupes d'atomes autour de l'axe internucléaire (axe d'une liaison simple). Les substituants d'un carbone peuvent donc prendre différentes positions par rapport aux substituants d'un autre carbone. Autrement dit, si nous considérons une conformation de l'éthane par exemple, on pourra passer de cette conformation à une autre, par rotation de l'un des groupements CH_3 autour de l'axe de la liaison simple $\text{C}-\text{C}$.

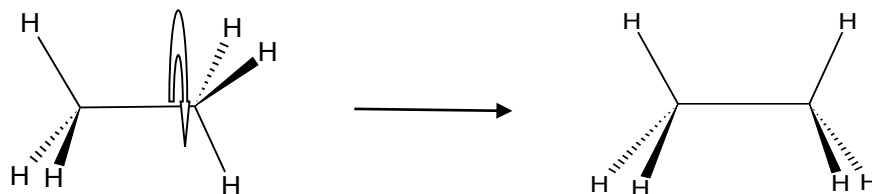


Figure 8: rotation libre de 180° autour de la liaison $\text{C}-\text{C}$

Cette rotation amène à définir un paramètre d'étude approprié pour repérer l'ensemble des conformations possibles: l'angle dièdre. L'angle dièdre est un angle formé par deux plans séquents, c'est le cas de l'angle $\text{HC}_1\text{C}_2\text{H}$ de l'éthane (angle α).

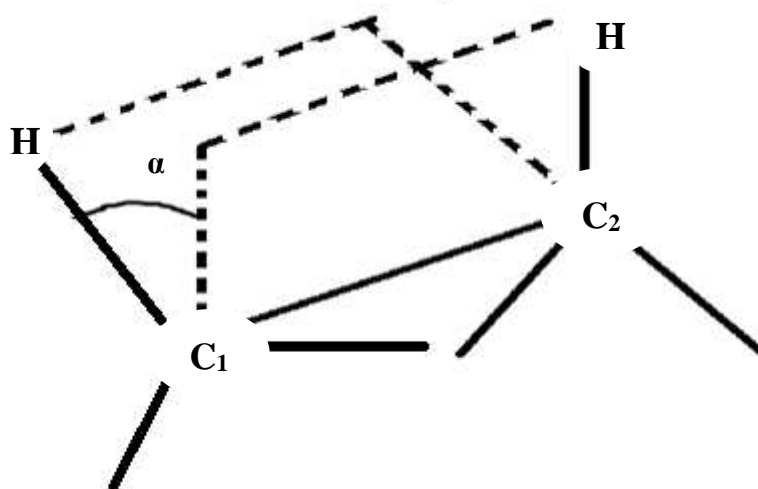


Figure 9 : angle dièdre $\text{HC}_1\text{C}_2\text{H}$ de l'éthane

Pour des angles dièdres égaux à (ou voisin de) 60° ou 180° la conformation est dite décalée. Une conformation est dite éclipsée lorsque l'angle dièdre vaut (ou est voisin de) 0° . Les conformations décalées et éclipsées sont des conformations remarquables ou extrêmes; on passe de l'une à l'autre par rotation successive autour de l'axe de la liaison $\text{C}-\text{C}$ d'un angle de 60° .

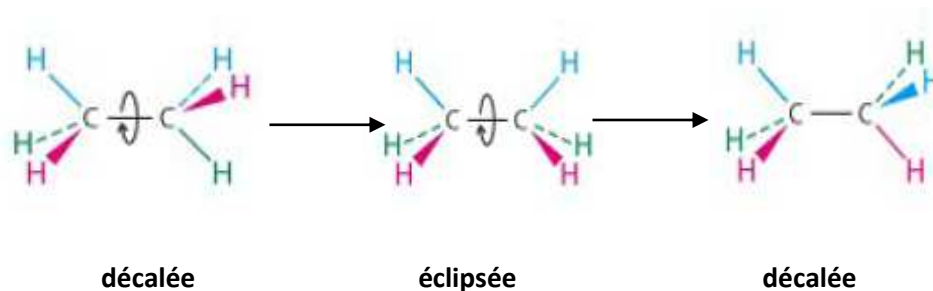
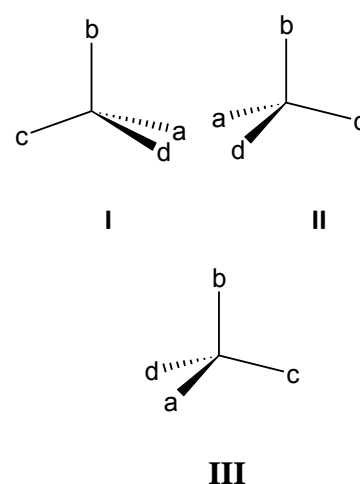


Figure 10: conformations de l'éthane obtenues par rotations successives de 60° d'un groupement $-\text{CH}_3$

- **Mise en évidence de l'énantiomérisie**

Considérons les représentations de Cram de molécules (I) et (II) ci-contre, ayant un atome de carbone asymétrique. On appelle carbone asymétrique, un carbone dont les quatre substituants sont différents ; et une molécule possédant un tel carbone est chirale. La rotation d'angle de 180° de la représentation (I) selon un axe vertical passant par l'atome de carbone, conduit à un composé (III). Ce composé diffère du composé (II) par la disposition des substituants a et d dont les places ont été permutées. Le passage de la forme (I) à la forme (II) par des rotations autour de l'axe de l'une des liaisons simples C—a, C—b, C—c, ou C—d, est impossible: ce sont des énantiomères.



On peut également constater que les molécules (I) et (II) sont images l'une de l'autre dans un miroir plan, et que leur superposition est impossible.

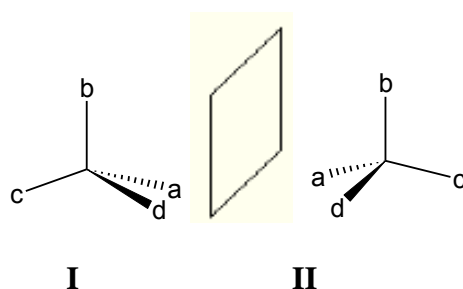
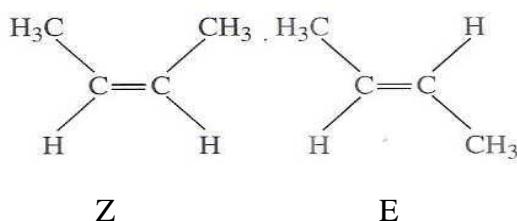


Figure 11: couple d'énantiomères

Ces différentes activités de traitement, montrent qu'il est possible, dans le système de Cram, de mettre en évidence la stéréoisomérie de conformation et l'énantiomérie.

- **Mise en évidence de la diastéréoisomérie Z et E**

A la formule semi-développée $R-CH=CH-R'$ ⁴ correspondent deux types de représentation de Cram dans le plan de la feuille. Supposons que R et R' sont identiques et correspondent à CH₃, on a les deux possibilités suivantes :



Ces deux représentations mettent en évidence des diastéréoisomères (c'est-à-dire des molécules stéréoisomères qui ne sont pas des énantiomères parce qu'il n'y a pas de rotation possible autour de la double liaison) : les groupements CH₃ sont tantôt du même côté de la double liaison (diastéréoisomérie Z), tantôt de part et d'autre (diastéréoisomérie E).

➤ **Conversion**

Une représentation de Cram d'une molécule peut être convertie en formules brute, développée et semi-développée, en représentation en perspective et en représentation de Newman. Par exemple, à partir de la représentation de Cram d'une conformation de l'éthane, on peut obtenir sa formule brute, sa formule développée, sa formule semi-développée, et sa représentation de Newman.

⁴ R et R' peuvent être identiques

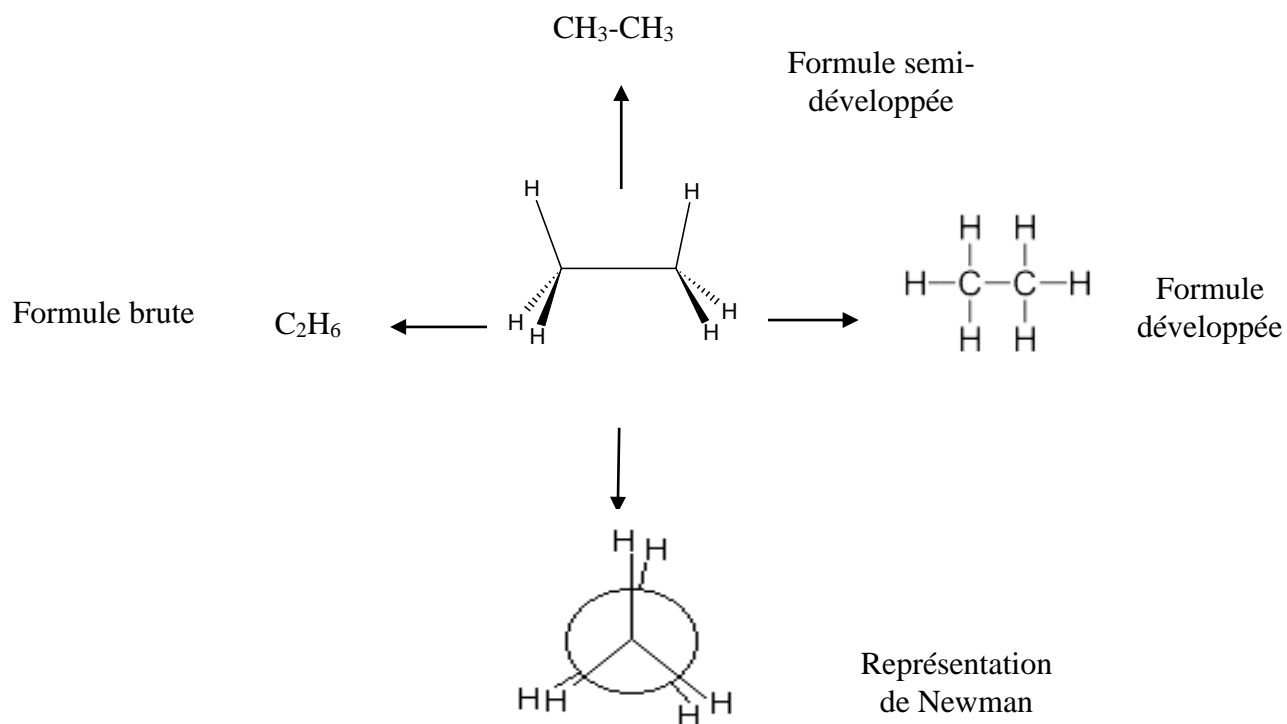


Figure 12 : conversions de la représentation de Cram

I.2.2.2. Système de la perspective

➤ Représentation

Ce système met en évidence la position relative des atomes (Eliel & Basolo, 1971). La molécule est vue sous un certain angle, et est représentée en perspective cavalière. Les liaisons sont représentées par des traits simples. On utilise également des signes tels que les symboles des atomes et quelquefois des chiffres pour indiquer leur nombre.

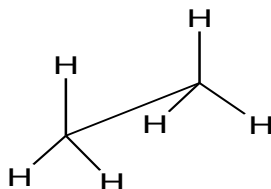


Figure 13: représentation en perspective de l'éthane

➤ **Activité de traitement : mise en évidence de la stéréoisomérie de conformation dans le cas du cyclohexane**

Toutes les opérations de traitement réalisées dans le registre de Cram peuvent être faites dans le registre de la perspective.

Considérons la molécule de cyclohexane par exemple. Elle peut présenter les conformations suivantes : la forme chaise et la forme bateau.



Figure 14: conformations chaise et bateau du cyclohexane en représentation en perspective

En conformation chaise, les liaisons C-C sont parallèles deux à deux et, les angles entre ces liaisons sont quasi-tétraédriques (111°). Il existe deux types de liaisons : des liaisons, sensiblement parallèles au plan moyen (c'est-à-dire le plan passant par le milieu de toutes les liaisons C—C du cycle) de cette conformation, appelées liaisons équatoriales, et des liaisons perpendiculaires à ce plan appelées liaisons axiales. Les hydrogènes respectifs de ces liaisons, sont appelés hydrogènes équatoriaux (Hé) et hydrogènes axiaux (Ha).

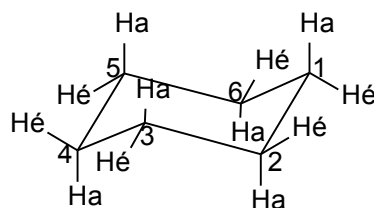


Figure 15: hydrogènes axiaux (Ha) et équatoriaux (He) du cyclohexane en conformation chaise

Le positionnement des liaisons axiales dépend de celui de l'atome de carbone situé à l'extrême droite (ou à l'extrême gauche) de cette conformation. Si ce dernier est orienté vers le haut (ou vers le bas), alors la liaison axiale portée par ce carbone le sera également. Et en circulant tout le long du cycle, on doit rencontrer successivement une liaison axiale dirigée vers le bas, puis une autre dirigée vers le haut et ainsi de suite. La liaison équatoriale quant à elle, est positionnée de telle sorte qu'elle soit parallèle aux liaisons C—C liées aux liaisons C—C convergeant vers le carbone qui la porte.

Dans la figure ci-dessus par exemple, les carbones situés aux extrémités droite et gauche sont, respectivement, les carbones 1 et 4. Si nous observons le carbone 1, on peut constater qu'il est

dirigé vers le haut, de même que la liaison axiale (C_1-H_a), la liaison équatoriale (C_1-H_e) est parallèle aux liaisons (C_5-C_6) et (C_3-C_2).

Le passage d'une conformation à une autre se fait par retournement de l'une des branches du cycle. On peut ainsi passer d'une conformation chaise à une autre conformation chaise par l'intermédiaire de la conformation bateau (interconversion chaise-chaise).

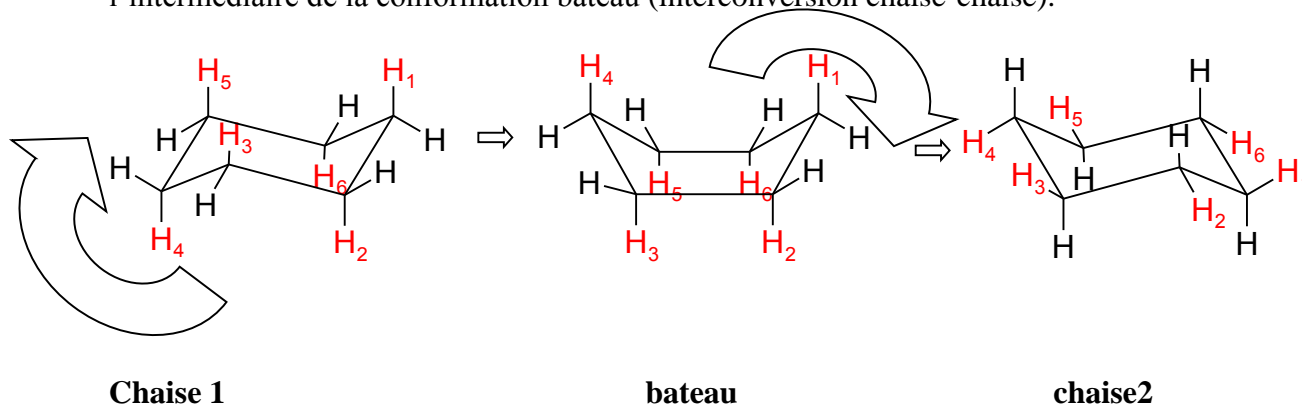


Figure 16: interconversion chaise-chaise

Lors de cette interconversion, les positions axiales deviennent équatoriales et vice versa.

➤ Conversion

Une représentation en perspective d'une molécule peut être convertie en formules brute, développée et semi-développée, en représentation de Cram et en représentation de Newman. Par exemple, à partir de la représentation en perspective d'une conformation de l'éthane, on peut obtenir sa formule brute, sa formule développée, sa formule sémi-développée, et sa représentation de Newman.

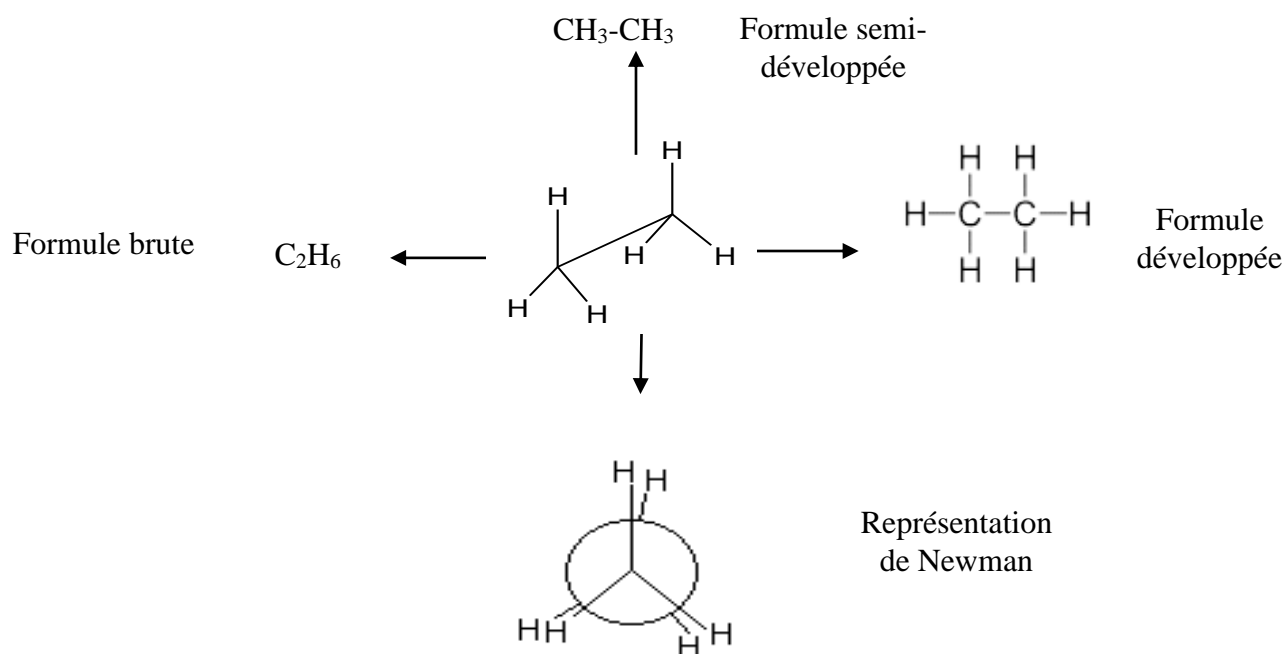


Figure 17 : conversions de la représentation en perspective de l'éthane

I.2.2.3. Système de Newman

➤ Représentation

Dans ce système, on a la connaissance de la position des substituants de deux carbones adjacents, les uns par rapport aux autres, et de leurs liaisons respectives. La représentation spatiale de la molécule est observée suivant l'axe de la liaison C—C choisie, en se plaçant à sa gauche ou à sa droite. Les liaisons établies, entre les atomes de carbone de l'axe C—C et leurs voisins, sont projetées dans le plan perpendiculaire à l'axe de la liaison choisie. Par convention, le carbone le plus proche est représenté par un point situé au point d'intersection des trois autres liaisons afférentes; le carbone le plus éloigné de l'observateur est représenté par un cercle duquel partent trois de ses quatre liaisons, figurées par des segments radiaux. A ces représentations, s'ajoutent également les symboles des atomes liés à ces carbones.

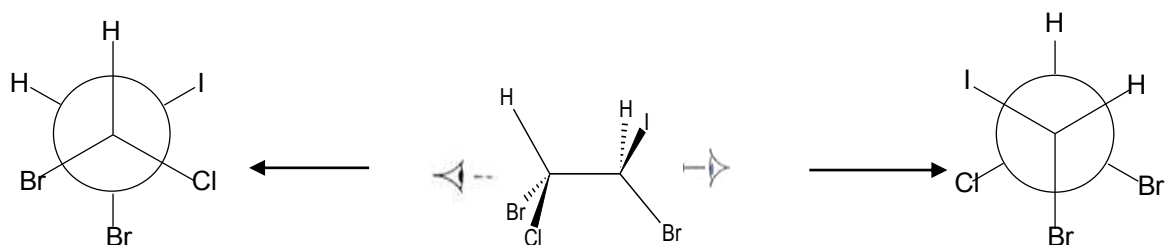


Figure 18 : exemples de représentations de Newman pouvant être obtenues à partir d'une représentation de Cram⁵

Les angles de 109° entre deux liaisons d'un carbone dans l'espace, deviennent des angles de 120° en projection. Les conventions de représentation de Newman permettent de faire la distinction sur le dessin entre les atomes de carbone et leurs liaisons afférentes, et non pas de reproduire la représentation mentale de la réalité dans laquelle l'observateur ne voit pas, en représentation spatiale, l'atome de carbone éloigné puisqu'il est occulté par l'atome de carbone proche (Pellegrin, 1999).

➤ **Activité de traitement : mise en évidence de la stéréoisomérie de conformation**

Des rotations autour de l'axe de la liaison C—C, donnent de nouvelles positions des substituants des carbonnes. On peut ainsi voir que les substituants des carbonnes sont éclipsés entre eux (angle dièdre $\alpha = 0^\circ$) ou décalés ($\alpha = 60^\circ$ ou 180° par exemple).

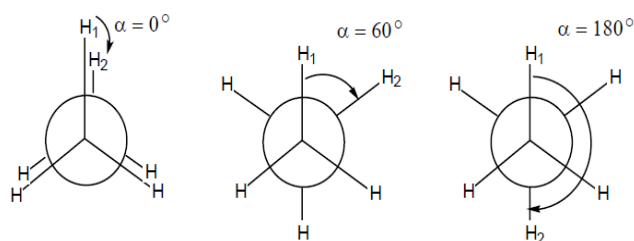


Figure 19 : exemples de rotations donnant des conformations de l'éthane

Cette activité de traitement met également en évidence les différentes conformations d'une même molécule. Nous tenons à souligner qu'il est également possible de mettre en évidence l'énantiométrie ou la diastéréoisomérie à partir d'une activité de traitement dans le système de Newman, toutefois nous nous abstenons de développer cette activité parce qu'elle ne figure dans notre objet d'étude.

⁵ Le dessin indique la position de l'œil de l'observateur.

➤ Conversion

Une représentation de Newman d'une molécule peut être convertie en formules brute, développée et semi-développée, en représentations de Cram ou en perspective.

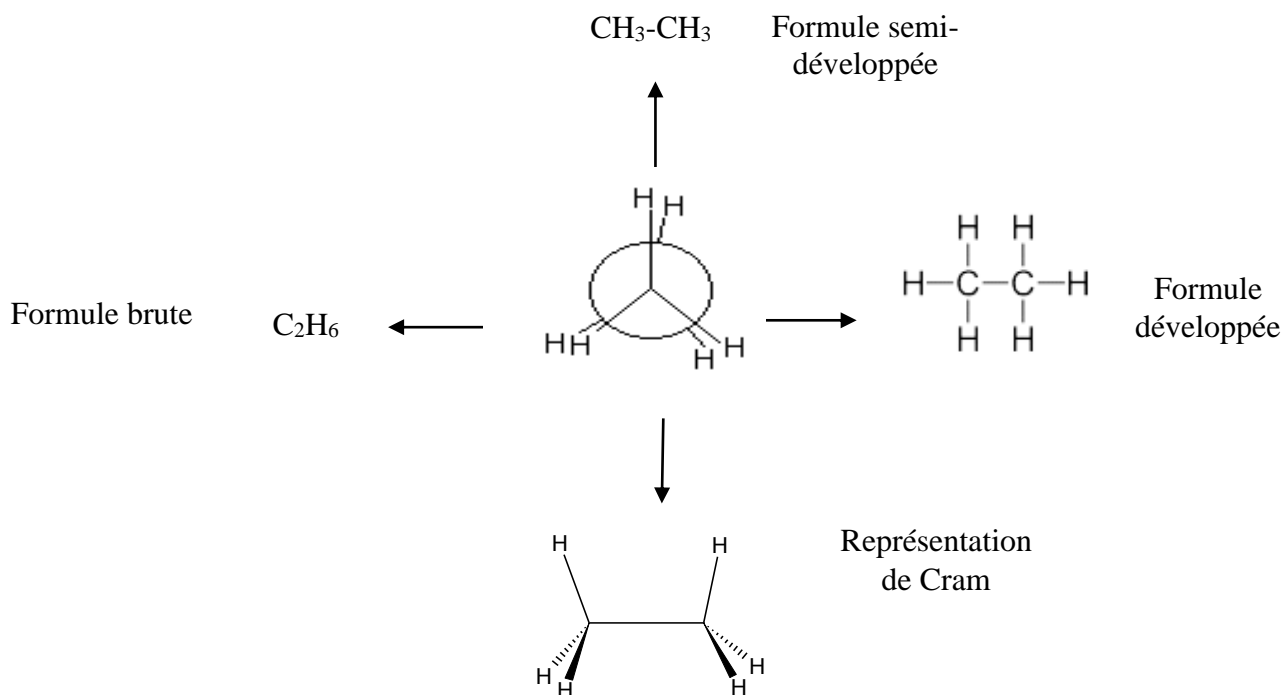


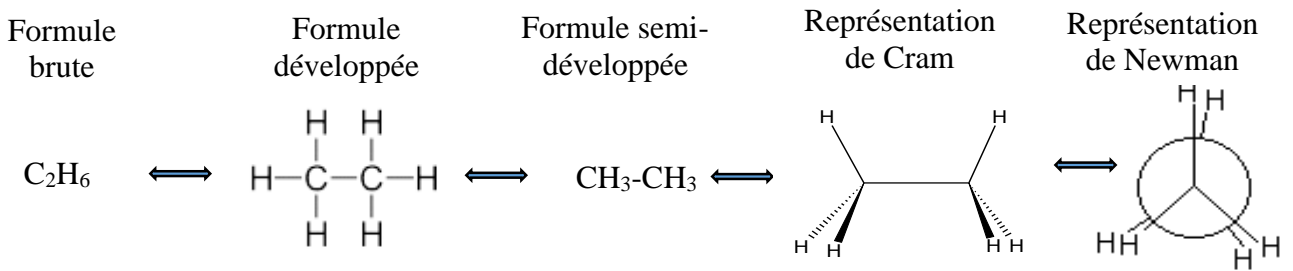
Figure 20 : conversions d'une représentation de Newman

I.3. Chaîne de conversion inter système

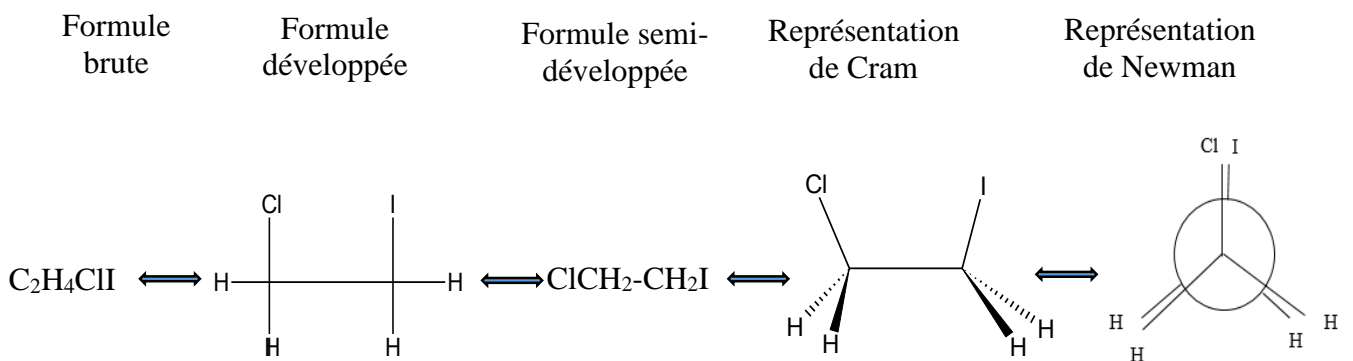
Les différents systèmes sémiotiques énumérés ci-dessus s'interconvertissent, on peut ainsi réaliser une chaîne de conversion en passant de la formule brute, à la formule développée, à la formule semi-développée, à la représentation de Cram ou à la représentation de Newman, et inversement. Toutefois, la réalisation de cette chaîne de conversion exige au préalable une connaissance du nom de la molécule, car à une même formule brute peuvent correspondre plusieurs molécules. Par exemple, à la formule brute C_2H_4ICl peuvent correspondre les molécules de 1-chloro-2-iodoéthane et de chloriodoéthane, et donc des formules différentes dans les autres systèmes sémiotiques (développée, semi-développée, Cram et Newman).

Nous présentons dans les lignes suivantes, des exemples de chaînes de conversion inter système de l'éthane, du 1-chloro-2-éthane et du chloriodoéthane; les exemples de représentation de Newman sont obtenues en observant la représentation de Cram à gauche.

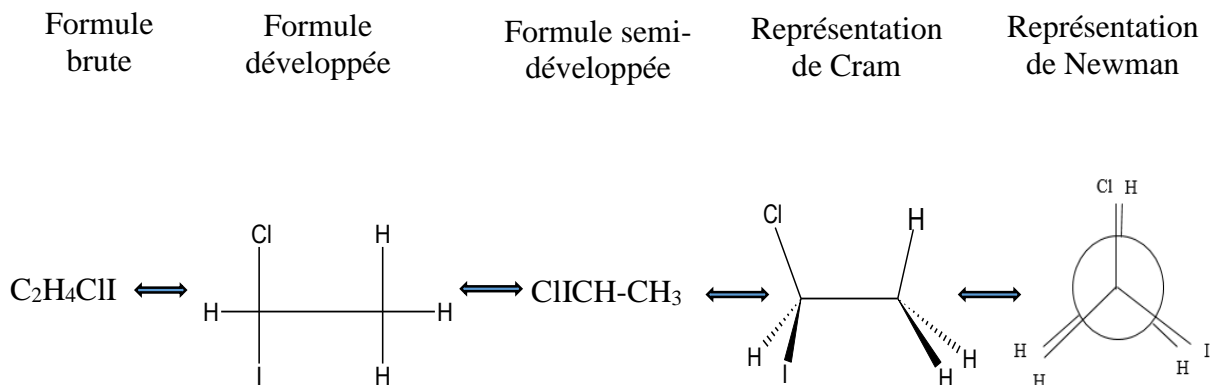
• Chaîne de conversion inter système de l'éthane



• Chaîne de conversion inter système du 1-chloro-2-iodoéthane



• Chaîne de conversion inter système du chloriodoéthane



Nous présentons dans le tableau suivant un résumé des fonctions cognitives des systèmes sémiotiques.

Systèmes sémiotiques Fonctions Cognitives	Formules brutes	Formules développées	Formules semi- développées	Cram	Perspective	Newman
Représentation ou communication	nombre et type d'atomes constituant une molécule	Enchaînement atomique et nature des liaisons chimiques dans la molécule	Enchaînement atomique et nature des liaisons chimiques dans la molécule	Structure spatiale de la molécule	position relative des atomes	position des liaisons et des substituants de deux carbones adjacents, les uns par rapport aux autres
Activité de traitement	Aucune	Mise en évidence de l'isomérie	Mise en évidence de l'isomérie	Mise en évidence de la stéréoisomérie de conformation ; des configurations Z et E ; et de l'énantiomérie	Mise en évidence de la stéréoisomérie de conformation ; des configurations Z et E ; et de l'énantiomérie	Mise en évidence de la stéréoisomérie de conformation ; de l'énantiomérie et de la diastéréoisomérie
Résultat de la conversion	Formules développée ou semi- développée	Formules brute ou semi-développée, représentations de Cram, en perspective ou de Newman	Formules brute ou développée, représentations de Cram, en perspective ou de Newman	Formules brute, développée ou semi-développée, représentations en perspective ou de Newman	Formules brute, développée ou semi-développée, représentations de Cram ou de Newman	Formules brute, développée ou semi- développée, représentation de Cram ou en perspective

Tableau 1: fonctions cognitives assurées par des systèmes sémiotiques

I.4. Coordination des registres sémiotiques

L'examen du tableau précédent montre qu'à l'exception du système des formules brutes, tous les autres systèmes remplissent les trois fonctions : communication, traitement et conversion. Nous pouvons donc les désigner registre sémiotique.

Bien que les différents registres (ou systèmes) sémiotiques soient utilisés pour représenter, le plus souvent, un même contenu : la molécule; ils n'en montrent pas les mêmes aspects (les possibilités de représentation et de traitement dans les différents registres étant distinctes). Par exemple le système de Cram donne des informations sur la géométrie de la molécule, contrairement au système de Newman.

Comme en mathématiques, pour comprendre certains contenus de stéréochimie, la coordination des différents registres est nécessaire c'est-à-dire, la capacité de reconnaître dans ces différentes représentations, des représentations d'un même contenu notionnel (Duval, 1993, 1996, 2005). La représentation d'une molécule dans le système de Newman, par exemple, résulte de la projection de sa représentation de Cram sur un plan. Nous voyons bien là le lien étroit qui existe entre les différents registres, d'où l'importance de leur coordination pour un meilleur apprentissage.

Toutefois, les élèves ne reconnaissent pas le même objet à travers des représentations qui en sont données dans des registres sémiotiques différents, et les conversions inter-registres suscitent de grandes difficultés (Duval, 1993). En chimie, ils ont également du mal à coordonner les multiples systèmes sémiotiques et la conversion entre eux (Bucat & Mocerino, 2009, Kozma & Russell, 1997, Stieff & Mc Combs, 2006) (le passage de la représentation de Cram à celle de Newman, et vice versa, peut être cité en exemple).

« *L'absence de coordination n'empêche pas toute compréhension* » (Duval, 1993). Si le registre de représentation est bien choisi, ses représentations suffisent pour permettre la compréhension de la notion représentée; toutefois, cette compréhension se limitera au contexte sémiotique de ce seul registre, réduisant ainsi les possibilités de mobiliser les connaissances acquises dans des apprentissages ultérieurs (Duval, 1993).

II. Système de modèles moléculaires

Les modèles moléculaires sont des objets matériels. Comme le soulignent Khanfour-Armalé et Le Maréchal (2009), ce ne sont pas des représentations au sens sémiotique du terme, car ils ne sont pas, en deux dimensions. Ces auteurs ont montré qu'ils présentent néanmoins les caractéristiques d'un système sémiotique tel que défini par Duval : représentation des caractéristiques géométriques des molécules (activité de communication), mise en évidence de l'isomérisation par exemple (activité de traitement) et passage du modèle moléculaire à un système sémiotique (activité de conversion). Nous procédons ici à une présentation détaillée des activités cognitives qu'ils permettent dans le cadre de la stéréochimie en terminale D au Bénin

➤ Représentation

Les modèles moléculaires reproduisent, comme la représentation de Cram, la structure spatiale des molécules. Ils « *sont basés sur une conception de la molécule (Paolini, 1985) dans laquelle les atomes gardent leur identité, et possèdent des caractéristiques invariantes d'une molécule à une autre, comme la taille avec laquelle ils sont représentés* » (Simon, 1998). Il existe deux types de modèles moléculaires : les modèles éclatés et les modèles compacts.



Figure 21: modèles compact et éclaté de l'éthane

Tous deux « *agissent comme des systèmes sémiotiques distincts au sens où chacun montre de la molécule un aspect particulier* » (Khanfour-Armalé & Le Maréchal, 2009). Le modèle compact montre la taille caractéristique du rayon de Van der Waals des atomes, alors que le modèle éclaté montre le squelette moléculaire (noyaux d'atomes et axes de liaison) (Boilevin et al., 1996, Simon, 1998, Khanfour-Armalé & Le Maréchal, 2009). Dans le cas du modèle compact, les nuages électroniques d'atomes sont matérialisés par des boules qui s'interpénètrent. En modèle éclaté leurs noyaux sont plutôt matérialisés par des boules sphériques, une tige représente le doublet d'électrons qui assure la liaison entre deux noyaux d'atomes. Dans les deux types de modèles moléculaires, à chaque atome correspond une boule de couleur et de volume bien précis (par exemple l'atome de carbone en noir, l'atome

d'hydrogène en blanc). Dans la suite de notre travail nous parlerons de « boule d'atome » et de « bâton de liaison » pour désigner les objets représentant les atomes et les liaisons.

➤ **Traitement**

Toutes les opérations de traitement réalisées dans le registre de Cram peuvent être faites avec un modèle moléculaire. Il est par exemple possible de réaliser une rotation autour de l'axe du bâton de liaison C—C du modèle moléculaire éclaté de l'éthane. Cela permet de mettre en évidence la stéréoisomérie de conformation.

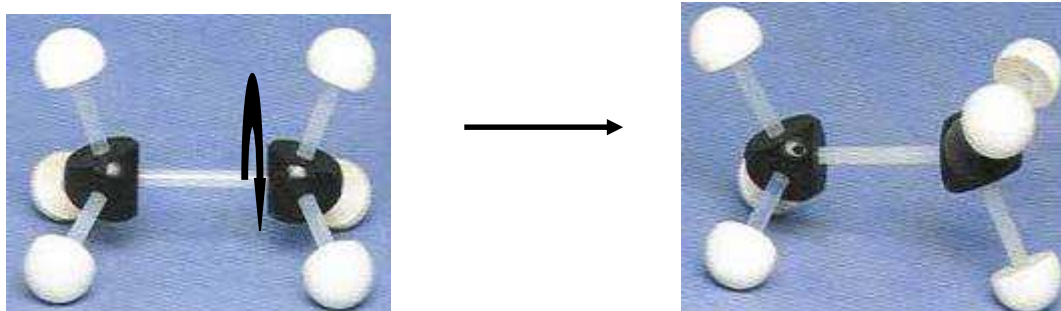


Figure 22: rotation libre de 180° autour du bâton de liaison C—C

➤ **Conversion**

Un modèle moléculaire peut être converti en différents systèmes sémiotiques (systèmes de Cram, de la perspective, de Newman...), et inversement. On peut par exemple transformer le modèle moléculaire de l'éthane en représentation de Cram, et inversement.

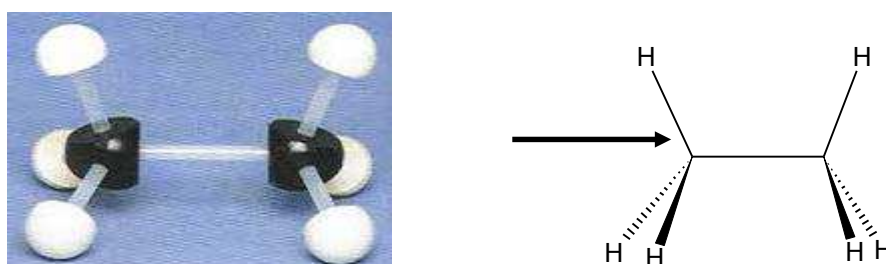


Figure 23: conversion du modèle moléculaire de l'éthane en représentation de Cram

Il convient de souligner que pour réaliser la conversion d'un modèle moléculaire en représentation spatiale, il est plus pratique que le plan vertical, passant par l'axe du bâton C—C, soit parallèle au plan frontal⁶ de l'observateur. Avec une conformation décalée ou éclipsée

⁶Le plan frontal est un plan vertical transversal coupant le corps humain parallèlement au plan du front.

(figures ci-dessous), on obtient à partir d'un modèle moléculaire placé à hauteur des yeux (vue de face) les trois vues en déplaçant le modèle moléculaire selon les trois flèches.

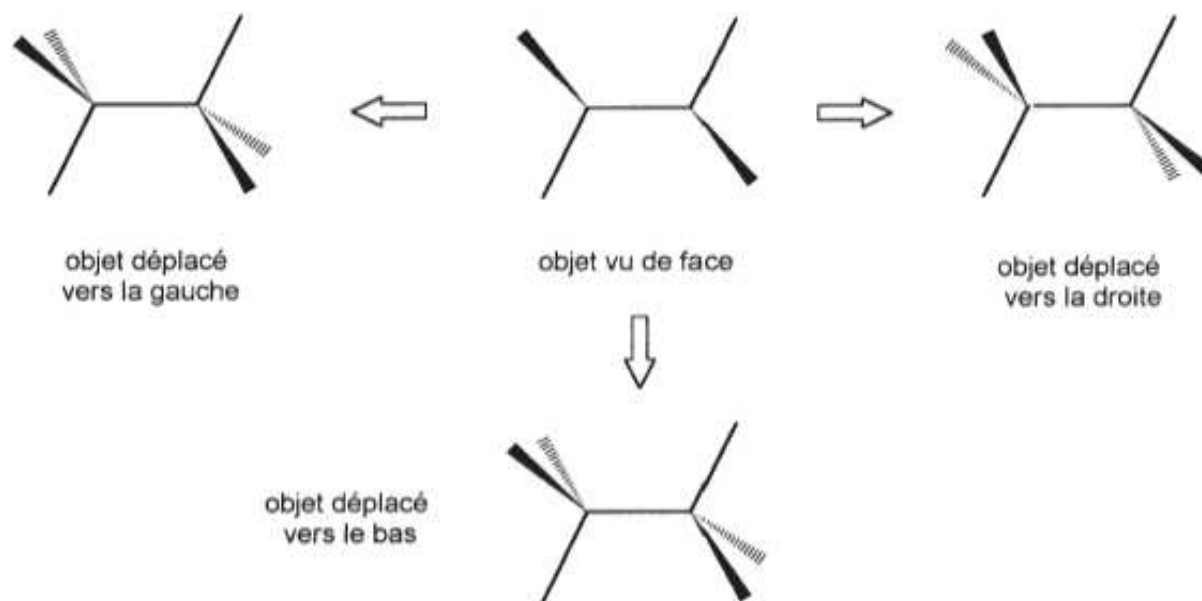


Figure 24: Représentation spatiale des bâtons de liaison d'un modèle moléculaire en conformation décalée (les flèches symbolisent le déplacement du modèle moléculaire, l'observateur étant fixe) (Pellegrin, 1999).

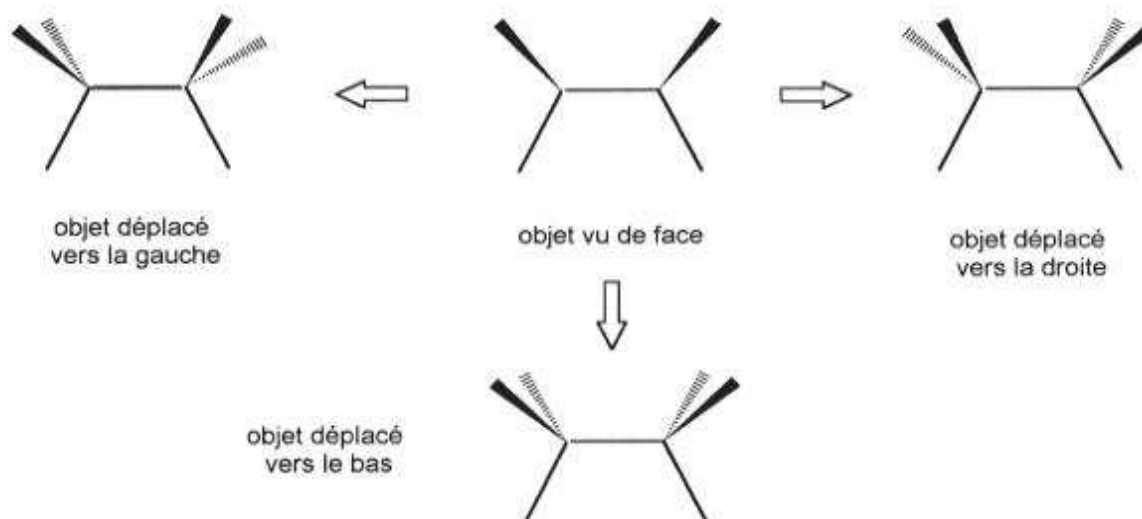


Figure 25: Représentation spatiale des bâtons de liaison d'un modèle moléculaire en conformation éclipsee type 1 (les flèches symbolisent le déplacement du modèle moléculaire, l'observateur étant fixe) (Pellegrin, 1999).

La conformation éclipsée (type 1) de la figure ci-dessus est celle d'un modèle moléculaire dont les bâtons de liaison contenus dans le plan vertical, passant par l'axe du bâton de liaison C—C, sont dirigés vers le bas. Pour obtenir les représentations spatiales de la conformation éclipsée d'un modèle moléculaire dont les bâtons de liaison contenus dans le plan vertical passant par l'axe du bâton de liaison C—C sont dirigés vers le haut, il suffit de réaliser une rotation de 180° autour de l'axe C—C des différentes représentations spatiales en conformation éclipsée type 1. On obtient ainsi les représentations spatiales de la figure ci-dessous.

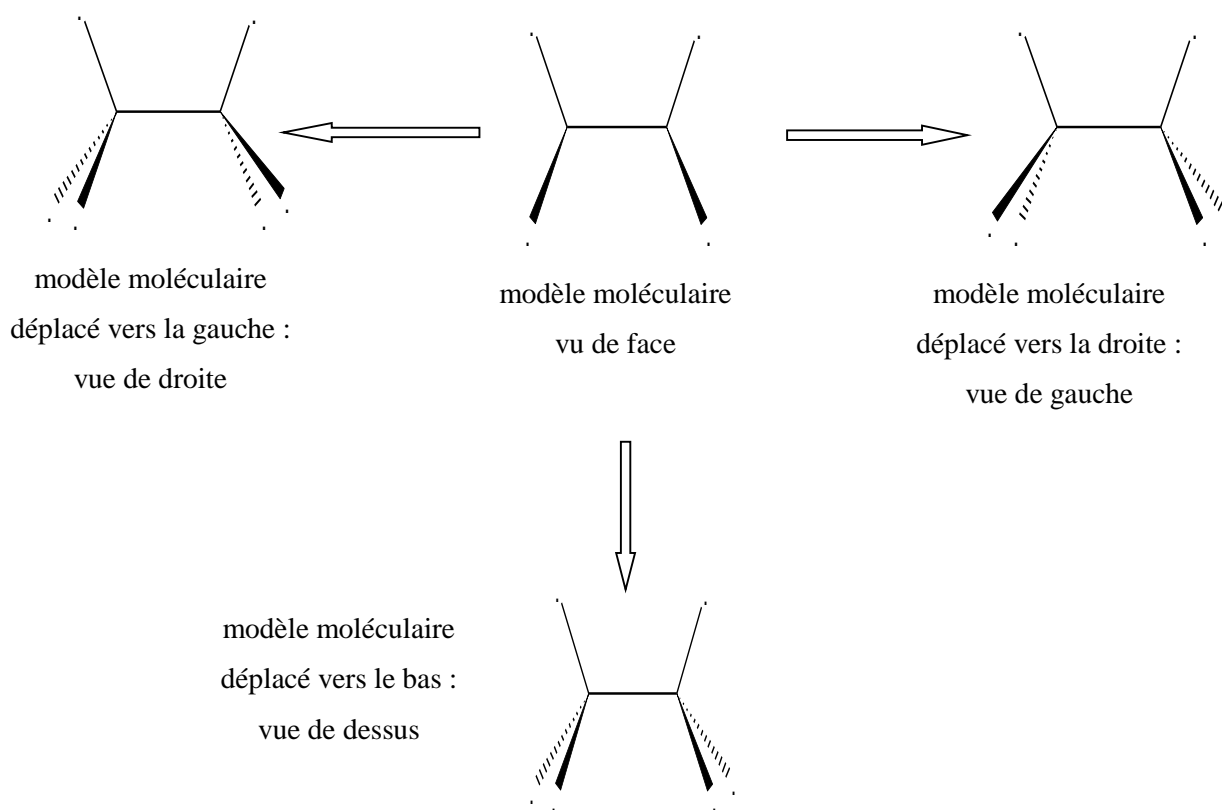


Figure 26: Représentation spatiale des bâtons de liaison d'un modèle moléculaire en conformation éclipsée type 2 (les flèches symbolisent le déplacement du modèle moléculaire, l'observateur étant fixe)

Un modèle moléculaire déplacé vers le bas est vu de dessus. Placé à gauche ou à droite de l'observateur, il est vu respectivement, de droite⁷ ou de gauche⁸.

⁷ Il s'agit de la droite du modèle moléculaire

⁸ Il s'agit de la gauche du modèle moléculaire

III. Conclusion

Le cadre théorique de Duval nous a permis de circonscrire les activités cognitives (communication, traitement et conversion) qui peuvent être réalisées avec les systèmes sémiotiques :

- de formules (formules développée et semi-développée) pour décrire l'isométrie ;
- de projections (de la perspective, de Cram et de Newman) et des modèles moléculaires expliquer la stéréochimie : ils permettent la mise en évidence des propriétés de stéréoisométries conformationnelle et configurationnelle.

Ces systèmes sont des registres sémiotiques, et n'offrent pas les mêmes possibilités de représentation de la molécule. Leur coordination est essentielle pour comprendre le contenu de stéréochimie.

Bien que les modèles moléculaires ne soient pas des représentations au sens sémiotique du terme, ils permettent les mêmes activités cognitives que certains systèmes sémiotiques, en l'occurrence celui de Cram. Leur supériorité par rapport à un système sémiotique de Cram réside dans le fait que ce sont des objets matériels tridimensionnels qu'il est possible de manipuler, alors que l'utilisation des systèmes sémiotiques en général nécessite une visualisation mentale de la molécule.

Dans le prochain chapitre, nous cherchons à voir dans quelle mesure les systèmes sémiotiques et les systèmes des modèles moléculaires sont intégrés dans le contenu à enseigner.

Chapitre 2 : Analyse de programmes et du manuel

Ce chapitre est consacré à l'analyse du contenu de stéréochimie à enseigner en terminale D. Nous analysons à la fois le manuel scolaire recommandé officiellement, le programme d'enseignement et son commentaire.

Cette analyse vise à vérifier, d'une part, la cohérence du programme d'enseignement (Soetewey et al., 2011), c'est à dire à établir un lien entre le contenu de stéréochimie prescrit, les objectifs pédagogiques, et les capacités attendues des élèves. D'autre part, elle a pour but de déterminer l'adéquation entre le programme d'enseignement et le contenu de stéréochimie traité dans le manuel recommandé par les instructions officielles. Ce manuel est conçu selon un programme d'enseignement français antérieur au programme béninois, il peut ou ne pas être adapté à ce programme.

Nous analysons le contenu à enseigner sous l'angle de la sémiotique. Nous cherchons à voir dans quelle mesure les systèmes sémiotiques et des modèles moléculaires sont utilisés dans le programme et le manuel : à quels systèmes sémiotiques le contenu à enseigner se réfère-t-il ? Quelles activités cognitives sont mises en jeu dans le contenu de stéréochimie prescrit, les objectifs pédagogiques et les capacités attendues des élèves?

Nous avons débuté notre étude sur l'enseignement et l'apprentissage de la stéréochimie en terminale D au Bénin, en septembre 2009. Jusqu'à la rentrée scolaire 2010-2011, le programme d'enseignement était conçu selon un courant pédagogique, qui s'appuie sur des principes de découpage des tâches d'apprentissage caractéristiques du behaviorisme : la pédagogie par objectifs (PPO). Cependant, à la rentrée scolaire 2011-2012, année au cours de laquelle nous recueillons nos dernières données (entretiens élèves et enseignants), le programme de terminale D change. Il est élaboré selon l'approche par les compétences (APC). Nous assistons ainsi au passage d'une approche de type analytique à une approche de type intégratif et contextualisé (Crahay, 2006). Nous clôturons notre travail d'analyse par un examen comparatif des programmes PPO (1995) et APC (2011) du point de vue du contenu à enseigner et des capacités attendues des élèves.

Nous présentons d'abord le cadre d'analyse auquel nous nous référons, les objectifs pédagogiques, les notions de compétence et capacité, puis l'analyse en elle-même.

I. Cadre d'analyse

I.1. Objectifs pédagogiques

Une des lignes directrices du cadre d'analyse du manuel scolaire, du programme et de son commentaire se réfère aux objectifs pédagogiques. Nous analysons le lien qu'il y a entre les objectifs pédagogiques du programme et les systèmes sémiotiques et modèles moléculaires : à quelle(s) activité(s) cognitive(s) permise(s) par les systèmes sémiotiques renvoient-ils? Qu'en est-il des modèles moléculaires ?

La pédagogie par objectifs, encore appelée PPO, consiste à définir et à préciser les objectifs à atteindre dans une séquence d'enseignement apprentissage. Objectifs que nous considérons comme des énoncés définissant, de la façon la moins équivoque possible et en termes de capacités de l'élève, les résultats escomptés des séquences d'apprentissages ; la capacité étant l' aptitude ou le comportement que l'élève met en œuvre pour faire quelque chose (nous reviendrons plus en détail sur la définition de la notion de capacité dans le paragraphe I.2). Considérons par exemple l'objectif suivant extrait du programme: *écrire la représentation conventionnelle des liaisons de l'atome de carbone tétraédrique*; l'élève devra donc être capable de l'écrire à la fin de la séquence d'apprentissage. Il s'agit là de la capacité attendue de l'élève. L'objectif pédagogique «*décrit donc une intention, plutôt que le processus d'enseignement lui-même*» (Mager, 2005, p.5), et est intimement lié à la capacité attendue de l'élève à la fin de la séquence d'apprentissage. Les objectifs constituent le niveau le moins général dans la hiérarchie des intentions pédagogiques :

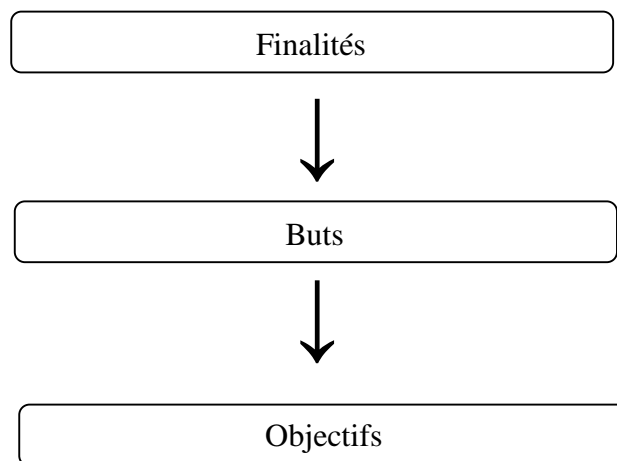


Figure 27: Hiérarchie des intentions pédagogiques

On entend par finalité, «une affirmation de principe au travers de laquelle une société ou un groupe social, identifie et véhicule ses valeurs. Elle fournit des lignes directrices à un système éducatif et des manières de dire au discours sur l'éducation» (Hameline, 1979) (exemple extrait du commentaire programme : «l'enseignement de la chimie organique en terminale D a pour finalité de montrer l'importance pratique de la chimie organique et de donner les notions de base de cette chimie en relation avec la biologie»); et par but, «un énoncé définissant de manière générale les intentions poursuivies à travers un programme ou une action déterminée de formation» (Ibid.) (exemple extrait du commentaire du programme : «le but de l'enseignement de la chimie organique dans les classes terminales est d'apporter des notions de stéréochimie pour expliquer la réactivité des molécules surtout dans la chimie du vivant»).

La formulation d'un objectif opérationnel est indispensable pour concevoir une évaluation objective et obtenir les résultats escomptés d'une action. Elle doit répondre aux cinq questions suivantes (De Landsheere, 1976) :

1. Qui produira le comportement souhaité ?
2. Quel comportement observable démontrera que l'objectif est atteint ?
3. Quel sera le produit de ce comportement (la performance) ?
4. Dans quelles conditions le comportement doit-il avoir lieu ?
5. Quels critères serviront à déterminer si le produit est satisfaisant ?

Exemple d'objectif opérationnel extrait du programme : *Utiliser les modèles moléculaires pour représenter un couple d'énantiomères à partir de la formule développée plane.*

Question 1 : Qui produira le comportement souhaité ?

Réponse : sous-entendu l'élève

Question 2 : Quel verbe d'action indique le comportement observable à la fin de l'apprentissage ?

Réponse : représenter

Question 3 : Quel sera le produit de ce comportement (la performance) ?

Réponse : couple d'énantiomères

Question 4 : Dans quelles conditions le comportement doit-il avoir lieu ?

Réponse : en utilisant les modèles moléculaires

Question 5 : Quels critères serviront à déterminer si le produit est satisfaisant ?

Réponse : elle est implicite, il revient à l'enseignant de les préciser.

Un tel objectif est dit comportementaliste, car il vise à intervenir sur le comportement. Notons cependant qu'on peut considérer un objectif comme suffisamment défini si seulement les trois premières conditions sont remplies, les deux dernières ne jouant un rôle important qu'au niveau de la conception des tâches d'évaluation.

I.2. Compétence et capacité

Pour examiner les dissemblances ou les ressemblances entre les programmes PPO et APC, nous trouvons utile de clarifier les notions de compétence et de capacité, afin d'éviter tout amalgame dans leur emploi.

La définition de la notion de compétence est équivoque (Rey, 2008; Carette, 2009; Rey et al., 2012; Jonnaert, 2002; Jonnaert et al. ; 2005, Crahay, 2006). Jonnaert (2002, p.48-40) propose un point de vue synthétique de cette notion et résume les définitions recensées sur la littérature relative à la notion de compétence (D'Hainaut, 1988; Gillet, 1991; Meirieu, 1991; Raynal et Rieunier, 1997; Perrenoud, 1997; Jonnaert et al. 1990; Pallascio, 2000) en cinq points :

1. Une compétence est une mise en œuvre, par un élève, de savoirs de différents types (savoir-être, savoir-faire ou savoir-devenir) dans une situation donnée. Elle est contextualisée dans une situation précise et dépendante de la représentation que l'élève se fait de cette situation.
2. Cette mise en œuvre fait appel à la mobilisation d'un ensemble de ressources d'ordre cognitif (par exemple des connaissances), social (par exemple, l'inscription de cette situation dans un projet personnel), contextuel (par exemple l'utilisation d'un modèle moléculaire) ou autres, pertinentes pour la situation.
3. Les ressources mobilisées doivent être triées de façon à ne retenir que celles qui conviennent pour traiter une situation. Les ressources retenues sont mises en relation ou coordonnées entre elles de manière à être les plus efficaces possibles dans la situation.
4. Le traitement des tâches que requiert la situation retenue devra être un succès.
5. Les résultats obtenus doivent avoir une dimension éthique; ils doivent être socialement acceptables.

Les trois premiers points, que nous considérons comme les composantes de base d'une compétence, se retrouvent notamment dans la définition de Lasnier (2000) retenue dans le

programme béninois : Une compétence est un «*un savoir-agir complexe résultant de l'intégration, de la mobilisation et de l'agencement d'un ensemble de capacités, d'habiletés et de connaissances utilisées efficacement*».

Les points recensés par Jonnaert, à propos de la définition d'une compétence, montrent que le concept de situation est central lorsqu'on évoque une compétence. La situation consiste à «*donner à l'élève l'occasion d'exercer la compétence visée : un problème complexe à résoudre, un travail de production personnelle, une activité de recherche, etc* » (Roegiers, 1999). Un autre élément primordial qui se dégage de l'ensemble des points inventoriés par Jonnaert, est l'ancrage d'une compétence dans des contextes qui lui donnent du sens.

Une capacité, c'est le pouvoir, l'aptitude à faire quelque chose. C'est une "*[...] activité intellectuelle stabilisée et reproductible dans des champs divers de connaissance ; terme utilisé souvent comme synonyme de "savoir-faire". Aucune capacité n'existe à l'état pur et toute capacité ne se manifeste qu'à travers la mise en oeuvre de contenus*" (Meirieu, 1990, p. 181). Jonnaert (2002) et Roegiers (1999) positionnent la capacité au niveau d'éléments sur lesquels repose la compétence : une compétence se développe parce que les capacités qui la fondent s'appliquent graduellement sur des situations variées. Il y a un rapport d'inclusion entre compétence et capacité, une compétence inclut forcément la coordination d'une série de capacités à d'autres ressources pour le traitement d'une situation (Jonnaert et al., 2005).

II. Analyse du manuel scolaire

Le manuel de chimie recommandé par le programme se réfère au programme de lycée français de 1989 ; il est antérieur au programme béninois, mis en place en 1995. Notre approche d'analyse porte à la fois sur les contenus textuels et les contenus sémiotiques. Nous examinons la place occupée par les systèmes sémiotiques et modèles moléculaires dans le contenu à enseigner du manuel.

L'examen du manuel est précédé de sa présentation générale et de sa structuration.

II.1. Présentation et structuration du manuel scolaire

Dans la gamme de manuels de chimie existant en terminale D, nous nous sommes limités exclusivement à celui recommandé par les instructions officielles (Ecollan De Coligny et al., 1989), et qui semble être le plus utilisé aussi bien par les enseignants que par les élèves.

Dans l'avant-propos, les auteurs expliquent que ce livre s'adresse aux élèves et, répond aux objectifs suivants :

- Donner une importance particulière à l'expérience : « *en chimie organique, nous nous sommes attachés à donner des descriptions précises d'expériences et à les présenter soigneusement sous forme de dessin ou de photographies* ».
- Aider à la préparation du baccalauréat : « *l'élève trouvera dans son manuel ce qui est nécessaire pour comprendre les phénomènes et résoudre les problèmes : explications simples mais dans un langage à sa portée ; nombreux exercices résolus inclus dans le cours et qui fournissent le moyen d'acquérir rapidement les méthodes de résolution des principaux types de problèmes posés au baccalauréat ; [...]* »

A la fin de chaque chapitre se trouve une rubrique « Pour vous tester » avec des réponses expliquées permettant de faire le point sur le chapitre étudié, et une série de problèmes regroupant des exercices simples (application directe du cours), de niveau moyen ou nécessitant une connaissance approfondie du cours. Les questions posées sont ordonnées selon leur niveau de complexité croissante.

La table des matières comprend trois parties : chimie générale (114 pages), chimie organique (134 pages) et cinétique chimique (63 pages).

La chimie organique débute par un rappel, en une page, des classes de seconde et première (schéma de Lewis d'un atome, liaison de covalence...). Elle aborde, dans l'ordre, la stéréochimie, les alcools et polyols, les aldéhydes et cétones, les amines, les acides carboxyliques et esters, les dérivés des acides carboxyliques, les acides α -aminés et protéines. La stéréochimie représente 20% du nombre de pages consacré à la chimie organique. Le tableau suivant présente le plan des chapitres consacrés à la stéréochimie dans le manuel:

Chapitres	Contenus
<p style="text-align: center;">Notions de stéréochimie</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Le carbone et les liaisons carbone-carbone dans les molécules organiques <ol style="list-style-type: none"> A. Structure électronique de l'atome de carbone B. Molécules ne comportant que des liaisons covalentes simples : le méthane et l'éthane C. Molécules comportant une double liaison carbone-carbone D. Molécules à chaîne carbonée cyclique 2. Représentation des molécules organiques <ol style="list-style-type: none"> A. Les différents types de formules B. Les isomères : isomérisation 3. Les conformations de la molécule d'éthane <ol style="list-style-type: none"> A. Possibilité de rotation autour de la liaison simple B. Les conformations de la molécule d'éthane C. Conformations particulières 4. Les conformations du cyclohexane <ol style="list-style-type: none"> A. La conformation chaise B. Autres conformations C. Interconversion chaise-chaise 5. Conformation – configuration <p>Pour vous tester</p> <p>Problèmes</p>
<p style="text-align: center;">Le carbone asymétrique et l'activité optique</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Le carbone asymétrique <ol style="list-style-type: none"> A. Définition B. Chiralité C. Enantiomérisation 2. Activité optique <ol style="list-style-type: none"> A. Nature ondulatoire de la lumière B. Activité optique-mise en évidence expérimentale C. Pouvoir rotatoire spécifique 3. Activité optique et chiralité <ol style="list-style-type: none"> A. Principe de Pasteur B. Activité optique et énantiomérisation C. Activité optique d'un mélange de deux énantiomères <p>Pour vous tester</p> <p>Problèmes</p>

Tableau 2: structure du cours de stéréochimie dans le manuel

II.2. Place des systèmes sémiotiques et des modèles moléculaires dans le manuel

Pour examiner la place occupée par les systèmes sémiotiques et les modèles moléculaires dans le manuel, nous étudions chaque chapitre de la stéréochimie en deux parties. Nous établissons dans un premier temps le lien entre le contenu à enseigner, les systèmes sémiotiques et les modèles moléculaires dans la partie cours, puis dans un deuxième temps le lien entre ces derniers et les capacités attendues de l'élève dans la partie « Pour vous tester » et « Problèmes ».

➤ Notions de stéréochimie

La stéréochimie débute par une présentation du schéma de Lewis du carbone et des composés carbonés suivants : le méthane, l'éthane, l'éthène, le benzène et le cyclohexane. L'environnement tétraédrique du carbone tétravalent est mentionné. Des dessins et des photos de modèles moléculaires éclatés du méthane, de l'éthène et du benzène sont présentés, pour illustrer leur structure spatiale. Des photos de leurs modèles moléculaires compacts, et un dessin du modèle moléculaire éclaté de l'éthane sont également exposés. Les valeurs des angles entre les traits de liaison (109°) et celles de leurs longueurs sont indiquées sur chacun des dessins.

S'ensuit une présentation des fonctions de communication des systèmes sémiotiques de formules brute, développée et semi-développée et de Cram⁹. En représentation de Cram, les auteurs attirent l'attention sur le respect approximatif de la valeur de l'angle entre deux traits de liaison (environ 109°), et le placement des traits de liaison gras et hachuré : « *les deux liaisons qui ne sont pas dans le plan de figure se situent toutes deux à droite de la liaison représentée par un trait vertical* ». Trois représentations spatiales ne respectant pas ces règles exemplifient ces propos.

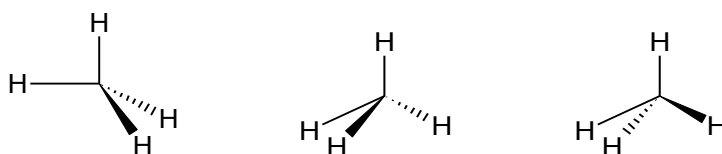


Figure 28: exemples de représentations spatiales erronées

⁹Les auteurs utilisent plutôt l'expression représentation spatiale. Dans la suite, nous l'utiliserons à chaque fois que le besoin s'en fera sentir (par exemple dans la formulation de l'instrument de collecte de données).

En insistant sur le respect des valeurs des angles entre les traits de liaisons, les auteurs mettent en avant des erreurs que les élèves peuvent commettre en représentant une molécule dans le registre de Cram.

L'étude de l'isomérisation repose sur une manipulation de formules semi-développées.

Pour étudier la stéréoisomérisation, les auteurs soulignent la nécessité d'utiliser les représentations de Cram ou les modèles moléculaires, la formule développée ou semi-développée ne suffisant plus. Ils s'appuient sur les molécules d'éthane (conformations décalée et éclipsée) et de cyclohexane (conformations chaise et bateau) pour présenter et expliquer la notion de conformation.

Deux conformations particulières (éclipsée et décalée) de l'éthane sont présentées dans un premier temps en photo de modèles moléculaires éclatés, puis en représentations de Cram et dans une autre représentation que les auteurs du manuel ne nomment pas. Il s'agit en fait de la représentation de Newman. Aucune explication à propos de la méthode de conversion inter registre Cram-Newman n'est fournie, les auteurs ne donnent que des illustrations traduisant une observation de la molécule en représentation de Cram, à gauche, suivant l'axe de la liaison C—C (cf. figure 29).

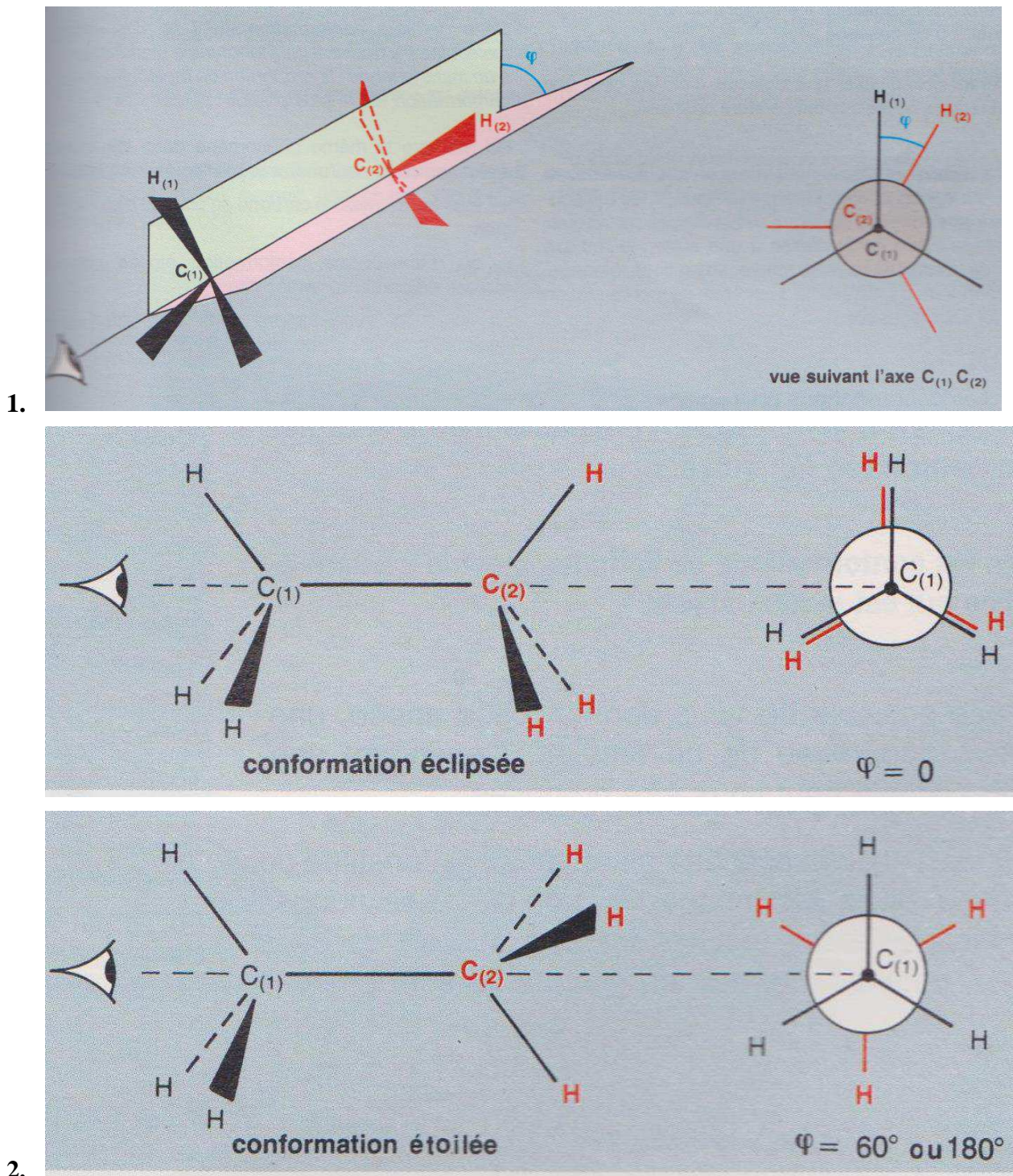


Figure 29 : illustrations de la conversion inter registre Cram-Newman dans le manuel (Ecollan De Coligny et al., 1989, p.131)

Dans la première illustration, on peut avoir l'impression que le point dans la représentation de Newman symbolise les deux carbones (C1) et (C2) de la représentation de Cram. Dans les deux autres illustrations, le point dans la représentation de Newman semble représenter uniquement le carbone proche de l'observateur, aucune mention de la symbolisation du carbone éloigné

n'est faite. Cette façon de présenter la conversion inter registre Cram-Newman peut conduire à une mauvaise interprétation des conventions de représentation des carbones dans le registre de Newman. L'absence d'une illustration où la représentation de Cram est observée depuis la droite, peut laisser supposer aux élèves que cela ne se fait pas. En choisissant de présenter les conformations dans un autre registre que celui de Cram, les auteurs font valoir l'importance du registre de Newman dans la représentation des conformations de molécule. Il arbore mieux les positions décalées ou éclipsées des liaisons de deux carbones adjacents, ce qui justifie l'emploi des termes « représentation décalée » et « représentation éclipsée » ; les dites représentations sont visibles sans qu'il soit besoin de faire appel à une capacité de visualisation mentale. Les auteurs parlent de la possibilité de rotation autour de l'axe de la liaison C—C, mais ne présentent aucune schématisation de cette opération de rotation en représentation de Cram ou de Newman. Ils parlent plutôt de manipulation du modèle moléculaire (rotation d'un des groupements méthyle de 60°, 120°, 180°, 240°, 300° et 360° autour de l'axe du bâton de liaison C—C) pour mettre en évidence les conformations particulières de l'éthane. Cette manipulation n'est suivie d'aucune illustration ; nous pensons qu'elle est à faire. Le choix du modèle moléculaire nous laisse supposer que, pour les auteurs du manuel, il traduit plus facilement l'opération de rotation autour de l'axe de la liaison C—C.

Les conformations du cyclohexane sont dévoilées uniquement en représentation en perspective (les auteurs parlent plutôt de formule semi-développée). Ils expliquent comment dessiner ces différentes conformations, en prenant le soin d'indiquer la démarche permettant la représentation des liaisons équatoriales et axiales dans chaque cas. Des photos de modèles moléculaires éclatés des conformations chaise et bateau du cyclohexane sont présentées.

L'étude de la stéréoisomérie de configuration s'appuie sur les molécules d'éthène et d'acide but-2-ène-1,4-dioïque en formule semi-développée.

A la fin de cette partie est proposé un tableau des différences entre stéréoisomérie de conformation et stéréoisomérie de configuration.

La rubrique « pour vous tester » propose des questions nécessitant une reproduction des définitions et descriptions du cours.

Parmi les problèmes proposés, l'un (problème 12) est consacré à l'identification de représentations de Cram correctes parmi une série d'autres représentations du même registre. Sa résolution exige des connaissances sur la valeur des angles entre les traits de liaison, et le placement des traits de liaisons gras et hachuré dans ce système sémiotique.

Sept problèmes questionnent sur les opérations de traitement dans les registres de formules semi-développées, de Cram ou de Newman. Cinq d'entre eux (7.b ; 8 ; 9.a ; 10.b ; 11) nécessitent une manipulation de formules semi-développées, et ce, pour représenter des stéréoisomères de configuration Z et E. L'un (14) est basé sur l'identification de molécules identiques dans le registre de Newman (les auteurs parlent de projection suivant l'axe C—C). Et un autre (13) porte sur l'absence de la stéréoisométrie de conformation dans la molécule de méthane dans le registre de Cram.

Deux problèmes, 14 et 16.a, interrogent respectivement sur les conversions inter registre Newman-formule semi-développée, et Cram-Newman. On peut se demander à quels types de démarche il faut s'attendre de la part de l'élève, car dans la partie cours aucune indication sur les méthodes de conversion inter registre n'est indiquée. De plus, les auteurs ne proposent pas d'exercices résolus, qui pourraient servir d'appui aux élèves.

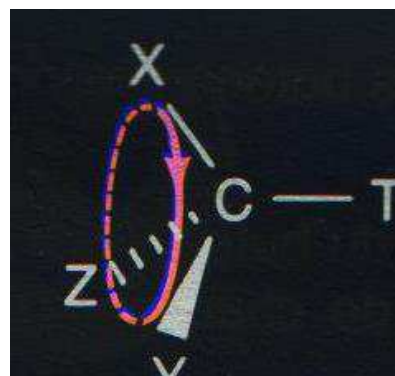
➤ Le carbone asymétrique et l'activité optique

Le seul cas de chiralité envisagé ici, est celui des molécules possédant un atome de carbone asymétrique.

Les auteurs s'appuient sur la formule semi-développée pour définir un carbone asymétrique. La chiralité et la relation d'énantiométrie entre deux molécules sont mises en évidence par le biais de la représentation de Cram. Des photos de modèles moléculaires éclatés et de chaussures servent d'appui à cela.

La mise en évidence expérimentale de l'activité optique d'une substance organique est accompagnée d'une description schématique du matériel et du phénomène observé. Des photos du matériel sont également affichées.

Comme dans la partie précédente, la rubrique « pour vous tester » propose des questions définitives et descriptives. Tous les problèmes proposés questionnent sur les opérations de traitement dans les registres sémiotiques de molécules. Six d'entre eux (1, 2, 7, 11, 13 et 16) concernent l'identification de molécules chirales représentées dans le registre de formules semi-développées. Trois autres (4, 5 et 6) interrogent sur la reconnaissance de la relation d'énantiométrie entre deux molécules, à un ou deux carbones, dans le registre de Cram. Les auteurs proposent une méthode de résolution. Cette méthode consiste à comparer les configurations des atomes



de carbone tétraédriques de deux molécules. Pour cela, il faut se fixer, au hasard, une séquence de lecture des substituants pour chacun d'eux et comparer les sens de rotation obtenus (les molécules sont regardées suivant un axe de liaison précis); si les sens sont les mêmes alors les molécules sont identiques, dans le cas contraire, ils forment un couple d'énantiomères (cf. figure ci-contre). Nous reviendrons plus en détail sur cette méthode lors de l'étude des difficultés des élèves dans le chapitre suivant.

Les exercices 8 et 12 concernent la représentation de molécules énantiomères dans le registre de Cram. Ils impliquent également la conversion inter registre formule semi développée-Cram.

Trois exercices (3 ; 9 et 10) ne questionnent pas sur les systèmes sémiotiques de molécules. L'un (3) porte sur la reconnaissance d'objets chiraux, et les deux autres (9 et 10) sur le calcul du pouvoir rotatoire d'une substance.

Il ressort de cette analyse du manuel que les systèmes sémiotiques en général, et de projection en particulier (systèmes de Cram, de la perspective et de Newman), interviennent dans les définitions des notions de stéréochimie et dans la mise en évidence des propriétés de stéréoisomérisation des molécules. Le traitement est l'activité cognitive la plus sollicitée. La fonction de conversion inter registre (Cram-Newman par exemple) est peu explicitée; les auteurs du manuel semblent oublier qu'elle joue un rôle essentiel dans la conceptualisation (Duval, 1993). Ils mettent implicitement en avant le fait que les systèmes sémiotiques ne représentent pas, pour un même contenu, les mêmes aspects. Par exemple, pour représenter les conformations éclipsée et décalée de l'éthane, ils utilisent les représentations de Cram, mais pour marquer le passage d'une conformation donnée à une autre par des rotations successives de 60° , ils s'appuient sur la représentation de Newman.

La résolution des exercices nécessite des élèves des capacités (Cp) liées pour la plupart aux activités cognitives que permettent les systèmes sémiotiques (cf. tableau 3).

Capacités attendues des élèves	Activités cognitives	Registres sémiotiques
(Cp1) Reconnaître parmi une série de molécules les représentations de Cram correctes	Communication ou représentation	Cram
(Cp2) Représenter les configurations Z et E d'une molécule en formule semi-développée	Traitement	Formule semi-développée
(Cp3) Reconnaître des molécules chirales parmi une série de molécules en formule semi-développée		Formule semi-développée
(Cp4) Reconnaître des molécules identiques parmi une série de molécules en représentation de Cram		Cram
(Cp5) Reconnaître des molécules identiques parmi une série de molécules en représentation de Newman		Newman
(Cp6) Reconnaître la relation d'énantiomérisme entre deux molécules, à un ou deux carbones, en représentation de Cram		Cram
(Cp7) Représenter des couples d'énantiomères en représentation de Cram à partir d'une molécule en formule semi-développée	Traitement et conversion	Formule semi-développée-Cram
(Cp8) Dessiner une molécule en représentation de Newman à partir de sa formule semi-développée	Conversion	Formule semi-développée-Newman
(Cp9) Dessiner une molécule en représentation de Newman à partir de sa représentation de Cram		Cram-Newman
*(Cp10) Reconnaître des objets chiraux		
*(Cp11) Calculer le pouvoir rotatoire d'une substance.		

Tableau 3 : capacités attendues des élèves et registres sémiotiques afférents recensés dans le manuel

*=capacités non liées aux activités cognitives que permettent les systèmes sémiotiques

Le manuel se réfère aux modèles moléculaires pour concrétiser la disposition des atomes dans l'espace ou expliciter la définition d'une notion. Cela montre l'importance qu'ils peuvent avoir dans l'apprentissage de la stéréochimie.

III. Analyse du programme par objectifs (1995)

Nous faisons tout d'abord une présentation succincte du programme et de son commentaire. Par la suite, nous cherchons à établir un lien entre les objectifs pédagogiques du programme et les systèmes sémiotiques et modèles moléculaires auxquels ils se réfèrent. Nous vérifions dans un premier temps si les objectifs pédagogiques sont comportementalistes, car il est difficile d'analyser avec efficacité un programme PPO si les objectifs pédagogiques ne sont pas clairement définis (Mager, 2005). Des objectifs comportementalistes, nous déduisons les capacités attendues de l'élève, puis identifions dans quelle mesure les systèmes sémiotiques et modèles moléculaires sont mis en jeu. Nous distinguons d'une part des capacités et systèmes sémiotiques explicites, c'est-à-dire déduits simplement à la lecture de l'objectif, et d'autre part des capacités et systèmes sémiotiques implicites, c'est-à-dire inférés de l'analyse de l'objectif.

III.1. Présentation du programme et son commentaire

L'enseignement de la chimie organique en terminale D a pour but d'expliquer la réactivité des molécules à partir de leur stéréochimie, et de montrer :

- la similitude des propriétés et de la réactivité chimique des composés organiques ayant des groupes d'atomes identiques;
- la transformation des groupes fonctionnels en d'autres groupes;
- l'existence d'une seule chimie dont les lois sont applicables aussi bien au monde inanimé qu'au monde vivant. (cf. commentaire programme de terminale D, 1995, en annexe CD-ROM)

Le programme (1995, cf. annexe CD-ROM) est rédigé selon la pédagogie par objectifs. Il donne des indications précises sur les contenus à enseigner et sur les objectifs de l'enseignement. Son commentaire indique ce qu'il faut évaluer.

Les contenus sont groupés en cinq parties: notions élémentaires de stéréochimie, les alcools, les amines, les acides carboxyliques et les acides α -aminés.

- La stéréochimie aborde les notions de configuration et de conformation des molécules, le carbone asymétrique, la chiralité, l'énantiomérisation dans le cas des composés dont la molécule ne contient qu'un atome de carbone asymétrique etc.
- L'étude des alcools comporte la nomenclature, l'existence des trois classes d'alcools, leur préparation et certaines propriétés chimiques¹⁰ (elles sont illustrées par des

¹⁰ Les élèves doivent retenir un schéma réactionnel

réactions d'oxydation et des expériences comme la lampe sans flamme...) et enfin les polyalcools (le glycol principalement); les groupes fonctionnels aldéhyde et cétone sont également présentés.

- L'étude des amines englobe la nomenclature, l'existence des trois classes d'amines et certaines propriétés.
- Les réactions d'estérification et d'hydrolyse, la saponification des esters, les fonctions dérivées anhydride d'acide et chlorure d'acyle sont étudiées dans la partie acide carboxylique.
- Dans la partie acides α -aminés sont abordées la représentation de Fischer et la nomenclature de configuration D et L, la chiralité et l'activité optique, les formes ioniques et non ioniques des acides α -aminés, et les liaisons peptidiques (cf. programme de chimie terminale D).


Le commentaire du programme (cf. Annexe CD-ROM) expose le but de l'enseignement de la chimie organique dans les classes terminales (exemple extrait du commentaire programme: « *apporter les notions de stéréochimie pour expliquer la réactivité des molécules surtout dans la chimie du monde vivant* »), fixe les limites des contenus à enseigner (exemple extrait du commentaire programme: « *l'étude des composés dont la molécule contient au moins deux atomes de carbone asymétrique n'est pas permise* »), donne des exemples d'activités expérimentales à réaliser (exemple extrait du programme: « *mise en évidence de l'activité optique d'une solution à l'aide de polaroïd utilisé en polariseur et en analyseur* »), et la documentation (manuel scolaire recommandé). Il souligne également l'importance des modèles moléculaires dans l'enseignement apprentissage de la stéréochimie (extrait du commentaire du programme « *il est vivement recommandé que chaque établissement secondaire soit doté de boîtes de modèles moléculaires (compact et éclaté) car la représentation spatiale ne peut être aisément perçue qu'avec l'usage de ces modèles moléculaires* ». L'objectif général de l'enseignement de la chimie organique, en particulier de la stéréochimie, n'est pas précisé.

Le temps hebdomadaire d'enseignement de la physique chimie en terminale D est de 7h, mais le programme ne comporte pas d'indications sur le temps à consacrer respectivement à l'enseignement de la physique et de la chimie. La gestion de ce temps est, la plupart du temps, à la charge des enseignants d'un même établissement. Elle se décide en animation pédagogique

au début de l'année et peut être modifiée au cours de l'année. Elle varie également d'un établissement à un autre.

III.2. Place des systèmes sémiotiques et des modèles moléculaires dans le programme

Le tableau suivant indique les contenus notionnels, les objectifs pédagogiques, et les extraits des commentaires du programme, associés aux notions de stéréochimie. Les contenus de stéréochimie sont divisés en trois parties: la possibilité de rotation autour d'une liaison C-C et la planéité des doubles liaisons (partie 1); les notions de configuration, de conformation : cas du cyclohexane (partie 2); et le carbone asymétrique, l'énantiométrie, la chiralité et l'activité optique (partie 3).

Contenus notionnels	Objectifs	Extraits des commentaires du programme*
<p><i>1. Possibilité de rotation autour d'une liaison C – C ; planéité des doubles liaisons</i></p>		
<p><i>2. Notion de configuration, de conformation : cas du cyclohexane</i></p>	<p><i>2.1 Ecrire la représentation conventionnelle des liaisons de l'atome de carbone tétraédrique.</i></p> <p><i>2.2 Représenter les différentes conformations : éclipsée et étoilée (éthane), chaise et bateau (cyclohexane)</i></p> <p><i>2.3 Reconnaître des isomères de conformation et des isomères de configuration.</i></p> <p><i>2.4 Faire la distinction entre isomères de conformation et isomères de configuration.</i></p> <p><i>2.5 Utiliser les modèles moléculaires pour représenter chaque isomère</i></p>	<p><i>On conviendra de représenter les liaisons du carbone tétraédrique par:</i></p> <div style="text-align: center;">  </div> <p><i>On définira la notion de conformation dans le cas de l'éthane et du cyclohexane. A propos de la molécule d'éthane, on définira les conformations éclipsée et étoilée. Pour la molécule de cyclohexane on montrera les conformations chaise et bateau. On définira les liaisons axiales et équatoriales. A l'aide de modèles éclatés on montrera la possibilité de l'interconversion chaise-chaise et le changement réciproque de nature des liaisons (axiale – équatoriale, équatoriale – axiale). On rappellera l'isomérie Z-E dans le cas de composés de type HAC=CAH et de type HAC=CBH simples. On précisera la différence entre isomères de conformation et isomères de configuration.</i></p>

Contenus notionnels	Objectifs	Extraits des commentaires du programme*
3 Carbone asymétrique, énantiométrie, chiralité, activité optique	<i>3.1 Définir le carbone asymétrique</i>	<i>L'étude sera limitée au cas des composés dont la molécule ne contient qu'un atome de carbone asymétrique. Lorsqu'un atome de carbone tétraédrique est lié à quatre atomes ou groupes d'atomes différents, il existe deux composés isomères non superposables, images l'un de l'autre dans un miroir plan et appelés énantiomères. Ce qui correspond à deux configurations différentes, pour cet atome de carbone asymétrique. Cette propriété de ne pas être superposable à son image dans un miroir est appelée chiralité. L'activité optique sera étudiée en relation avec la polarisation rectiligne de la lumière. La chiralité se manifeste par une propriété qu'on ne trouve pas avec les composés achiraux : l'activité optique. Elle sera, si possible, mise en évidence expérimentalement : on se bornera à définir un composé lévogyre, un composé dextrogyre, un mélange racémique, à montrer qualitativement le rôle de la concentration d'un composé actif sur l'angle de rotation du plan de polarisation</i>
	<i>3.2 Reconnaître le carbone asymétrique dans une molécule.</i>	
	<i>3.3 Définir la chiralité et l'énantiométrie pour un composé dont la molécule ne contient qu'un atome de carbone asymétrique.</i>	
	<i>3.4 Définir : un composé dextrogyre, un composé lévogyre : un mélange racémique.</i>	
	<i>3.5 Utiliser les modèles moléculaires pour représenter un couple d'énantiomères à partir de la formule développée plane.</i>	
<i>3.6 Mettre en évidence l'activité optique d'une solution à l'aide de « polaroid » utilisé en polariseur et en analyseur</i>		

Tableau 4: Contenus notionnels, objectifs, et extraits des commentaires du programme associés aux notions élémentaires de stéréochimie

* : Les textes figurant en caractères italiques sont des citations du programme et de son commentaire

Les objectifs pédagogiques du programme regroupent au moins les trois premiers critères d'un objectif opérationnel : on y retrouve celui qui produira le comportement souhaité (de manière implicite), le comportement observable et le produit du comportement. Ces objectifs sont comportementalistes. Nous notons une absence des deux conditions liées à la conception des tâches d'évaluation : modalités dans lesquelles le comportement doit avoir lieu et critères servant à déterminer si le produit est satisfaisant. De plus, les auteurs ne disent rien de la façon d'atteindre ces objectifs.

A priori, la plupart des objectifs pédagogiques ne précisent pas les registres sémiotiques auxquels ils se réfèrent. L'analyse ci-dessous nous permettra de les identifier.

➤ **Partie 1**

Aucun objectif pédagogique n'est formulé dans la partie 1. Nous notons également une absence de commentaire. L'examen du manuel montre qu'il s'agit ici, de donner la structure électronique de l'atome de carbone en utilisant le schéma de Lewis déjà vu en seconde, de représenter les molécules ne présentant que des liaisons simples (plus précisément le méthane et l'éthane), les molécules comportant une double liaison carbone-carbone (cas de l'éthylène) et les molécules à chaîne carbonée cyclique (cas du benzène et du cyclohexane). Les données expérimentales des molécules (structure, longueur et angle des liaisons) sont simplement signalées. L'enseignant peut ainsi montrer, en utilisant des modèles moléculaires éclatés, la planéité des doubles liaisons, la possibilité d'une rotation autour de la liaison simple C-C et l'impossibilité de rotation autour d'une double liaison C=C. L'absence d'objectif pédagogique suppose qu'aucune capacité de l'élève liée à cette partie n'est évaluée.

➤ **Partie 2**

A première vue, l'intitulé de la partie 2 (Notion de configuration, de conformation : cas du cyclohexane) laisse croire qu'il ne faut étudier que les conformations du cyclohexane. Les objectifs et le commentaire associés, donnent plutôt l'impression qu'il s'agit de se limiter aux conformations de l'éthane et du cyclohexane. L'objectif 2.2 *Représenter les différentes conformations : éclipsée et étoilée (éthane), chaise et bateau (cyclohexane)* étaye cette assertion. L'analyse du manuel montre qu'il ne s'agit pas seulement de l'étude des conformations de l'éthane et du cyclohexane, puisque les exercices portent sur des conformations d'autres molécules. Ces deux molécules ne sont que des exemples sur lesquels l'enseignant peut s'appuyer pour introduire la notion de conformation.

Cinq objectifs pédagogiques comportementalistes sont formulés dans cette partie.

Le premier objectif « **2.1** *Ecrire la représentation conventionnelle des liaisons de l'atome de carbone tétraédrique* », renvoie a priori à l'activité de communication dans le registre de Cram. Cela nous laisse supposer qu'à la fin de l'apprentissage, l'élève doit être capable de reproduire les symboles des liaisons dans ce registre. Cet objectif peut également supposer que l'élève doit pouvoir dessiner la structure spatiale d'une molécule à partir de la formule semi-développée par exemple. Il ne s'agit plus alors de l'activité de communication dans le registre de Cram, mais plutôt d'une conversion inter registre formule semi-développée Cram (cf. analyse du manuel).

Le deuxième objectif « **2.2** *Représenter les différentes conformations : éclipsée et étoilée (éthane), chaise et bateau (cyclohexane)* » est lié à l'activité de traitement dans des registres sémiotiques. Le programme n'indique pas lequel est utilisé. Il peut s'agir des registres de la perspective, de Cram ou de Newman. L'élève est supposé apte à reproduire les conformations de l'éthane et du cyclohexane à la fin de l'apprentissage dans au moins l'un des registres sémiotiques. L'analyse du manuel montre que dans le cas de l'éthane, ce sont les registres de Cram et de Newman ; les conformations du cyclohexane sont représentées dans le registre de la perspective. Les représentations des conformations dans le registre de Newman peuvent également impliquer une conversion inter registre Cram-Newman

Le troisième objectif « **2.3** *Reconnaître des isomères¹¹ de conformation et des isomères de configuration* » renvoie également à l'activité de traitement dans un registre sémiotique. Bien qu'il ne précise pas les registres concernés, nous pouvons estimer, en nous référant à l'analyse du manuel, qu'il s'appuie sur les registres de Cram, de Newman ou de la perspective (pour les conformations) et de formules semi-développées (pour les configurations Z et E). A la fin de l'apprentissage l'élève est supposé capable de reconnaître des stéréoisomères de conformation d'une part et des stéréoisomères de configuration Z et E d'autre part.

Le quatrième objectif « **2.4** *Faire la distinction entre isomères de conformation et isomères de configuration* » concerne l'activité de traitement dans un registre sémiotique. Dans le cas des stéréoisomères de conformation, il s'agit des registres de la perspective, de Cram et/ou de Newman (cf. analyse du manuel). Le commentaire du programme stipule que les configurations étudiées dans cette partie sont les configurations Z et E. Celles-ci ne peuvent être qu'en formule semi développée, si on se réfère au manuel. Le commentaire du programme demande aux enseignants d'énumérer les différences entre stéréoisomères de configuration et stéréoisomères

¹¹ Le terme approprié est stéréoisomères, nous l'utiliserons tout au long de notre développement.

de conformation. Nous supposons qu'à la suite de l'apprentissage, l'élève doit être capable de différencier leurs caractéristiques.

Le cinquième objectif « *2.5 Utiliser les modèles moléculaires pour représenter chaque isomère* » concerne la manipulation de modèles moléculaires. Si dans le cas du cyclohexane, le commentaire du programme recommande d'utiliser des modèles éclatés, rien n'est précisé à propos de l'éthane : faut-il utiliser les deux modèles moléculaires éclaté et compact ? L'absence d'indication sur une quelconque conversion inter registre sémiotique-modèle moléculaire ou inversement, nous laisse penser qu'il faut insister sur la manipulation du modèle moléculaire (opération intra registre) ; ce qui bien entendu n'exclut pas, dans une certaine mesure, la réalisation d'une conversion inter registre sémiotique (formule semi-développée par exemple) - modèle moléculaire.

➤ **Partie 3**

Six objectifs pédagogiques comportementalistes sont formulés dans la partie 3. Trois d'entre eux (3.1, 3.3, et 3.4) nécessitent la mémorisation de définitions.

Deux des objectifs renvoient à des opérations de traitement dans les registres sémiotiques. L'objectif « *3.2. Reconnaître le carbone asymétrique dans une molécule* » peut être lié à l'activité de traitement dans les registres de formules développée ou semi-développée, de la perspective ou de Cram. Les conclusions de l'analyse du programme suggèrent qu'il ne s'agit que des registres de la formule semi-développée et de Cram.

L'objectif « *3.5 Utiliser les modèles moléculaires pour représenter un couple d'énantiomères à partir de la formule développée plane* » implique, la conversion de la formule développée en modèle moléculaire, et une construction de ce dernier.

L'objectif 3.6 « *Mettre en évidence l'activité optique d'une solution à l'aide de polaroïd utilisé en polariseur et en analyseur* » ne réfère à aucune activité dans un registre sémiotique. Il implique la manipulation d'un Polaroid.

L'analyse ainsi effectuée nous permet de construire provisoirement un tableau de correspondance entre le contenu à enseigner, les capacités (Cp) attendues de l'élève et les registres sémiotiques sur lesquels ce contenu et ces capacités s'appuient.

Contenus notionnels	Capacités attendues de l'élève	Activités cognitives	Registres sémiotiques
1 Possibilité de rotation autour d'une liaison C – C ; planéité des doubles liaisons			
2. Notions de configuration et de conformation	(Cp12) Ecrire la représentation conventionnelle des liaisons de l'atome de carbone tétraédrique dans le registre de Cram	Communication	Cram
	*(Cp13) Représenter une molécule dans le registre Cram à partir de sa formule semi-développée	Conversion	formule semi-développée-Cram
	*(Cp14) Représenter les différentes conformations, éclipsée et étoilée de l'éthane dans le registre de Cram	Traitement	Cram et Newman
	*(Cp15) Représenter les différentes conformations, éclipsée et étoilée de l'éthane dans le registre de Newman	Traitement et/ou Conversion	Newman et/ou Cram-Newman
	(Cp16) Représenter les différentes conformations, chaise et bateau du cyclohexane dans le registre de la perspective	Traitement	Perspective
	(Cp17)Reconnaître des stéréoisomères de conformation d'une part et des stéréoisomères de configuration Z et E d'autre part.	Traitement	formules semi-développées
	(Cp18)Faire la distinction entre stéréoisomères de conformation et stéréoisomères de configuration.	Traitement	Cram, Newman et formules semi-développées
	(Cp19) Utiliser les modèles moléculaires pour représenter des stéréoisomères	Traitement	Modèles moléculaires

Contenus notionnels	Capacités attendues de l'élève	Activités cognitives	Registres sémiotiques
3. Carbone asymétrique, énantiométrie, chiralité, activité optique	(Cp20) Définir le carbone asymétrique		
	(Cp21) Reconnaître le carbone asymétrique dans une molécule.	Traitement	formule semi-développée et Cram
	(Cp22) Définir la chiralité et l'énantiométrie pour un composé dont la molécule ne contient qu'un atome de carbone asymétrique.		
	(Cp23) Définir : un composé dextrogyre, un composé lévogyre : un mélange racémique.		
	(Cp24) Utiliser les modèles moléculaires pour représenter un couple d'énantiomères à partir de la formule développée plane.		Formule développée et modèle moléculaire
	(C25) Mettre en évidence l'activité optique d'une solution à l'aide de « polaroid » utilisé en polariseur et en analyseur		

Tableau 5: correspondance entre le contenu à enseigner, les capacités et les registres sémiotiques

* : Les cellules surlignées sont celles des capacités, activités cognitives ou registres sémiotiques implicites. Les cellules non colorées indiquent celles qui sont explicites.

En résumé, l'enseignement et l'apprentissage de la stéréochimie se limitent aux notions de stéréoisomérisation de conformation et de configuration, et à l'activité optique d'une substance. La stéréoisomérisation de conformation s'appuie sur les molécules d'éthane et du cyclohexane. La stéréoisomérisation de configuration ne concerne que l'énantiomérisation de molécules à un carbone asymétrique et la diastéréoisomérisation Z et E. L'étude des composés dont la molécule contient au moins deux atomes de carbone asymétrique n'est pas abordée. L'usage des modèles moléculaires est vivement recommandé.

Du point de vue sémiotique, trois systèmes sémiotiques de projection (systèmes de la perspective, de Cram et de Newman) et des modèles moléculaires devraient être utilisés dans l'enseignement et l'apprentissage de la stéréochimie. La compréhension et la mise en évidence des notions de stéréochimie s'articulent autour des activités cognitives de communication, de traitement et de conversion qu'ils permettent. Le système de formule semi-développée est utilisé pour être converti en système de projection, le système de formule développée est plutôt employé pour être converti en modèle moléculaire.

L'atteinte de la plupart des objectifs pédagogiques comportementalistes exige de l'élève des capacités à réaliser des opérations de représentation et de traitement intra registre ou de conversion inter registre sémiotique ou registre sémiotique-modèle moléculaire. Ceci montre l'importance qu'occupent les systèmes sémiotiques et les modèles moléculaires dans l'enseignement/apprentissage de la stéréochimie.

IV. Programme et manuel : quelques points de repère

Dans la mesure où ce manuel est conçu d'après un programme français, nous cherchons à savoir s'il répond aux attentes du programme béninois. Nous construisons donc une grille d'analyse qui consiste en un tableau de repérage des contenus notionnels du programme dans le manuel. Nous y ajoutons également les applications (« Pour vous tester », « Problèmes ») pouvant être associées à ces contenus.

Contenus notionnels	Objectifs	Repérage dans le manuel			
		Chapitres	Paragraphes	Applications	
1 Possibilité de rotation autour d'une liaison C – C ; planéité des doubles liaisons		Notions de stéréochimie	3. Les conformations de la molécule d'éthane A. Possibilité de rotation autour de la liaison simple 1. Le carbone et les liaisons carbone-carbone dans les molécules organiques C. Molécules comportant une double liaison carbone-carbone	Pour vous tester n° 3	
	2.1 Ecrire la représentation conventionnelle des liaisons de l'atome de carbone tétraédrique		2. Représentation des molécules organiques A. Les différents types de formules A.3. La formule spatiale	Problème n° 12	
	2.2 Représenter les différentes conformations : éclipsée et étoilée (éthane), chaise et bateau (cyclohexane)		3. Les conformations de la molécule d'éthane B. Les conformations de la molécule d'éthane C. Conformations particulières 4. Les conformations du cyclohexane A. La conformation chaise B. Autres conformations C. Interconversion chaise-chaise	Pour vous tester n° 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8 Problèmes n° 14, 15, 16	
2 Notions de configuration et de conformation	2.3 Reconnaître des isomères de conformation et des isomères de configuration.		5. Conformation – Configuration		Pour vous tester n° 9 Problèmes n° 6, 7, 8, 9, 10, 11
	2.4 Faire la distinction entre isomères de conformation et isomères de configuration.				
	2.5 Utiliser les modèles moléculaires pour représenter chaque isomère.				

Contenus notionnels	Objectifs	Repérage dans le manuel				
		Chapitres	Paragraphes	Applications		
3 Carbone asymétrique, énantiométrie, chiralité, activité optique	3.1 Définir le carbone asymétrique	Le carbone asymétrique et l'activité optique	1. Le carbone asymétrique A. Définition	Pour vous tester n° 1 Problèmes n° 2		
	3.2 Reconnaître le carbone asymétrique dans une molécule.					
	3.3 Définir la chiralité et l'énantiométrie pour un composé dont la molécule ne contient qu'un atome de carbone asymétrique.				1. Le carbone asymétrique B. Chiralité C. Enantiométrie	Pour vous tester n° 2, 3, 4, 5, 6 Problèmes n° 3, 4, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 15, 16
	3.4 Définir : un composé dextrogyre, un composé lévogyre, un mélange racémique.				3. Activité optique et chiralité A. Principe de Pasteur B. Activité optique et énantiométrie C. Activité optique d'un mélange de deux énantiomères	Pour vous tester n° 8, 11, 12 problème, n° 1, 8, 9, 10
	3.5 Utiliser les modèles moléculaires pour représenter un couple d'énantiomères à partir de la formule développée plane.					
	3.6 Mettre en évidence l'activité optique d'une solution à l'aide de « polaroïd » utilisé en polariseur et en analyseur				2. Activité optique A. Nature ondulatoire de la lumière B. Activité optique-mise en évidence expérimentale C. Pouvoir rotatoire spécifique	

Tableau 6: correspondance entre contenu notionnel du programme et du manuel

L'examen du tableau montre qu'à l'exception du mode opératoire des travaux pratiques de l'utilisation des modèles moléculaires pour représenter un couple d'énantiomères à partir de la formule développée plane, tous les contenus du programme figurent dans le manuel. Bien que l'ordre proposé par le programme diffère de celui du manuel, ce dernier répond effectivement aux attentes du programme. Les capacités attendues des élèves auxquelles renvoient les objectifs pédagogiques du programme peuvent être évaluées à partir des applications du manuel.

V. Programme par objectifs (1995) et programme par compétences (2011), quel lien?

Nous cherchons ici à mettre en évidence les dissimilitudes ou les similitudes entre les programmes PPO et APC du point de vue du contenu de stéréochimie à enseigner et des capacités attendues de l'élève. Cette analyse est précédée d'une présentation du programme APC.

V.1. Présentation du programme par compétences et du guide d'accompagnement

Le nouveau programme de physique chimie (2011, cf. annexe CD-ROM) est conçu selon l'approche par les compétences. Il donne des indications sur:

- les orientations générales, c'est-à-dire les principes et les valeurs sur lesquels il se fonde, les conditions de sa mise en œuvre et la nature des objets d'apprentissage : « *Il n'est plus question de mettre seulement chez l'élève, l'accent sur les capacités de mémorisation et de rétention, mais aussi et surtout de développer son intelligence, sa capacité de création et son adaptabilité aisée à des situations nouvelles* ».
- les compétences à développer chez l'élève. Deux types de compétences disciplinaires sont à développer, lors de l'enseignement de la chimie organique en général : « *Elaborer une explication d'un fait ou d'un phénomène de son environnement naturel ou construit, en mettant en œuvre les modes de raisonnement propres aux sciences physique et chimique et à la technologie* » et « *Apprécier l'apport des sciences physique et chimique et de la technologie à la vie de l'homme* »
- les thèmes et contenus notionnels à enseigner ;
- le plan de développement d'une situation d'apprentissage ;
- les types d'évaluation (formative et sommative).

Le document d'accompagnement¹² (2011, cf. annexe CD-ROM) apporte des éclaircissements sur certains éléments du programme cité précédemment. Il propose un canevas général à respecter pour enseigner et explique que la mise en œuvre d'une situation d'apprentissage se fait en trois phases :

- *introduction*: cette étape consiste à mettre en évidence les idées premières des élèves à propos du thème étudié, et ce, sans chercher à les apprécier.
- *réalisation*: Cette deuxième phase correspond à la construction du savoir de l'élève au moyen d'activités qui lui sont proposées.
- *retour et projection*: le retour correspond à « *l'objectivation, la consolidation ou l'enrichissement* » du savoir, et la projection à « *un réinvestissement des acquis à court, moyen ou long terme dans une situation de la vie courante* ».

La chimie organique doit être enseignée en 18h, et le nombre d'heures à attribuer à l'enseignement de la stéréochimie n'est pas fixé. L'objectif général et le but de cet enseignement ne sont pas indiqués. Le manuel scolaire de référence ((Ecollan De Coligny et al., 1989) est le même que celui recommandé dans le programme PPO; des manuels béninois (qui sont des recueils d'exercices avec un résumé de cours) sont également recommandés (ce qui est une nouveauté par rapport au programme PPO).

.Le document d'accompagnement présente une structuration des compétences autour d'une table de spécification, c'est-à-dire un tableau mettant en parallèle les contenus à enseigner, les indications pédagogiques, les capacités et les compétences à développer chez l'élève (cf. extrait du guide ci-dessous).

¹² C'est l'équivalent du commentaire du programme PPO

<i>Connaissances et techniques</i>	<i>Indications pédagogiques et commentaires</i>	<i>Compétences, capacités, connaissances et techniques exigibles (évaluation)</i>
<p><i>I- Notions élémentaires de stéréochimie</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Possibilité de rotation autour d'une liaison C-C ; notion de conformation : cas de l'éthane et du cyclohexane. • La double liaison Carbone-carbone et la diastéréoisomérisation Z-E. 	<p><i>D'une manière générale, la stéréochimie et les composés organiques oxygénés (alcool , aldéhyde, cétone et acide carboxylique) ont été abordés de façon plus ou moins exploratoire par les apprenants en première. En classe de terminale il s'agit d'aller plus loin et d'asseoir de manière plus ferme des concepts nouveaux et les applications associées.</i></p> <p><i>Pour cette étude de stéréochimie, le professeur peut partir d'une situation complexe où des molécules, au cours des réactions chimiques, se comportent différemment selon leur structure qui peut permettre aux apprenants de se poser des questions comme :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> -Comment s'expliquent les possibilités de rotation autour d'une liaison C-C; la planéité des doubles liaisons? -Comment reconnaître les isomères de conformation et les isomères de configuration? -Quelles sont les conformations de l'éthane et du cyclohexane ? -Quels sont les isomères de configuration des composés à double liaison éthylénique? -Comment distinguer les isomères de conformation des isomères de configuration? 	<p><i>L'évaluation (formative ou sommative) portera sur des situations complexes ou des items d'évaluation sollicitant la mobilisation des connaissances et techniques pour expliquer, argumenter, classer, distinguer, nommer ou prendre position</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Distinguer un isomère de constitution d'un stéréoisomère. • Distinguer un stéréoisomère de conformation d'un stéréoisomère de configuration. • Faire la représentation spatiale du carbone tétraédrique. • Utiliser la projection de Newman.

<i>Connaissances et techniques</i>	<i>Indications pédagogiques et commentaires</i>	<i>Compétences, capacités, connaissances et techniques exigibles (évaluation)</i>
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Le carbone asymétrique ; énantiomérisation ; chiralité ; activité optique.</i> 	<p>-Comment reconnaître un carbone asymétrique dans une molécule ?</p> <p>-Comment utiliser les modèles moléculaires pour la représentation de chaque isomère et un couple d'énantiomères à partir de la formule développée plane ?</p> <p>-Quand parle-t-on de chiralité et d'énantiomérisation ?</p> <p>-Quelle est la signification de : composé dextrogyre, composé lévogyre et mélange racémique ?</p> <p><i>Le professeur aidera les apprenants à mener des activités d'observation, d'expérimentation et d'exploitation documentaire dans la logique d'une démarche expérimentale. En effet, les apprenants seront amenés à mettre en évidence l'activité optique d'une solution à l'aide d'un polarimètre.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Reconnaître un carbone asymétrique dans une molécule.</i> • <i>Reconnaître et représenter les deux énantiomères d'une molécule.</i> • <i>Distinguer les diastéréoisomères Z/E.</i> • <i>Construire le modèle moléculaire d'une molécule dont la représentation conventionnelle est donnée, et inversement.</i> • <i>Construire les modèles moléculaires d'un couple d'énantiomères à partir de la formule développée plane.</i>

Tableau 9: extrait du document d'accompagnement du programme par compétences (2011)

V.2. Lien entre programme par objectifs et programme par compétences

Bien que dans ses orientations générales, le nouveau programme parle du développement des compétences chez l'élève, l'examen du tableau précédent montre qu'il puise largement dans l'ancien programme les contenus disciplinaires et les compétences.

Dans la première partie, Connaissances et techniques, les auteurs du programme énumèrent simplement les titres du contenu de stéréochimie enseignable, sans aucune autre précision. Ceci nous rappelle plutôt l'ancien programme par objectif.

Contenus notionnels (PPO)	Connaissances et techniques* (APC)
1 Possibilité de rotation autour d'une liaison C – C ; planéité des doubles liaisons	Possibilité de rotation autour d'une liaison C-C
2 Notions de configuration et de conformation	Notion de conformation : cas de l'éthane et du cyclohexane
	La double liaison Carbone-carbone et la diastéréoisomérisation Z-E.
3 Carbone asymétrique, énantiomérisation, chiralité, activité optique	Le carbone asymétrique ; énantiomérisation ; chiralité ; activité optique

Tableau 7: correspondance entre les contenus à enseigner des programmes PPO et APC

*= les connaissances et techniques équivalent aux contenus notionnels.

La troisième partie, compétences, capacités, connaissances et techniques exigibles (évaluation), nous rappelle les objectifs pédagogiques de l'ancien programme. Son contenu est ambigu, car aucune différenciation n'est faite entre compétences, capacités, connaissances et techniques exigibles. L'analyse du programme PPO et celle du manuel nous permettent de construire le tableau suivant : il établit un parallèle entre le contenu de cette partie du nouveau programme et les objectifs pédagogiques de l'ancien programme auxquels il peut être lié.

Objectifs (ancien programme)	Compétences, capacités, connaissances et techniques exigibles (nouveau programme)
2.1 Ecrire la représentation conventionnelle des liaisons de l'atome de carbone tétraédrique	Faire la représentation spatiale du carbone tétraédrique.
2.2 Représenter les différentes conformations : éclipsée et étoilée (éthane), chaise et bateau (cyclohexane)	Distinguer un isomère de constitution d'un stéréoisomère. Utiliser la projection de Newman.
2.3 Reconnaître des isomères de conformation et des isomères de configuration.	Distinguer les diastéréoisomères Z/E.
2.4 Faire la distinction entre isomères de conformation et isomères de configuration.	Distinguer un stéréoisomère de conformation d'un stéréoisomère de configuration.
2.5 Utiliser les modèles moléculaires pour représenter chaque isomère.	Construire le modèle moléculaire d'une molécule dont la représentation conventionnelle est donnée, et inversement.
3.1 Définir le carbone asymétrique	
3.2 Reconnaître le carbone asymétrique dans une molécule.	Reconnaître un carbone asymétrique dans une molécule.
3.3 Définir la chiralité et l'énantiomérisation pour un composé dont la molécule ne contient qu'un atome de carbone asymétrique.	Reconnaître et représenter les deux énantiomères d'une molécule
3.4 Définir : un composé dextrogyre, un composé lévogyre, un mélange racémique.	
3.5 Utiliser les modèles moléculaires pour représenter un couple d'énantiomères à partir de la formule développée plane.	Construire les modèles moléculaires d'un couple d'énantiomères à partir de la formule développée plane.
3.6 Mettre en évidence l'activité optique d'une solution à l'aide de « polaroid » utilisé en polariseur et en analyseur	

Tableau 8: correspondance entre objectifs pédagogiques de l'ancien programme et compétences du nouveau programme

Si on suppose que cette partie présente les capacités attendues des élèves, alors ces dernières sont similaires à celles de l'ancien programme. Dans le cas où il s'agit des compétences, nous pouvons dire qu'il les décrit en termes de comportements observables. D'un point de vue épistémologique, la notion de compétence est, comme le souligne Jonnaert et al. (2005), utilisée ici dans une perspective comportementaliste; elle est presque réduite à un objectif opérationnel tel qu'il est utilisé dans la pédagogie par objectifs. Ce texte liste les compétences sans vraiment préciser les situations qui en permettraient le développement chez l'élève. Dans un programme scolaire, l'absence de situations et d'activités que les élèves doivent réaliser, rend ce dernier difficile à mettre œuvre dans la perspective d'une logique de compétences, puisque toute

compétence est par nature détectable lors de l'activité de la personne en situation¹³ (Jonnaert et al., 2005). Un tel programme scolaire se rapproche plus de la pédagogie par objectifs comportementalistes, tout en se disant d'une autre nature (ibid.).

Les résultats de la discussion faite autour des programmes PPO et APC rejoignent ceux de Ouarda et Ginestié (2009) à propos du nouveau programme APC tunisien de sciences physiques de première année introduit en 2004. Les compétences décrites dans le programme béninois sont étroitement liées au contenu de stéréochimie à enseigner dans le programme antérieur. Leur formulation les restreint à des objectifs opérationnels comportementalistes. Bien que, dans le programme APC, les circonstances de la mise en œuvre des capacités attendues de l'élève sont modifiées (elle se fait à partir d'une situation complexe), ces capacités restent similaires à celles préconisées dans l'ancien programme. Ce dernier n'a donc pas subi de changement majeur qui pourrait affecter considérablement la suite de nos recherches. Nous nous sommes limités à cette analyse concise. Cependant, d'autres éléments mériteraient d'être étudiés (aucune référence sur l'outil permettant l'évaluation des compétences par exemple) ce qui demanderait une autre étude.

VI. Conclusion

Grâce à l'analyse du programme PPO développée ci-dessus, nous avons une idée générale du type d'activités et contenus de stéréochimie à enseigner en terminale D, et qui sont en relation avec les systèmes sémiotiques de la perspective, de Cram et de Newman et des modèles moléculaires. L'analyse du manuel permet, d'une part, de rendre compte de son adéquation avec le programme d'enseignement et, d'autre part, donne une vue effective des prestations légitimement exigibles des élèves par l'enseignant utilisateur du manuel. La manipulation et l'interprétation des systèmes sémiotiques et des modèles moléculaires aident à définir le savoir de stéréochimie. Les capacités attendues des élèves sont liées aux trois activités cognitives suivantes: la communication, le traitement et la conversion. Aucun objectif du programme ou exercice du manuel ne cherche à mettre en évidence la capacité à reconnaître dans les différentes représentations, des représentations d'un même contenu notionnel, bien que

¹³En ne précisant pas les situations et les activités que les élèves doivent réaliser, les auteurs du programme veulent peut-être laisser à l'enseignant le soin de construire les situations, ce qui, sans formation ou exemple, est délicat.

la coordination des registres sémiotiques permette une meilleure compréhension du contenu notionnel stéréochimie.

Du point de vue du contenu notionnel et des capacités à développer chez l'élève, l'ancien programme n'a pas subi de rénovations qui affectent la suite de notre travail. De plus, le manuel scolaire de référence est le même dans les deux programmes.

L'analyse ainsi réalisée oriente nos choix concernant les thèmes et les questions de recherches qui font l'objet d'étude des raisonnements et difficultés des élèves.

Chapitre 3 : Raisonnements et difficultés des élèves

La résolution des problèmes de stéréochimie implique à la fois, la connaissance des notions de stéréochimie et la capacité à utiliser et à interpréter des représentations sémiotiques et des modèles moléculaires. Au premier abord, il est difficile de savoir si les erreurs des élèves relèvent d'un manque de connaissance de ces notions ou tout simplement d'une incapacité à interpréter ou à manipuler les représentations sémiotiques et les modèles moléculaires. De nombreuses recherches révèlent le caractère prédominant de l'inaptitude à interpréter et à manipuler des représentations sémiotiques et des modèles moléculaires, dans les difficultés d'ordre stéréochimique chez les étudiants (e.g. Ainsworth, 2006; Kozma et al., 2000 ; Kozma, 2003; Pellegrin, 1999; Boukhechem et al., 2011 ; Stull et al., 2012).

Dans le cadre de l'enseignement de la stéréochimie en terminale D, nous distinguons plusieurs types de représentations sémiotiques, permettant chacune des activités cognitives bien précises. Cette diversité de représentations peut, comme chez les étudiants, compliquer l'apprentissage de la stéréochimie.

Dans ce chapitre, nous cherchons à faire le point sur les raisonnements et les difficultés des élèves béninois sur quelques représentations sémiotiques et les modèles moléculaires en stéréochimie. Il s'agit d'appréhender leurs connaissances (au moyen de questionnaires papier-crayon et d'entretiens individuels) selon une approche cognitive qui suppose la prise en compte du fonctionnement de la connaissance « *sous l'angle des mécanismes et des processus qui la permettent en tant qu'activité d'un être individuel* » (Duval, 1996).

Nous exposons dans un premier temps notre cadre d'analyse de référence, et les recherches antérieures en rapport avec notre étude. Par la suite nous développerons les études réalisées.

I. Cadre d'analyse

Notre cadre d'analyse traite principalement de la visualisation mentale des représentations sémiotiques et les gestes.

I.1. Visualisation mentale des représentations sémiotiques

La résolution de la plupart des problèmes de stéréochimie nécessite une utilisation et une interprétation des représentations sémiotiques de molécules. Cela implique la construction d'un

raisonnement sur des relations spatiales entre ces représentations sémiotiques (Rozzelle & Rosenfeld, 1985, Wu & Shah, 2004). Ce raisonnement se réfère à la visualisation mentale de la représentation de la molécule. La visualisation mentale est une des capacités essentielles devant être maîtrisée par un étudiant de chimie pour comprendre la structure et la réactivité des molécules (Rozzelle & Rosenfeld, 1985, Wu & Shah, 2004).

Nous désignons par *Visualisation*, la manière de voir une représentation sémiotique. La visualisation est dite *mentale* lorsqu'une image mentale (c'est-à-dire la « *représentation mentale d'objets ou d'évènements qui ne sont pas physiquement présents*»), est générée et manipulée (Marchand, 2006).

Pour passer de la représentation de Cram d'une conformation donnée d'une molécule d'éthane à une autre conformation par exemple, il faut être capable de se situer dans l'espace et de se représenter mentalement la molécule fournie, puis de réaliser la rotation d'un groupement CH_3 autour de l'axe $\text{C}-\text{C}$.

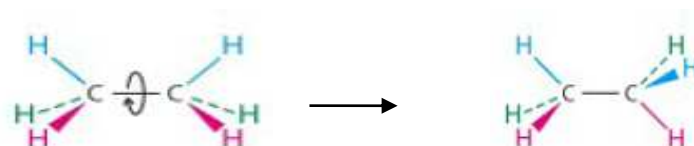


Figure 30: exemple d'utilisation impliquant une visualisation mentale

L'élève doit être capable de générer, de contrôler et de modifier ses images mentales, puis de communiquer ce processus de façon orale ou écrite. Cette faculté à réaliser un tel processus est appelée connaissance spatiale (Marchand, 2006) ou capacité spatiale (Barnea & Dori, 1999, Lohman, 1979, cités par Harle & Towns, 2011, Barnea, 2000, cité par Ferk et al., 2003). Trois facteurs sont identifiés comme des dimensions majeures de la capacité de visualisation mentale (Lohman, 1979, cités par Harle & Towns, 2011, Barnea, 2000, cité par Ferk et al., 2003):

- la visualisation spatiale: la capacité d'appréhender la structure tridimensionnelle des molécules à partir de leur représentation sémiotique plane;
- l'orientation spatiale: elle implique la capacité d'imaginer comment une représentation sémiotique de la molécule serait vue dans une perspective différente, par exemple visualiser dans l'espace la disposition des substituants d'une molécule en représentation de Cram selon deux positions distinctes de l'observateur, à gauche puis à droite de la représentation de Cram, suivant l'axe de la liaison $\text{C}-\text{C}$;

- les relations spatiales: elles se composent de tâches nécessitant une rotation mentale (RM) d'un objet dans un plan ou dans l'espace, ou tout autre capacité de manipulation mentale telle que la projection mentale des substituants des carbones d'une molécule, en représentation de Cram, sur un plan perpendiculaire à l'axe de la liaison C—C.

La rotation mentale (RM) est l'aptitude à faire tourner mentalement l'image d'un objet en 2 ou en 3 dimensions autour d'un axe (Hoyek et al., 2010). Elle permet de reconnaître un objet vu dans différentes orientations et de prévoir sa position dans l'espace après une rotation autour d'un axe. Par exemple, une rotation mentale est requise pour trouver les positions des substituants des carbones d'une molécule dans une autre conformation.

I.2. Les gestes

Les données observables lors d'un entretien d'élèves peuvent être de trois types : ce qu'ils disent, ce qu'ils écrivent et les gestes qu'ils font. A ce jour, peu de travaux de recherche sur leurs raisonnements se sont intéressés aux gestes ; or ils aident à mieux comprendre leurs productions orales (Crowder & Newman, 1993, Dupont & Le Maréchal, 2002, Gandillet & Le Maréchal, 2003, Gandillet et al., 2003, Stieff, 2011). En stéréochimie par exemple, certains gestes, comme tourner la main pour décrire la rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe C—C d'une molécule, sont un moyen d'expression de connaissances ; leur analyse peut donc révéler des informations précieuses sur leur activité cognitive. Par conséquent, il est raisonnable, en plus du cadre d'analyse de la visualisation mentale, de prendre en compte les gestes dans notre analyse des raisonnements et difficultés des élèves.

McNeill (1992, p.1) définit les gestes comme «*les mouvements des mains et des bras que l'on voit lorsque l'on parle* ». Ils visent à exprimer, à exécuter quelque chose. Ce sont des moyens d'expression ou d'action. «*Il s'agit de faire ou de dire par le faire, de signifier une chose en la reproduisant, en la figurant* » (Calbris, 2001). Les gestes sont distincts du discours mais lui sont intrinsèquement liés (Sabena, 2008). Dans le cadre de nos entretiens où l'objectif est la mise en évidence des connaissances des élèves en stéréochimie, le terme «gestes» désigne donc tous les mouvements des mains et des bras que les élèves effectuent au cours de leurs activités stéréochimiques, excluant donc les cas où ils se touchent, se grattent etc.

McNeill (1992) distingue principalement quatre catégories de gestes :

- Gestes iconiques: ils décrivent les traits caractéristiques d'un objet matériel ou d'un événement concret évoqué lors d'une conversation (description d'un modèle

moléculaire par exemple). Dans cette catégorie, les mains fonctionnent comme des symboles qui fournissent par leur forme et par leur mouvement des informations sur le point de vue de l'orateur à l'égard de cet objet ou de cet événement.

- Gestes métaphoriques : ils décrivent dans l'espace gesticulatoire les images liées aux notions ou aux idées abstraites (description de la forme d'une représentation spatiale de la molécule, ou de la rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe C—C d'une représentation de molécule par exemple). Ils se différencient des gestes iconiques par le fait que ce qu'ils véhiculent n'est pas susceptible d'être présenté visuellement.
- Gestes déictiques: ce sont des mouvements de pointage, ils indiquent des objets ou des endroits dans le monde concret (par exemple pointer la boule noire d'un modèle moléculaire pour indiquer l'atome de carbone). Ils ont pour fonction d'attirer l'attention conjointe du locuteur et de l'interlocuteur sur une référence, et tirent leur interprétation essentiellement du contexte dans lequel l'interaction locuteur-interlocuteur prend place.
- Gestes de battements: les mains se déplacent avec la pulsation rythmique de la parole, donnant une structure temporelle ou emphatique à la communication.

Les différentes catégories de gestes (iconiques, métaphoriques, déictiques et battements) d'une part, et la parole concomitante d'autre part, sont des expressions différentes d'un même processus mental (Pavelin, 2002, 40). Aussi, afin d'inférer la représentation cognitive complète que le locuteur a dans sa tête, les discours oraux et les gestes doivent être pris ensemble (McNeill, 1985).

Dans le cadre de notre recherche, nous nous intéressons principalement aux gestes déictiques, iconiques et métaphoriques. Nous faisons l'hypothèse que leur interprétation nous permettra de comprendre les discours oraux et écrits des élèves interrogés en entretiens. De plus, l'analyse des gestes métaphoriques nous permettra d'inférer les opérations de visualisation mentale réalisées.

La manipulation d'un modèle moléculaire exige des gestes procéduraux qui peuvent ne pas entrer dans la classification de McNeill. C'est le cas, lorsqu'on tourne par exemple un groupement de boules d'atomes autour du bâton de liaison C—C pour passer d'une conformation donnée à une autre. Les gestes différents de ceux de la classification de McNeill, et qui expriment une démarche ou une procédure seront dits « gestes procéduraux ».

II. Recherches antérieures sur les difficultés des étudiants et des élèves

La revue de littérature que nous présentons concerne des recherches effectuées majoritairement, sur une population estudiantine de premier et deuxième cycles. Nous n'avons repéré qu'une recherche en lien avec les élèves du secondaire. Il semble que la stéréochimie est enseignée à l'université plutôt qu'au lycée dans la plupart des pays

L'enseignement et l'apprentissage de la stéréochimie s'appuie sur des systèmes sémiotiques. Ces différents systèmes permettent d'expliquer les notions de stéréochimie (stéréoisoméries de conformation et de configuration par exemple). S'il est reconnu que les chimistes experts les utilisent aisément, les novices par contre ont souvent des difficultés à maîtriser leur utilisation (Kozma, 2003). Ces difficultés sont aggravées lorsque plusieurs systèmes sémiotiques doivent être liés et intégrés pour un apprentissage significatif (Ainsworth, 2006, Kozma et al., 2000, Pellegrin, 1999). Sans l'appropriation des activités cognitives que permettent les systèmes sémiotiques, leur utilisateur court le risque de développer un savoir incohérent (Stull et al., 2012).

Des études révèlent que des étudiants ont souvent du mal à coordonner les systèmes sémiotiques et à réaliser la conversion entre eux (Bucat & Mocerino, 2009, Kozma & Russell, 1997, Stieff & Mc Combs, 2006). Ces difficultés sont très visibles lors des évaluations en classe qui incluent différents types de systèmes sémiotiques (Kozma, 2003) et des problèmes complexes qui les obligent à mettre en œuvre des capacités de visualisation mentale (Rozzelle & Rosenfeld, 1985, Wu & Shah, 2004).

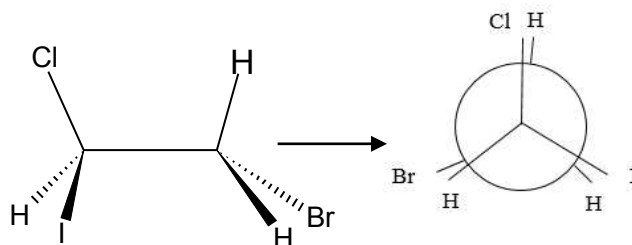
Pour qu'ils réussissent l'apprentissage et la résolution des problèmes de chimie organique en général, et de stéréochimie en particulier, ils doivent développer des aptitudes de construction, d'interprétation et de conversion des différents systèmes sémiotiques (Stull et al., 2012). Ces aptitudes sont des aspects importants de la capacité de visualisation mentale (Kozma & Russell, 1997, 2005 ; Kozma et al., 2000 ; Wu et al., 2001).



Pour réaliser les conversions inter registres sémiotiques telles que Cram-Newman par exemple, les étudiants et les experts utilisent une variété de stratégies correspondant à des raisonnements analytiques ou des raisonnements spatiaux (Stieff & Raje, 2010 ; Stieff, 2011). Un raisonnement est dit analytique ou non spatial lorsqu'il renvoie à l'application d'algorithmes spécifiques au domaine graphique en remplacement de transformations spatiales complexes, sans avoir recours à des images mentales (Stieff et al., 2010 cité par Stieff, 2011). Un raisonnement spatial

par contre se réfère spécifiquement au processus de production et de manipulation d'images mentales (Hegarty, 2004, West, 1991 cité par Stieff, 2011). Il relève de la visualisation mentale. Voici deux exemples de raisonnements possibles, un analytique et un autre spatial.

Tout d'abord, la conversion inter registre Cram-Newman ci-dessous peut être accomplie, en représentant dans le registre de Newman :

- les carbones, respectivement à gauche et à droite dans la représentation de Cram, par un point et un cercle ;
- les atomes H et Br portés par les traits de liaison hachurés



- les atomes H et Br portés par les traits de liaison hachurés () à l'extrémité des tirets simples (—) à gauche du cercle ;
- les atomes I et H portés par les traits de liaison gras () à l'extrémité des tirets simples (—) à droite du cercle ;
- les atomes Cl et H portés par les traits de liaisons en tiret simple dans la représentation de Cram, sur des traits verticaux.

Avec une telle stratégie, il n'est pas nécessaire d'imaginer la représentation de Cram en trois dimensions. Cependant, sans une compréhension de la façon dont les manipulations des symboles se rapportent à la structure tridimensionnelle de la molécule, il est difficile pour les novices de se rappeler les étapes exactes de cette procédure, dont chacune introduit une possibilité d'erreur (Stull et al., 2012). Les raisonnements analytiques ne sont pas nécessairement la stratégie la plus facile ou la plus pratique pour les étudiants (Stieff, 2007 cité par Stieff, 2011 ; voir aussi Stull et al., 2012). Ils ne parviennent pas souvent à appréhender correctement leur utilisation (Taagepera & Noori, 2000 cité par Stieff, 2011).

Sinon, en utilisant un raisonnement spatial, la conversion inter registre Cram-Newman pourrait comprendre les étapes cognitives suivantes :

- positionnement de l'observateur, suivant l'axe de la liaison C—C et visualisation dans l'espace de la molécule à partir de sa représentation de Cram (capacité d'orientation spatiale);
- projection mentale des substituants des carbones sur un plan perpendiculaire à l'axe de la liaison C—C ;

- représentation des carbones, des liaisons afférentes, et des angles qu'elles forment selon les conventions de représentation dans le registre de Newman.

Réaliser une telle opération mentale est une tâche complexe, pas souvent réussie. Une étude a par exemple révélé que, lors de la réalisation de la conversion inter registre Cram Newman, des futurs enseignants algériens¹⁴ de physique chimie inversent les configurations absolues des carbones asymétriques (Boukhechem et al., 2011).

L'enseignement de la stéréochimie passe également par le traitement des représentations sémiotiques des molécules. Toutefois, les étudiants ont souvent de la peine à les voir dans l'espace ; en représentation de Cram par exemple, des étudiants français des premier et deuxième cycles ne savent pas s'ils doivent dessiner le trait de liaison hachuré au-dessus ou en-dessous du trait de liaison gras, pour deux traits de liaisons issus d'un même carbone (Pellegrin et al., 2003). Les résultats des recherches menés par Barlet et Plouin (1997) révèlent aussi que certains étudiants français de premier cycle (licence de sciences physiques, et DEUG 2^{ème} année section sciences de la matière à orientation chimie) méconnaissent la libre rotation de groupes d'atomes autour d'une liaison simple et l'infinité de conformations pour une même molécule. Krajcik (1991, cité par Harle & Town, 2011) a également constaté que beaucoup d'étudiants qui peuvent former une représentation 3-D d'une image 2-D ne sont pas capables de la faire tourner mentalement avec précision. Ils ont du mal à mettre en œuvre les opérations de rotation pour comparer les différentes représentations de Cram (cas des étudiants américains de chimie organique, Kuo et al., 2004); une autre étude établit que des étudiants sud-africains de premier cycle (deuxième année) (Tuckey et al., 1999) ont des difficultés à identifier les axes de rotation, et à visualiser les positions des atomes après rotation. La reconnaissance des molécules stéréoisomères de conformation dans le registre de Newman n'est pas également aisée, et cela résulte d'un manque de maîtrise de la définition des concepts (Boukhechem et al., 2011).

La nécessité d'exécuter une série de tâches impliquant l'emploi de modèles moléculaires est un autre problème auquel beaucoup d'étudiants font face lors de l'étude de la stéréochimie. L'utilisation des modèles moléculaires vise à simplifier, illustrer et explorer la structure des molécules, les phénomènes et les processus chimiques d'une manière progressive (Barnea & Dori, 1999). Les capacités de visualisation des étudiants sont peut être améliorées (Copolo & Hounshell, 1995, Ferk et al., 2003), mais des difficultés persistent en raison de l'utilisation insuffisante des modèles moléculaires dans les classes de sciences, et le manque d'accent, par

¹⁴ Il s'agit précisément des étudiants de troisième et quatrième année

les enseignants, sur le fait que ces derniers ne sont pas un reflet exact de la réalité ; les perceptions du modèle moléculaire par les étudiants sont parfois partielles ou mauvaises (Gilbert, 1991, Ingham & Gilbert, 1991 cités par Barnea & Dori, 1999). Des résultats montrent que certains ont des difficultés à visualiser les structures tridimensionnelles de molécules représentées par des modèles moléculaires et des formules 2D (Tuckey et al., 1991). Lors de la conversion représentation sémiotique-modèle moléculaire ou modèle moléculaire-représentation sémiotique, certains étudiants américains de chimie organique ne sont pas en mesure d'établir correctement la correspondance entre le modèle moléculaire et les représentations sémiotiques (Stull et al., 2012). Pour passer du modèle moléculaire à la représentation spatiale par exemple, ils ne respectent pas l'ordre circulaire des substituants autour des atomes de carbone central de la molécule (Ibid.). En outre, les conventions de représentation des modèles moléculaires (par exemple, ce que signifient les couleurs des boules d'atomes) ne sont pas connues de tous (Ibid.). Besson et Davous (1991) ont également montré que les élèves avaient du mal à passer du modèle compact à la formule brute ou du modèle éclaté à la formule développée.

A notre connaissance, aucune étude sur les difficultés et les raisonnements des élèves, à propos de la stéréochimie, n'a été réalisée au Bénin : l'enseignement/apprentissage dans le secondaire présente des différences notoires avec celui de l'université. Examiner cette question des raisonnements et des difficultés des élèves béninois en stéréochimie revêt donc une importance particulière ; c'est ce que notre étude se propose de réaliser.

III. Etudes réalisées

Nous avons accompli nos études en trois phases, et ce, durant trois années consécutives, 2010, 2011 et 2012. Les résultats de la première phase ont influencé la formulation de certaines questions spécifiques de recherche de la deuxième phase ; de même les résultats de la deuxième étude ont eu des répercussions sur l'élaboration de certaines questions spécifiques de recherche de la troisième phase.

Nous présentons pour chaque étude réalisée, les questions spécifiques de recherche, l'approche méthodologique, les résultats obtenus et la conclusion partielle.

III.1. Etude 1

La revue de littérature montre que la plupart des études en lien avec les raisonnements et les difficultés d'apprentissage de la stéréochimie, ont été réalisées sur des étudiants de premier et

deuxième cycle universitaire. Etant donné que la nôtre porte sur des élèves de terminale D (cycle secondaire), nous avons jugé nécessaire de procéder à une étude préliminaire de leurs raisonnements et difficultés lors de l'utilisation et l'interprétation des représentations sémiotiques.

III.1.1. Questions spécifiques de recherche (QSR)

L'analyse du manuel, du programme PPO et de son commentaire révèlent que les capacités attendues des élèves, à la fin de l'enseignement de stéréochimie, sont liées aux activités cognitives (communication, traitement et conversion) que permettent les systèmes de projections, particulièrement ceux de Cram et de Newman. Les recherches antérieures mettent en évidence les raisonnements et les difficultés des étudiants relatifs à la réalisation de ces activités cognitives. Nous choisissons donc d'orienter nos questions spécifiques de recherches autour de ces activités.

- Communication

Les capacités à réaliser les opérations de traitement intra registre sémiotique ou de conversion inter registre sémiotique, exigent au préalable la connaissance des activités de communication ou de représentation que permet le système sémiotique. Nous nous intéressons aux connaissances des élèves à propos de l'activité de communication dans le système de Cram. Le choix de ce système de projection s'explique par le fait que, dans le programme PPO, la majorité des capacités attendues des élèves s'y rapportent, ce qui n'est pas le cas des autres systèmes de projection (systèmes de la perspective et de Newman par exemple).

- QSR1 : Quelle signification les élèves donnent-ils à la représentation de Cram ?

- Traitement

Une capacité attendue des élèves porte sur la reconnaissance des molécules identiques parmi une série de molécules en représentation de Newman (Cp5). Boukhecm et al. (2011) remarquent que des étudiants ne maîtrisent pas la définition du concept de stéréoisomérisation de conformation, il en résulte des difficultés à reconnaître des molécules stéréoisomères de conformation dans le registre de Newman. Nous cherchons à vérifier si les élèves rencontrent le même problème. La question spécifique de recherche suivante est posée:

- QSR2 : Comment les élèves reconnaissent-ils des molécules stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Newman?

- Conversion

Deux autres capacités attendues des élèves sont les aptitudes à écrire les représentations conventionnelles des liaisons dans le registre de Cram (Cp12) et à réaliser les conversions inter registre formule semi-développée-Cram (CP13). Nous supposons que les élèves ne respectent pas tous les conventions de représentation de Cram d'une molécule à deux carbones. Il en découle la question spécifique de recherche suivante :

- QSR3 : Quelles sont les erreurs des élèves relatives aux conventions de représentation dans le registre de Cram ?

Certaines capacités attendues des élèves (Cp9 et Cp15) renvoient à la conversion inter registre Cram-Newman. La revue de littérature montre que pour réaliser cette conversion inter registre, on peut s'appuyer sur un raisonnement spatial ou un raisonnement analytique. Et chaque raisonnement apporte sa part de difficultés (Stieff, 2007, Taagepera & Noori, 2000 cités par Stieff, 2011). Nous formulons la question spécifique de recherche suivante :

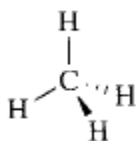
- QSR4 : Quels raisonnements utilisent les élèves pour réaliser la conversion inter registre Cram-Newman ?

III.1.2. Instrument de collecte de données

Un questionnaire papier-crayon est utilisé pour collecter les données. Les questions 1 et 2 concernent, respectivement la signification d'une représentation de Cram et les conversions d'une formule semi-développée en représentation de Cram, puis en représentation de Newman, la question 3 la reconnaissance de stéréoisomères de conformation dans le registre de Newman.

Question 1 : signification de la représentation de Cram



Elle se rapporte à la question spécifique de recherche 1. Elle a pour but de mettre en évidence les raisonnements et difficultés des élèves à propos de la signification des traits dans la représentation de Cram de la molécule de méthane, que nous proposons accompagnée de deux questions :



- Que représentent les traits dans cette représentation spatiale ?*
- Pourquoi sont-ils dessinés différemment ?*

Nous utilisons le terme « représentation spatiale » parce que le programme et le manuel ne parlent pas de représentation de Cram.

Réponses attendues

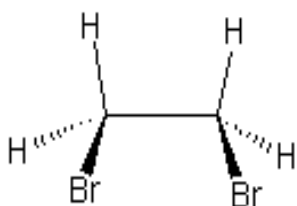
- a) Les traits représentent les liaisons de covalence ou les électrons de liaison entre les atomes, ou le trait normal (—) représente une liaison dans le plan de la feuille, le trait gras (), une liaison pointant hors du plan de la feuille vers l'observateur, et le trait hachuré (), une liaison en arrière du plan de la feuille.
- b) Les traits sont dessinés différemment pour distinguer la position des traits de liaison ou d'atomes liés au carbone dans l'espace.

Question 2 : conversions inter registres formule semi-développée-Cram et Cram-Newman

Elle est liée aux questions spécifiques de recherche 3 et 4. Nous cherchons à connaître les raisonnements et difficultés rencontrées par les élèves pour réaliser les conversions inter registres formule semi-développée-Cram et Cram-Newman. Elle comprend deux sous-questions. La sous-question 2.a propose de dessiner une représentation de Cram d'une conformation éclipsée de la molécule de 1,2-dibromoéthane en formule semi-développée.

Sous-question 2.a : *Dessinez une représentation spatiale en conformation éclipsée correspondant à la formule semi-développée suivante $\text{BrCH}_2\text{-CH}_2\text{Br}$.*

Réponse attendue



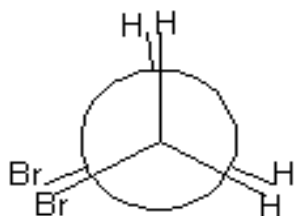
(les substituants d'un carbone peuvent occuper différentes positions, le résultat présenté n'est qu'une réponse parmi d'autres possibles).

Puis, nous demandons, à la question 2.b, de donner la représentation de Newman de la représentation de Cram obtenue à la question précédente, ainsi que la démarche utilisée.

Sous-question 2.b : *A partir de la représentation spatiale que vous avez proposée, donnez sa représentation de Newman.*

Expliquez comment vous avez procédé pour dessiner cette représentation de Newman.

Réponse attendue



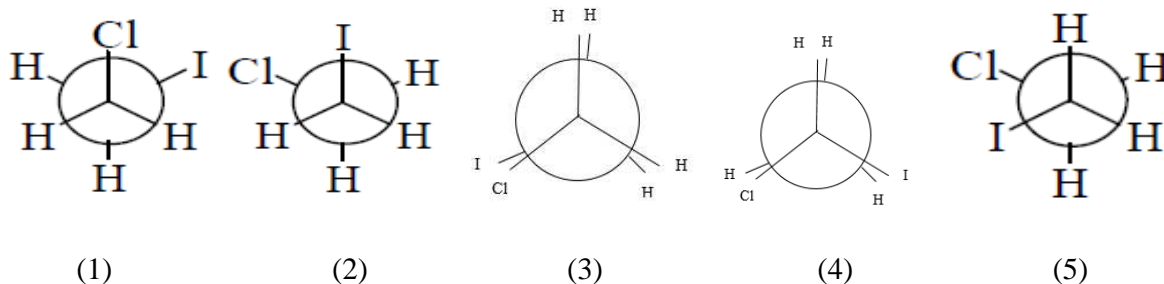
Explication

D'après notre expérience, pour réaliser cette conversion les enseignants proposent un raisonnement spatial, que nous considérons comme l'explication attendue à cette question : la molécule en représentation spatiale est observée, à gauche ou à droite, suivant l'axe de la liaison C—C ; les liaisons établies entre les atomes de carbone et leurs voisins sont projetées dans un plan perpendiculaire à cet axe ; le carbone le plus proche de l'observateur est symbolisé par un point situé au point d'intersection des trois autres liaisons afférentes, le carbone le plus éloigné par un cercle duquel partent ses trois liaisons, figurées par des segments radiaux.

Question 3 : reconnaissance de stéréoisomères de conformation dans le registre de Newman

Cette question 3 concerne la reconnaissance de molécules stéréoisomères de conformation dans le registre de Newman. Elle se rapporte à la question spécifique de recherche 2. Nous proposons quatre représentations de Newman différentes de 1-chloro-2-iodoéthane ($\text{ClH}_2\text{C}-\text{CH}_2\text{I}$, représentations 1, 2, 3 et 5), et une du chloroiodoéthane ($\text{IClHC}-\text{CH}_3$, représentation 4). Dans le cas des représentations de Newman des molécules 1 et 3, le carbone observé le plus proche de l'observateur est celui lié à l'atome de chlore, et dans celui des représentations 2 et 5, le carbone lié à l'atome d'iode. Les représentations 1, 2 et 5 sont sous la forme décalée (d), et les deux autres sous la forme éclipsée (é).

Lesquelles parmi ces molécules sont des stéréoisomères de conformation ? Justifiez.



Réponses attendues

La réponse attendue est (d=décalée, é=éclipsée) : 1(d), 2(d), 3(é) et 5(d). Nous considérons également comme valable, les autres combinaisons telles que : 1(d) et 2(d) ; 1(d) et 3(é) ; 1(d) et 5(d) ; 2(d) et 3(é) ; 2(d) et 5(d) ; 2(é) et 5(d) ; 3(é) et 5(d) ; 1(d), 2(d) et 3(é) ; 1(d), 2(d), 3(é), et 5(d) ; 2(d), 3, et 5(d).

La justification attendue est : les représentations de Newman diffèrent par des rotations des substituants d'un des carbones autour de l'axe de la liaison C—C.

III.1.3. Collecte des données

Les consignes du questionnaire sont, au préalable, validées en termes de faisabilité par trois enseignants de physique chimie de terminale D, et un test du questionnaire est fait avec un petit groupe de 10 élèves (hors échantillon). Cela nous permet de vérifier si les questions posées ne sont pas ambiguës, et à la portée des élèves. Les résultats obtenus s'avèrent satisfaisants, ce qui nous conduit à l'envoyer à tout l'échantillon.

La collecte des données s'est déroulée dans quatre établissements scolaires béninois (désignés par les lettres Ct, D, M et B) de la ville de Porto-Novo (Cf. tableau 9). Elle est basée sur un échantillon de 224 élèves, âgés de 17 à 21 ans, des classes terminales D.

Etablissements	Effectifs
Ct	80
D	33
M	87
B	24
	Total: 224

Tableau 9: Répartition de la population d'élèves
par établissement

Le questionnaire papier-crayon d'une durée de 30 minutes, est distribué 4 mois après l'enseignement de la stéréochimie. Les élèves sont prévenus quelques jours avant, et il leur est demandé de réviser leurs cours de stéréochimie. Des consignes sur la conduite du questionnaire sont données aux enseignants, en charge de la surveillance des élèves : anonymat et non évaluation du questionnaire.

III.1.4. Méthodologie d'analyse des données

L'analyse des réponses repose sur une catégorisation a priori, à partir de notre cadre d'analyse de référence et de la revue de littérature, et a posteriori à la lecture des données (catégories émergentes). Pour chaque question, nous enregistrons les éléments de réponses pertinents afin de les classer par thème ou catégories thématiques, en vue d'établir des pourcentages et de procéder à leur comparaison et interprétation (Robert & Bouillaguet, 2002, p. 28).

Question 1

Pour la question 1.a qui porte sur la signification des traits dans la représentation de Cram, nous repérons d'une part, des réponses qui mentionnent le terme liaison, et d'autre part celles qui ne l'évoquent pas. Dans la question 1.b où nous demandons pourquoi les traits sont dessinés différemment, les réponses sont catégorisées en termes de position des traits de liaison ou des atomes dans l'espace.

Question 2

Dans la question 2.a, liée à la conversion inter registre formule semi-développée-Cram, nous distinguons des représentations spatiales et des représentations non spatiales. A l'intérieur de la première catégorie, nous examinons les caractéristiques des angles entre les traits de liaisons et la symbolisation des liaisons. Pour la question 2.b, les représentations de Newman obtenues à partir des représentations de Cram, sont classées selon qu'elles sont conformes ou non aux règles de ce système. L'observation de la représentation de Cram suivant l'axe C—C, la

projection de substituants des carbones et la symbolisation des liaisons sont les éléments de raisonnement retenus pour la catégorisation des méthodes de conversion proposées.

Question 3

La question 3 met en jeu l'identification des stéréoisomères de conformation parmi des représentations de Newman décalées et éclipsées de molécules ; les catégories de réponses sont construites à partir des formes globales (éclipsée ou décalée) des représentations et de l'identification ou non des substituants des carbones. Les justifications sont ordonnées selon qu'elles parlent de rotation autour de l'axe C—C ou non.

III.1.5. Analyse des réponses d'élèves

Dans cette partie, nous présentons les analyses des réponses d'élèves aux différentes questions.

III.1.5.1. Sur la signification de la représentation de Cram

La question 1 porte sur les connaissances des élèves à propos de la représentation de Cram. Elle comprend deux sous-questions. Dans la première (1.a), nous interrogeons sur la signification des traits dans la représentation de Cram de la molécule de méthane, et dans la seconde (1.b) nous demandons pourquoi ils sont dessinés différemment.



Catégorisation et répartition des réponses à la question 1.a

Pour analyser les réponses à la question 1 .a, nous utilisons deux grandes catégories de réponses : réponses renfermant le terme liaison et réponse ne l'évoquant pas ou catégorie autre. La première est a priori, et la seconde émergente.

(Ls) Réponses renfermant le terme liaison

Nous distinguons cinq sous-catégories de réponses a priori :

- **(Ls1) Liaison** : réponses qui se limitent simplement au terme liaison ou liaison chimique, sans rien ajouter d'autre, et des réponses où le terme liaison est suivi d'une expression qui n'apporte pas d'information pertinente ; par exemple : « liaison du carbone asymétrique ».
- **(Ls2) Electrons de liaison** : réponses stipulant que les traits sont des électrons de liaison
- **(Ls3) Liaisons covalentes** : réponses énonçant que les traits sont des liaisons de covalence, par exemple : « liaison de covalence » ou « liaisons covalentes simples ».

- **(Ls4) Liaison entre atomes** : réponses ayant la même formulation que cette catégorie ou faisant appel aux atomes d'hydrogène, par exemple : «liaison entre le carbone et les hydrogènes ».
- **(Ls5) Liaisons et précision de leur position** : réponses mettant en avant la position relative de la liaison par rapport au plan de la feuille ; par exemple : le trait normal (—) représente une liaison dans le plan de la feuille, le trait gras (), une liaison pointant hors du plan de la feuille vers l'observateur, et le trait hachuré (), une liaison en arrière du plan de la feuille.

(A1) Réponses ne renfermant pas le terme liaison ou autres : réponses qui ne rentrent pas dans les catégories précédentes, par exemple « les traits dans cette formule spatiale représentent le tétragonal ».



		Pourcentage	
(Ls) Réponses renfermant le terme liaison	(Ls1) Liaisons**	62	92
	(Ls2) Electrons de liaison**	0	
	(Ls3) Liaisons covalentes**	11	
	(Ls4) Liaisons entre le carbone et les atomes qui lui sont liés**	19	
	(Ls5) Liaisons et précision de leur position**	0	
(A1) Réponses renfermant le terme liaison ou autres		6	8
Absence de réponse		2	
		Total : 100	

Tableau 10: répartition des réponses des élèves à la question 1.a

**= réponses correctes

Analyse des réponses à la question 1.a

L'examen du tableau 10 montre que 92% des élèves indiquent que les traits représentent les liaisons dans le système de Cram. Certaines réponses d'élèves sont plus complètes que d'autres. 19% (Ls4), par exemple, précisent les atomes qui forment ces liaisons, alors que 62% (Ls1) ne les mentionnent pas. 11% d'élèves (Ls3) soulignent que les liaisons sont covalentes, faisant preuve de la connaissance de leur nature.

Bien que la liaison covalente soit présentée comme la mise en commun d'électrons, nous remarquons qu'aucun élève ne parle d'électrons de liaison (Ls2). De plus, aucun n'explique les conventions de représentation des liaisons (Ls5) : trait normal (—) dans le plan de la feuille, trait gras () en avant du plan de la feuille, et trait hachuré () en arrière du plan de la feuille ; c'est peut-être parce que la question posée : *Que représentent les traits dans cette représentation spatiale ?*, ne les demande pas clairement.

Un pourcentage minime d'élèves, 8%, n'indique pas ce que représentent les traits : certains donnent des réponses qui ne rentrent pas dans les catégories précédentes (A1, 6%) et d'autres ne répondent pas (2%).

Catégorisation et répartition des justifications à la question 1.b

Nous distinguons trois catégories de justifications, dont deux a priori (P1 et P2), et une émergente (A2):

- **(P1) Position des traits de liaison dans l'espace** : justifications faisant référence à la différenciation des positions des traits de liaison dans l'espace ; par exemple : « ils sont dessinés différemment pour situer leur position dans l'espace ».
- **(P2) Position des atomes dans l'espace** : justifications se référant à la distinction des positions des atomes dans l'espace ; par exemple : « c'est pour bien voir la position des atomes dans l'espace ».
- **(A2) autres** : justifications jugées hors sujet et ne faisant pas référence à la position des traits de liaison ou des atomes dans l'espace. Par exemple : « pour bien dessiner ».

	Pourcentage	
(P1) position des traits de liaison dans l'espace**	43	75
(P2) Position des atomes dans l'espace**	32	
(A2) Autres	21	
Pas de réponses	4	
	Total : 100	

Tableau 11 : répartition des justifications des élèves à la question 1.b

**= réponses correctes

Analyse des justifications à la question 1.b

75% des élèves (P1, 43%, P2, 32%) disent pour quelles raisons les traits sont dessinés différemment, à savoir situer leur position, ou celle des atomes, dans l'espace (cf. tableau 11). Cela nous laisse supposer que la représentation de Cram est, pour eux, une représentation bidimensionnelle d'une molécule à structure tridimensionnelle. La fonction de communication du système de Cram est connue.

21% (A2) donnent des réponses sans rapport avec une disposition spatiale des traits de liaison. 4% ne fournissent pas de raison. Nous pouvons conjecturer qu'ils ne savent pas pourquoi les traits de liaison sont dessinés différemment dans le système de Cram. Il n'est pas certain que, pour eux, ce système a pour fonction la représentation de la structure spatiale d'une molécule.

Nous précisons qu'aucun des élèves des catégories «autres» (A1) et «absence de réponse» de la question 1.a, ne donne une justification correcte à la question 1.b.

Résumé

Il ressort de cette analyse que la plupart des élèves savent que les traits représentent les liaisons dans le système de Cram (92%), et ont connaissance de sa fonction de communication: la représentation de la structure spatiale d'une molécule (75%). Une proportion minimale (8%) ne sait pas ce que représentent les traits dans ce système. Un quart d'entre eux ignore sa fonction de communication (25%).

III.1.5.2. Sur les conversions inter registres

A la question 2, il est demandé de réaliser les conversions inter registres formule semi-développée-Cram (2.a) et Cram-Newman (2.b).

III.1.5.2.1. Formule semi-développée-Cram

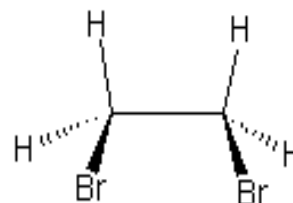
La question 2.a concerne la conversion inter registre formule semi-développée-Cram du 1,2-dibromoéthane en conformation éclipsée.

Catégorisation et proportions des réponses à la question 2.a

Nous distinguons deux grandes catégories a priori de réponses : représentations spatiales (C1) et représentation non spatiales. Pour plus de netteté, les exemples de dessins d'élèves sont reproduits avec le logiciel ChemSketch.

(C1) Représentations spatiales : dessins ayant des caractéristiques d'une représentation spatiale. Nous repérons deux types de dessins correspondant aux caractéristiques des liaisons et des angles:

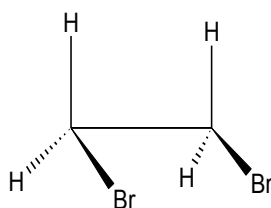
- **(C1a) Caractéristiques conformes** : les conventions de représentation des liaisons



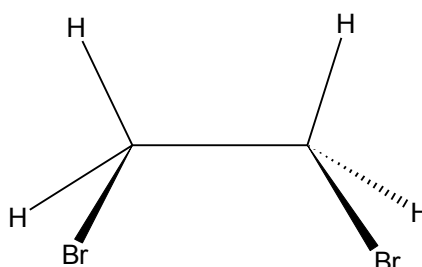
et des angles sont respectées ; par exemple

- **(C1b) Caractéristiques non conformes** : les conventions de représentations des liaisons et/ou de leurs angles ne sont pas respectées. Trois cas se présentent:

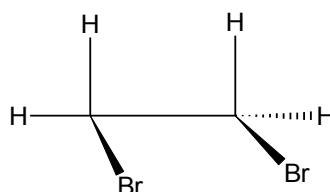
- **(C1b1) angles non conformes** : nous incluons dans cette catégorie des dessins où les conventions de représentations des liaisons sont respectées mais pas les valeurs approximatives des angles ; par exemple



- **(C1b2) traits de liaison non conformes** : l'une des représentations des liaisons est erronée mais avec des angles adéquats; par exemple

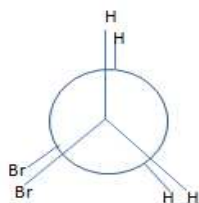


- **(C1b3) traits de liaison et angles non conformes** : les représentations des liaisons et des angles formés ne sont pas respectées ; par exemple :

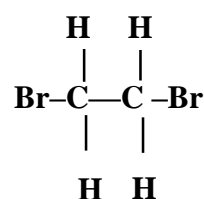


(C2) Représentations non spatiales : dessins présentant les caractéristiques d'une représentation autre que celle de Cram. Nous distinguons deux sous-catégories de réponses émergentes.

- **(C2a) représentations de Newman éclipsées** : par exemple



- **(C2b) formules développées**



		Catégories de réponses		Pourcentage
(C1) Représentations spatiales	(C1a) Caractéristiques conformes **		12	
	(C1b) Caractéristiques non conformes	(C1b1) angles non conformes	28	52
		(C1b2) traits de liaisons non conformes	11	
		(C1b3) traits de liaison et angles non conformes	13	
(C2) Représentations non spatiales	(C2a) représentations de Newman éclipsées		27	31
	(C2b) formules développées		4	
		Pas de réponse	5	
				Total : 100

Tableau 12 : répartition des réponses des élèves à la question 2.a

** = réponse correcte

Analyse des réponses à la question 2.a

L'examen du tableau 12 montre qu'une majorité d'élèves (64%) dessine une représentation spatiale, dont 12% avec des caractéristiques des liaisons et des angles conformes à la représentation éclipsée attendue (C1a). 52% ne respectent pas les conventions de représentations des liaisons et/ou des angles dans le registre de Cram (28% : C1b1, 11% : C1b2, et 13% : C1b3) ; ils n'en voient peut-être pas l'intérêt ou ne les connaissent pas. Contrairement

aux représentations des catégories (C1b2) et (C1b3), les représentations de la catégorie (C1b1) ont la particularité d'être sous la forme éclipsée. En effet, bien que les angles entre les liaisons ne soient pas respectés, une observation de cette représentation suivant l'axe C—C montre des angles dièdres voisins de 0°.

31% des élèves proposent des représentations autres que la représentation spatiale, dont 27% une représentation de Newman éclipsée (C2a), 4% reprennent la formule développée (C2b).

Parmi ces 27% d'élèves (C2a), 21% donnent des réponses sans rapport avec la disposition spatiale des traits de liaison à la question 1.b (catégorie A2, 21%-tableau 11), et 6%, à cette même question, expliquent pourquoi les traits sont dessinés différemment dans une représentation de Cram (catégories P1 et P2). Ceci confirme notre point de vue selon lequel les élèves de la catégorie (A2) ne savent pas ce qu'on entend par représentation spatiale. Quant à ceux des catégories P1 et P2, ils ont du mal à réaliser la conversion de la formule semi développée en représentation de Cram : une justification correcte à la question 1b, ne signifie pas que la connaissance soit opérationnelle.

Les élèves n'ayant pas répondu à la question 1 (4%), n'ont pas, non plus, répondu à la question 2.

III.1.5.2.2. Conversion inter registres Cram-Newman

La question 2.b porte sur la conversion de la représentation Cram (obtenue à la question 2.a) en représentation de Newman.

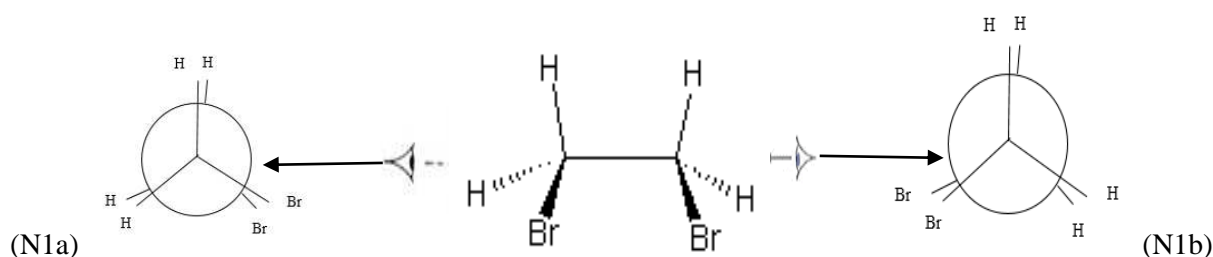
L'analyse des résultats est réalisée en trois parties. Dans un premier temps, nous nous intéressons uniquement aux réponses des élèves ayant dessiné une représentation spatiale avec des liaisons correctes (représentation de Cram éclipsée), en l'occurrence ceux des sous-catégories C1a et C1b1. Nous estimons qu'il est possible de passer d'une représentation spatiale avec des angles incorrects à une représentation de Newman. Puis nous examinons les représentations spatiales qui ne peuvent pas être converties en représentation de Newman (il s'agit des réponses d'élèves des sous-catégories C1b2 et C1b3), et les représentations non spatiales (réponses d'élèves de la catégorie C2). Les exemples de dessins sont reproduits avec le logiciel ChemSketch.

- **Réponses des catégories (C1a) et (C1b1) à la question 2.b**

Catégories et proportions des réponses

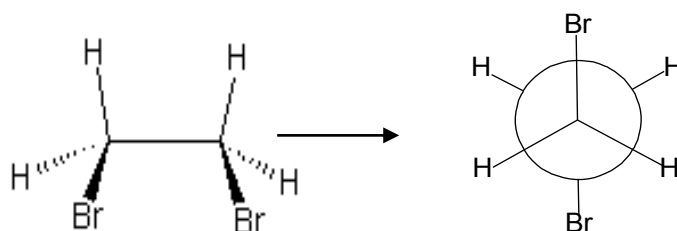
Nous relevons deux grandes catégories de réponses, la première (N1), a priori, et la seconde (N2), émergente.

(N1) Newman éclipsée attendue : il s'agit de la représentation pouvant être obtenue en observant la représentation spatiale initiale, à gauche (N1a) ou à droite (N1b), suivant l'axe C—C ; par exemple :

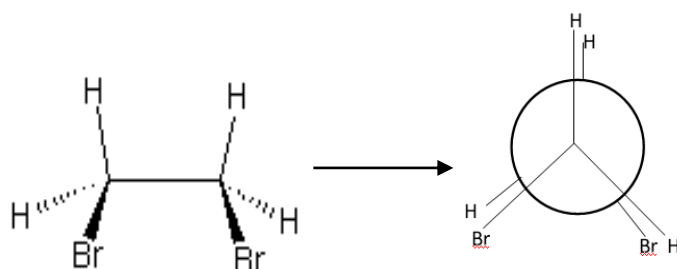


(N2) Autres représentations de Newman : elles correspondent à une autre conformation que celle de la représentation spatiale fournie. Nous avons distingué deux cas :

- **(N2a) Newman décalée** : par exemple



- **(N2b) Newman éclipsée ne correspondant pas à la conformation de la représentation de Cram** : par exemple



	(N1)		(N2a)	(N2b)	Pas de réponse	Total
	(N1a)	(N1b)				
(C1a) Caractéristiques conformes**	6 (**15)	0	2 (**5)	3 (**7,5)	1 (**2,5)	12 (**30)
(C1b1) Angles non conformes	9 (**22,5)	0	3 (**7,5)	12 (**30)	4 (**10)	28 (**70)
Total	15 (**37,5)	0	5 (**12,5)	15 (37,5)	5 (**12,5)	40 (**100)

Tableau 13: répartition des réponses d'élèves des catégories (C1a) et (C1b1) à la question 2.b

** = répartition des réponses d'élèves des catégories (C1a) et (C1b) si l'on ne prend en compte que la population d'élèves des deux catégories.

Analyse des réponses

L'examen du tableau 13 montre que la moitié des élèves (6%) ayant dessiné correctement la représentation spatiale (C1a) propose une représentation de Newman pouvant être obtenue en observant la représentation de Cram à gauche suivant l'axe C—C (C1a-N1a). Plus d'un tiers de ceux qui ont dessiné une représentation spatiale avec des angles non conformes (C1b1) donne également une représentation de Newman semblable (C1b1-N1a, 9%).

5% des deux catégories d'élèves (C1a) et (C1b1) dessinent une conformation décalée en représentation de Newman (N2a) au lieu d'une conformation éclipsée, 15% une représentation de Newman d'une autre conformation éclipsée que celle demandée (N2b).

Raisonnements des élèves

Les explications proposées par les élèves sont de deux types :

- **Observation de la représentation spatiale suivant l'axe de la liaison C—C et symbolisation des liaisons** : explications indiquant que la représentation spatiale est observée suivant l'axe de la liaison C—C et mentionnant la symbolisation des liaisons, sans pour autant préciser si la molécule est observée à gauche ou à droite. Par exemple « *pour représenter une molécule en représentation de Newman, il faut regarder la molécule suivant la liaison carbone-carbone, les liaisons du carbone qui est devant, sont représentées par des segments ; le carbone en arrière est représenté par un cercle sur lequel partent les trois autres liaisons restantes* ».
- **Autre** : explications ne précisant pas la position de l'observateur, par exemple « *pour dessiner il faut un crayon, un compas...* ».

	Observation de la représentation spatiale suivant l'axe de la liaison C—C et symbolisation des liaisons **	Autres	Pas de réponse	Total (en %)
(C1a) et (N1)	4	2	0	6
(C1a) et (N2a)	0	0	2	2
(C1a) et (N2b)	0	3	0	3
(C1b1) et (N1)	2	2	5	9
(C1b1) et (N2a)	0	0	3	3
(C1b1) et (N2b)	0	3	9	12
				Total : 35%

Tableau 14 : répartition des explications des élèves (en %) ayant dessiné les représentations spatiale et de Newman

**= réponse partiellement correcte

L'examen du tableau 14 montre qu'au total, seuls 6% des élèves (C1a et N1, 4%, C1b1 et N1, 2%) donnent une explication se rapportant à une observation de la représentation spatiale suivant l'axe C—C, sans toutefois préciser si la représentation spatiale est observée à gauche ou à droite, et si les liaisons établies, entre les atomes de carbone de l'axe C—C et leur voisin, sont projetées dans le plan perpendiculaire à cet axe. L'absence de ces précisions ne nous permet pas de dire si la visualisation mentale de la représentation de Cram est effective, et d'inférer leurs capacités de visualisation mentale. Nous pouvons simplement supposer qu'ils se sont appuyés soit sur un raisonnement spatial (par exemple celui attendu), soit sur un raisonnement analytique (par exemple celui proposé au § II p. 89).

29% n'expliquent pas la méthode utilisée (C1a-N2a : 2%, C1b1-N1 : 5%, C1b1-N2a : 3%, C1b1-N2b : 9%), ou donnent des explications ne permettant pas de comprendre comment ils procèdent (C1a-N1 : 2%, C1a-N2b : 3%, C1b1-N1 : 2%, C1b1-N2b : 3%, cf. tableau 14). Ces absences d'explications ou ces considérations peuvent suggérer qu'ils ne connaissent pas le raisonnement spatial attendu ou qu'ils ont du mal à expliquer leur raisonnement.

Nous émettons deux hypothèses concernant les raisonnements des élèves des catégories C1a-N2b¹⁵ (3%) et C1b1-N2b (12%), soit 15% (cf tableau 14).

- 1^{ère} hypothèse : ces élèves utilisent un raisonnement spatial. Ils regardent la représentation de Cram suivant la liaison C—C:
 - o (a) soit successivement à droite et à gauche ou vice versa pour représenter les substituants du premier carbone vu, ce que nous désignons par la mention « double regard ». Dans ce cas, ils ne maîtrisent pas les différentes étapes de la conversion inter registre Cram-Newman.

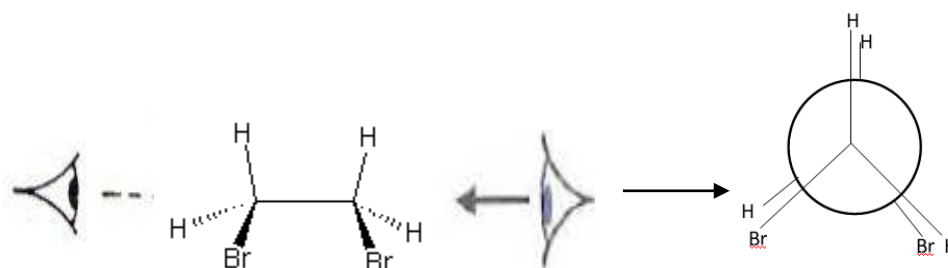


Figure 31: Exemple de « double regard »

- o (b) soit à gauche ou à droite (position fixe de l'observateur), et les positions des substituants du carbone proche ou éloigné ont été permutées. Cela suppose que les capacités de visualisation mentale des substituants du carbone proche ou éloigné leur font défaut.

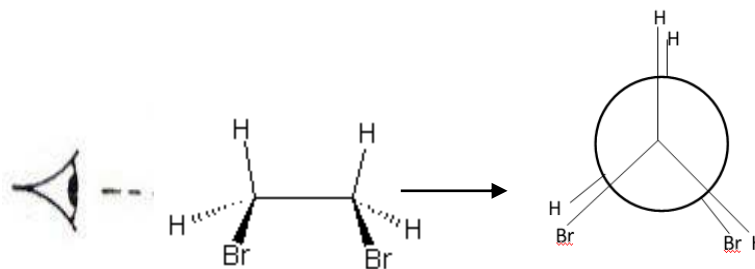


Figure 32: exemple de schéma traduisant une permutation des positions des substituants du carbone proche de l'observateur

¹⁵ Ces proportions paraissent peut-être peu élevées, mais si l'on rapporte le nombre d'élèves de chacune des catégories de représentation de Newman au nombre d'élèves ayant répondu aux cas étudiés (C1a et C1b1), alors les taux des réponses augmentent considérablement : C1a-N1b : 7,5%, C1b1-N2b : 30% (cf. tableau 13), soit 37,5%.

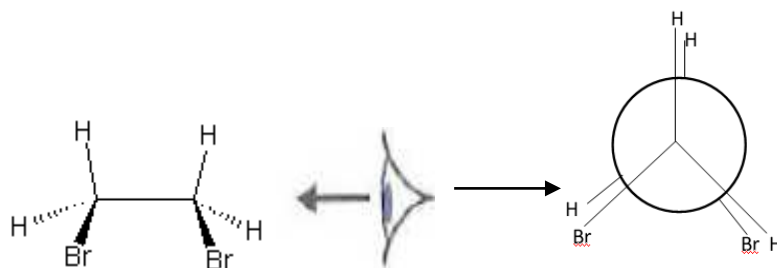


Figure 33: exemple de schéma traduisant une permutation des positions des substituants du carbone éloigné de l'observateur

- 2^{ème} hypothèse : ces élèves utilisent le raisonnement analytique (cf. § II p. 89). Mais, ils n'attribuent pas une position fixe, à gauche ou à droite, aux atomes situés sur les traits de liaison hachurés et gras. Ils la changent d'un carbone à l'autre.

➤ Réponses des catégories (C1b2) et (C1b3) à la question 2.b

Les élèves des catégories C1b2 (11%) et C1b3 (13%) dessinent des représentations de Newman éclipsées. 17% expliquent avoir observé la représentation spatiale suivant l'axe C—C, sans préciser leur position, à gauche ou à droite de la représentation spatiale, ou une éventuelle projection des liaisons établies, entre les atomes de carbone de l'axe C—C et leur voisin, dans le plan perpendiculaire à cet axe. Le fait de mentionner une observation de la représentation spatiale suivant l'axe C—C peut laisser penser qu'ils utilisent le raisonnement spatial attendu ou un raisonnement analytique. Etant donné qu'il n'est pas évident d'obtenir une représentation de Newman à partir de la visualisation mentale d'une représentation spatiale dont les traits de liaison et les angles ne sont pas conformes, nous pensons que ce n'est pas le cas. Ils semblent néanmoins mieux connaître les conventions de représentation des liaisons dans le registre de Newman que dans celui de Cram.

7% des élèves des catégories (C1b2) et (C1b3) ne justifient pas leurs réponses.

➤ Réponses de la catégorie (C2) à la question 2.b

Au lieu de fournir une représentation spatiale éclipsée à la question 2.a, certains élèves (27%) dessinent une représentation de Newman éclipsée (C2a). Lorsqu'on leur demande une représentation de Newman à la question 2.b, 6% fournissent une représentation spatiale de conformation identique à celle de la représentation de Newman, avec des angles incorrects entre les liaisons ; ils confondent les noms des deux types de représentation. 21% ne répondent pas à la question.

Les élèves de la catégorie (C2b) n'ont pas répondu à la question.

Résumé

Des proportions minimales d'élèves réussissent les conversions inter registre (formule semi développée- Cram : 12% ; Cram-Newman : 15%, C1a-N1a et C1b-N1a). A peine 6% seulement (C1a-N1a) arrivent à réaliser les deux conversions inter registre sans se tromper. Les explications des élèves concernant la façon de réaliser la conversion inter registre Cram-Newman sont peu claires. Ils ne précisent jamais la position de l'observateur, à gauche ou à droite de la représentation de Cram ; certains indiquent cependant qu'il faut regarder suivant l'axe C—C, les autres se contentent de parler des moyens de faire un dessin. Nous supposons néanmoins chez certains, l'utilisation du raisonnement spatial attendu ou d'un raisonnement analytique réussi.

La majorité des élèves échoue dans la réalisation des conversions inter registre (formule semi développée en Cram : 88%, représentations de Cram en Newman : 85%).

Dans le cas de la conversion inter registre formule semi-développée Cram, cela peut être dû :

- d'une part, à un manque de maîtrise des conventions de représentation des liaisons et des angles formés par ces liaisons dans le registre de Cram (52%), et ce, malgré le fait que le manuel insiste sur leur respect et précise les représentations erronées (cf. § II.2 figure 28) ;
- d'autre part, au fait qu'ils ne savent ce qu'est une représentation de Cram (36%, C2 et absence de réponse).

Cela affecte, bien évidemment, la réalisation de la conversion inter registre Cram-Newman. Une autre difficulté à l'origine de l'insuccès de la conversion inter registre Cram Newman peut être le manque de maîtrise de la méthode (29%). Deux types de raisonnements possibles sont inférés (15%): spatial et analytique. Dans l'éventualité d'un raisonnement spatial, ils ont :

- soit du mal à positionner de façon précise et cohérente l'observateur par rapport à la molécule observée ; la position de l'observateur est variable, conduisant ainsi à un double regard sur la liaison C—C, au lieu d'être fixe ;
- soit du mal à visualiser dans l'espace les positions des substituants des carbones proche ou éloigné, la position de l'observateur suivant l'axe C—C étant fixe.

Dans le cas d'un raisonnement analytique, ils se sont trompés dans les positions attribuées aux atomes fixés sur les traits de liaison hachurés et gras.

III.1.5.3. Sur la reconnaissance de stéréoisomères de conformation dans le registre de Newman

La question 3 propose une série de molécules en représentation de Newman, il faut identifier celles qui sont stéréoisomères de conformation, et justifier.

Catégorisation et répartition des réponses

Les catégories de réponses sont construites à partir des formes, éclipsée (é) ou décalée, (d) des représentations, et de l'identité des substituants des carbones. Nous distinguons deux catégories de réponses a priori (C3 et C6) et quatre catégories de réponses émergentes (C1, C2, C4 et C5) :

- **(C1) stéréoisomères de conformation de nature différente:** des réponses qui donnent les couples de représentations de conformations décalée et éclipsée, comme celles regroupant au moins deux des couples suivants : 1(d) et 3(é) ; 2(d) et 3(é) ; 5(d) et 3(é).
- **(C2) stéréoisomères de conformation de même nature:** réponses qui considèrent seulement des triplets ou des doublets de représentations de conformation décalée, comme : 1(d), 2(d) et 5(d) ; 1(d) et 2(d).
- **(C3) stéréoisomères de conformation de tout type:** ces réponses admettent à la fois des représentations de conformations décalée et éclipsée; c'est le cas lorsqu'au moins une des réponses suivantes est proposée: 1(d), 2(d), 3(é) ; 2(d), 3(é), 5(d).
- **(C4) formes globales identiques et substituants incorrects:** nous incluons dans cette catégorie, des réponses qui ne choisissent que les représentations de formes identiques (éclipsées) sans vérifier si les substituants de carbones sont identiques : comme la réponse suivante: 3(é) et 4(é) ;
- **(C5) formes globales différentes et substituants incorrects:** cela concerne les réponses qui ne sélectionnent que les représentations de formes différentes sans vérifier si les substituants de carbones sont identiques : c'est le cas si les élèves proposent un des couples suivants : 1(d) et 4(é) ; 2(d) et 4(é) ;
- **(C6) formes globales avec ou sans prise en compte systématique des substituants:** réponses qui considèrent tantôt les représentations de formes différentes, tantôt celles de formes identiques ; les substituants de carbones étant également tantôt différents, tantôt identiques, comme celles qui regroupent les deux couples suivants : 1(d), 2(d) et 3(é),4(é)

Catégories de réponses	Pourcentage	
(C1) stéréoisomères de nature différente (éclipsée-décalée)=(é-d)	0	Total : 42
(C2) stéréoisomères de conformation de même nature (d- d)**	29	
(C3) stéréoisomères de conformation de tout type (d-d-é)**	13	
(C4) formes globales identiques (é-é), et substituants incorrects	6	31
(C5) formes globales différentes (é-d), et substituants incorrects	5	
(C6) formes globales avec ou sans prise en compte systématique des substituants	20	
Absence de réponse	27	

Tableau 15: répartition des réponses à la question 3

**= réponse correcte

Analyse des réponses

L'examen du tableau 15 montre que 42% des élèves répondent correctement; 29% proposent des stéréoisomères de conformation d'un seul type (C2 : conformations identiques) et 13% des stéréoisomères de conformation des deux types (C3 : conformations identiques et conformations différentes). Aucun d'entre eux ne propose uniquement des stéréoisomères de nature différente (C1).

31% d'élèves identifient les stéréoisomères de conformation sans se préoccuper des substituants, des molécules de formes identiques (décalées ou éclipsées) (C4, 6%), de formes différentes (C5, 5%) ou considèrent à la fois des formes identiques et différentes (C6, 20%).

Plus d'un quart des élèves (27%) ne répond pas à la question.

Justifications des réponses

Les justifications obtenues, sont classées en cinq catégories. J1 est une catégorie a priori et correspond à la justification attendue. Les quatre autres, J2, J3, J4 et J5, sont des catégories émergentes ; la justification (J3) est insuffisante, donc partiellement correcte.

- **(J1) Passage d'une représentation à une autre par une rotation du groupement d'un carbone autour de la liaison C—C** : justifications qui stipulent qu'on peut passer d'une conformation à une autre par une rotation (sous-entendu de l'un des groupements CH₂Cl ou CH₂I) autour de l'axe de la liaison C—C ; par exemple : « pour 1 et 3 en effectuant une rotation de CH₂Cl de la molécule 1 on trouve la molécule 3 ».

- **(J2) Molécules différentes car disposition des substituants différente sur le papier :** ces justifications considèrent que, si les substituants des carbones de deux représentations de Newman sont différentes, alors elles sont stéréoisomères de conformation; par exemple : « car elles (en parlant des représentations de Newman) n'ont pas les mêmes atomes ».
- **(J3) Possibilité de rotation autour de la liaison simple C—C des molécules :** justifications faisant référence à la possibilité de rotation autour de la liaison C—C des molécules, sans mentionner le fait que les représentations de Newman comparées diffèrent par la rotation des substituants de leurs carbones autour de l'axe C—C; par exemple : « on peut effectuer une rotation autour de la liaison simple C—C ».
- **(J4) Molécules décalées :** justifications qui s'appuient sur l'identité des conformations ; par exemple « parce qu'elles ont toutes la conformation décalée »
- **(J5) Autres :** justifications n'entrant pas dans les catégories précédentes; par exemple : « elles ont des liaisons »

Justification Réponses	(J1) **	(J2)	(J3)	(J4)	(J5)	Absence de justification	Total (en %)	
(C2)	2	2	2	4	4	15	29	42
(C3)	7	0	0	0	2	4	13	
(C4)	0	1	0	0	0	5	6	31
(C5)	0	0	2	0		3	5	
(C6)	3	1	1	0	3	12	20	
Absence de réponses	0	0	0	0	0	27	27	27
Total (en %)	12	4	5	4	9	66	100	

Tableau 16 : répartition des justifications d'élèves ayant répondu à la question 3

**= justification attendue

L'examen du tableau 16 indique que 12% des élèves (J1) proposent une justification correcte, 5% une justification insuffisante(J3), et 17% des justifications absolument incorrectes (J2, 4%,

J4, 4%, et J5, 9%). La majorité des élèves (66%) ne justifient pas leurs réponses. Ils ont peut-être du mal à le faire.

- **Elèves ayant fait un choix correct des représentations de Newman (C2 et C3)**

Sur les 42% d'élèves ayant fait un choix correct de représentation de Newman (C2¹⁶ et C3¹⁷), seuls 9% proposent des justifications convenables, c'est à dire en accord avec les réponses proposées (C2-J1, 2%, et C3-J1, 7%).

Les réponses et justifications des élèves de la catégorie C3-J1 (7%) traduisent une maîtrise plus complète de la notion de stéréoisomérisation de conformation. Nous estimons que pour identifier les stéréoisomères de conformation, ils ont vérifié que les représentations de Newman, de tout type, diffèrent par la rotation du groupement d'un carbone autour de l'axe de la liaison C—C.

Certes, les élèves de la catégorie C2-J1 (2%), donnent la justification attendue, mais le fait de n'avoir choisi que les représentations de Newman de conformation de même nature (décalée) prouve qu'ils considèrent, à tort, que la rotation autour de l'axe de la liaison C—C conduit uniquement à une conformation de même type ; ils font preuve d'une maîtrise partielle de la notion de stéréoisomérisation de conformation. D'où leur choix des représentations de conformations décalées. Pour reconnaître les stéréoisomères de conformation, ils se sont assurés que les représentations de Newman de formes globales identiques diffèrent par la rotation du groupement d'un carbone autour de l'axe de la liaison C—C.

14% des élèves ayant répondu correctement à la question donnent des justifications partiellement correctes (C2-J1, 2%) ou absolument incorrectes (C2-J3, 2%, C2-J4, 4%, C2-J5, 4%, C3-J5, 2%). Ils ne sont pas capables d'explicitier leur raisonnement, ce qui nous laisse supposer qu'ils ne se sont pas vraiment appropriés : les réponses correctes trouvées sont peut-être un effet du hasard.

19% ne donnent pas de justification (C2, 15%, C3, 4%). Leurs réponses correctes sont peut-être aussi un effet du hasard, ou ils ont du mal à formuler leur argumentation.

- **Elèves ayant fait un choix incorrect des représentations de Newman (C4, C5 et C6)**

Sur les 31% d'élèves (C4, C5 et C6) ayant fait des choix incorrects, 3% (C6-J1) donnent des justifications qui permettent d'identifier correctement des stéréoisomères de conformation, mais qui ne sont pas en accord avec les réponses proposées. En effet, les représentations de

¹⁶ C2 : élèves ayant proposé des stéréoisomères de conformation de même nature

¹⁷ C3 : élèves ayant proposé des stéréoisomères de conformation de tout type.

Newman choisies ne diffèrent pas toutes par une rotation autour de l'axe C—C. La définition de la notion de stéréoisomérisation de conformation est peut-être connue, mais elle n'est pas opératoire. Nous présumons qu'ils se sont simplement remémoré la définition de la notion de stéréoisomérisation de conformation, sans chercher à la mettre en relation avec la détermination des représentations de Newman stéréoisomères de conformation.

20 % (C4, 5%, C5, 3%, C6, 12%) ne justifient pas leurs réponses. Cela peut traduire une appropriation insuffisante (ou une méconnaissance) de la notion de stéréoisomérisation de conformation, ce qui peut expliquer pourquoi ces élèves ne se sont pas préoccupés de l'identité des substituants des carbones. Une des causes de cette appropriation insuffisante peut résulter du fait que l'enseignement de la notion de stéréoisomères de conformation repose sur les conformations de la molécule d'éthane (cf. analyse du programme); les atomes liés aux carbones de cette dernière étant semblables, les élèves pensent alors que les formes globales sont les seuls critères permettant d'identifier des stéréoisomères de conformation, et oublient de regarder la nature des atomes liés.

Résumé

L'analyse ainsi réalisée révèle que 42% d'élèves reconnaissent les stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Newman. Une proportion non négligeable (27%) ne répond pas à la question.

Certains (7%, C3-J1) identifient des représentations de Newman ayant les mêmes substituants de carbone, et ce, indépendamment de leur forme globale (éclipsée ou décalée). Ils font preuve d'une bonne maîtrise de la notion de stéréoisomérisation de conformation.

Une minorité (C2-J1, 2%) repère les représentations de Newman ayant les mêmes substituants de carbone et les formes globales semblables. Ces élèves ne maîtrisent que partiellement la notion de stéréoisomérisation de conformation.

Les justifications fournies par ces deux catégories d'élèves (C2-J1 et C3-J1) nous conduisent à supposer que, pour reconnaître les stéréoisomères de conformation, ils vérifient si les représentations de Newman, de tout type ou de même forme globale, ne diffèrent que par la rotation du groupement d'un carbone autour de l'axe de la liaison C—C.

D'autres élèves (C4, C5, C6 : 31%) font une centration sur les formes globales identiques ou différentes pour identifier les stéréoisomères de conformation en représentation de Newman, et ce, sans prendre en compte l'identité des substituants des carbones. Cela résulte peut-être d'une appropriation insuffisante de la notion de stéréoisomérisation de conformation.

III.1.6. Conclusion partielle

Dans cette partie, nous apportons des éléments de réponses à nos questions spécifiques de recherche.

Signification de la représentation de Cram

La connaissance des activités de communication que permet le système de Cram est un préalable à la réalisation des opérations intra registre de Cram et inter registre Cram Newman. La première question spécifique de recherche porte donc sur la signification de la représentation de Cram :

- QSR1 : quelle signification les élèves donnent-ils à la représentation de Cram ?

Nous avons souligné que le système de Cram rend compte de la structure spatiale d'une molécule ; des traits de différentes formes (trait normal, trait gras et trait hachuré) représentent les axes des liaisons selon leur position dans l'espace (cf. chapitre § I.2.2.1.). 75% des élèves en sont conscients et proposent des réponses allant dans ce sens. Cela présume que, pour eux, la représentation de Cram est une représentation bidimensionnelle d'une molécule à structure tridimensionnelle. La majorité (92%) reconnaît que, dans le système de Cram, les traits représentent des liaisons ; néanmoins, nous ne disposons pas d'éléments de réponse permettant de dire qu'elle connaît la signification de chacun des traits par rapport au plan de la feuille (conventions de représentation des liaisons dans l'espace), et ce, peut-être à cause de la formulation peu précise de la question qui leur est posée. Nous ne pouvons donc pas affirmer qu'ils maîtrisent parfaitement la signification de la représentation de Cram.

Reconnaissance de stéréoisomères de conformation dans le registre de Newman

Dans la question spécifique de recherche 2, nous cherchons à mettre en évidence les difficultés des élèves relatives à la reconnaissance des molécules stéréoisomères de conformation dans le registre de Newman :

- QSR2 : Comment les élèves reconnaissent-ils des molécules stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Newman?

Nous avons recensé deux types de démarche :

- la première consiste à vérifier que les représentations de Newman, de tout type ou de formes globales identiques, ne diffèrent que par la rotation du groupement d'un carbone

autour de l'axe de la liaison C—C, ce qui conduit, respectivement, à une identification complète ou partielle des stéréoisomères de conformation ;

- la seconde, à repérer les représentations de Newman de formes globales identiques ou différentes, et ce, sans prendre en compte l'identité des substituants des carbones ; cette démarche ne permet pas d'obtenir des réponses correctes.

Il apparaît que la reconnaissance des stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Newman, n'est pas aisée pour certains élèves. Comme chez les étudiants (Boukhechem et al., 2011), cela semble être dû à une mauvaise appropriation de la notion de stéréoisométrie de conformation.

Conversion inter registre formule semi-développée Cram et Cram Newman

Les questions spécifiques de recherche 3 et 4 portent, respectivement, sur les conversions inter registre formule semi-développée Cram et Cram Newman :

- QSR3 : quelles sont les erreurs des élèves relatives aux conventions de représentation dans le registre de Cram ?
- QSR4 : quels raisonnements utilisent-ils pour réaliser la conversion inter registre Cram Newman ?

Peu d'élèves réalisent la conversion inter registre formule semi-développée-Cram, sans commettre des erreurs relatives aux conventions de représentation des liaisons et des angles formés par ces liaisons dans le registre de Cram. La majorité ne maîtrise pas ces conventions, et représente les molécules à deux carbones, avec quatre traits de liaison normaux, et/ou des angles de 90°. Certains ne savent pas ce qu'on entend par représentation de Cram, et la confondent avec la représentation de Newman ou la formule semi-développée.

Dans le cas de la conversion inter registre Cram Newman, ils sont également peu nombreux à réussir. Nous n'obtenons guère de renseignements sur la manière de réaliser cette conversion. Toutefois nous inférons un possible raisonnement spatial ou raisonnement analytique.

Certains n'arrivent pas à réaliser cette conversion, et se trompent sur les positions des substituants des carbones. Nous supposons qu'ils utilisent soit un raisonnement spatial « double regard », soit un raisonnement analytique défectueux. La difficulté à réaliser cette conversion inter registre peut également être due à l'incapacité de visualisation des positions des substituants des carbones proche ou éloigné, la position de l'observateur suivant l'axe C—C étant fixe (incapacité d'orientation spatiale).

Implication des résultats sur l'étude 2

L'étude ainsi réalisée révèle d'une part, que certains élèves s'appuient peut-être sur un raisonnement spatial pour passer de la représentation de Cram à la représentation de Newman. Toutefois, les résultats obtenus ne nous permettent pas de déceler leurs capacités de visualisation mentale, ou, pour être plus précis, les difficultés de visualisation mentale que peut engendrer l'observation, à gauche ou à droite, de la représentation de Cram de la molécule suivant l'axe C—C. D'autre part, nous constatons que des élèves tiennent seulement compte de la forme éclipsée et décalée des représentations de Newman pour reconnaître des molécules stéréoisomères de conformation. Néanmoins, nous ne pouvons pas affirmer l'existence d'un raisonnement identique lorsque les molécules proposées sont en représentation de Cram.

Pour apporter des éléments de réponses aux objections que nous venons de soulever, nous estimons qu'une nouvelle étude est nécessaire. Cette nouvelle étude est aussi l'occasion de nous intéresser aux capacités des élèves à réaliser certaines opérations de traitement qui ne sont pas abordées dans l'étude 1 : la reconnaissance d'un couple d'énantiomères avec la méthode de la double permutation et le passage d'une conformation à une autre par la rotation d'un groupement de carbones autour de l'axe de la liaison C—C.

III.2. Etude 2

Cette étude a pour but de connaître les raisonnements et difficultés des élèves liés aux opérations :

- de rotation autour de l'axe de la liaison C—C d'une molécule en représentation de Cram ;
- de reconnaissance des molécules stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Cram ;
- d'identification des couples d'énantiomères parmi une série de molécules en représentation de Cram ;
- de conversion de la représentation de Cram en représentation de Newman.

III.2.1. Questions spécifiques de recherche (QSR)

Comme dans l'étude 1, les questions spécifiques de recherches de cette étude sont liées à certaines activités cognitives que permettent les systèmes sémiotiques de Cram et de Newman.

- **Traitement**

Une des notions de base de la stéréochimie est la stéréoisomérisation de conformation. Le passage d'une conformation de molécule à une autre implique un raisonnement spatial nécessitant des capacités de rotation mentale. Les recherches de Tuckey et al. (1999) révèlent que les étudiants ont du mal à mettre en place cette opération dans le registre de Cram, et plus précisément, à identifier l'axe de rotation ou à repérer la place occupée par chaque substituant après la rotation. Nous faisons l'hypothèse que, dans le registre de Cram, les élèves rencontrent également ces difficultés. La question spécifique de recherche porte sur leurs capacités à réaliser l'opération de rotation dans le registre de Cram (rotation mentale) :

- QSR5 : Comment les élèves réalisent-ils l'opération de rotation autour de l'axe C—C d'une molécule en représentation de Cram ?

Deux capacités attendues des élèves portent sur la reconnaissance des molécules identiques parmi une série de molécules en représentation de Cram (Cp4) ou de Newman (Cp5). L'étude 1 nous permet de constater qu'ils ne maîtrisent pas la définition de la notion de stéréoisomérisation de conformation, il en résulte des difficultés à reconnaître des molécules stéréoisomères de conformation dans le registre de Newman : des élèves s'appuient simplement sur la forme éclipsée et décalée des représentations de Newman pour identifier des molécules stéréoisomères de conformation. Nous cherchons à vérifier s'ils adoptent le même raisonnement lorsque les représentations sont celles de Cram. La question spécifique de recherche suivante est posée:

- QSR6 : Comment les élèves reconnaissent-ils des molécules stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Cram?

La capacité attendue (Cp6) se rapporte à la reconnaissance de la relation d'énantiomérisation entre deux molécules, à un ou deux carbones, en représentation de Cram. Au Bénin, les enseignants présentent aux élèves une méthode d'identification des couples d'énantiomères désignée couramment sous le terme «méthode de la double permutation»¹⁸. Cette méthode emploie un raisonnement analytique, et ce, dans le but de permettre aux élèves de contourner les difficultés de visualisation mentale qu'implique l'opération de reconnaissance de molécules énantiomères. Nous faisons l'hypothèse que, comme chez les étudiants (Stieff, 2007 cité par Stieff, 2011), les raisonnements analytiques ne sont pas nécessairement la stratégie la plus facile ou la plus

¹⁸ Nous la développerons au paragraphe III.2.2

pratique pour les élèves; il leur est difficile d'appréhender correctement leur utilisation (Taagepera & Noori, 2000 cité par Stieff, 2011). Nous nous posons la question suivante :

- (QSR7) Les élèves maîtrisent-ils la méthode de la double permutation ?

- **Conversion**

Nous avons supposé, dans l'étude 1, que pour réaliser la conversion inter registre Cram-Newman, les élèves utilisent un raisonnement spatial, sans pour autant montrer que la visualisation mentale de la représentation de Cram est effective. Nous cherchons dans cette étude à mettre en évidence leurs capacités de visualisation mentale des positions des substituants du carbone, selon que la représentation de Cram est observée à gauche ou à droite. Nous formulons la question spécifique de recherche suivante :

- QSR8 : Comment les élèves visualisent-ils mentalement les positions des substituants des carbones et les traits de liaison dans l'espace?

III.2.2. Instrument de collecte des données

Pour collecter les données, nous construisons un questionnaire papier-crayon comportant quatre questions. Dans la première nous testons l'application de la méthode de la double permutation couramment utilisée par les enseignants pour identifier des couples d'énantiomères. Dans la deuxième, nous nous intéressons à la visualisation mentale de la représentation d'une molécule qu'impliquent les opérations de rotation autour de l'axe de la liaison C—C lors du passage d'une conformation à une autre (opération de traitement, intra registre). La question 3 concerne la reconnaissance de stéréoisomères de conformation dans le registre de Cram. Dans la quatrième, nous examinons le passage du registre de Cram à celui de Newman (opération de conversion inter registre).

Question 1 : Méthode de la double permutation (MDP)

Elle est liée à la question spécifique de recherche 7. Pour reconnaître des molécules énantiomères ou identiques parmi une série de représentation de Cram de molécules, les élèves peuvent s'appuyer sur un raisonnement spatial ou un raisonnement analytique. Au Bénin, les enseignants inculquent aux élèves un raisonnement analytique désigné sous le nom de méthode de la double permutation (MDP). Cette méthode permet aux élèves de contourner les difficultés de raisonnement spatial qu'engendre l'activité d'identification des représentations de molécules énantiomères ou identiques parmi une série de molécules en représentation de Cram. Nous

précisons que cette méthode n'apparaît pas dans les instructions officielles (programme, commentaires et manuel).

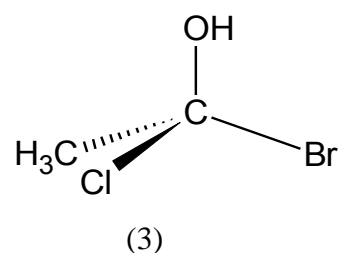
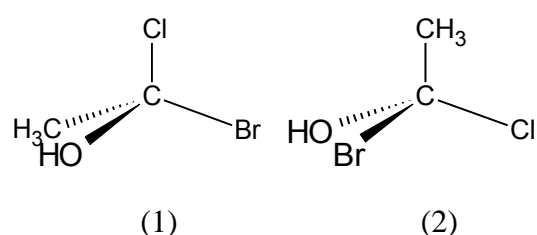
La MDP s'appuie sur les propriétés de l'environnement tétraédrique du carbone:

- **Propriété 1** : la permutation, deux à deux, (double permutation) des atomes liés à un carbone asymétrique, conduit à la même molécule ;
- **Propriété 2** : la permutation de deux atomes (permutation simple) liés à un atome de carbone asymétrique conduit à une molécule symétrique (image) par rapport à un miroir plan.

Pour appliquer cette méthode, il faut au moins deux représentations de Cram de molécules. Nous distinguons trois grandes étapes :

- **étape 1** : fixation d'une représentation de référence parmi celles dont on dispose ;
- **étape 2** : réalisation de la double permutation des substituants de la deuxième représentation de la molécule de telle sorte que le substituant situé sur le trait de liaison hachuré soit le même que dans la représentation de la molécule de référence ;
- **étape 3** : comparaison de la séquence de lecture choisie des trois substituants (par une règle de numérotation par exemple) qui ne sont pas sur le trait hachuré de la représentation de référence et de la représentation obtenue après double permutation: si les séquences de lectures sont identiques alors les molécules le sont également, dans le cas contraire elles sont énantiomères.

Considérons les représentations de molécules (1) et (2) ci-contre par exemple. Pour déterminer si ces représentations correspondent à des énantiomères ou à une même molécule, on peut considérer la représentation de la molécule (1) comme référence. Par la suite on procède à une double permutation des substituants de la représentation de la molécule (2) de telle sorte que le groupement $-CH_3$ soit en arrière du plan de la feuille : CH_3 et OH , Br et Cl . On obtient la représentation (3) ci-contre. Enfin, on vérifie la séquence de lecture des substituants Cl , Br et OH dans les représentations (1) et (3).



Leur sens étant opposé dans les deux représentations, alors on conclut que les deux molécules (1) et (2) forment un couple d'énantiomères.

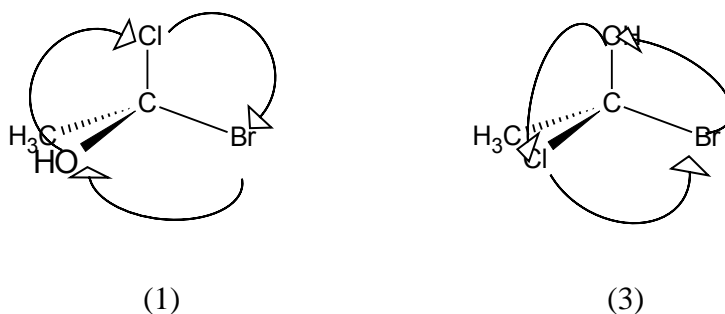


Figure 34: Sens de lecture des substituants dans les représentations de Cram (1) et (3)

Nous supposons que pour mieux appliquer cette méthode, les élèves doivent connaître les propriétés 1 et 2. A travers la question 1, nous testons leurs connaissances de ces propriétés. Ils ont à exprimer leur accord ou leur désaccord sur quatre propositions concernant l'obtention de la molécule chirale initiale (représentation de Cram fournie) ou de son image après une simple ou une double permutation des substituants du carbone.



	<i>Pas du tout d'accord</i>	<i>Plutôt pas d'accord</i>	<i>Plutôt d'accord</i>	<i>Tout à fait d'accord</i>
<i>La permutation de deux atomes liés à l'atome de carbone conduit à une molécule qui est image de la première dans un miroir.</i>				
<i>La permutation de deux atomes liés à l'atome de carbone conduit à une molécule identique.</i>				
<i>La permutation, deux à deux, des atomes liés au carbone (a avec b, et c avec d par exemple), conduit à la même molécule.</i>				
<i>La permutation, deux à deux, des atomes liés au carbone (a avec b, et c avec d par exemple), conduit à une molécule qui est image de la première dans un miroir plan.</i>				

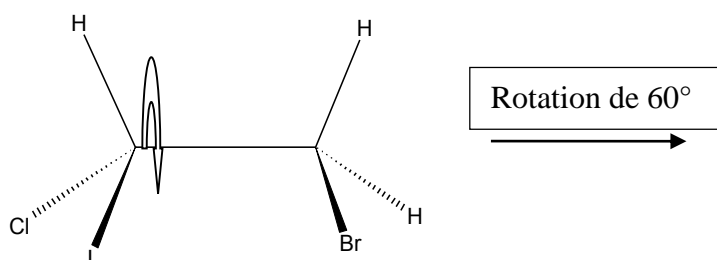
Réponses attendues :

	<i>Pas du tout d'accord</i>	<i>Plutôt pas d'accord</i>	<i>Plutôt d'accord</i>	<i>Tout à fait d'accord</i>
<i>(C1) La permutation de deux atomes liés à l'atome de carbone conduit à une molécule qui est image de la première dans un miroir</i>			X	Ou X
<i>(C2) La permutation de deux atomes liés à l'atome de carbone conduit à une molécule identique</i>	X	Ou X		
<i>(C3) La permutation, deux à deux, des atomes liés au carbone (a avec b, et c avec d par exemple), conduit à la même molécule</i>			X	Ou X
<i>(C4) La permutation, deux à deux, des atomes liés au carbone (a avec b, c avec d par exemple), conduit à une autre molécule qui lui est image par rapport à un miroir plan</i>	X	Ou X		

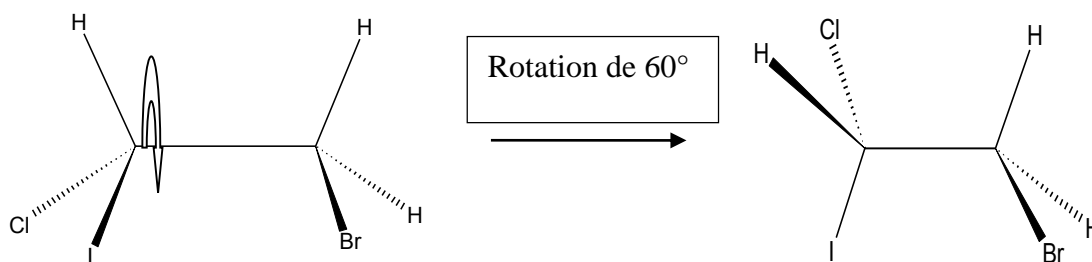
Question 2 : Passage d'une conformation de molécule à une autre conformation dans le registre de Cram

Nous nous intéressons à la visualisation mentale de la molécule qu'impliquent les opérations de rotation autour de l'axe de la liaison C—C lors du passage d'une conformation à une autre (opération de traitement intra registre). Cette question se rapporte à la question spécifique de recherche 5. Nous proposons en représentation de Cram, un dérivé trihalogéné de l'éthane en conformation éclipsée, et demandons de produire la représentation de Cram correspondant à une rotation de 60° des substituants du carbone de gauche autour de l'axe de la liaison C—C (un schéma précise le sens de la rotation).

Complétez la figure suivante en dessinant une nouvelle représentation spatiale qui indique la position des atomes, après une rotation de 60° du groupement —CHICl autour de l'axe de la liaison C—C.



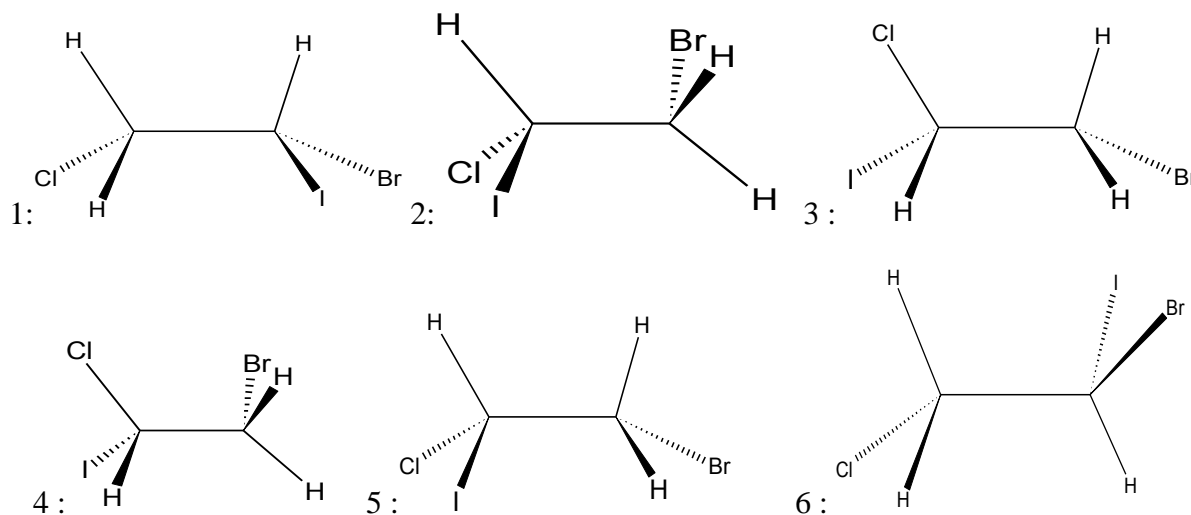
Réponse attendue : conformation décalée



Question 3 : reconnaissance de stéréoisomères de conformation dans le registre de Cram

Comme la question 3 de l'étude 1, celle-ci concerne la reconnaissance de molécules stéréoisomères de conformation. Cette fois, nous considérons l'opération dans le registre de Cram. Elle est liée aux questions spécifiques de recherche 6. Nous proposons une série de représentations de Cram correspondant pour certaines à des conformations différentes d'une même molécule et demandons de repérer les stéréoisomères de conformation (opération de traitement intra registre) et de justifier.

Indiquez parmi la série de représentations spatiales, celles qui correspondent à des stéréoisomères de conformation d'une même molécule. Justifiez.



Réponses attendues

Les réponses attendues sont (éclipsée = é ; décalée = d) : 1(é) et 6(d) ; 2(d), 3(é), 4(d) et 5(é). Nous considérons également les combinaisons réalisées à partir des représentations 2(d), 3(é), 4(d) et 5(é), telles que : 2(d) et 3(é) ; 2(d) et 5(é) ; 3(é) et 4(d) ; 4(d) et 5(é) ; 2(d) et 4(d) ; 3(é) et 5(é).

La justification attendue est : les molécules diffèrent par des rotations autour de l'axe de la liaison C—C.

Question 4 : conversion inter registre Cram-Newman

Elle se rapporte à la question spécifique de recherche 8. Notre intérêt se porte sur la conversion de la représentation de Cram en représentation de Newman (opération inter registre) d'une molécule à deux atomes de carbone. Cette conversion exige, outre la connaissance des conventions de représentation de molécule dans les deux registres (coordination des deux registres sémiotiques), une observation suivant l'axe de la liaison C—C de la représentation de Cram de la molécule. La façon de l'observer est un élément déterminant des différentes représentations de Newman qu'on peut attribuer à une même molécule: selon que l'observateur est placé à gauche ou à droite de l'axe de la liaison C—C de cette représentation de la molécule à deux carbones, on obtient deux représentations de Newman différentes. Cela nécessite de bonnes capacités d'orientation spatiale.

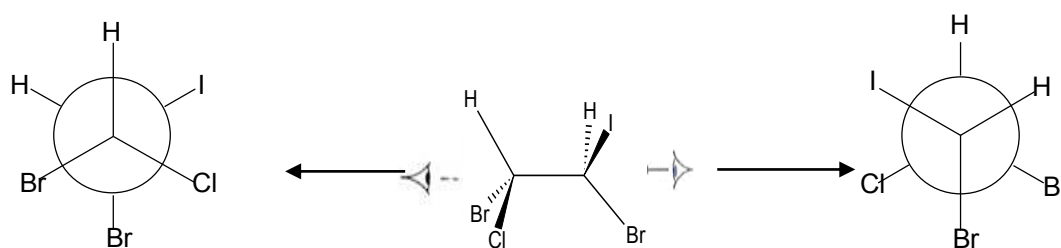


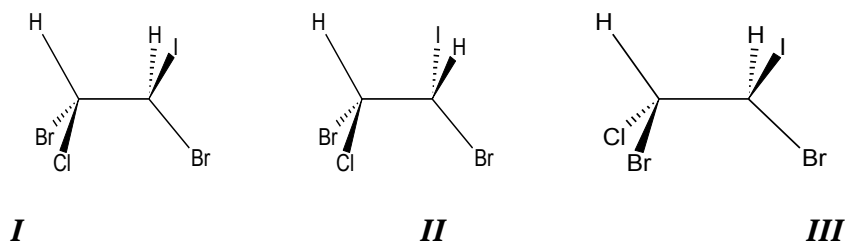
Figure 35: exemples de représentations de Newman pouvant être obtenues à partir d'une représentation de Cram

A l'observation de la représentation de Cram de la molécule suivant l'axe de la liaison C—C (visualisation spatiale) s'ajoute sa manipulation mentale, conduisant à des projections des substituants des carbones sur un plan perpendiculaire à l'axe de la liaison C—C. Nous faisons l'hypothèse que les difficultés résident, dans l'observation à gauche ou à droite de la représentation de la molécule (orientation spatiale), dans sa visualisation spatiale, et sa manipulation mentale (projections mentales) en représentation de Cram. A travers cette question, nous abordons un autre problème que peut poser la visualisation mentale : nous cherchons à mettre en évidence quelles liaisons (celles du carbone le plus proche ou le plus éloigné) les élèves visualisent le mieux. Nous proposons trois stéréoisomères en représentation de Cram et trois en représentation de Newman, et demandons de choisir la position de l'observateur (à gauche de la représentation de Cram, à droite de la représentation, ni à gauche

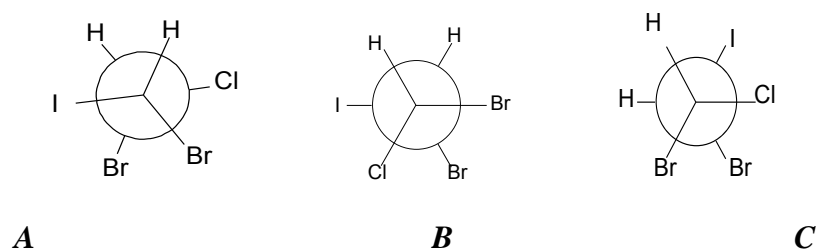
et ni à droite) parmi une série de trois propositions afin de déterminer s'il est possible d'obtenir la représentation de Newman à partir de la représentation de Cram.

Voici des stéréoisomères dans différentes représentations de Cram et de Newman :

Représentations de Cram :



Représentations de Newman :



Complétez le tableau suivant en indiquant à chaque fois parmi les propositions suivantes a., b., et c., celle qui convient le mieux.

- a. La représentation de Newman a été obtenue en plaçant l'œil de l'observateur à gauche de la molécule en représentation de Cram suivant la liaison C—C.
- b. La représentation de Newman a été obtenue en plaçant l'œil de l'observateur à droite de la molécule en représentation de Cram suivant la liaison C—C.
- c. La représentation de Newman ne peut être obtenue en plaçant l'œil de l'observateur à gauche ou à droite de la molécule en représentation de Cram suivant la liaison C—C.

<i>représentations de Newman</i>	A	B	C
<i>représentations de Cram</i>			
I			
II			
II			

Réponses attendues :

Une façon de retrouver les résultats corrects est de chercher les deux représentations de Newman qu'on peut obtenir à partir de chaque représentation de Cram. Puis de les comparer avec les représentations de Newman proposées. Nous présentons ci-dessous les représentations de Newman correspondant aux différentes positions de l'observateur (à gauche et à droite), et indiquons si elles correspondent à une représentation de Newman proposée.

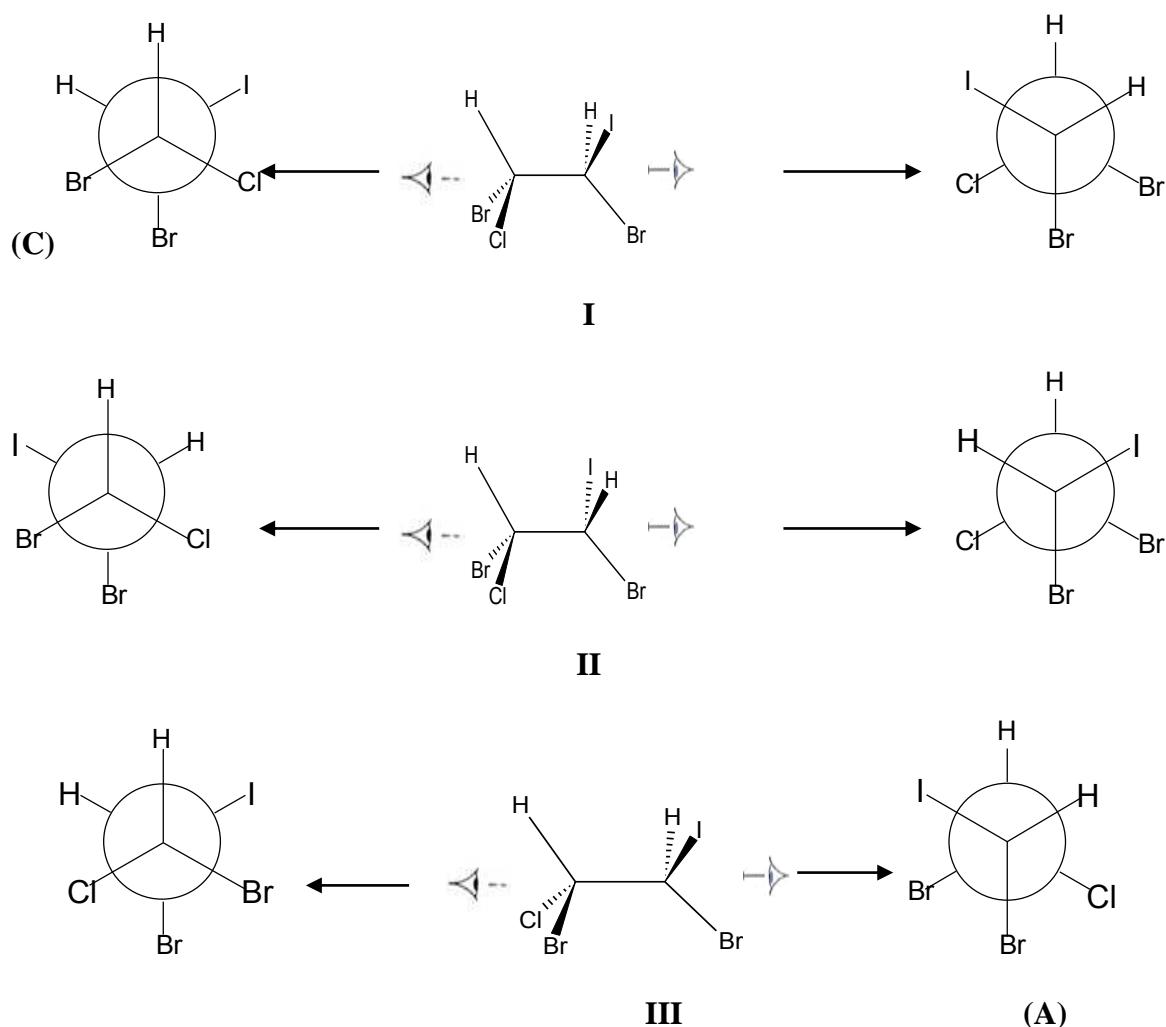


Figure 36 : représentations de Newman pouvant être obtenues à partir de celles de Cram

La figure 36 montre que la représentation de Newman (C) est obtenue en observant la représentation de Cram (I) à gauche, la présentation de Newman (A) en observant la représentation de Cram (III) à droite, et qu'aucune position de l'observateur ne permet d'obtenir les représentations de Newman proposées à partir de la représentation de Cram (II). Par conséquent les réponses correctes attendues sont :

<i>représentations de Newman</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
	<i>représentations de Cram</i>		
<i>I</i>	<i>c</i>	<i>c</i>	<i>a</i>
<i>II</i>	<i>c</i>	<i>c</i>	<i>c</i>
<i>II</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>c</i>

III.2.3. Collecte des données

La collecte des données est basée sur un échantillon de 340 élèves, âgés de 17 à 21 ans, des classes terminales D des établissements scolaires des villes de Porto-Novo (Ct¹⁹ : 83 élèves, D : 62 élèves, I : 56 élèves, Mi : 38 élèves, M : 50 élèves et Lc : 12 élèves), et de Natitingou (N, 39 élèves). Comme dans l'étude préliminaire, ce questionnaire papier-crayon, de quatre questions et d'une durée d'une heure, est distribué 4 mois après l'enseignement de la stéréochimie. Les élèves sont prévenus quelques jours avant, et on leur demande de réviser leur cours de stéréochimie. Les instructions sur la conduite des essais sont données à un enseignant en charge de la surveillance (anonymat, non évaluation du questionnaire). Un enseignant de physique chimie terminale D valide le questionnaire en terme de faisabilité. D'ailleurs, un test de ce dernier, fait avec un petit groupe de 10 élèves du CEG I (hors échantillon), avant de l'administrer à tout l'échantillon, nous a permis de vérifier si les questions posées ne sont pas confuses, et plutôt à la portée des élèves. Les résultats obtenus s'avérant satisfaisants, nous l'envoyons à tout l'échantillon, soit 340 élèves.

III.2.4. Méthodologie d'analyse des données

L'analyse des réponses repose sur une catégorisation des réponses fondées sur les tendances de l'étude 1, la revue de littérature et l'analyse du contenu à enseigner (catégories a priori) et à la lecture des données (catégories émergentes).

Question 1

Pour la question 1, qui examine l'application de la méthode de la double permutation, les propositions à choisir étant antinomiques, l'analyse des réponses recherche la cohérence des choix effectués par les élèves.

¹⁹ Les lettres désignent les établissements scolaires

Question2

Ici, il faut passer d'une conformation éclipsée à une conformation décalée par une rotation mentale de 60° des substituants du carbone autour de l'axe C—C. Deux grandes catégories s'imposent donc, l'une comportant les réponses incluant une représentation décalée, l'autre une éclipsée. À l'intérieur de chaque catégorie, on examine si les positions des substituants et les conventions de représentation des liaisons sont respectées ou non.

Question3

Comme la question 3 de l'étude 1, elle met en jeu l'identification des stéréoisomères de conformation parmi des représentations décalées et éclipsées dans le registre de Newman. Les catégories de réponses sont également construites à partir des formes globales éclipsée ou décalée et de l'identification ou non des substituants des carbones. Les justifications sont catégorisées selon qu'elles renvoient à la rotation autour de l'axe C—C ou non.

Question4

Ici, le type de choix demandé aux élèves et la place de l'observateur par rapport à la représentation de Cram pour obtenir une représentation de Newman donnée, permettent de catégoriser les choix effectués en termes de respect des positions des substituants observés d'une part et de respect des positions des carbones observés d'autre part.

III.2.5. Analyse des réponses d'élèves

Cette partie est consacrée à l'analyse des réponses d'élèves.

III.2.5.1. Sur la méthode de la double permutation (MDP)

La question 1 concerne la MDP. Il est demandé aux élèves d'exprimer leur niveau d'accord ou de désaccord sur des propositions antithétiques relatives à l'obtention de la molécule chirale initiale (représentation de Cram fournie) ou de son image après une seule ou une double permutation des substituants du carbone.

Les tableaux suivants, respectivement 17 et 18, présentent la répartition globale des résultats obtenus, et la répartition détaillée des réponses cohérentes ou incohérentes.

	<i>Pas de réponse</i>	<i>Pas du tout d'accord</i>	<i>Plutôt pas d'accord</i>	<i>Plutôt d'accord</i>	<i>Tout à fait d'accord</i>
(C1) La permutation de deux atomes liés à l'atome de carbone conduit à une molécule qui est image de la première dans un miroir	2	26	8	11	53
		34		64	
(C2) La permutation de deux atomes liés à l'atome de carbone conduit à une molécule identique	3	49	12	13	23
		61		36	
(C3) La permutation, deux à deux, des atomes liés au carbone (a avec b, et c avec d par exemple), conduit à la même molécule	2	33	19	16	30
		52		46	
(C4) La permutation, deux à deux, des atomes liés au carbone (a avec b, et c avec d par exemple), conduit à une molécule qui est image de la première dans un miroir plan.	3	29	13	18	37
		42		55	

Tableau 17 : répartition globale des réponses (en %) à la question 2

Les cellules grisées correspondent aux réponses attendues.

Nous avons également construit un tableau avec des résultats de l'analyse croisée.

	Pourcentage (%)
Elèves ayant répondu de manière correcte aux quatre propositions (profil correct attendu)**	9
Elèves ayant répondu de manière incorrecte aux quatre propositions**	4
Elèves n'ayant répondu à aucune des propositions	1
Elèves d'accord avec (C1) et pas d'accord avec (C2)**	33
Elèves d'accord avec (C3) et pas d'accord avec (C4)**	26
Elèves d'accord avec (C1) et (C2)	18
Elèves pas d'accord avec (C1) et (C2)	20
Elèves d'accord avec (C3) et (C4)	17
Elèves pas d'accord avec (C3) et (C4)	19
Elèves d'accord avec (C1) et pas d'accord avec (C3)	21
Elèves pas d'accord avec (C1) et d'accord avec (C3)	37
Elèves d'accord avec (C2) et pas d'accord avec (C4)	36
Elèves pas d'accord avec (C2) et pas d'accord avec (C4)	20

Tableau 18 : répartition des réponses (en %) de l'analyse croisée

**= réponses cohérentes

Globalement, 64% et 46% d'élèves sont d'accord, respectivement, avec (C1) et (C3) (cf. tableau 17). 61% et 42% ne sont pas d'accord avec, respectivement, les propositions (C2) et (C4) (cf. tableau 17). Bien que ces réponses soient correctes, l'analyse croisée des réponses révèle que seulement 9% d'élèves donnent leurs points de vue sur toutes les affirmations de manière correcte, 4% de manière incorrecte et 1% ne répondent pas (cf. tableau 18).

Cohérence des réponses

33% d'élèves sont d'accord avec (C1) et pas d'accord avec (C2) ; 26% sont d'accord avec (C3) et pas d'accord avec (C4). Ils sont cohérents dans leurs réponses.

18% d'élèves sont d'accord avec (C1) et (C2), et 20% ne le sont pas ; 17% sont d'accord avec (C3) et (C4), et 19% ne le sont pas (cf. tableau 18). Ces résultats révèlent des incohérences dans ces réponses: on ne peut pas avoir les mêmes opinions pour les propositions (C1) et (C2), ou (C3) et (C4), car (C1) et (C2) sont antagonistes, tout comme (C3) et (C4).

Pour être cohérent dans ses choix, si un élève est d'accord avec la proposition (C1), il devrait aussi l'être avec (C3) et vice versa. En effet, si l'on suppose qu'une permutation de deux atomes

liés à l'atome de carbone conduit à une molécule image, alors une permutation, deux à deux, des atomes liés au carbone conduirait à la même molécule. Cependant, 21% sont d'accord avec (C1) et pas d'accord avec (C3) ; 37% ne sont pas d'accord avec (C1) et d'accord avec (C3). Ces élèves (soit 58%) sont donc incohérents dans leurs choix.

De même, si un élève est d'accord avec (C2), il devrait aussi l'être avec (C4). 36% des élèves sont néanmoins d'accord avec (C2) et pas d'accord avec (C4) ; 20% ne sont pas d'accord avec (C2) et d'accord avec (C4), soit 56% de réponses incohérentes.

Résumé

Plus de la moitié des élèves répond de façon incohérente, ce qui nous conduit à penser que leurs réponses sont aléatoires. Nous pouvons supposer que, pour la plupart, les propriétés qui régissent la MDP ne leur sont pas connues, et il n'est pas certain qu'ils identifient des couples d'énantiomères par cette méthode.

III.2.5.2. Sur le passage d'une conformation de molécule à une autre dans le registre de Cram

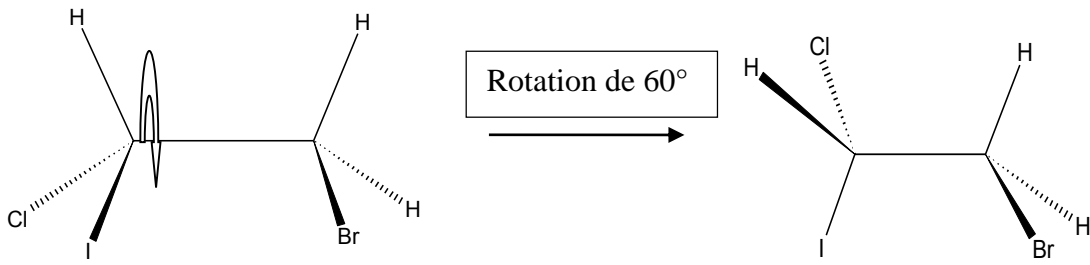
Dans la question 2, les élèves doivent dessiner la représentation de Cram d'une molécule obtenue après une rotation de 60° des substituants du carbone autour de l'axe de la liaison C—C. La molécule fournie est dans une conformation éclipsée.

Catégorisation et répartition des réponses

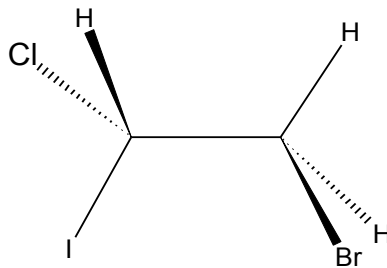
Nous catégorisons ces réponses en fonction de la forme, décalée ou éclipsée, de la représentation de Cram. Ceci afin d'en inférer les activités mentales réalisées. Les caractéristiques des valeurs des angles entre les traits de liaison ne sont pas prises en compte. Elles seront discutées dans un autre paragraphe.

Nous distinguons trois grandes catégories de réponses a priori. Comme dans l'étude 1, les exemples de dessins des élèves ont été reproduits avec le logiciel ChemSketch.

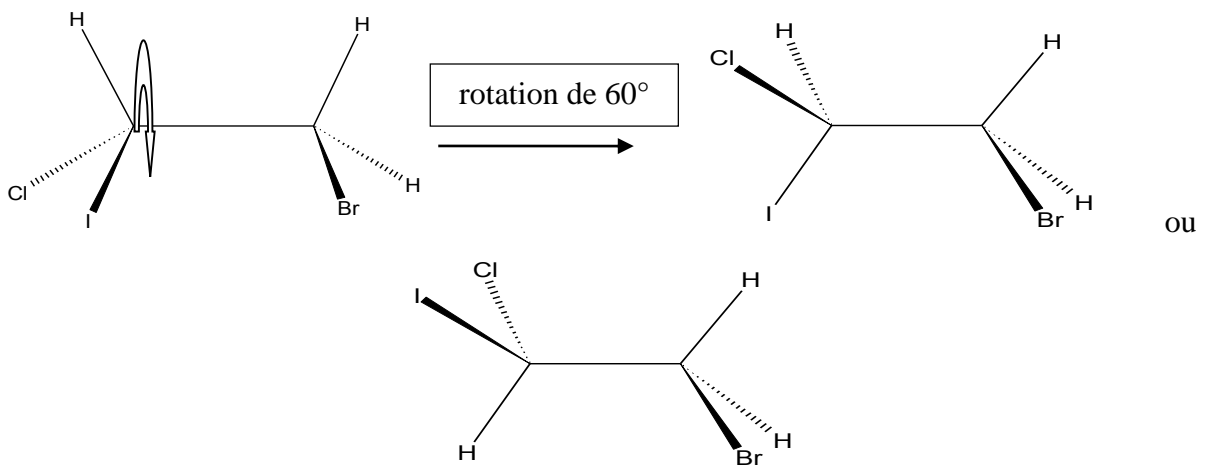
- **(C1) Conformation décalée** : réponses d'élèves ayant dessiné une conformation décalée. En fonction de la disposition des traits de liaison et des symboles des atomes, nous distinguons trois sous-catégories de réponses.
 - **(C1a) disposition correcte des traits de liaison et des symboles des atomes**: elle correspond à la réponse correcte attendue.



- **(C1b) Disposition relative des traits de liaisons non conforme:** réponses où la disposition des symboles d'atomes est correcte mais celle des traits de liaison gras et hachuré n'est pas respectée. Exemple :

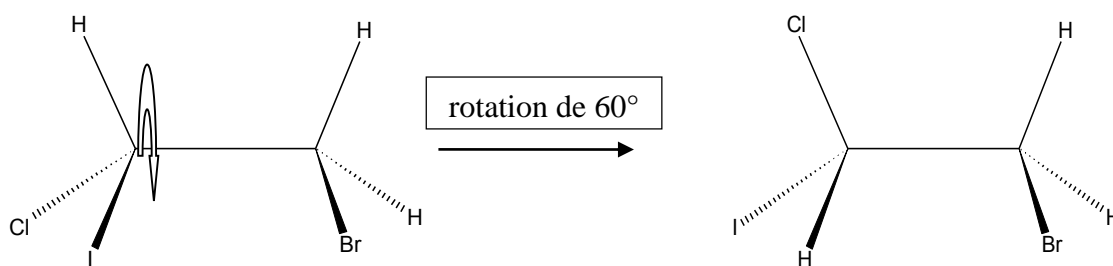


- **(C1c) disposition correcte des traits de liaison et incorrecte des symboles des atomes:**

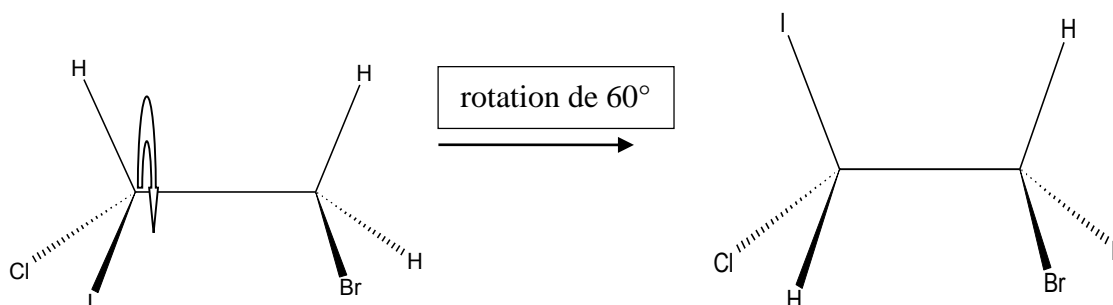


- **(C2) Conformation éclipsée :** réponses où les élèves dessinent une conformation éclipsée. En fonction de la disposition des liaisons et des atomes, nous distinguons trois sous-catégories de réponses.

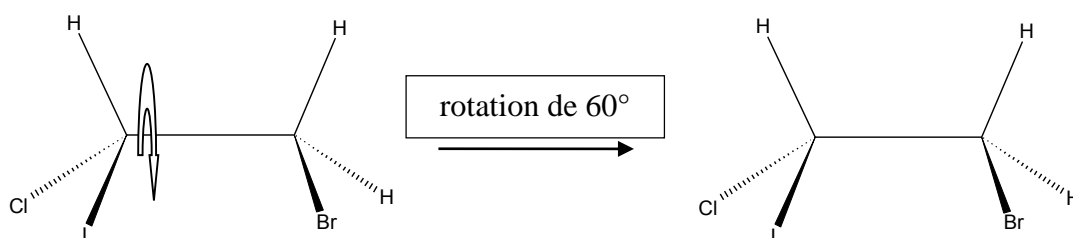
- **(C2a) disposition des atomes respectée:**



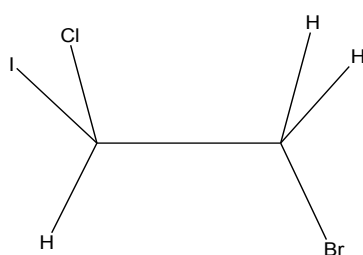
- **(C2b) disposition des atomes non respectée:**



- **(C2c) Même représentation :** réponses où les élèves donnent une représentation identique à la première.



- **(C3) Autres:** réponses où les conventions de figuration des liaisons ne sont pas respectées (plus de trois ou moins de deux traits liaisons identiques ; par exemple



	Catégories de réponses (réponse correcte **)	Pourcentage	
Conformation décalée (C1)	(C1a) Disposition correcte des traits de liaison et des atomes **	0%	
	(C1b) Disposition relative des traits de liaison non conforme	4%	
	(C1c) Disposition correcte des traits de liaison et incorrecte des atomes	5%	
Conformation éclipsée (C2)	(C2a) Disposition des atomes respectée	9%	70%
	(C2b) Disposition des atomes non respectée	57%	
	(C2c) Même représentation que celle de départ	4%	
Autres		14%	
Pas de réponse		7	

Tableau 19 : répartition des réponses à la question 2

**= réponse correcte attendue

Analyse des réponses

Aucun élève ne donne la réponse correcte attendue (cf. tableau 19). 9% représentent une conformation décalée, dont 5% avec une disposition incorrecte des atomes (C1c) et 4% avec une disposition non conforme des traits de liaisons gras et hachuré (C1b).

La disposition incorrecte des atomes par les élèves de la catégorie (C1c) nous laisse supposer qu'ils réalisent sans succès la rotation mentale (1^{er} cas) ou qu'ils utilisent une autre démarche (2^{ème} cas). Dans le deuxième cas, ils supposent simplement qu'une rotation des substituants du carbone autour de l'axe C—C change la conformation éclipsée de la représentation initiale en conformation décalée. Les substituants du carbone sont alors répartis aléatoirement, ce qui explique l'inversion de configuration de la représentation initiale. Un tel raisonnement peut être dû au fait que l'enseignement de la stéréoisométrie de conformation s'appuie particulièrement sur les conformations limites, éclipsée et décalée, de la molécule d'éthane (cf. chapitre 2). Ils pensent que toute rotation des substituants autour de l'axe C—C conduit à une conformation, éclipsée ou décalée, différente de la représentation initiale. La répartition aléatoire des substituants du carbone s'explique alors par le fait que ceux de la molécule d'éthane sont tous identiques : les élèves ne distinguent pas les positions exactes des hydrogènes avant et après l'opération de rotation, et jugent qu'ils sont distribués au hasard.

Les représentations de la catégorie (C1b) ne peuvent pas être obtenues par rotation mentale autour de l'axe C—C (Pellegrin, 1999). Les élèves ne procèdent donc pas à une rotation mentale de la représentation de la molécule, mais ont le même raisonnement (2^{ème} cas) que ceux de la catégorie (C1c) cités précédemment. La répartition correcte des positions des atomes est un fait

du hasard, et la disposition incorrecte des traits de liaison en avant et en arrière du plan de la feuille est due au fait qu'ils ne savent pas, en conformation décalée, dans quelle circonstance un trait de liaison gras doit être au-dessus ou en dessous du trait de liaison hachuré (Pellegrin, 1999, Pellegrin et al., 2003).

70% d'élèves donnent une conformation éclipsée (C2), dont 9% avec une disposition correcte des atomes (C2a) comme s'ils effectuaient une rotation de 120° des liaisons autour de l'axe de la liaison C-C. Cela peut être dû au fait qu'ils supposent, à tort, qu'en conformation éclipsée l'angle dièdre est égal à 60° . Dans le cas où ils ne réalisent pas la rotation mentale de la représentation, nous pouvons supposer qu'ils exécutent simplement une permutation circulaire des substituants du carbone.

Les conformations éclipsées de 57% des élèves ont une disposition erronée des atomes (C2b) comme s'ils les permutaient indépendamment de la rotation des liaisons autour de l'axe de la liaison C—C. Ce qui peut expliquer l'inversion de configuration de la représentation initiale.

4% des élèves donnent une représentation éclipsée identique à la représentation initiale (C2c). 14% (catégorie autres) proposent des dessins avec des conventions de figurations des liaisons non respectées. 7% ne répondent pas à la question. Ces résultats traduisent une incapacité à réaliser la rotation mentale de la représentation de la molécule. Concernant ceux de la catégorie autres, la méconnaissance des conventions de représentation des liaisons dans le registre de Cram peut en être la cause principale.

Caractéristiques des angles entre les traits de liaison

Dans ce paragraphe nous présentons les caractéristiques des dessins du point de vue de la valeur des angles entre les traits de liaison. Nous regroupons les réponses des catégories précédentes selon que les angles ont été, ou non, respectés.

Angle entre les traits de liaison	Catégories de réponses	Pourcentage	
Respecté	(C1b) Disposition relative des liaisons non conforme	4	19%
	(C1c) Disposition correcte des liaisons et incorrecte des atomes	2	
	(C2a) Disposition des atomes respectée	1	
	(C2b) Disposition des atomes non respectée	8	
	(C2c) Même représentation que celle de départ	4	
	Autres	0	
Non respecté	(C1b) Disposition relative des liaisons non conforme	0	74%
	(C1c) Disposition correcte des liaisons et incorrecte des atomes	3	
	(C2a) Disposition des atomes respectée	8	
	(C2b) Disposition des atomes non respectée	49	
	(C2c) Même représentation que celle de départ	0	
	Autres	14	
Pas de réponse	7		

Tableau 20: caractéristiques des angles entre les traits de liaison dans les dessins

L'examen du tableau 20 montre que 19% des élèves ont respecté la valeur approximative des angles entre les traits de liaison (109°). Dans la plupart des dessins proposés (74%), les angles entre les traits de liaison sont incorrects.

Résumé

Aucun élève ne donne la réponse attendue. Une minorité (9%, C1b et C1c) trouve la forme décalée attendue, mais échoue dans la disposition des traits de liaison ou des substituants du carbone. Il semble que certains d'entre eux utilisent sans succès la rotation mentale, d'autres changent simplement la conformation initiale éclipsée en décalée, et répartissent les substituants des carbones aléatoirement.

Une majorité d'élèves (91%) ne trouve pas la réponse attendue. Certains (70%, C2) dessinent une autre conformation que celle attendue, dont une grande proportion (51%, C2b) avec une disposition erronée des substituants du carbone. Ces élèves paraissent avoir permuté, circulairement ou aléatoirement, les substituants du carbone, et ce, indépendamment de l'opération de rotation.

19% des représentations de Cram proposées présentent des angles entre les traits de liaison corrects. La majorité (74%) ne les respecte pas.

III.2.5.3. Sur la reconnaissance de stéréoisomères de conformation dans le registre de Cram

La question 3 propose une série de molécules en représentation de Cram. Il s'agit de reconnaître celles qui sont stéréoisomères de conformation, puis de justifier.

Catégorisation et répartition des réponses

Comme dans l'étude 1 (question 3), les catégories de réponses sont construites à partir des formes éclipsée ou décalée des représentations et de l'identité des substituants des carbones (catégories a priori). Nous en distinguons six, les réponses d'élèves sont des paires et des triplets, aucun quadruplet n'est proposé. Les trois premières (C1, C2 et C3) sont correctes, C1 étant la plus complète.

- **(C1) stéréoisomères de conformation de nature différente:** des réponses qui donnent les couples de représentations de conformations décalée et éclipsée, comme celles regroupant au moins deux des couples suivants : 1(é) et 6(d) ; 2(d) et 3(é) ; 2(d) et 5(é) ; 3(é) et 4(d) ; 4(d) et 5(é)
- **(C2) stéréoisomères de conformation de même nature:** ces réponses concernent les couples de représentations de conformations décalée ou éclipsée, comme 2(d) et 4(d) et/ou 3(é) et 5(é)
- **(C3) stéréoisomères de conformation de tout type:** des réponses qui envisagent à la fois les couples de représentations de conformations décalée et éclipsée, et ceux des représentations de conformations décalée ou éclipsée; c'est le cas, si les élèves proposent à la fois les couples 1(é) et 6(d) ; 2(d) et 4(d) par exemple.
- **(C4) formes globales identiques et substituants incorrects:** des réponses qui ne considèrent que les représentations de formes identiques sans vérifier si les substituants de carbones sont identiques ; comme au moins un des triplets suivants : 2(d), 4(d) et 6(d) ; 1(é), 3(é), et 5(é).
- **(C5) formes globales différentes et substituants incorrects:** ces réponses ne donnent que les représentations de formes différentes sans vérifier si les substituants de carbones sont identiques ; comme celles qui proposent au moins deux des couples suivants : 1(é) et 4(d) ; 1(é) et 2(d) ; 3(é) et 3(d) ; 5(é) et 6(d) ; 6(d) et 3(é)

- **(C6) formes globales avec ou sans prise en compte systématique des substituants:**
des réponses comme les couples (1(é) et 6(d) ; 1(é) et 5(é)) ou (1(é) et 4(d) ; 2(d) et 4(d)) qui considèrent tantôt les représentations de formes différentes, tantôt celles de formes identiques ; les substituants des carbones étant également tantôt différents, tantôt identiques.

Catégories de réponses (réponses correctes**)	Pourcentage
(C1) stéréoisomères de conformation de nature différente (éclipsée-décalée)=(é-d)**	39%
(C2) stéréoisomères de conformation de même nature (éclipsée-éclipsée=é-é, et/ou décalée- décalée=d-d)**	3%
(C3) stéréoisomères de conformation de tout type (é-d) et (é-é) ou (é-d) et (d-d)**	9%
(C4) formes globales identiques (é-é) ou (d-d), et substituants incorrects	4%
(C5) formes globales différentes (é-d), et substituants incorrects	9%
(C6) formes globales avec ou sans prise en compte des substituants	19%
Pas de réponse	17%

Tableau 21: répartition des réponses à la question 3

**= réponses correctes

Analyse des réponses

L'examen du tableau 21 montre que 51% des élèves répondent correctement, dont 42% qui présentent des stéréoisomères de conformation d'un seul type (C1 : formes différentes, éclipsée et décalée, 39% ; C2 : formes identiques, éclipsées ou décalées, 3%). 9% proposent des stéréoisomères de conformation des deux types (C3).

Les réponses incorrectes identifient des stéréoisomères de conformation sans se préoccuper des substituants, des molécules : de formes identiques (décalées ou éclipsées) (C4, 4%), de formes différentes (C5, 9%), ou considèrent à la fois des formes identiques et différentes (C6, 19%). 17% des élèves ne répondent pas du tout à la question.

Justification des réponses

Les justifications obtenues, sont classées en quatre catégories. La première, J1, est une catégorie a priori et correspond à la justification attendue. Les trois autres, J2, J3 et J4 sont des catégories émergentes ; la justification J2 est insuffisante, donc partiellement correcte, J3 et J4 sont absolument incorrectes.

- **(J1) Passage d'une représentation à une autre par une rotation du groupement d'un carbone autour de l'axe C—C** : des justifications qui stipulent qu'on peut passer d'une conformation à une autre par simple rotation (sous-entendu de l'un des groupements du carbone) autour de l'axe de la liaison C—C ; par exemple : « *si on fait une rotation de CH₃Br de la molécule 1 on trouve la molécule 6* ».
- **(J2) Substituants des carbones sont identiques dans les différentes représentations** : des justifications qui considèrent, que les substituants des carbones sont identiques dans les représentations de Cram, sans toutefois préciser qu'on peut passer d'une représentation de Cram à une autre par la rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe C—C; par exemple : « leurs carbones ont les mêmes atomes »
- **(J3) Molécules images l'une de l'autre par rapport à un miroir** : des justifications qui notifient, à tort, que les représentations des molécules sont images l'une de l'autre par rapport à un miroir plan ; par exemple « c'est parce qu'elles sont images par rapport au miroir plan ».
- **(J4) Autres** : des justifications qui ne sont pas catégorisables; par exemple « ils sont dessinés »

Réponses \ Justification	(J1) **	(J2)	(J3)	(J4)	Absence de justification	Total en %	
(C1)	6	6	3	2	22	39	51
(C2)	0	0	1	1	1	3	
(C3)	3	1	1	0	4	9	
(C4)	2	0	0	0	2	4	32
(C5)	2	0	0	0	7	9	
(C6)	3	1	0	0	15	19	
Absence de réponse	0	0	0	0	17	17	17
Total	16	8	5	3	68	100	

Tableau 22: répartition en pourcentage des réponses et justifications des élèves

**= justifications attendues

L'examen du tableau 22 montre que 16% des élèves donnent des justifications correctes (J1), 8% des justifications insuffisantes (J2), et 5% des justifications absolument incorrectes (J3, 5% et J4, 3%). La majorité des élèves (68%) ne justifient pas leurs réponses. Ils ont peut-être du mal à verbaliser leur raisonnement.

Nous analysons dans les paragraphes suivants les justifications proposées en faisant le lien avec les représentations choisies.

- **Elèves ayant fait un choix correct des représentations de Cram (C1, C2 et C3)**

Sur les 51% ayant fait des choix corrects de représentations de Cram (C1, C2 et C3), seuls 9% proposent des justifications convenables (C1-J1, 6%, C3-J1, 3%).

Les justifications des élèves de la catégorie C3-J1 (3%) traduisent une bonne maîtrise de la notion de stéréoisométrie de conformation. Nous supposons que pour identifier les stéréoisomères de conformation, ils vérifient que les représentations de Cram, de tout type, diffèrent par la rotation du groupement d'un carbone autour de l'axe de la liaison C—C.

Les élèves de la catégorie (C1-J1) donnent une justification correcte, mais le fait de ne choisir que des représentations de nature différente (décalée-éclipsée) montre que la notion de stéréoisométrie de conformation est partiellement maîtrisée. Ils pensent peut-être, à tort, que la rotation d'un groupement carbone autour de l'axe de la liaison C—C, conduit uniquement à une conformation différente. Nous estimons que, pour identifier les stéréoisomères de conformation, ils vérifient que les représentations de Cram de formes globales distinctes diffèrent par la rotation du groupement d'un carbone autour de l'axe de la liaison C—C.

7% des élèves répondent correctement à la question mais donnent des justifications insuffisantes (C1-J2, 6%, C3-J2, 1%,). Ils pensent que l'identité des substituants de carbones dans les représentations de Cram, suffit à justifier l'existence de la relation de stéréoisométrie de conformation. Cela suppose qu'ils ne se sont pas appropriés suffisamment la définition de la stéréoisométrie de conformation. Nous envisageons que, pour reconnaître les stéréoisomères de conformation, les élèves de la catégorie C1-J2 repèrent d'abord les représentations de Cram de forme globale identique, puis comparent l'identité des substituants de leurs carbones ; ceux de la catégorie C3-J2, examinent l'identité des substituants des carbones, indépendamment des formes globales des représentations de Cram.

8% des justifications sont incorrectes (C1-J3, 3%, C1-J4, 2%, C2-J3, 1%, C2-J4, 1%, C3-J3, 1%). Les réponses correctes trouvées par ces élèves sont peut être un effet du hasard ; ils ne sont pas vraiment appropriés le raisonnement correct.

27% ne donnent pas de justification (C1, 22%, C2, 1%, C3, 4%). Nous supposons que leurs réponses sont également un effet du hasard, ou qu'ils ont du mal à formuler leur argumentation.

▪ **Elèves ayant fait un choix incorrect des représentations de Cram (C4, C5 et C6)**

Sur les 32% d'élèves (C4, C5 et C6) ayant fait des choix incorrects, 7% (C4-J1, 2%, C5-J1, 2%, C6-J1, 3%) donnent des justifications qui permettent d'identifier correctement des stéréoisomères de conformation mais qui contredisent leurs réponses. En effet, les représentations de Cram de molécules choisies ne diffèrent pas toutes par la rotation du groupement CHCl autour de l'axe de la liaison C—C. La définition de la notion de stéréoisomérisation de conformation est peut-être connue, mais elle n'est pas opérationnelle.

25 % (C4, 2%, C5, 7%, C6, 17%) ne justifient pas leurs réponses. Cela peut traduire une appropriation insuffisante (ou une méconnaissance) de la notion de stéréoisomérisation de conformation. ce qui peut expliquer pourquoi les élèves ne se sont pas préoccupés de l'identité des substituants des carbones (C3, C5 et C5). Le fait que l'enseignement de la notion de stéréoisomérisation de conformation s'appuie sur les conformations limites de la molécule d'éthane (cf. analyse du programme) peut être l'une des causes de l'appropriation insuffisante de cette notion ; les atomes liés aux carbones de la molécule d'éthane étant identiques, les élèves considèrent alors les formes globales comme les seuls critères permettant d'identifier des stéréoisomères de conformation, et oublient de regarder la nature des atomes liés.

Résumé

Plus de la moitié des élèves (51%) reconnaît les stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Cram. Des disparités apparaissent dans le choix de ces stéréoisomères. A peine 9% (C3) d'entre eux identifient des stéréoisomères de tout type. La majorité (C1, 39%) ne détermine que des stéréoisomères de nature différente, une minorité (C2, 3%), ne choisit que des stéréoisomères de même nature.

De l'analyse des justifications, nous constatons qu'à peine 3% (C1-J1) maîtrisent la notion de stéréoisomérisation de conformation. Certains (C1-J1, 6%) font preuve d'une maîtrise partielle de cette notion, d'autres (la majorité), pas du tout.

Certains élèves (C4, C5, C6 : 32%) adoptent comme stratégie cognitive, la centration sur les formes globales, identiques et/ou différentes, pour identifier les stéréoisomères de conformation en représentation de Cram, et ce, sans se soucier de l'identité des substituants des carbones des représentations.

Confrontation avec les résultats de l'étude 1

Bien que les populations d'élèves, des deux études, soient différentes, nous trouvons important de comparer les résultats obtenus. Les tendances relevées peuvent servir d'hypothèses à de futures recherches.

Le tableau 23 présente la répartition des réponses aux questions 3 des questionnaires 1 et 2.

Catégories de réponses (réponses correctes**)	Pourcentage			
	Q1 (Newman)		Q2 (Cram)	
(C1) stéréoisomères de conformation de nature différente	0%	42%	39%	51%
(C2) stéréoisomères de conformation de même nature	29%		3%	
(C3) stéréoisomères de conformation de tout type**	13%		9%	
(C4) formes identiques, et substituants incorrects	6%	31%	4%	32%
(C5) formes différentes, et substituants incorrects	5%		9%	
(C6) formes avec ou sans prise en compte des substituants	20%		19%	
Pas de réponse	27		17	

Tableau 23: répartition des réponses aux questions 3, des questionnaires 1 et 2 (** =réponse correcte)

L'examen du tableau 23 montre que les catégories de réponses recensées dans les deux études sont similaires. A priori, lorsqu'il s'agit d'identifier des stéréoisomères de conformations parmi une série de molécules en représentations de Newman ou de Cram, les meilleurs résultats s'obtiennent en représentation de Cram (51% en Cram contre 42% en Newman, cf. tableau 23). Toutefois, nous notons quelques disparités dans ces résultats. En représentation de Newman, 13% des élèves reconnaissent des stéréoisomères de tout type (Q1, C3), tandis qu'en représentation de Cram, ils ne sont que 9% (Q2,C3). Des différences apparaissent aussi dans les proportions des élèves des catégories C1 et C2.

Si en représentation de Newman, aucun élève ne s'appuie uniquement sur la nature différente des conformations (Q1, C1), en représentation de Cram par contre, 39% le font (Q2, C1). La proportion s'appuyant seulement sur la nature identique des conformations (C2) est par contre plus élevée avec des représentations de Newman (29% en Newman contre 3% en Cram). Dans

l'étude 1, les élèves avaient plus de chance de proposer une paire d-d qu'une paire é-d, alors que c'est exactement le contraire dans l'étude 2. Les différences de pourcentage dans les deux études sont conformes aux probabilités attendues, étant donné la nature des conformations proposées dans les consignes. En effet, dans l'étude 1, nous avons trois conformations décalées (représentations de Newman 1, 2 et 5) et une conformation éclipsée (représentation de Newman 3) d'une même molécule, alors que dans l'étude 2, deux conformations, éclipsée (représentation de Cram 1) et décalée (représentation de Cram 6), sont celles d'une même molécule, et quatre autres, deux éclipsées (représentations de Cram 3 et 5) et deux décalées (représentations de Cram 2 et 4), sont celles d'une autre molécule.

Les proportions d'élèves s'appuyant sur la forme globale pour identifier les stéréoisomères de conformation, sont presque identiques dans les deux registres (31% en Newman et 32% en Cram).

III.2.5.4. Sur la conversion inter registre Cram-Newman

A la question 4, nous proposons trois stéréoisomères en représentation de Cram et trois autres en représentation de Newman, et demandons aux élèves de choisir parmi une série de trois propositions fixant la position de l'observateur (à gauche de la représentation de Cram, à droite de la représentation, ni à gauche et ni à droite) s'il est possible d'obtenir la représentation de Newman à partir de cette représentation.

Catégorisation et répartition des réponses

Nous cherchons, dans un premier temps, pour chaque représentation de Cram de la molécule fournie (I, II et III), les deux représentations de Newman possibles, RN.a et RN.b²⁰. Nous les comparons ensuite, aux représentations de Newman proposées (A, B et C), afin de repérer les incohérences. Nous constituons ainsi une catégorie de réponses correctes attendues (C1) rassemblant 9 cas (I-A.c; I-B.c; I-C.a; II-A.c; II-B.c; II-C.c, III-A.b; III-B.c, III-C.c) correspondant au respect des positions de carbones, proche et éloigné, et de leurs substituants, et 7 catégories de réponses erronées (C2a, C2b, C2c, C3, C4a, C4b, C4c), chacune réunissant plusieurs cas correspondant à des positions de l'observateur (à gauche ou à droite de l'axe C-C de la représentation de Cram) et ne permettant pas de dessiner la représentation de Newman fournie (Cf. figures 37, 38 et 39).

²⁰ RN.a et RN.b désignent les représentations de Newman pouvant être obtenues en observant la représentation de Cram, respectivement, à gauche (a) et à droite (b), suivant l'axe de la liaison C—C.

Les figures 37,38 et 39 regroupent les catégories de réponses fournies correspondant à des positions de l'observateur, à gauche et à droite. Les rectangles rouges indiquent les réponses proposées par les élèves, par exemple I-A.a veut dire que la représentation de Newman A est obtenue en regardant la représentation de Cram I suivant l'axe C—C, à gauche (a), et I-A.b, que la représentation de Newman A est obtenue en regardant la représentation de Cram I à droite (b). Les rectangles noirs précisent nos catégories de réponses, ils correspondent aux différences entre les représentations de Newman possibles, RN.a et RN.b, et les réponses d'élèves.

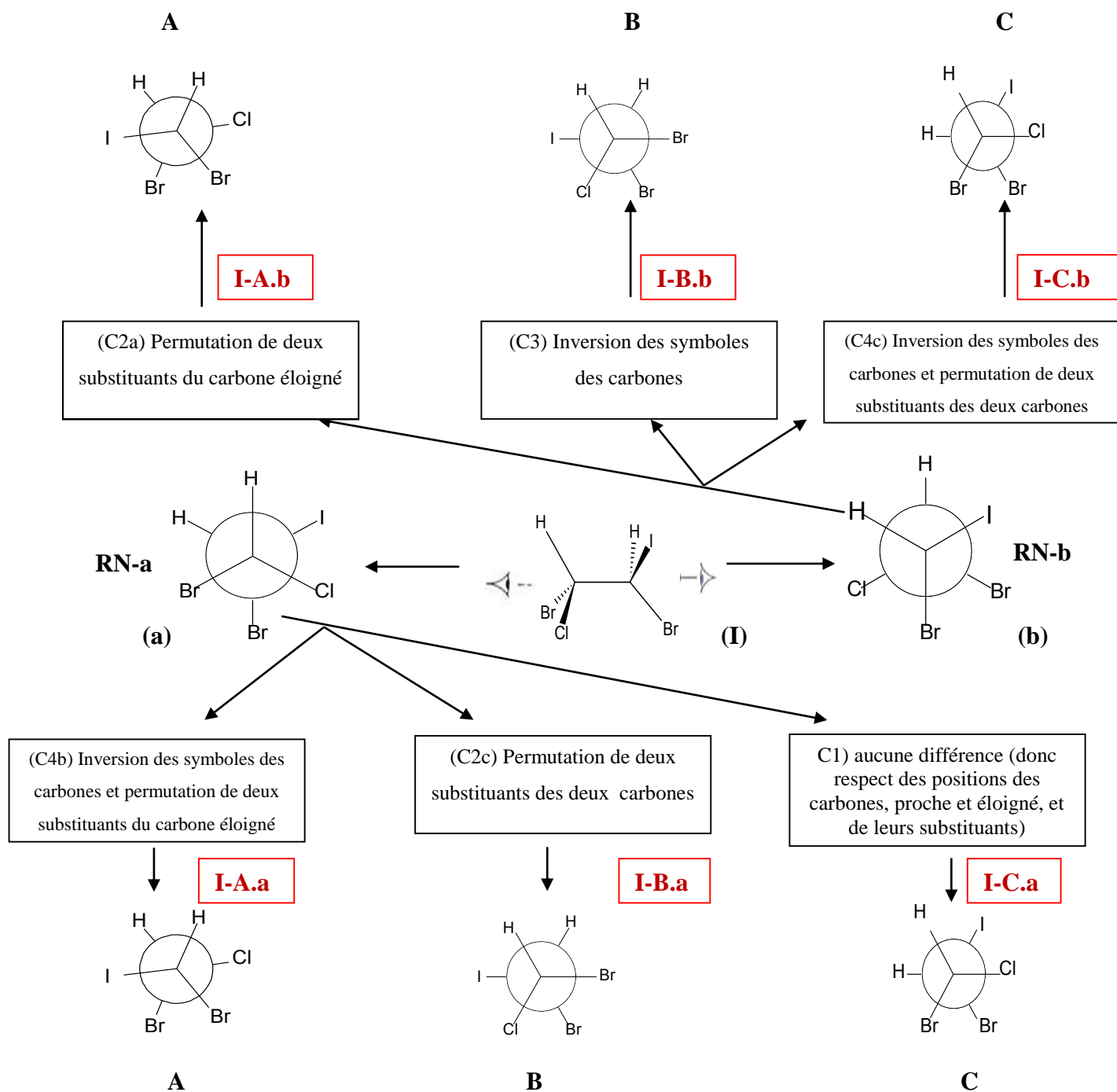


Figure 37: Catégorisation des réponses fournies correspondant à des positions de l'observateur, à gauche et à droite de la représentation de Cram (I)

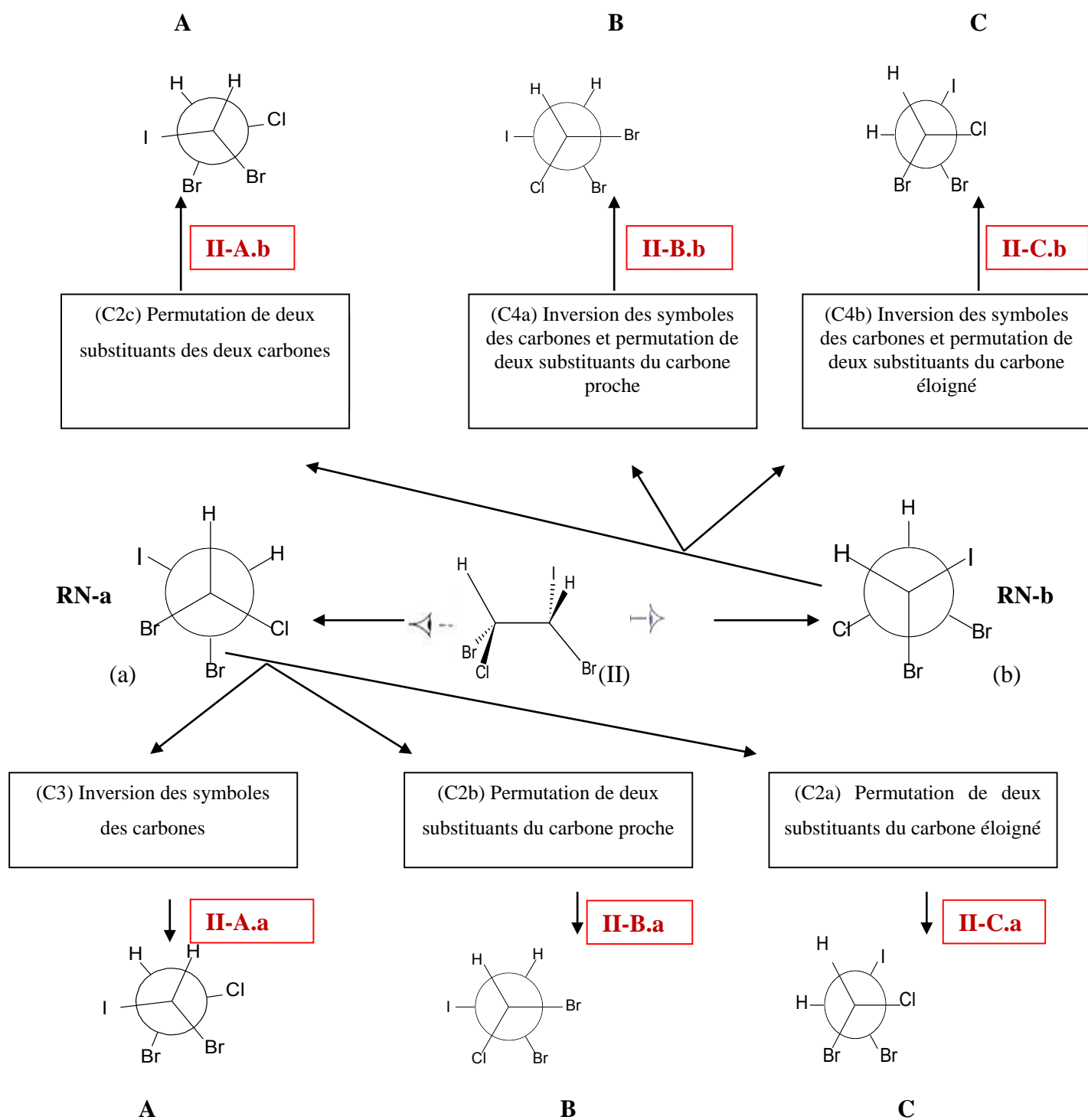


Figure 38: Catégorisation des réponses fournies correspondant à des positions de l'observateur, à gauche et à droite de la représentation de Cram (II)

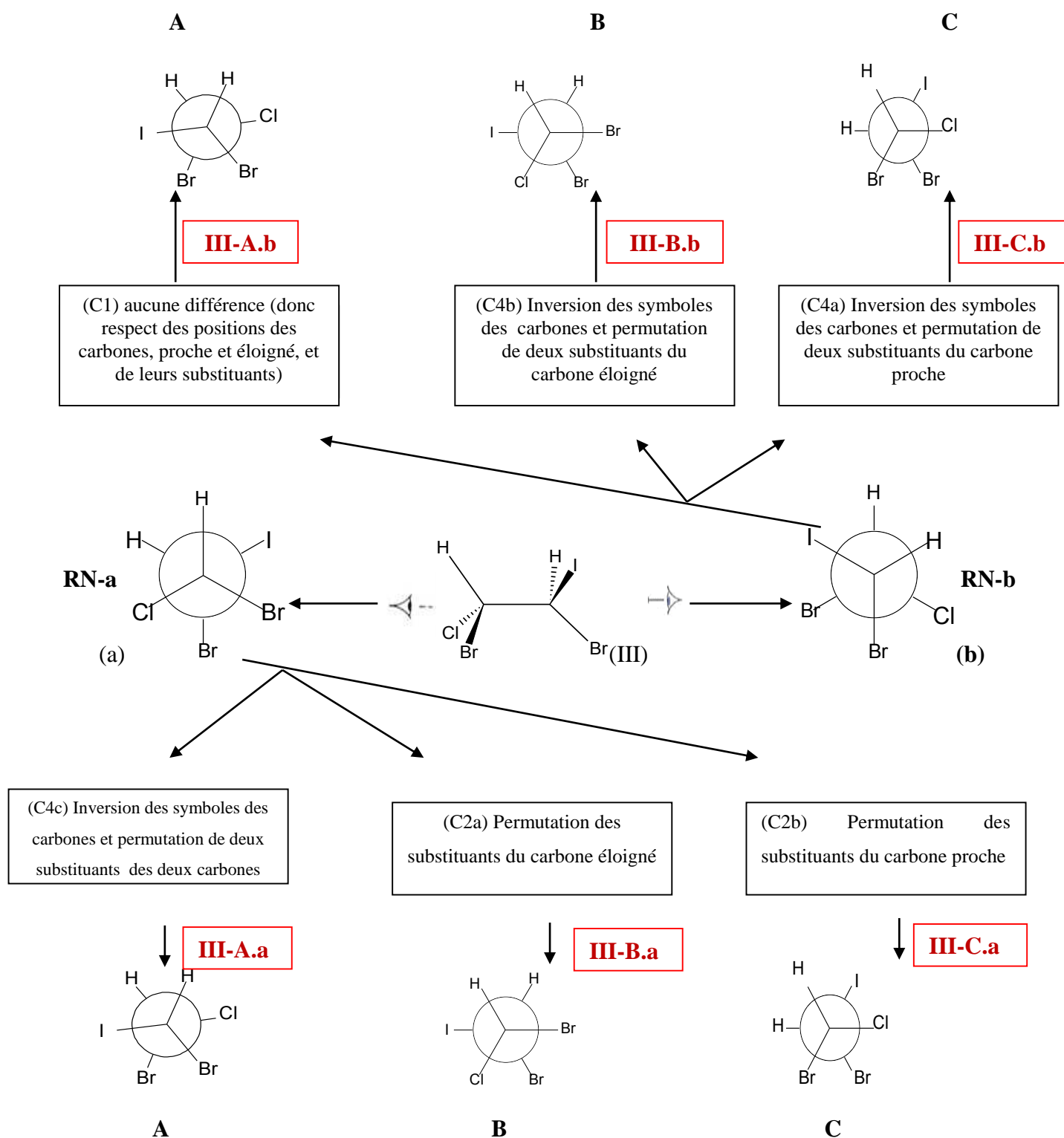


Figure 39: Catégorisation des réponses fournies correspondant à des positions de l'observateur, à gauche et à droite de la représentation de Cram (III)

Trois des réponses erronées (C2a, C2b et C2c), rassemblant 7 cas (I-A b , I-B a, II-A b , II-B a, II-C a, III-B a, III-C a, cf. tableau 24) concernent le non-respect des positions des substituants sur les atomes de carbone. La première catégorie (C2a) consiste en une permutation des substituants de l'atome de carbone éloigné de l'observateur (3 cas, I-A b , II-C a, III-B a), la seconde (C2b) en une permutation des substituants de l'atome de carbone proche de l'observateur (2 cas, II-B a, III-C a) et la troisième (C2c) en une permutation des substituants des deux atomes de carbone (2 cas, I-B a, II-A b).

Une catégorie de réponses erronées (C3) est constituée des 2 cas (I-B b, II-A a) où les élèves inversent les représentations des carbones observés. Ils choisissent une représentation de Newman conduisant à dire qu'ils représentent le carbone de devant par un cercle, et celui de derrière par un point.

Trois autres catégories de réponses (C4a, C4b et C4c), rassemblant 7 cas (I-A a, I-C b, II-B b, II-C b, III-A a, III-B b, III-C b) concernent à la fois le non respect des substituants sur les atomes de carbone et l'inversion des symboles des carbones observés. Les élèves choisissent une représentation de Newman conduisant à dire qu'ils représentent le carbone proche de l'observateur par un cercle, et celui éloigné par un point, et ne respectent pas les positions des substituants sur les atomes de carbone. La première catégorie (C4a) consiste en une inversion des représentations des carbones observés et une permutation des substituants de l'atome de carbone proche (2 cas, II-B b, III-C b), la deuxième (C4b) en une inversion des représentations des carbones observés et une permutation des substituants de l'atome de carbone éloigné (3 cas, I-A a, II-C b, III-B b), et enfin la troisième (C4c) en une inversion des représentations des carbones observés et une permutation de leurs substituants (2 cas, I-C b, III-A a).

Outre ces 7 types de réponses erronées correspondant à des positions de l'observateur (à gauche ou à droite de l'axe C-C de la représentation de Cram), nous ajoutons un autre type de réponse erronée (C5), constitué de deux cas (I-C c et III-A c) dans lesquels les élèves ne choisissent aucune position de l'observateur, alors que cela est possible.

Catégories de réponses (correctes :**)		Réponses correspondantes
(C1) Respect des positions des carbones, proche et éloigné, et de leurs substituants**		I-A.c; I-B.c; I-C.a; II-A.c; II-B.c; II-C.c III-A.b; III-B.c III-C.c**
(C2) Non respect des positions des substituants des carbones	(C2a) Permutation de deux substituants du carbone éloigné	I-A. b; II-C a; III-B a
	(C2b) Permutation des liaisons du carbone proche	II-B a ; III-C a
	(C2c) Permutation de deux substituants des deux carbones	I-B a ; II-A b
(C3) Inversion des symboles des carbones		I-B b ; II-A a
(C4) Inversion des symboles des carbones et non respect des positions des substituants	(C4a) Inversion des symboles des carbones et permutation de deux des substituants du carbone proche	II-B b ; III-C b.
	(C4b) Inversion des symboles des carbones et permutation de deux des substituants du carbone éloigné	I-A a ; II-C b ; III-B b.
	(C4c) Inversion des symboles des carbones et permutation de deux des substituants des deux carbones	I-C b ; III-A a.
(C5) Autres		I-C c ; III-A c

Tableau 24: Synthèse des catégories de réponses et des résultats associés

**= réponses correctes attendues

Les tableaux suivants présentent les pourcentages de réponses d'élèves si l'on prend en compte toute la population d'élèves (tableau 25), et les pourcentages des élèves ayant choisi les différentes réponses à la question 4 si l'on ne prend en compte que la population des élèves ayant répondu à chaque cas (tableau 26).

Résultats obtenus	I-A	I-B	I-C	II-A	II-B	II-C	III-A	III-B	III-C
Réponses a	27	23	17**	15	22	17	14	17	14
Réponses b	24	12	15	20	19	13	14**	14	11
Réponses c	6**	10**	12	10**	14**	15**	16	13**	30**
Pas de réponse	43	55	56	55	45	55	56	56	45
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 25 : pourcentages des élèves ayant choisi les différentes réponses à la question

**= réponses correctes attendues

Résultats obtenus	I-A	I-B	I-C	II-A	II-B	II-C	III-A	III-B	III-C
Réponses a	47	52	39**	33	40	38	32	39	25
Réponses b	42	27	34	45	35	29	32**	32	20
Réponses c	11**	21**	27	22**	25**	33	36	29**	55**
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 26 : pourcentages des élèves ayant choisi les différentes réponses à la question 4 si l'on ne prend en compte que la population d'élèves ayant répondu à chaque cas

**= réponses correctes attendues

Le tableau 27 présente une répartition en pourcentage des catégories de réponses des élèves.

Catégories de réponses (correctes : **)		Réponses correspondantes	Pourcentages
(C1)** Respect des positions des carbones et de leurs substituants		I-A.c; I-B.c; I-C.a; II-A.c II-B.c; II-C.c III-A.b; III-B.c III-C.c	6; 11 17; 16 13; 30 20; 14 15
(C2) Non respect des positions des substituants des carbones	(C2a) Permutation de deux substituants du carbone éloigné	I-A. b; II-C a; III-B a	24 ; 17 ; 17
	(C2b) Permutation de deux substituants du carbone proche	II-B a ; III-C a	23 ; 14
	(C2c) Permutation de deux substituants des deux carbones	I-B a ; II-A b	23 ; 20
(C3) Inversion des symboles carbones		I-B b ; II-A a	12 ; 15
(C4) Inversion des carbones et non respect des positions des substituants	(C4a) Inversion des carbones et permutation de deux des substituants du carbone proche	II-B b ; III-C b.	19 ; 11
	(C4b) Inversion des carbones et permutation de deux des substituants du carbone éloigné	I-A a ; II-C b ; III-B b.	27 ; 13 ; 14
	(C4c) Inversion des carbones et permutation de deux des substituants des deux carbones	I-C b ; III-A a.	15 ; 14
(C5) Autres		I-C c ; III-A c	12 ; 16

Tableau 27: répartition des réponses (en pourcentage) à la question 4

**= réponses correctes attendues

Analyse des résultats

La question 4 s'est révélée très difficile pour les élèves qui devaient produire 9 réponses. Aucun n'a fourni 9 réponses exactes. 36% des élèves ne donnent aucune réponse, 26% ne répondent pas à au moins une proposition, et 38% donnent 9 réponses dont quelques-unes correctes.

17%, 17% et 24% (3 cas) des élèves ont permuté les substituants de l'atome de carbone éloigné de l'observateur (C2a, cf. tableau 27), 14% et 23% (2 cas) les substituants de l'atome de carbone proche de l'observateur (C2b), et 20% et 23% (2 cas) les substituants des deux atomes de carbone (C2c) (Cf. tableau 27). Si l'on rapporte le nombre d'élèves ayant commis chaque erreur

au nombre d'élèves ayant répondu au cas étudié (variable selon les cas) alors les taux de réponses erronées (C2b, 25% et 40% ; C2a, 37%, 37% et 42% ; C2c, 44% et 51%) (cf. tableau 26) montrent que ces erreurs sont commises par une proportion importante des élèves qui répondent. Ces erreurs peuvent être interprétées de deux manières :

1. l'image mentale générée à partir de la représentation de Cram de la molécule (visualisation spatiale) est erronée. Dans certains cas, seules les positions des substituants d'un des carbones sont permutées, et dans d'autres cas celles des deux substituants de chacun des carbones.
2. l'image mentale générée à partir de la représentation de Cram de la molécule est correcte, mais le problème se pose lorsqu'il s'agit de faire les projections mentales des substituants des carbones sur le plan perpendiculaire à l'axe C—C (relation spatiale): tantôt l'un des substituants situés à gauche de l'axe C—C est projeté à droite ou vice versa, tantôt les deux substituants situés à gauche de cet axe sont projetés à droite ou vice versa.

La capacité de visualisation mentale leur fait défaut.

Le tableau suivant indique les pourcentages des élèves ayant commis à la fois les erreurs de permutation de deux substituants du carbone éloigné (C2a) et du carbone proche (C2b) :

(C2a) (C2b)	I-A.b	II-C.a	III-B.a
I-B.a	13 (25**)	7(16**)	9 (22**)
III-C.a	8 (16**)	6 (15**)	6 (15**)

Tableau 28: pourcentages des élèves ayant commis à la fois les erreurs (C2a) et (C2b)

**= pourcentages des élèves ayant commis à la fois les erreurs (C2a) et (C2b) si l'on ne prend en compte que la population d'élèves ayant répondu à ces cas

A première vue, les résultats montrent que la permutation des substituants des carbones intervient plus dans le cas du carbone le plus éloigné (pourcentage C2a légèrement supérieur au pourcentage C2b, cf. tableau 27). Toutefois, selon les cas (6), les pourcentages des élèves ayant commis à la fois les erreurs (C2a) et (C2b) vont de 6% à 13% (cf. tableau 28). Si l'on rapporte le nombre d'élèves ayant commis à la fois ces deux types d'erreurs au nombre d'élèves ayant répondu au cas étudié (variable selon les cas) alors les taux de réponses ne sont pas négligeables. Ils vont de 15% à 25%. Nous concluons que le problème de visualisation mentale

des substituants des carbones ne dépend pas nécessairement de la position du carbone par rapport à l'observateur. Les erreurs de la catégorie (C2a) peuvent également être dues au non respect des consignes de la question. Les élèves observent une première fois la représentation de Cram à gauche et une deuxième fois à droite ou vice versa (double regard suivant la liaison C-C) : ce procédé nous laisse supposer qu'ils ont du mal à se positionner de façon précise et cohérente par rapport à la molécule observée.

12% et 15% des élèves (2 cas) intervertissent les symboles de représentation des carbones (C3) (cf. tableau 27), ces taux rapportés au nombre d'élèves qui répondent à chaque cas, vont de 27% à 33% (cf. tableau 26). Ces éléments nous conduisent à dire qu'une proportion importante d'élèves commet cette erreur, qui est peut être due à une méconnaissance des conventions de représentation dans le registre de Newman.

11% et 19% des élèves (2 cas), inversent les symboles des carbones observés et permutent les substituants de l'atome de carbone proche (C4a) (Cf. tableau 27) ; 13%, 14% et 27% (3 cas) intervertissent les représentations des carbones observés et permutent les substituants de l'atome de carbone éloigné (C4b), et 14% , 15% (2 cas) inversent les symboles des carbones observés et font une permutation de leurs substituants(C4c) (cf. tableau 27). Si l'on rapporte le nombre d'élèves ayant commis chaque erreur au nombre d'élèves ayant répondu au cas étudié (variable selon les cas) alors les taux de réponses erronées sont importants (C4a, 20% et 35% ; C4b, 29%, 32% et 47% ; C4c, 32% et 34%) (cf. tableau 26) et montrent que ces erreurs sont commises également par une proportion non négligeable d'élèves. Ces éléments nous amènent à dire que les difficultés de représentation et de manipulation d'image mentale sont considérables dans la conversion inter registre Cram-Newman, et qu'à cela s'ajoute la méconnaissance des conventions de représentation dans le registre de Newman.

Les erreurs de la catégorie (C4b) peuvent également être dues à un double regard sur la représentation de la molécule suivant la liaison C-C.

Le tableau ci-dessous présente les pourcentages des élèves ayant commis à la fois les erreurs C3 (inversion des symboles des carbones) et C4 (inversion des symboles des carbones et non-respect des positions des substituants).

(C4) (C3)	I-C b	II-B b	III-C b	I-A a	II-C b	III-B b	III-A a
I-B b	4 (10**)	4(9**)	2(6**)	9(22**)	3(13**)	2(5**)	6(14**)
II-A a	5(11**)	4(10**)	4(10**)	5(13**)	4(9**)	4(10**)	3(8****)

Tableau 29 : pourcentages des élèves ayant commis à la fois les erreurs (C3) et (C4)

**= pourcentages des élèves ayant commis à la fois les erreurs (C3) et (C4) si l'on ne prend en compte que la population d'élèves ayant répondu à ces cas.

Son examen montre que 2% à 9% des élèves commettent à la fois les erreurs (C3) et (C4) (14 cas). Si l'on rapporte le nombre d'élèves ayant commis ces deux catégories d'erreurs au nombre d'élèves ayant répondu aux deux cas étudiés (variable selon les cas) alors les taux de réponses varient de 5% à 22% (cf. tableau 29). L'erreur relative à l'inversion des symboles des carbones est régulièrement faite par certains élèves.

Selon les cas, 12% et 16% n'ont choisi aucune position de l'observateur (cf. tableau 27, C5), alors que cela est possible ; ces taux rapportés au nombre d'élèves qui répondent à chaque cas sont de 27% et 36% (cf. tableau 26). Cela peut être dû à une méconnaissance des conventions de représentations dans le registre de Cram et/ou de Newman et/ou à une difficulté à générer et manipuler une image mentale.

Nous avons souligné, d'une part, que pour trouver la réponse correcte à la question 4, il faut utiliser deux observations, à gauche et à droite, de la représentation de Cram suivant l'axe C—C, d'autre part, que cela exige des capacités d'orientation spatiale. Les réponses erronées peuvent également être dues à un défaut de ces capacités.

Résumé

En résumé, la conversion inter registre Cram-Newman est laborieuse pour la majorité des élèves. Une proportion conséquente (36%) ne donne aucune réponse. Certains de ceux qui ont répondu à la question intervertissent les symboles des carbones (C3 : 12% à 15%, C4 : 11 à 27%) et/ou permutent les substituants d'au moins un des carbones (C2 : 17% à 24%, C3 : 12% à 15%, C4 : 11 à 27%). Cela nous laisse supposer, d'une part la méconnaissance des conventions de représentation de Newman, et d'autre part des difficultés de visualisation spatiale, de projection mentale et d'orientation spatiale. Ces difficultés ne dépendent pas de la position de l'observateur, à gauche ou à droite, par rapport à l'axe de la liaison C-C de la

représentation de Cram de la molécule. Certains élèves n'ont peut-être pas utilisé un raisonnement spatial, mais plutôt un raisonnement analytique défectueux.

Le raisonnement spatial relatif à la conversion inter registre n'est peut-être pas connu de certains élèves. Ils semblent utiliser un « double regard » au lieu d'un seul (C2a : 17% à 24%, C4b : 13% à 27%).

Confrontation avec les résultats de l'étude 1

L'analyse des réponses d'élèves aux questions 2.b et 4, respectivement, des études 1 et 2, montre que la conversion inter registre Cram Newman n'est pas aisée pour la plupart des élèves.

Dans l'étude 1 (cf. § III.1.5.2.2), nous relevons que des élèves ne réussissent pas la disposition des atomes, de la représentation de Cram, dans la représentation de Newman (C1a-N2b et C1b1-N2b, 15%). Ils sont peu disert quant à l'explication de la méthode utilisée. Deux types de raisonnements sont néanmoins inférés : spatial et analytique. Nous concluons que dans l'éventualité d'un raisonnement spatial (hypothèse 1), ils ont, soit du mal à positionner de façon précise et cohérente l'observateur par rapport à la molécule observée (la position de l'observateur est variable, conduisant ainsi à un double regard sur la liaison C—C au lieu d'une position fixe de l'observateur, hypothèse 1.a), soit du mal à visualiser dans l'espace les positions des substituants des carbones proche ou éloigné, la position de l'observateur suivant l'axe C—C étant fixe (hypothèse 1.b) (cf. §. III.1.5.2.2 pp. 110-111) Ces deux sous-hypothèses, 1.a et 1.b, sont également posées dans l'étude 2. En effet, les catégories de réponses C2b et C4b, de l'étude 2, permettent d'inférer l'utilisation d'un double regard (hypothèse 1.a), et ce, en supposant que la consigne n'est pas respectée. L'étude 2 révèle aussi que des élèves permutent les substituants du carbone éloigné (C2a) ou du carbone proche (C2b), ce qui nous permet de conjecturer, comme dans l'étude 1 (hypothèse 1.b) qu'ils ont du mal à visualiser dans l'espace les positions des substituants des carbones proche ou éloigné.

Cette analyse ne nous autorise pas à rejeter ou à confirmer l'hypothèse d'un raisonnement analytique chez les élèves, également relevée dans l'étude 1 (hypothèse 2). L'étude orale de leurs raisonnements apportera des éclaircissements sur ce sujet.

III.2.6. Conclusion partielle

Nous apportons dans cette partie, les éléments de réponses à nos questions spécifiques de recherche (QSR5 à QSR8).

Passage d'une conformation de molécule à une autre dans le registre de Cram

La première, QSR5, portait sur la réalisation de l'opération de rotation autour de l'axe de la liaison C—C dans le registre de Cram.

- QSR5 : Comment les élèves réalisent-ils l'opération de rotation autour de l'axe C—C d'une molécule en représentation de Cram ?

L'opération de rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe de la liaison C—C dans le registre de Cram n'est réussie par aucun élève (question 2). Les réponses proposées nous permettent de déduire trois catégories de raisonnements, tous infructueux. Le premier, spatial, consiste à réaliser l'opération de rotation mentalement ; le deuxième, non spatial, à changer la forme initiale de la représentation, et à répartir les substituants du carbone aléatoirement ; et enfin le troisième, également non spatial, à réaliser une permutation, circulaire ou aléatoire, des substituants du carbone. Nous remarquons que, comme les étudiants (Tuckey et al., 1999), les élèves ont du mal à mettre en place l'opération de rotation des substituants autour de l'axe C—C. Cette incapacité à la réaliser est accentuée par la méconnaissance de l'angle de rotation ou de l'angle dièdre dans une conformation éclipsée. Le fait que l'enseignement de la stéréoisomérie de conformation s'appuie particulièrement sur les conformations limites, éclipsée et décalée, de la molécule d'éthane semble également affecter leur compréhension de l'opération de rotation autour de l'axe C—C ; les élèves ne différencient pas les positions exactes des hydrogènes après l'opération de rotation, et pensent qu'ils sont répartis de manière aléatoire.

Bien que le manuel insiste sur le respect des valeurs des angles entre les traits de liaisons dans le registre de Cram (cf. § II.2 figure 28), nous constatons comme dans l'étude 1 (cf. § III.1.5.2.) une forte proportion de dessins avec des angles erronés (74%). Certains ne respectent pas les conventions de figuration des liaisons ; ils dessinent des conformations décalées avec des traits de liaison gras et hachuré mal disposés, commettant ainsi les mêmes erreurs que les étudiants (Pellegrin et al., 2003), ou proposent des dessins où tous les traits de liaison sont en tirets simples.

Nous avons suspecté un possible raisonnement analytique dans la réalisation de quelques dessins proposés (par exemple la permutation des substituants de carbone chez certains élèves). Une analyse de leurs raisonnements, au moyen d'un entretien par exemple, nous permettra peut-être de confirmer ou d'infirmer ces suspicions.

Reconnaissance de stéréoisomères de conformation

Nous constatons dans l'étude 1 que des élèves s'appuient seulement sur la forme éclipsée et décalée des représentations de Newman pour reconnaître des molécules stéréoisomères de conformation. A travers cette deuxième étude, nous voulons vérifier si le même raisonnement est utilisé lorsque les molécules proposées sont en représentation de Cram. Nous rappelons la question spécifique de recherche afférente :

- QSR6 : Comment les élèves reconnaissent-ils des molécules stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Cram?

Bien que 83% d'élèves répondent à la question portant sur l'identification de molécules stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Cram (question 3), nous déplorons un fort pourcentage (66%) d'absence de justification des réponses.

Nous recensons trois types de démarches.

La première, correcte, consiste à vérifier que les représentations de Cram, de formes globales quelconques ou distinctes, ne diffèrent que par la rotation du groupement d'un carbone autour de l'axe de la liaison C—C ; la deuxième, partiellement correcte, à vérifier l'identité des substituants des carbones des représentations de formes globales quelconques ou identiques. Nous précisons que ces deux types de démarches sont inférés chez une faible proportion d'élèves.

Dans la troisième (démarche absolument incorrecte), les représentations de Cram de formes globales identiques et/ou différentes sont repérées, sans prendre en compte l'identité des substituants des carbones.

Les première et deuxième démarches se rapprochent de celles utilisées lorsque les molécules proposées sont en représentation de Newman.

MDP

La troisième question spécifique de recherche, QSR7, concernait l'application de la méthode de la double permutation décrite dans le paragraphe III.2.2. (pp. 125-127) :

- QSR 7 : Les élèves maîtrisent-ils la méthode de la double permutation ?

Peu d'élèves (9%) donnent un point de vue conforme aux propriétés 1 et 2 qui fondent cette méthode. La plupart répond aléatoirement au test d'application de la MDP (question 1) ; nous relevons une mauvaise assimilation des propriétés qui régissent cette méthode, et donc une improbable identification des molécules énantiomères. Il apparaît donc que le raisonnement

analytique, en l'occurrence la MDP, n'est pas forcément la stratégie la plus aisée ou la plus efficace pour les élèves ; nous arrivons ainsi à la même conclusion que Stieff (2007), Taagepera et Noori (2007, cités par Stieff, 2011) à propos de l'utilisation d'un raisonnement analytique.

Conversion inter registre Cram-Newman

L'étude 1 révèle que certains élèves s'appuient peut-être sur un raisonnement spatial pour réaliser la conversion inter registre Cram Newman. Cependant, les résultats obtenus ne nous permettent pas de mettre en évidence leurs capacités de visualisation mentale, ou, pour être plus précis, les difficultés de visualisation mentale que peut engendrer l'observation, à gauche ou à droite, de la représentation de Cram de la molécule suivant l'axe C—C. Dans l'étude 2, nous cherchons à apporter des réponses aux remarques que nous venons d'énoncer. La question spécifique de recherche suivante est :

- QSR8 : Comment les élèves visualisent-ils mentalement les positions des substituants des carbones et les traits de liaison dans l'espace?

Aucun élève ne donne intégralement les réponses attendues à la question relative à la conversion inter registre Cram Newman (question 4). Les réponses proposées par certains élèves nous permettent de supposer, d'une part, que :

- l'image mentale générée à partir de la représentation de Cram est inexacte, et se traduit, en représentation de Newman, par la permutation des substituants d'au moins un des carbones ; dans ce cas, les capacités de visualisation spatiale des élèves sont défectueuses.
- l'image mentale générée à partir de la représentation de Cram est exacte, mais les projections mentales des substituants des carbones sur le plan perpendiculaire à l'axe C—C échouent, ce qui se manifeste également, en représentation de Newman, par la permutation des substituants d'au moins un des carbones ; dans cette hypothèse, les élèves n'ont pas de bonnes capacités de relation spatiale.

Ces erreurs sont réalisées en observant la représentation de Cram, aussi bien à gauche qu'à droite, et ce, sur les carbones proche et éloigné de l'observateur. Ce qui nous laisse présumer que des élèves présentent une carence de capacité d'orientation spatiale. Le problème de visualisation mentale des substituants des carbones ne dépend donc pas nécessairement de la position du carbone par rapport à l'observateur.

D'autre part, des élèves ne respectent peut-être pas la consigne demandée, et, comme dans l'étude 1, ils observent la représentation de Cram une première fois à gauche, et une deuxième

fois à droite, ou vice versa (double regard suivant l'axe C—C). Ils ne sont pas en mesure d'attribuer à l'observateur une position précise et cohérente par rapport à la molécule observée.

Outre ces difficultés de visualisation mentale, nous déduisons également que certains élèves ne connaissent pas le symbolisme des carbones dans le registre de Newman. Ils représentent le carbone proche par un cercle, et le carbone éloigné par un point.

Implications des résultats sur l'étude 3

L'analyse des questionnaires 1 et 2 permet d'inférer des raisonnements spatiaux lors de la réalisation des opérations de rotation autour de l'axe de la liaison C—C dans le registre de Cram, et de conversion inter registre Cram Newman. Nous suspectons également de possibles raisonnements analytiques, par exemple, la permutation des substituants du carbone lors de la réalisation de l'opération de rotation autour de l'axe de la liaison C—C dans le registre de Cram. Pour mieux expliciter ces raisonnements, nous estimons qu'il est nécessaire, à travers une nouvelle étude, d'analyser, au moyen d'entretiens individuels, les productions écrites et verbales des élèves, et les gestes qui pourraient accompagner ces productions. De plus nous cherchons également, dans cette nouvelle étude, à mettre en évidence les raisonnements des élèves concernant la manipulation et l'interprétation des modèles moléculaires.

III.3. Etude 3

L'étude 3 vise d'une part à mettre en évidence les raisonnements des élèves à propos de certaines opérations inter et intra registre des représentations sémiotiques de Cram et de Newman de molécules organiques. D'autre part, elle a pour but de connaître leur manière de manipuler un modèle moléculaire, ainsi que leurs raisonnements lors de la conversion d'un modèle moléculaire en représentation sémiotique de Cram.

III.3.1. Questions spécifiques de recherche (QSR)

Comme dans les deux études précédentes, les questions spécifiques de recherche sont toujours liées aux activités cognitives que permettent les systèmes sémiotiques de Cram et de Newman, et le système de modèle moléculaire.

- Communication

Nous avons précisé que les capacités à réaliser les opérations de traitement intra registre sémiotique ou de conversion inter registre sémiotique, exigent au préalable la connaissance des activités de communication ou de représentation que permet le système sémiotique (cf. §

III.1.1). De ce fait, la première question spécifique de recherche de l'étude 1 (QSR1) porte sur la signification que les élèves donnent à la représentation de Cram. Etant donné que nous cherchons dans cette étude, à saisir les raisonnements des élèves à propos des opérations de traitement intra registre de Cram et de conversion inter registre Cram Newman, et afin d'établir, si possible, un lien entre les raisonnements des élèves à propos de ces opérations et leur maîtrise de l'activité de communication dans le registre de Cram, nous reprenons cette question de recherche, et complétons sa visée à travers la question spécifique de recherche 9 (QSR9).

QSR9 : Quelle signification les élèves donnent-ils à la représentation de Cram ? Quels est leur degré de maîtrise des renseignements qu'on peut tirer de cette représentation ?

Les réponses à cette question permettront de mieux comprendre les raisonnements et les difficultés des élèves concernant les activités de traitement et de conversion en rapport avec le registre de Cram.

- **Traitement et conversion**

Les résultats des études 1 et 2, montrent que les élèves ne réussissent pas les opérations de rotation autour de l'axe de la liaison C—C dans le registre de Cram, et de conversion inter registre Cram-Newman. Nous formulons les questions spécifiques de recherche suivantes :

QSR10 : Quels raisonnements, spatial ou non-spatial, adoptent les élèves pour réaliser les opérations de rotation autour de l'axe C—C dans le registre de Cram, et de conversion inter registre Cram-Newman ?

Le manuel s'appuie sur des modèles moléculaires pour montrer la stéréoisométrie de conformation, et propose des photos de modèles moléculaires s'identifiant à des représentations de Cram de molécules. Les capacités attendues des élèves (Cp19 et Cp24) se rapportent également à l'usage des modèles moléculaires. La manipulation du modèle moléculaire ou sa conversion dans un autre registre pose des problèmes aux étudiants ; certains ne sont pas en mesure d'établir correctement la correspondance entre le modèle moléculaire et la représentation de Cram, ils ne respectent pas l'ordre circulaire des substituants autour des atomes de carbone central de la molécule (Stull et al., 2012). Un autre aspect de nos questions spécifiques de recherche porte sur l'usage de modèle moléculaire et son passage en représentation de Cram. Les questions spécifiques de recherches posées sont les suivantes :

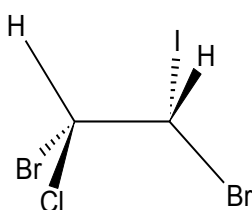
QSR11 : Quel est le degré de maîtrise des élèves concernant les gestes procéduraux liés à la manipulation d'un modèle moléculaire ? Comment réalisent-ils le passage d'un modèle moléculaire en représentation de Cram ?

III.3.2. Instrument de collecte de données

Un protocole d'entretien individuel de cinq questions est construit pour collecter les données.

Question 1 : signification d'une représentation de Cram et renseignements pouvant être tirés

Nous cherchons ici, à savoir ce que signifie pour les élèves la représentation sémiotique de Cram d'une molécule et les renseignements qu'on peut en tirer. Cette question est liée à la question spécifique de recherche 8. Nous donnons le dessin d'une molécule (dans le registre de Cram), et demandons sa signification, et les renseignements qu'on peut en tirer.

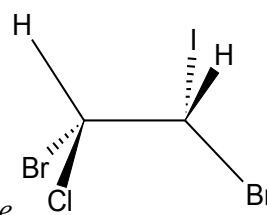


- Quand vous voyez ce dessin qu'est-ce qu'il signifie pour vous ?*
- Quels renseignements pouvez-vous en tirer ?*

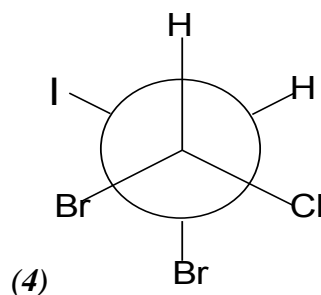
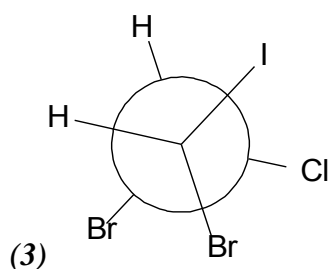
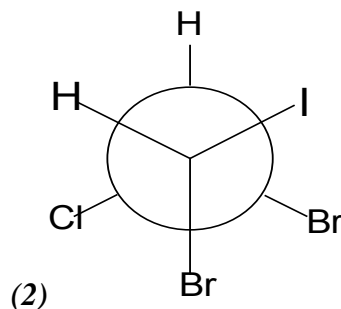
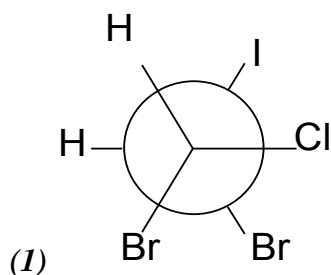
Question 2 : conversion inter registre Cram Newman

Dans la question 2, nous nous intéressons à la conversion inter registre Cram-Newman. Il s'agit pour nous de comprendre la démarche utilisée et d'y déceler les traces d'un « double regard » lors de cette activité cognitive. Cette question se rapporte à la question spécifique de recherche 9.

Nous proposons une représentation de Cram d'une molécule, et quatre représentations de Newman, dont deux pouvant être obtenues à partir d'un positionnement précis de l'observateur (à gauche de la représentation de Cram pour la représentation de Newman 4 et à droite pour la représentation de Newman 2), et deux autres à partir d'un « double regard » (représentations de Newman 1 et 3). Puis nous leur demandons d'indiquer la ou les représentation(s) de Newman pouvant être obtenue(s) à partir de la représentation spatiale et d'expliquer leur raisonnement.



Voici une représentation spatiale²¹ d'une molécule, et une série de quatre représentations de Newman



a. Quelle(s) représentation(s) de Newman peut-on obtenir à partir de la représentation spatiale fournie ?

b. Expliquez-moi comment vous raisonnez.

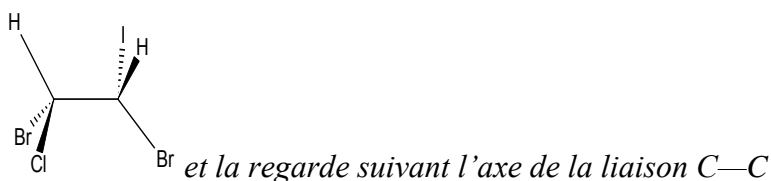
Question 3 : visualisation des positions des traits de liaison

Cette question est liée à la question spécifique de recherche 8. Elle se rapporte à la visualisation des liaisons des carbones adjacents, et comprend trois consignes.

Dans la première (a), nous utilisons une formulation assez vague pour leur laisser une grande liberté de réponse. Nous demandons à notre interlocuteur de se mettre dans la peau d'un observateur qui regarde une représentation spatiale d'une molécule suivant l'axe de la liaison C—C, et d'indiquer comment il la voit.

²¹ Nous utilisons le terme représentation spatiale dans les entretiens, parce que les instructions officielles ne parlent pas de représentation de Cram.

Vous êtes un observateur qui se met à gauche de la représentation spatiale suivante



a. Comment voyez-vous la représentation ?

En l'absence de précision sur les positions des liaisons dans sa réponse, nous enchaînons avec des questions précises sur la manière de voir les liaisons (b et c).

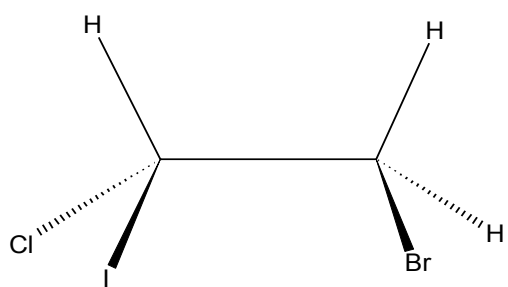
b. Est-ce qu'il peut y avoir des traits qui en cachent d'autres ? si oui, lesquels ?

c. Est-ce qu'il y a des traits sur votre gauche ou votre droite ? si oui lesquels ?

Question 4 : Passage d'une conformation de molécule à une autre conformation dans le registre de Cram

La question 4 porte sur la rotation mentale dans le registre de Cram. Elle est liée à la question spécifique de recherche 9. Nous demandons aux élèves de dessiner une représentation spatiale d'une molécule obtenue après une rotation des substituants du carbone, de gauche, de 60° autour de l'axe de la liaison C—C, et d'expliquer leur raisonnement ainsi que ce à quoi ils pensent en le faisant.

a. Voici une représentation spatiale d'une molécule.



, dessinez moi une autre représentation spatiale obtenue après rotation de 60° du groupement CHICl autour de l'axe C—C.

b. Expliquez-moi comment vous faites.

c. A quoi pensez-vous quand vous le faites ?

Question 5 : traitement et conversion du modèle moléculaire

Nous abordons ici l'usage de modèles moléculaires et leur conversion en représentation de Cram. La question est liée aux questions spécifiques de recherche 11.

Nous présentons aux élèves le modèle moléculaire de la représentation spatiale de la molécule de la question 4, sans pour autant leur dire que les représentations de molécules des questions 4 et 5 étaient identiques. Nous leur demandons de réaliser une rotation de 60° des substituants du carbone autour de l'axe de la liaison C—C à partir du modèle moléculaire fourni, de dessiner la représentation spatiale du modèle moléculaire obtenu, puis d'expliquer leur raisonnement.

Voici un modèle moléculaire représentant une conformation d'une molécule.

- a. Pouvez-vous réaliser une rotation de 60° du groupement²² qui est devant vous autour de l'axe carbone-carbone ?*
- b. Dessinez-moi une représentation spatiale de ce que vous avez obtenu.*
- c. Expliquez-moi comment vous avez fait.*

III.3.3. Collecte des données

La collecte des données est basée sur un échantillon de 16 élèves volontaires, âgés de 17 à 22 ans, des classes terminales D de quatre établissements scolaires du Bénin. Trois²³ d'entre eux (Ct, 8 élèves, D, 1 élève et M, 6 élèves) sont situés dans la ville de Porto-Novo, et un autre (Nd, 1 élève) dans celle de Cotonou.

Lors de la construction du protocole d'entretien de l'étude 3, nous nous trouvons en France. Ledit protocole est donc finalisé à partir des résultats d'un test d'essai mené sur quatre étudiants de première année de l'université Paris Diderot- Paris 7, dont la tranche d'âge varie entre 19 et 21 ans. Ces étudiants ont reçu une formation en stéréochimie. Nous estimons que les résultats de ce test ne sont pas biaisés, car des études révèlent que des élèves ou des étudiants développent des capacités de visualisation à peu près au même taux, quelle que soit la culture (Jahoda et McGurk, 1974a, 1974b, Cohen, 1985, cité par Ferk et al.): un test réalisé en France peut donc servir de pilotage à un entretien mené au Bénin.

Les entretiens individuels durent de 14 à 28 min. Ils ont lieu, au moins deux à quatre mois après l'enseignement de la stéréochimie en terminale D. Les élèves sont prévenus de la passation de l'entretien quelques jours avant, et il leur est demandé de réviser leur cours de stéréochimie.

Les entretiens sont semi-directifs, ceci dans le but de laisser les élèves exposer en détail leurs pensées. Ils sont enregistrés à l'aide d'un caméscope et d'un magnétophone, ce dernier permet

²² Il s'agit du groupement -CHCl

²³ Pour des besoins d'anonymat, les établissements scolaires sont désignés par des lettres.

de réaliser des enregistrements audio plus audibles. Les représentations sémiotiques intervenant dans les questions posées, sont présentées sur des feuilles de papier. Nous ne disposons pas de modèles moléculaires adéquats, nous utilisons donc des boules de cotillon et des tiges métalliques, en remplacement des boules d'atomes et des bâtons de liaison usuels. Nous prenons le soin de préciser à l'élève, chaque fois que cela s'avère nécessaire, quel atome représente la boule de cotillon (par exemple, la boule de cotillon rose représente l'atome de chlore).

Il convient de préciser qu'à la fin de l'entretien, il est demandé à l'élève de préciser s'il a déjà vu et utilisé un modèle moléculaire. Lors de l'entretien avec le deuxième élève, ce dernier a souligné un fait qui nous a semblé d'une grande importance pour l'analyse de la question 2 : on ne lui avait jamais parlé de la possibilité d'observer la représentation de Cram à droite, lors de la conversion inter registre Cram Newman. Dans les entretiens suivants, nous demandons donc, à chaque élève, si c'est également le cas.

III.3.4. Méthodologie d'analyse des données

Les enregistrements audio et vidéo (expressions orales, écrites et gestuelles) sont transcrits intégralement. Chaque élève est désigné par E_i (i allant de 1 à 16).

III.3.4.1. Les productions gestuelles

Les productions gestuelles sont relevées à toutes les questions. Pour chacune, le rôle des gestes est décrit en les situant comme ressources sémiotiques (catégorisation selon une classification de McNeill) ou procédurales, et en regardant la façon dont ils sont étroitement liés aux raisonnements des élèves. Les gestes déictiques résultent d'une catégorisation a priori. La catégorisation des gestes métaphoriques et procéduraux est faite a priori, puis a posteriori (catégorisation mixte).

Les gestes déictiques (GD) consistent à pointer les symboles et les boules d'atomes, les traits et les bâtons de liaisons etc.

Parmi les gestes métaphoriques, nous avons distingué :

- des gestes de rotation effectués avec les doigts (GM1), pour traduire la rotation d'un objet abstrait (substituant des carbones d'une molécule en représentation spatiale par exemple) autour d'un axe.



Figure 40: geste métaphorique accompagnant un discours sur la rotation autour d'un axe (GM1)

- Des gestes de rapprochement de la main vers le visage (GM2) pour préciser une position dirigée vers le locuteur, ou une région de l'espace située en avant d'un plan vertical
- Des gestes d'éloignement de la main du visage (GM3) pour préciser une direction s'éloignant du locuteur, ou une région de l'espace située en arrière d'un plan vertical.

Aucun geste iconique n'est relevé.

4 gestes procéduraux sont identifiés:

- Des gestes consistant à se pencher et à observer la représentation de la molécule suivant l'axe C—C (GP1).
- des gestes de rotation des boules d'atomes liés à la boule de carbone autour de l'axe du bâton de liaison C—C (GP2)
- des gestes de retournement du modèle moléculaire de 180 ° (GP3).
- des gestes de déboitement du modèle moléculaire (GP4).

III.3.4.2. Les productions écrites

Les productions écrites (représentations spatiale et de Newman de molécule) ne sont repérées qu'à partir de la question 3. Elles sont classées selon leurs caractéristiques et comparées aux productions correctes attendues.

III.3.4.3. Les productions verbales

Nous nous intéressons au sens des propos de chaque élève et non à leur forme. Ils sont découpés en unités de signification, qui sont subséquentement réparties en catégories thématiques dépendant des questions posées et des questions spécifiques de recherche, et enfin analysées.

Question 1

La question 1.a examine la signification de la représentation sémiotique de Cram d'une molécule (opération de communication) ; a priori, trois grandes catégories de réponses s'imposent : réponses liées à la représentation de molécule, réponses qui parlent de molécule et

pas de représentation, réponses qui ne parlent ni de représentation ni de molécule. A l'intérieur de la première catégorie nous examinons les types de représentations déclarées (spatiale, Newman...).

Pour la question 1.b, qui analyse les renseignements qu'on peut tirer d'une représentation spatiale, nous distinguons d'une part des réponses mentionnant les activités cognitives qu'elle permet (communication et traitement), et d'autre part des réponses ne les mentionnant pas.

Question 2

La question 2 met en jeu la conversion inter registre, puisqu'il s'agit d'identifier les représentations de Newman pouvant être obtenues à partir de la représentation spatiale fournie ; nous y distinguons les choix corrects et incorrects (question 2.a). Les démarches utilisées sont catégorisées selon qu'elles recourent à la conversion inter registre Cram-Newman ou non. (question 2.b). Dans la première catégorie nous analysons le type de raisonnement (spatial ou non-spatial), dans la seconde les critères d'identification des représentations de Newman employés.

Question 3

La question 3 porte sur la visualisation mentale des positions des traits de liaison par rapport à l'observateur placé suivant l'axe C—C. Les réponses des élèves sont catégorisées d'une part en termes de visualisation des traits de liaison éclipsés ou décalés des carbones adjacents (question 3.a), et d'autre part en termes de visualisation des traits de liaison à gauche ou à droite de l'observateur (question 3.b). A l'intérieur de chaque catégorie nous apprécions le type de traits de liaison choisis.

Question 4

Ici, nous distinguons des représentations de Cram et des représentations qui ne le sont pas. Puisqu'il s'agit de passer d'une conformation éclipsée à une conformation décalée par une rotation des substituants du carbone de 60° autour de l'axe C—C, deux grandes catégories sont distinguées : les réponses comprenant une représentation décalée, les autres une éclipsée. Dans chaque catégorie, nous vérifions le respect des positions des substituants. Les raisonnements sont classés selon qu'ils se réfèrent ou pas à une rotation mentale effectuée sur la représentation de Cram, puis examinés.

Question 5

La question 5 concerne la réalisation d'une rotation sur le modèle moléculaire autour de l'axe du bâton de liaison C—C (5.a), la conversion du modèle moléculaire en représentation de Cram (5.b) et le raisonnement des élèves à propos de cette conversion (5.c).

Nous examinons à la question 5.a, la cohérence des gestes effectués lors la manipulation du modèle moléculaire (il s'agit de gestes procéduraux différents de la classification de McNeill) et l'angle de rotation réalisé.

A la question 5.b, nous vérifions dans un premier temps comment les élèves se placent par rapport au modèle moléculaire. Puis nous comparons leur dessin à la représentation spatiale pouvant être obtenue (cf. figures 25 et 26). Les critères de comparaison retenus sont la symbolisation et la disposition des traits de liaison, ainsi que la valeur des angles qu'ils forment entre eux.

III.3.5. Analyse des réponses d'élèves

Cette partie est consacrée à l'analyse des réponses d'élèves.

III.3.5.1. Sur la signification d'une représentation de Cram et des renseignements qu'on peut en tirer

La question 1 porte sur les connaissances des élèves à propos de la représentation de Cram. Elle comprend deux sous-questions. Nous fournissons le dessin d'une représentation de molécule à deux carbones (dans le registre de Cram) et demandons, dans la première, question 1.a, la signification du dessin; dans la seconde, question 1.b, les renseignements qu'on peut en tirer.

Catégorisation et répartition des réponses à la question 1.a

Productions verbales

Nous distinguons trois catégories de réponses a priori : représentation, molécule, et autres.

- **Représentation:** réponses considérant le dessin proposé comme une représentation de la molécule. Nous distinguons dans cette catégorie de réponse, d'une part, des réponses complètes, c'est-à-dire précisant la dimension de la représentation, spatiale (par exemple *E12 : une représentation spatiale d'une molécule*) ou plane (par exemple *E9 : C'est une représentation de la molécule dans le plan*) ; et d'autre part, des réponses partielles, c'est-à-dire n'indiquant pas la dimension de la représentation (par exemple *E14 : C'est une représentation, c'est la représentation d'une molécule*).

- **Molécule:** réponses désignant le dessin proposé par le terme molécule, sans mentionner la « représentation ».
- **Autres :** propos nommant le dessin proposé par l'un des termes « spécialisés », en lien avec la stéréochimie, suivants : conformation décalée d'une molécule, énantiomère, diastéréoisomère, isomère ; ou stipulant que le dessin proposé leur fait penser à la stéréochimie. Aucune mention n'est faite de la représentation d'une molécule.

Productions gestuelles

Aucun geste n'accompagne les propos des élèves.

	Représentation	Molécule	Autres				
			Conformation décalée	Enantiomères	Diastéréoisomères	Isomères	Stéréochimie
E1	Sp						
E2	x						
E3	Sp						
E4	Sp						
E5					x		
E6							x
E7							x
E8	Sp						
E9	P						
E10				x			
E11						x	
E12	Sp						
E13			x				
E14	x						
E15	Sp						
E16		x					
Total	9	1	6				

Tableau 30: répartition des réponses d'élèves à propos de la signification du dessin de la molécule dans le registre de Cram

Code utilisé :

X : absence de précision sur la dimension spatiale ou plane de la représentation

Sp : spatiale

P : plane

Analyse des réponses à la question 1.a

Neuf élèves (E1 à E4, E8, E9, E12, E14 et E15) considèrent le dessin proposé comme la représentation d'une molécule (cf. tableau 30). Six d'entre eux (E1, E3, E4, E8, E12 et E15) précisent qu'il s'agit d'une représentation spatiale.

E9 déclare que le dessin fourni est une représentation dans le plan de la feuille. Il n'y a pas dans ces propos l'idée que le plan vise à représenter le dessin de la molécule dans l'espace. Cela peut être dû au fait qu'il ne fait pas de lien entre la symbolisation différente des traits de liaison et leur position dans l'espace.

E16 estime que le dessin est une molécule, ce qui traduit un amalgame entre « représentation d'une molécule » (description imagée de la molécule) et « molécule ». Cette confusion montre que la définition d'une représentation de la molécule est mal assimilée.

Nous plaçons six réponses d'élèves (E5, E6, E7, E10, E11 et E13) dans la catégorie « autres ». Trois d'entre eux, respectivement E5, E10 et E11, déclarent que le dessin proposé signifie énantiomère, diastéréoisomère, et isomère, sans faire allusion ou mentionner la représentation d'une molécule. Leurs propos révèlent une méconnaissance de la définition des termes utilisés, en effet les relations de stéréoisomérisation ou d'isomérisation impliquent au moins deux représentations d'une molécule.

Catégorisation et répartition des réponses à la question 1.b

Productions verbales

Nous différencions d'une part des réponses en lien avec les activités de communication et de traitement dans le système sémiotique de Cram, et d'autre part celles qui ne le sont pas.

Réponses en lien avec les activités de communication et de traitement du système sémiotique de Cram

- **communication** : réponses indiquant la signification du symbolisme utilisé pour représenter les liaisons ou parlant de la disposition des atomes dans l'espace.

Par exemple :

- **E2** : [...]. Ça, (montre le trait portant le Br du carbone de gauche) *c'est les traits de liaison en arrière et I, ça* (montre le trait portant le Cl du

carbone de gauche) *la liaison en avant du plan*, Br (montre le trait C—Br du carbone de droite) *et H* (montre le trait C—H du carbone de gauche) *traits de liaison dans le plan*.

- **traitement** : réponses liées à la stéréoisomérisation conformationnelle ou configurationnelle. Par exemple :
 - **E13** : *Nous savons qu'autour du...il y a retournement...on retourne les atomes* (de CHIBr) (indique le sens de la rotation avec ses doigts) *autour de cette barre* (C—C), *et on a premièrement la conformation éclipsée, et si on échange les atomes là* (de CHIBr) (indique le sens de la rotation avec ses doigts), *ça devient décalé*.
 - **L0** : *Qu'est-ce que tu entends par décalé ?*
 - **E13** : *(Rire) c'est tourné !*

Réponses sans lien avec les activités cognitives du système sémiotique de Cram

Il s'agit, d'une part des réponses citant les atomes (par exemple **E9** : - - *c'est une molécule qui comporte deux atomes de carbone*), ou les types de représentation de molécules (par exemple **E14** : *Je sais qu'en chimie...en stéréochimie il y a plusieurs types de représentations : la représentation de Newman et - - il y a plusieurs représentations parmi lesquelles nous avons la représentation de Newman...*) ou encore déclarant que le dessin rappelle la stéréochimie (par exemple **E1** : [...]*ça me rappelle la notion de stéréochimie*) ; et d'autre part des réponses estimant qu'aucun renseignement ne peut être tiré du dessin fourni.

Productions gestuelles

Nous identifions deux types de gestes: déictiques et métaphoriques.

			E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	total	
Réponses en lien avec les activités cognitives du système sémiotique de Cram	Communi- cation	Signification du symbolisme des liaisons			X			X										X	3	
		Disposition des Atomes dans l'espace et forme de la molécule																x		1
	Traitement	Passage d'une conformation de molécule à une autre					X		X							X				3
		Mise en évidence de l'énantiomérisie				X							X	X						3
		Mise en évidence de la diastéréoisomérisie				X														1
Réponses sans lien avec les activités cognitives du système sémiotique de Cram	Citation des atomes (1) ou des représentations (2), fait penser la notion de stéréochimie (3)	3								1	1					2			4	
	Aucun Renseignement													X					1	

Tableau 31: propos des élèves concernant les renseignements pouvant être tirés du dessin de la molécule dans le registre de Cram

	Gestes déictiques	Gestes métaphoriques
E1		
E2		
E3	x	
E4		
E5	x	x
E6	x	
E7		
E8	x	
E9		
E10		
E11		
E12		
E13		x
E14		
E15		
E16	x	
Total	5	2

Tableau 32: gestes accompagnant les propos des élèves concernant les renseignements pouvant être tirés du dessin de la molécule dans le registre de Cram

Analyse des résultats à la question 1.b

L'examen du tableau 32 montre que six élèves (E3, E5, E6, E8, E13 et E16) utilisent des gestes déictiques et/ou métaphoriques. E5 emploie les deux types de gestes. E13 ne fait que des gestes métaphoriques ; E3, E6, E8 et E16 que des gestes déictiques.

Dix élèves (E1, E2, E4, E7, E9, E10, E11, E12, E14, et E15) n'ont esquissé aucun geste (cf. tableau 32).

Les gestes déictiques sont utilisés lors de la lecture ou lors des explications pour désigner les symboles d'atomes ou les traits de liaison sur la représentation de Cram. Nous reviendrons sur les gestes métaphoriques dans ce qui suit.

L'examen du tableau 31 indique que les renseignements donnés par quatre élèves (E3, E6, E15, et E16) font partie de l'activité de communication du système sémiotique de Cram. Trois

(E3, E6 et E16) énoncent la signification des traits de liaison. E15 ajoute que le dessin indique la position des atomes dans l'espace.

Les opinions de six élèves (E4, E5, E7, E10, E11 et E13) portent sur certaines activités de traitement dans le système sémiotique de Cram: renseignements sur la stéréoisométrie de conformation (E5, E7 et E13), l'énantiométrie (E4, E10 et E11) et la diastéréoisométrie (E4). E5 et E13 utilisent des gestes métaphoriques GM1 pour indiquer la possibilité de rotation d'un groupement d'atomes autour de l'axe de la liaison C—C. Leurs gestes sont cohérents avec leur description.

Les déclarations de cinq élèves (E1, E8, E9, E12 et E14) n'ont pas de lien avec les activités de communication, de traitement ou de conversion dans le système sémiotique de Cram. E12 estime qu'aucun renseignement ne peut être extrait du dessin fourni. E8 et E9 citent simplement les atomes représentés sur le dessin, E14 les types de représentation. E1 déclare que le dessin lui fait penser à la stéréochimie.

Ces résultats montrent que les renseignements pouvant être extraits de la représentation spatiale d'une molécule ne sont pas connus de tous les élèves.

A la question 1.a, la réponse de E6 est classée dans la catégorie autre, et E16 a déclaré que le dessin est une molécule. Le fait d'indiquer la signification traits de liaison (ou de dire que le dessin indique la position des liaisons dans l'espace) nous laisse supposer qu'ils savent que le dessin est en trois dimensions.

Résumé

Les points de vue des élèves à propos de la signification du dessin de la molécule sont disparates. Six (E1, E3, E4, E8, E12 et E15) estiment que c'est une représentation spatiale de la molécule, par contre deux (E2 et E14) lui donnent une signification partielle : représentation. E16 déclare à tort qu'il s'agit d'une molécule. Un seul (E9) attribue faussement au dessin, une dimension plane.

Les deux tiers d'élèves connaissent partiellement les renseignements pouvant être tirés du dessin : la structure spatiale de la molécule, la stéréoisométrie conformationnelle et la stéréoisométrie configurationnelle. Seul un tiers des élèves semble ne pas les connaître.

Ces résultats montrent que les activités de communication que permet le système sémiotique de Cram ne sont pas connues de certains élèves. Quelques-uns ne parviennent pas également à exprimer des activités de traitement.

III.3.5.2. Sur la conversion inter registre Cram Newman

La question 2 porte sur le type de raisonnement, spatial ou non-spatial, utilisé par les élèves pour réaliser l'opération de conversion inter registre Cram Newman. Il est demandé d'identifier parmi une série de quatre représentations de Newman, celle(s) pouvant être obtenue(s) à partir d'une représentation spatiale de molécule fournie.

Les tableaux 33 et 34 présentent les réponses et gestes d'élèves:

Représentations de Newman choisies	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	Total
1				x	x	x		x				x	x				7
2	x	x	x	x		x				x						x	7
3		x		x		x	x			x	x	x					8
4	x		x	x	x	x	x	x					x	x			9
Pas de réponse															x		1

Tableau 33: répartition des réponses d'élèves à la question 2.a

Cellules colorées : choix corrects

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	Total
Gestes déictiques				x				x	x				x			x	5
Gestes métaphoriques		x		x													2

Tableau 34:gestes accompagnant les propos des élèves concernant la conversion inter registre Cram Newman à la question 2.a

Quinze élèves (E1 à E14, et E16) répondent à la question posée, et un seul (E15²⁴) déclare ne pas en être capable.

Deux élèves (E1 et E3) choisissent les deux représentations de Newman attendues (cf. tableau 33). Deux autres (E14 et E16) estiment qu'une seule représentation de Newman peut être obtenue à partir de la représentation spatiale fournie; il s'agit de l'une des représentations correctes attendues. Huit (E2, E4, E5, E6, E7, E8, E10 et E13) se trompent sur au moins un de leur choix, et trois (E9, E11 et E12) ne donnent aucune des réponses correctes attendues.

Deux catégories de geste sont notées : déictiques et métaphoriques (cf. tableau 34).

Seuls six élèves (E2, E4, E8, E9, E13 et E16) accompagnent leurs propos de gestes déictiques (cf. tableau 34). Ces gestes arrivent lors de l'identification des atomes de carbone et leurs substituants dans la représentation spatiale et les représentations de Newman. Certains, E4, E13, et E16 utilisent des gestes déictiques pour indiquer l'axe de la liaison C—C dans la représentation spatiale, et, E1, E8, E9, l'observation de la représentation de Cram suivant cet axe à bon escient.

Deux élèves (E2 et E4) ont recours à des gestes métaphoriques, E2 pour préciser une rotation autour de l'axe C—C d'une représentation de Newman (GM1), E4, la direction du trait de liaison gras par rapport au plan de la feuille (GM2).

Pour répondre à la consigne, certains convertissent la représentation de Cram en représentation de Newman, et comparent cette dernière avec les représentations de Newman fournies (1^{ère} démarche : E1, E2 et E9). D'autres, procèdent directement à l'identification des représentations de Newman, et s'appuient sur des critères plus ou moins précis (2^{ème} démarche : E3, E4 à E8, E10 à E14, et E16). Nous présentons dans les paragraphes suivants les raisonnements des élèves.

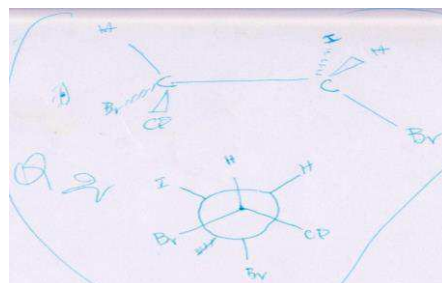
➤ **Elèves ayant procédé à la conversion inter registre Cram-Newman**

Parmi les élèves qui procèdent au préalable, à la conversion inter registre Cram-Newman, un seul (E1) s'appuie réellement sur la visualisation mentale de la représentation spatiale pour identifier les représentations de Newman correctes : son raisonnement est spatial. Les deux autres (E2 et E9) proposent des raisonnements non-spatiaux (ou analytiques) c'est-à-dire ne reposant pas sur une visualisation mentale de la représentation de Cram.

²⁴ Contrairement à E15, les cellules vides dans la colonne de E9 signifie qu'il déclare qu'aucune représentation de Newman ne peut être obtenue à partir de la représentation spatiale fournie.

Raisonnement spatial

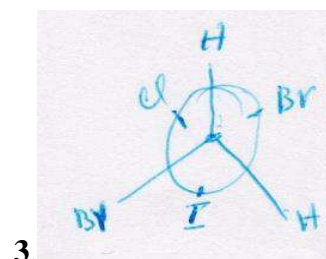
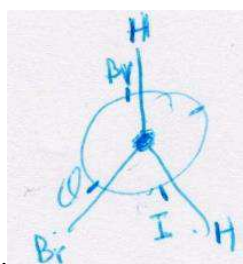
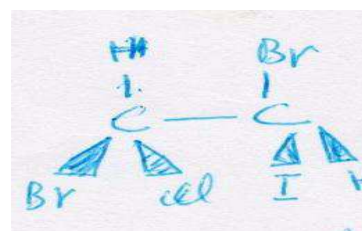
Le raisonnement spatial consiste à utiliser les deux observations, à gauche et à droite, suivant l'axe C—C de la représentation spatiale de la molécule. Et ne parle pas explicitement de projection des substituants des carbones sur un plan perpendiculaire à l'axe de la liaison C—C. Toutefois le dessin²⁵ de la représentation de Newman réalisé (voir ci-contre) ou le repérage des représentations de Newman correctes suppose qu'il l'effectue. Cet élève fait preuve d'une bonne maîtrise de la méthode de conversion inter registre, ce qui traduit une bonne appréhension des trois aspects d'une visualisation mentale de la représentation de la molécule: visualisation spatiale, orientation spatiale et relation spatiale (projection mentale).



Raisonnements non-spatiaux

Nous recensons trois types de raisonnements non-spatiaux.

Le premier (E2) est très confus: la conformation décalée de la représentation de Cram fournie est d'abord changée en éclipsée (cf. dessin 1 ci-contre²⁶), cette dernière est ensuite transformée en représentation de Newman (cf. dessin 2), puis une rotation de 60° des substituants du carbone éloigné, autour de l'axe C—C, est réalisée. Son auteur (E2) n'arrive pas à expliquer comment il réalise ces différentes étapes, et pourquoi il les fait. Il choisit la représentation de Newman 2, alors qu'elle est différente de celle trouvée (dessin 3), et ce, sans donner plus d'explication. Pour justifier son second choix, celui de la représentation de Newman 3, il affirme dans un premier



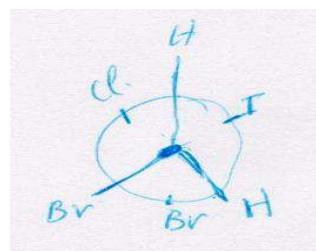
²⁵ Le dessin montre une observation de la représentation de Cram depuis la gauche, l'observation à droite est décrite oralement.

²⁶ Nous faisons remarquer que les conventions de représentation des traits de liaison ne sont pas respectées.

temps que la démarche est la même. Il suffit, selon lui, de juste tourner les substituants d'un des carbones de la représentation de Newman 2 autour de l'axe C—C.

Pour mieux comprendre son raisonnement, nous lui demandons de le réexpliquer. Il en propose alors un autre (deuxième raisonnement), certainement parce qu'il remarque que le premier n'est pas concluant.

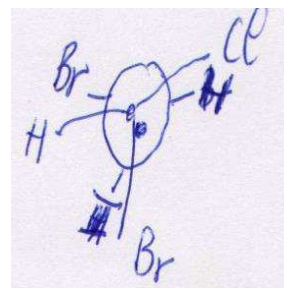
Dans le deuxième raisonnement (E2), les atomes situés sur des traits de liaison de même symbolisme dans la représentation de Cram sont répartis diamétralement opposés dans la représentation de Newman (cf. dessin 4 ci-contre réalisé par E2). Bien que la représentation de Newman trouvée (dessin 4) soit différente de la représentation de Newman 3, E2 les trouve identiques. Ses considérations sur les positions des atomes, nous laisse supposer qu'il regarde cette



4.

fois-ci la représentation de Cram suivant l'axe C—C, et l'a voit comme une figure plane. E2 déclare également qu'en représentation de Newman, le point au centre du cercle représente les deux atomes de carbone, le cercle sert simplement de support aux traits de liaison. Son raisonnement montre un réel problème de méthode de conversion inter registre Cram Newman. Cette dernière n'est pas connue, ainsi que les conventions de représentation en Newman.

Le troisième raisonnement (E9) consiste à regarder la représentation de Cram à gauche, ceci dans le but de trouver le symbolisme des carbones dans le registre de Newman : le plus proche est représenté par un point, et le plus éloigné par un cercle. La conformation décalée initiale (en représentation de Cram) est changée en éclipsée (en représentation de Newman), et les substituants des carbones sont distribués aléatoirement (voir dessin ci-contre²⁷). Ce raisonnement indique que la méthode de



Dessin réalisé par E9

conversion inter registre Cram Newman n'est pas maîtrisée. Le geste métaphorique GM1 utilisé, pour préciser une rotation autour de l'axe C—C d'une représentation de Newman, a un rôle indicatif de la consigne, il ne sert pas d'appui à un raisonnement spatial correct.

²⁷ Sur le dessin, la configuration du premier carbone est respecté, mais selon les déclarations de l'élève, cette répartition est aléatoire, c'est donc un pur hasard.

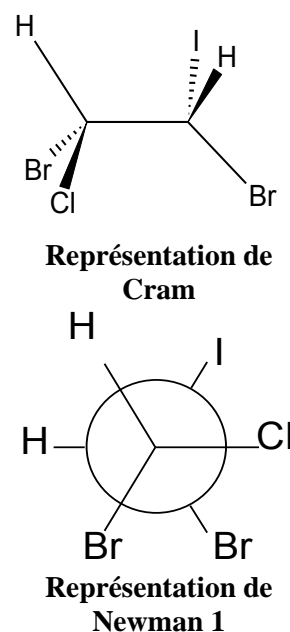
➤ **Elèves n'ayant pas procédé à la conversion inter registre Cram Newman**

Nous inventorions trois types de raisonnements chez ces élèves (E3, E4 à E8, E10 à E14, et E16).

Dans le premier, le critère d'identification des représentations de Newman pouvant être obtenue à partir de la représentation de Cram fournie, est l'identité de la forme globale des représentations (forme décalée) dans les deux registres²⁸ (E3 et E13). Ils choisissent les représentations de Newman, respectivement, 2 et 4, 1 et 4. E3 considère les représentations de Newman 1 et 3 incorrectes parce que les angles entre les traits de liaison C—Subs sont différents de 120°. Il convient de préciser qu'ils sont bien égaux à 120°, mais que le positionnement des traits de liaison diffère de celui rencontré dans les deux autres représentations de Newman (présence d'un trait de liaison vertical dans les représentations de Newman 2 et 4, et absence de trait de liaison vertical dans les représentations de Newman 1 et 3). L'absence d'un trait de liaison vertical dans les représentations de Newman perturbe peut-être ses points de repère. E13 ne choisit pas les représentations de Newman 2 et 3, car les substituants des carbones représentés par un point, ne sont pas identiques à ceux du carbone à gauche dans la représentation de Cram. Il pense que ce dernier correspond toujours au carbone symbolisé par un point.

Dans le deuxième raisonnement, les élèves (E4, E5, E6, E7 E8, E10, E11, E12 et E14) ne s'intéressent qu'à l'identité des substituants des carbones dans les deux registres sémiotiques.

- **L0** : [...] Expliquez-moi comment vous raisonnez ?
- **E5** : *Quand je prends ceci (montre la représentation de Cram), le carbone qui est au milieu (montre le point sur la représentation de Newman 1), je prends la première représentation, le carbone au milieu, c'est ce qui est ici (à gauche dans la représentation de Cram), le H est là, notre Br est là, le chlore qui est aussi là (indique les substituants du carbone à gauche dans la représentation de Cram dans celle de Newman). Maintenant pour le second (carbone à droite dans la représentation de Cram), j'ai mon H qui est ici, le Br qui est là, et le I ici (indique les substituants du carbone à droite dans la représentation de Cram dans celle de Newman).*



²⁸ Les élèves ne choisissent que les représentations de Newman de forme globale identique à celle de la représentation de Cram, c'est-à-dire de forme étoilée

A priori, s'appuyer sur un tel raisonnement conduirait à considérer toutes les représentations de Newman fournies correctes ; ce que font E4 et E6. Plusieurs raisons expliquent pourquoi certains élèves n'ont pas choisi les quatre représentations de Newman.

- E5 et E8 n'admettent pas les représentations 2 et 3 parce que les carbones proches ne correspondent pas au carbone à gauche dans la représentation de Cram. Ils raisonnent comme si on leur avait appris à regarder la représentation de Cram seulement à gauche.
- E7, E10, E11, E12 et E14 n'arrivent pas à expliquer pourquoi il est impossible d'obtenir les représentations, respectivement (1 et 2), (1 et 4), (2 et 4), (2 et 4), (1, 2 et 3).

Nous précisons que certains (E6, E8, et E14) déclarent avoir observé la représentation de Cram, à gauche, suivant l'axe de la liaison C—C. Ces déclarations ne sont pas suivies d'une visualisation mentale de la représentation de Cram. Elles ont pour but de repérer les carbones proche et éloigné dans la représentation de Newman.

Ces deux premiers raisonnements nous laissent supposer que pour réaliser la conversion inter registre Cram Newman, les élèves dessinent en représentation de Newman, une forme globale, éclipsée ou décalée, identique à celle de Cram, puis répartissent les substituants des carbones aléatoirement. L'impact que peut avoir la position de l'observateur sur la disposition des substituants en représentation de Newman est ignoré. Quelques-uns (E5, E8, E13 et E14 par exemple), symbolisent nécessairement le carbone à gauche dans la représentation de Cram, par un point dans la représentation de Newman, et celui à droite, par un cercle.

Dans le troisième raisonnement, l'élève E16 déclare qu'en tournant le groupement CHBrCl de la représentation spatiale autour de l'axe C—C dans le sens horaire, on obtient la représentation de Newman 2, sans préciser la valeur de l'angle de rotation. L'opération de rotation autour de l'axe C—C avant de passer de la représentation de Cram à celle de Newman n'est pas fondée, car une simple observation à droite suivant l'axe C—C de la représentation de Cram permet d'identifier les positions des substituants des carbones, et de les identifier dans la représentation de Newman 2. Son choix est peut-être un effet du hasard. Lorsqu'on lui demande pourquoi il ne choisit pas la représentation de Newman 3 par exemple, il explique que dans cette représentation, les substituants des carbones sont trop rapprochés les uns des autres. Cela suppose que les angles entre les traits de liaison ne sont pas respectés. Ce raisonnement est peut-être dû au fait que dans cette représentation, il n'y a pas de trait de liaison vertical. Ses capacités d'analyse sont perturbées par cette présentation de la représentation de Newman, à laquelle il

n'est peut-être pas habitué, et à l'impression que les angles entre les traits de liaison ont été réduits.

Comme nous le soulignons dans notre cadre méthodologique, une question portant sur l'observation de la représentation de Cram à gauche et à droite lors de la conversion inter registre Cram Newman a été ajoutée. Excepté E1, tous les élèves interrogés déclarent n'avoir jamais entendu parler d'une observation à droite. Cela peut être dû au fait que les enseignants et le manuel scolaire n'utilisent qu'une observation à gauche. Ce qui expliquerait peut-être pourquoi certains n'ont pas pris en compte cet aspect dans leur raisonnement.

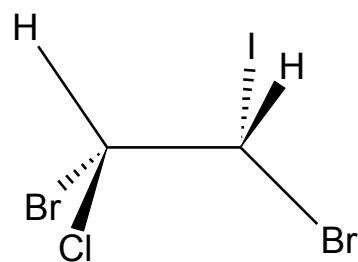
Résumé

Un seul élève identifie les représentations de Newman attendues, et tient un raisonnement spatial correct. La majorité se trompe dans le choix des représentations de Newman, parce qu'elle ne connaît pas la méthode de conversion inter registre Cram-Newman. Ils proposent des raisonnements non-spatiaux incorrects. L'absence d'un trait de liaison vertical dans les représentations de Newman perturbe les points de repère de certains, et les empêche d'identifier la valeur des angles entre les traits de liaison des carbones adjacents.

III.3.5.3. Sur la visualisation des positions des traits de liaison

La question 3 porte sur la visualisation dans l'espace des positions des traits de liaison de deux carbones adjacents lorsque l'observateur est placé suivant l'axe C—C. Elle comprend deux aspects : la visualisation des traits de liaison éclipsés ou pas, et la visualisation de leur position selon qu'ils sont à gauche ou à droite de l'observateur.

A la question 3.a, nous demandons aux élèves, comment ils voient la représentation ci-contre, lorsqu'ils sont à sa gauche et la regarde suivant l'axe de la liaison C—C. En l'absence de précision sur la position des traits de liaisons, nous redemandons s'il peut y avoir des traits qui en cachent d'autres (question 3.b), et s'il y a des traits sur leur gauche ou leur droite (question 3.c).



Nous n'avons pas obtenu de réponses indiquant les positions de trait de liaisons à la question 3.a. Nous avons donc enchaîné avec les deux autres.

➤ Visualisation des traits de liaison éclipsés

Cette partie porte sur les réponses à la question 3.b. Il convient de souligner que nous ne nous intéressons ici qu'aux substituants des atomes de carbone. Aussi, les déclarations qui mentionnent que l'atome de carbone éloigné est caché par l'atome de carbone proche ne sont pas prises en compte dans nos analyses.

Catégorisation et proportions des productions verbales et gestuelles

Productions verbales

Les réponses ont été regroupées en deux grandes catégories : traits de liaison décalés et traits de liaison éclipsés

- **Traits de liaison décalés (C1):** réponses qui estiment qu'aucun trait n'en cache un autre. C'est la réponse correcte attendue.
- **Traits de liaison éclipsés (C2) :** propos considérant qu'au moins un des traits de liaison peut en cacher un autre. Nous distinguons dans cette catégorie, d'une part ceux qui estiment que les atomes cachés sont ceux du carbone éloigné (C2a), et d'autre part ceux qui considèrent au moins un des traits du carbone proche caché par un trait du carbone éloigné (C2b) (par exemple *E13* : *Ici par exemple, ça* (trait portant le Br du carbone à gauche) *et ça* (le trait portant le Br du carbone à droite); *et puis ce trait aussi* (trait portant le Br du carbone à droite) *cache le trait là* (trait portant le Cl du carbone à gauche).

Productions gestuelles

Nous relevons d'une part des gestes déictiques et d'autre part des gestes procéduraux.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16
Traits de liaison décalés (C1)			x			x	x				x	x				x
Traits de liaison éclipsés (C2)	C2a			x				x	x							
	C2b	x	x			x				x			x	x	x	

Tableau 35: réponses d'élèves à propos des traits de liaison décalés ou éclipsés

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	total
Gestes déictiques	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x	x	13
Gestes procéduraux		x				x	x										3

Tableau 36: gestes accompagnant les propos des élèves concernant la visualisation des traits de liaison éclipsés

Analyse des réponses

L'examen du tableau 36 montre que treize élèves (de E1 à E9, et de E13 à E16) utilisent des gestes déictiques. Trois (E2, E6 et E7) font également des gestes procéduraux. Par contre les raisonnements de trois autres (E10, E11 et E12) ne sont pas accompagnés de gestes.

Les gestes déictiques sont associés à la désignation des symboles d'atomes ou des traits de liaison éclipsés ou pas. E3 et E4 les emploient également pour montrer, sur la feuille, leur position à gauche suivant l'axe C—C.

E2, E6 et E7 font usage de gestes procéduraux (GP1). Ils se penchent à gauche et observent la représentation de Cram suivant l'axe C—C.

Six élèves (E3, E6, E7, E11, E12 et E16) donnent la réponse correcte attendue (C1). Ils estiment qu'aucun trait de liaison n'en cache un autre. Le geste procédural GP1 utilisé par E6 et E7 a donc servi d'appui à une visualisation mentale des traits de liaison réussie.

Dix (E1, E2, E4, E5, E8, E9, E10, E13, E14, E15) déclarent que des traits de liaison peuvent en cacher d'autres, lorsque la représentation de molécule est observée suivant l'axe C—C (C2). Le geste procédural GP1 réalisé par E2 ne lui a pas permis la visualisation mentale des traits de liaison.

Trois d'entre eux pensent que les traits de liaison cachés sont ceux du carbone éloigné (C2a) : pour E4 et E9, chaque trait du carbone proche cache le trait du carbone éloigné symbolisé de la même façon ; pour E8, seul le trait de liaison hachuré du carbone éloigné est éclipsé par le trait de liaison hachuré du carbone proche (C2a). Ils s'appuient certainement sur les types de traits de liaison ; en clair, pour eux les traits de liaison identiques s'éclipsent d'emblée, ils ne procèdent donc pas à une visualisation mentale de la représentation de la molécule. Les capacités de visualisation spatiale et d'orientation spatiale leur font défaut.

Sept autres (E1, E2, E5, E10, E13, E14 et E15) considèrent à la fois un trait de liaison du carbone proche éclipsé par un autre trait de liaison du carbone éloigné, et un trait de liaison du carbone éloigné caché par un autre trait de liaison du carbone proche (C2b). Ces réponses ne reposent pas sur une visualisation mentale de la représentation de la molécule. En effet pour une seule observation de la représentation de la molécule, suivant l'axe C—C, il est impossible de voir les substituants du carbone proche cachés par ceux du carbone éloigné. Ils répondent peut-être aléatoirement, et ce, parce qu'ils n'ont pas d'orientation spatiale.

En résumé, la plupart des élèves donne des réponses erronées, et leurs explications montrent qu'ils n'ont pas de capacités d'orientation spatiale.

➤ **Visualisation des positions des traits de liaison selon qu'ils sont à gauche ou à droite de l'élève observateur**

Nous nous intéressons ici aux réponses d'élèves à la question 3.c. la représentation de Cram fournie est observée à gauche suivant l'axe de la liaison C—C, la réponse correcte attendue est : traits de liaison gras à droite, traits de liaison hachurés à gauche.

Catégorisation et répartition des productions verbales et gestuelles

Productions verbales

Nous identifions trois catégories de réponses :

- **Attribution correcte de la position des traits de liaison** : réponses qui stipulent que les traits de liaison gras et hachurés sont respectivement à droite et à gauche de chaque carbone
- **permutation de la position des traits de liaison gras et hachuré du carbone proche** : réponses qui considèrent les traits de liaison gras et hachuré du carbone proche respectivement, à gauche et à droite, et ceux du carbone éloigné, respectivement à droite et à gauche.
- **Absence de traits à gauche et à droite** : réponses qui estiment qu'il n'y a pas de traits de liaison à gauche ou à droite.
- **Traits simples à gauche et/ou à droite** : réponses qui estiment qu'un trait de liaison simple est à gauche et/ou à droite. Par exemple
 - *L0 : Quels sont les traits à votre gauche ?*

- **E16** : *Le H (du carbone à gauche) est à gauche, et le Cl à droite (les montre à chaque fois).*
- **L0** : *Est-ce qu'il y a d'autres traits ?*
- **E16** : *Le H toujours (du carbone à droite) est à gauche, et le Br à droite (du carbone à droite, montre à chaque fois les symboles d'atomes).*

Productions gestuelles

Nous distinguons des gestes déictiques et des gestes procéduraux.

Catégories	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	total
Attribution correcte de la position des traits de liaison			X														1
Permutation de la position des traits de liaison gras et hachuré du carbone proche												X					1
Absence de traits à gauche et à droite								X		X			X				3
Traits simples à gauche et/ou à droite	X	x		x	X	X	x		X		x			X	X	x	11

Tableau 37: catégories de réponses à propos de la visualisation des traits de liaison à gauche ou à droite
Cellules colorées : réponse correcte attendue

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	total
Gestes déictiques	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	X		x	x	X	14
Gestes procéduraux	x	X					x										3

Tableau 38: gestes accompagnant les propos des élèves concernant la visualisation des traits de liaison éclipés à la question 3.b

Analyse des réponses

Onze élèves (E3 à E6, E9 à E12, E14 à E16) utilisent des gestes déictiques pour indiquer la position des atomes ou des traits de liaison sur la feuille. L'un d'entre eux (E10) l'a aussi utilisé pour montrer, sur la feuille, la position de l'observateur à gauche suivant l'axe C—C.

Trois (E1, E2, et E7) usent de gestes procéduraux, ils se sont penchés pour regarder la représentation spatiale fournie, suivant l'axe C—C, sur le papier (GP1).

Les raisonnements de deux autres (E8 et E13) ne sont pas suivis de gestes.

Le tableau 37 montre qu'un seul élève, E3, donne un point de vue conforme à la réponse correcte attendue.

Un autre, E12, permute les positions des traits de liaison gras et hachuré du carbone proche. Il donne néanmoins leur position exacte dans le cas du carbone éloigné. Il visualise certainement mieux les traits de liaison du carbone éloigné que ceux du carbone proche.

La plupart (E1, E2, E4, E5, E6, E7, E9, E11, E14, E15, et E16) déclare que le trait de liaison simple pouvait être vu à gauche et/ou à droite. Etant donné que ce trait de liaison est dans l'axe du regard, qui est celui de l'axe C—C, il ne peut en aucun cas être vu à gauche ou à droite par l'observateur. Nous pouvons conjecturer que ces élèves ne sont pas parvenus à s'orienter spatialement. E9, E14, E15 et E16 par exemple, ne prennent en compte que les traits de liaison gras et en tiret simple dans leur raisonnement. E15 et E16 déclarent que le trait de liaison hachuré de chacun des carbones n'était pas visible, parce qu'il est caché par le trait de liaison gras. Une telle observation n'est pas possible si on regarde la représentation spatiale de la molécule, telle qu'elle est présentée, face à la feuille. Cela confirme bien que certains ont du mal à s'orienter spatialement. Le geste procédural (GP1) utilisé par E1, E2, et E7 ne leur permet pas de bien visualiser la représentation spatiale.

Trois élèves (E8, E10 et E13) déclarent qu'il n'y a pas de trait à gauche ou à droite. Nous pouvons supposer qu'ils voient la représentation de Cram comme une représentation plane.

Cohérence des réponses aux sous-questions 3.b et 3.c

A la question 3.b, six élèves (E3, E6, E7, E11, E12 et E16) déclarent qu'aucun trait de liaison n'en cache un autre, lorsqu'on observe la représentation spatiale de la molécule suivant l'axe C—C.

A la question 3.c, un seul (E3) repère avec exactitude les positions des traits de liaison gras et hachuré, toujours en regardant la représentation de Cram à gauche suivant l'axe C—C. Il est

cohérent dans sa réponse. Les cinq autres (E6, E7, E11, E12 et E16) estiment que le trait de liaison en tiret simple peut être vu à gauche et/ou à droite du plan de la feuille ; nous présumons que leurs réponses aux deux sous-questions 3.b et 3.c ne reposent pas sur une visualisation mentale de la représentation de la molécule, et qu'elles sont peut-être aléatoires. Ces résultats montrent que leurs capacités d'orientation spatiale sont défectueuses.

Le geste procédural (GP1) réalisé par certains d'entre eux (E6 et E7) ne conduit donc pas à une représentation mentale de la molécule. En ce qui concerne E7, cela est évident, puisqu'il ne sait pas que la représentation est en 3D (l'analyse de ses propos à la question 2 révèle qu'il voit la représentation comme une figure plane). Par contre E6 sait que la représentation est tridimensionnelle (cf. analyse question 1.b), donc nous supposons qu'il n'arrive pas à visualiser la représentation dans l'espace : il présente une incapacité d'orientation spatiale.

Les réponses des autres (E1, E2, E4, E5, E8, E9, E10, E13, E14 et E15) sont incorrectes aux deux sous-questions. Pour certains (E2, E7, E8, E9, E10 et E13) l'absence de visualisation spatiale de la représentation de la molécule est avérée, car ils la voient plane. Pour d'autres (E1, E4, E8 et E15), il s'agit d'une incapacité d'orientation spatiale, puisqu'ils savent que la représentation est tridimensionnelle (cf. question 1).

Discussion autour des résultats des questions 2 et 3

A la question 2, seul E1 réalise la conversion inter registre Cram Newman en utilisant un raisonnement spatial, et ce, sans se tromper. Il n'indique pas les positions exactes des traits de liaisons des carbones adjacents à la question 3, ce qui est curieux : pour y répondre, il se montre très hésitant. Le fait que la même représentation de Cram soit présentée dans les deux questions l'incite peut-être à proposer, par crainte d'erreur, une réponse différente de celle donnée à la question 2.

Pour identifier les représentations de Newman pouvant être obtenues à partir de la représentation de Cram (question 2), E3 s'appuie, à tort, sur l'identité de la forme de ces deux modes de représentation. A la question 3, il fait preuve d'une bonne capacité de visualisation spatiale des substituants et d'orientation spatiale. Ne pas utiliser un raisonnement spatial pour passer de la représentation de Cram à celle de Newman à la question 2, nous laisse présager qu'il ne le connaît pas.

A la question 3, la plupart des élèves voient, soit la représentation de Cram comme une représentation plane, soit échouent dans la visualisation spatiale des traits de liaison des

carbones. Cela peut expliquer pourquoi ils optent pour un raisonnement analytique à la question 2. Dans le cas contraire, c'est le raisonnement spatial qui n'est pas connu.

Confrontation des résultats avec ceux des études 1 (question 2.b) et 2 (question 4)

L'étude 3, question 2, a mis en évidence l'existence de deux raisonnements, chez les élèves, lors de la conversion inter registre Cram Newman : spatial et analytique. Toutefois un seul d'entre eux est l'auteur d'un raisonnement spatial.

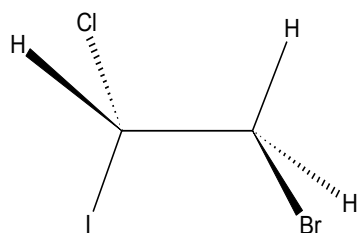
Les résultats de l'étude 3, montrent que les capacités d'orientation spatiale font défaut à la plupart des élèves. D'autres voient la représentation de Cram comme une représentation plane. De plus ils n'ont jamais observé la représentation de Cram à droite. Ces défauts de raisonnement peuvent justifier, pourquoi à l'étude 2, aucun élève n'a donné la réponse attendue à la question 4, puisqu'elle nécessite une visualisation mentale de la représentation de Cram. La plupart d'entre eux emploient plutôt des raisonnements analytiques erronés ne correspondant pas à celui inféré dans l'étude 1 (cf. § III.1.5.2.). Une analyse d'entretiens menés sur un échantillon d'élèves plus grand, permettra peut-être de mettre en évidence le raisonnement spatial de double regard et le raisonnement analytique déduits au paragraphe III.1.5.2.

III.3.5.4. Sur le passage d'une conformation de molécule à une autre dans le registre de Cram

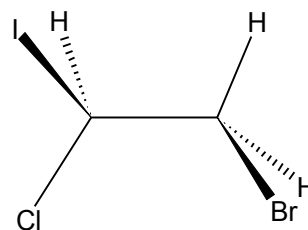
Nous demandons dans la question 4, la représentation de Cram pouvant être obtenue à partir d'une rotation de 60° autour de l'axe C—C du groupement CHCl de la molécule CHCl—CH₂Br, également en représentation de Cram, et le raisonnement utilisé.

Catégorisation des réponses

Selon que le sens de la rotation est horaire ou antihoraire, on obtient deux représentations spatiales différentes (conformation décalée). Les dessins ci-dessous sont les réponses attendues.



Dessin obtenu après rotation de 60° dans le sens horaire



Dessin obtenu après rotation de 60° dans le sens anti horaire

Les productions écrites sont de deux types : représentations de Cram et représentations de Newman. Nous distinguons dans les « représentations de Cram » des représentations de conformations décalées et éclipsées.

Nous différencions uniquement des gestes déictiques et métaphoriques.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	total
Gestes déictiques	x	x		x		x			x	x					x	x	8
Gestes métaphoriques	x	x			x	x	x			x	x						7

Tableau 39: gestes accompagnant les propos des élèves concernant l'opération de rotation mentale

Analyse des réponses

Excepté E8, tous les élèves répondent à la question. Nous analysons dans l'ordre, les gestes ayant accompagné leurs propos, les représentations de Cram, et les raisonnements proposés.

➤ Caractéristiques des gestes

Huit élèves (E1, E2, E4, E6, E9, E10, E15 et E16) utilisent des gestes déictiques (cf. tableau 39). Six d'entre eux (E1, E2, E4, E6, E10 et E1) les font pour montrer les atomes ou les traits de liaison sur la feuille, l'un (E16) pour indiquer le plan de la feuille et la région de l'espace située en avant de ce plan, et deux (E9 et E15) pour désigner la position de l'observateur à gauche suivant l'axe C—C, sur la feuille.

Sept (E1, E2, E5, E6, E7, E10, et E11) se servent des gestes métaphoriques. Ils s'appuient tous sur le geste métaphorique GM1 pour montrer la rotation autour d'un axe. Cinq d'entre eux (E1, E2, E5, E10 et E11) utilisent le sens anti horaire; E6 et E7 le sens horaire.

Cinq (E3, E8, E12, E13 et E14) ne réalisent aucun geste.

➤ Caractéristiques des représentations de Cram

Aucun élève ne dessine la représentation de Cram attendue.

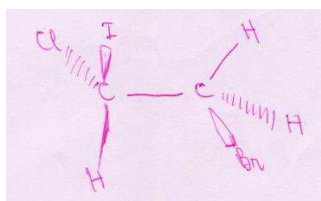
Douze (E1 à E7, E10, E12, E13, E15 et E16) esquissent des représentations de Cram; trois (E9, E11 et E14), celles de Newman, et déclarent ne pas pouvoir le faire dans le registre de Cram. Un seul (E8) ne propose pas de représentation, et estime qu'une rotation de 60° autour

de l'axe C—C est impossible, cela impliquerait la rupture de la liaison C—C ; selon lui, seule une rotation de 120° est possible.

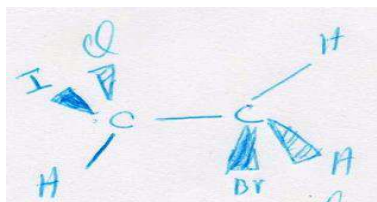
Parmi les représentations de Cram, figurent trois conformations décalées (E2, E3 et E13) et neuf conformations éclipsées (E1, E4 à E7, E10, E12, E15 et E16).

○ Conformations décalées

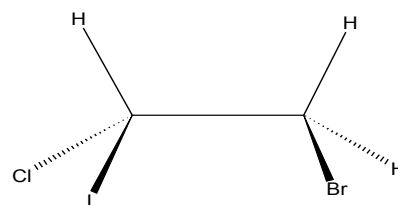
Les représentations de Cram des conformations décalées proposées par E2 et E3 sont celles d'une molécule différente de la molécule initiale par leur configuration. De plus, celle dessinée par E3 ne respecte pas les positions des traits de liaison gras et hachuré (Pellegrin, 1999, Pellegrin et al., 2003)



Dessin proposé par E3

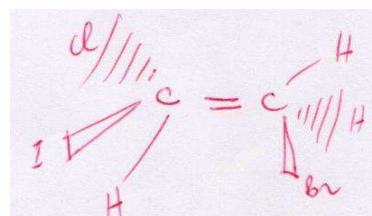


Dessin proposé par E2



Représentation initiale

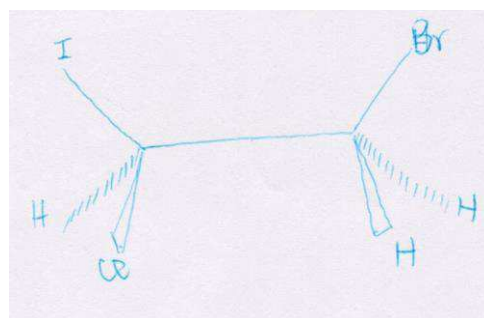
E13 ne respecte pas la valence des carbones et la valeur des angles entre les traits de liaison.



Dessin proposé par E13

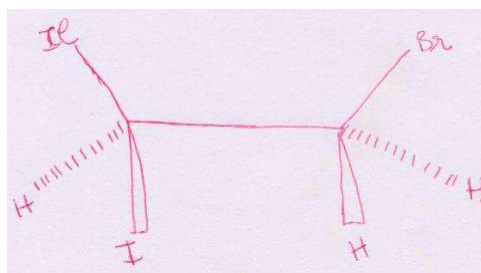
○ Conformations éclipsées

Trois élèves (E4, E6 et E16) représentent des conformations éclipsées d'une molécule identique à celle proposée.



Dessin proposé par E6 par exemple

Les représentations de six autres (E1, E5, E7, E10, E12, E15) sont par contre celles des conformations éclipsées d'une molécule différente de celle proposée (leur configuration est opposée à celle de la molécule initiale). Les angles entre les traits de liaison ne sont pas respectés par certains d'entre eux (E1, E5, E7 et E12).



Dessin proposé par E15 par exemple

➤ **Raisonnements des élèves ayant représenté la molécule dans le registre de Cram**

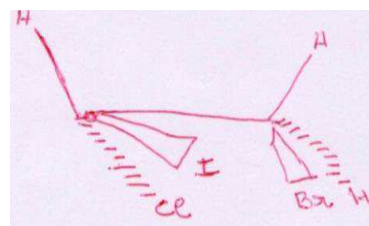
Deux élèves (E5 et E7) n'expliquent pas leur raisonnement. Quatre (E1, E2, E3 et E12) utilisent des raisonnements spatiaux, et six (E4, E6, E10, E13, E15 et E16) adoptent des raisonnements non-spatiaux ou analytiques.

Les raisonnements spatiaux recensés présentent des caractéristiques différentes.

Dans le premier, les élèves (E2 et E3) procèdent à la rotation du groupement CHCl autour de l'axe C—C, d'un angle qui s'avère égal à 180° . Les positions des traits de liaison gras et hachuré obtenues sont permutées, ce qui change la configuration de la représentation de Cram obtenue. Nous concluons que ces élèves ne connaissent pas la valeur des angles dièdres dans une conformation éclipsée. En outre, les capacités de rotation mentale leur font défaut.

Dans le deuxième, la rotation est faite autour de l'axe C—H²⁹ passant par le carbone du groupement CHCl (E1). L'axe de rotation C—C n'est donc pas identifié.

Enfin dans le troisième, à la suite de l'opération de rotation, les positions initiales des traits de liaison sont supposées inclinées (E12). L'angle de rotation n'est pas réussi, de plus la représentation de la molécule dans le registre de Cram, après l'opération de rotation, échoue.



Dessin proposé par E12

Les raisonnements non-spatiaux consistent à assimiler la rotation du groupement CHCl autour de l'axe C—C :

²⁹ Il s'agit du C et du H du groupement CHCl

- à une permutation circulaire des trois substituants H, I et Cl (E4, E6 et E16) ou des traits de liaison C—H, C—I et C—Cl (E13). E6 précise qu'il pense à un cercle et considère son angle égal à 180° , cela suppose qu'il estime à tort les angles dièdres dans une conformation éclipsée égaux à 60° . E4 et E16 ont peut-être eu les mêmes pensées.
- à la permutation des substituants situés sur les traits de liaison simple et hachuré (E15).
- à la représentation de l'image de la représentation de Cram fournie dans un miroir plan (E10). La rotation autour d'un axe est confondue avec la symétrie par rapport à un plan.

Nous rappelons qu'E1 et E2, se servent du geste métaphorique GM1 pour montrer la rotation autour d'un axe. Le fait de tenir un raisonnement spatial incorrect montre que ce geste ne sert pas de support à un raisonnement spatial correct. E6 et E10 utilisent également ce geste, mais tiennent un raisonnement non-spatial ; leur geste métaphorique a simplement un rôle indicatif de l'opération de rotation.

Résumé

Aucun élève ne donne la réponse attendue. Certains tentent de réaliser la rotation mentale de la représentation de Cram, mais en sont incapables. D'autres procèdent simplement à une permutation des substituants du carbone. Nous relevons des difficultés relatives à l'identification de l'axe de rotation (Tuckey et al., 1999) et au respect de l'angle de rotation.

➤ Confrontations des résultats avec ceux de l'étude 2 (question 2)

Aucun élève ne donne la réponse attendue dans les études 2 et 3. Les dessins proposés dans les deux études présentent des caractéristiques similaires. Le taux de dessins en conformation décalée est à chaque fois très inférieur à celui des dessins en conformation éclipsée : 9% contre 70% dans l'étude 2, 3 contre 9 dans l'étude 3.

- **Conformation décalée**

Des élèves de l'étude 3 réalisent la rotation dans le sens anti horaire, alors que ceux de l'étude 2 utilisent le sens horaire proposé. Dans des deux études certains inversent la configuration de la représentation de la molécule (étude 2 : C1b, 5%, étude 3 : 2 élèves). Nous avons supposé dans l'étude 2, que la rotation mentale n'était pas réussie (1^{er} cas) ; cela peut être confirmé par les résultats de l'étude 3.

- **Conformation éclipsée**

Dans les deux études, certains élèves produisent des conformations éclipsées d'une molécule identique à celle proposée (étude 1 : C2a, 9%, étude 3 : 3 élèves). L'explication des

raisonnements d'élèves interrogés dans l'étude 3 montre qu'ils réalisent une permutation circulaire de substituants du carbone. Ils considèrent, à tort, que les angles dièdres dans une conformation éclipsée valent chacun 60° . La rotation mentale n'est donc pas effective. Cela va dans le même sens que l'hypothèse avancée à propos des élèves de l'étude 2.

Les conformations éclipsées de 57% (C2b) et de 7 élèves, respectivement des études 2 et 3, ont une configuration différente de la représentation de la molécule initiale. L'explication des raisonnements d'élèves interrogés dans l'étude 3, révèle que certains se trompent d'axe de rotation, d'autres se contentent de permuter les substituants du carbone du groupe CHCl. Nous supposons que ceux de l'étude 2 ont également tenu des raisonnements inadéquats similaires.

III.3.5.5. Sur la manipulation et l'interprétation d'un modèle moléculaire

La question 5 porte sur la rotation autour de l'axe du bâton de liaison C—C d'un modèle moléculaire (5.a) et sa conversion en représentation spatiale (5.b).

➤ **Rotation autour de l'axe du bâton de liaison C—C**

Nous présentons, à la question 5.a, un modèle moléculaire du 2-bromo-1-chloro-1-iodoéthane (CHCl—CH₂Br) en conformation éclipsée et, après avoir présenté les boules correspondant à chaque atome, nous demandons de réaliser une rotation de 60° du groupement CHCl autour de l'axe du bâton de C—C. Le geste correct attendu consiste à ne tourner que le groupement demandé, et ce, en respectant l'angle de rotation, il s'agit d'un geste procédural.

Cinq élèves (E8, E9, E11, E14 et E15) ne répondent pas à la question. E8 avance la même raison qu'à la question 4 : impossibilité d'une rotation de 60° autour l'axe C—C. E11, E14 et E15 déclarent n'avoir jamais vu de modèle moléculaire ; quant à E9, il ne connaît pas la valeur des angles entre les bâtons de liaison (109°). Ce dernier semble confondre l'angle dièdre avec l'angle entre les bâtons de liaison.

- **Caractéristiques des gestes**

Le tableau ci-dessous regroupe les gestes accompagnant les propos des élèves.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E10	E12	E13	E16	total
Gestes déictiques	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	11
Gestes procéduraux	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	11

Tableau 40: gestes accompagnant les propos des élèves concernant la manipulation d'un modèle moléculaire à la question 5.a

Tous les élèves (11) ayant répondu à cette question réalisent des gestes procéduraux (cf. tableau 40). Ils utilisent également des gestes déictiques pour montrer les atomes dans le modèle moléculaire, et ce, pour accompagner leur raisonnement.

Parmi les gestes procéduraux, nous repérons des gestes consistant d'un côté à tourner le groupement CHCl ou CH₂Br autour de l'axe du bâton de liaison C—C (GP2), et d'un autre côté à tourner chacun de ces groupements (GP2) ou tout le modèle moléculaire (GP3). En outre, nous relevons des gestes de déboîtement du modèle moléculaire (GP4).

Sept élèves (E1 à E5, E12 et E13) tournent le groupement CHCl autour de l'axe du bâton de liaison C—C. E7 tourne plutôt le groupement CH₂Br, il n'est peut-être pas à l'aise dans l'identification des groupements.

E6 tourne chacun des groupements CHCl et CH₂Br, et E16 retourne le modèle moléculaire. E10 déboîte le modèle moléculaire, puis modifie les positions des bâtons de liaison C—I et C—Br. Ces élèves ont du mal à réaliser le geste procédural attendu, ce qui n'est pas étonnant puisqu'ils manipulent un modèle moléculaire pour la première fois..

- **Caractéristiques des angles de rotation**

Le sens de la rotation est variable. Sept élèves (E2, E3, E5, E6, E7, E12, et E16) effectuent la rotation dans le sens des aiguilles d'une montre ; les autres (E1, E4 et E13), dans le sens contraire.

Aucun d'eux ne réussit à tourner le groupement en respectant l'angle de rotation demandé (60°). Sept (E1, E3, E5, E6, E7, E12 et E16) réalisent un angle de rotation de 120°; trois (E2, E4 et E13), un angle de 180°. Ceci peut être dû à la difficulté d'appréciation de la valeur des angles dièdres ou de visualisation de l'angle de rotation demandé.

Nous rappelons qu'à la question 4 relative à l'opération de rotation de 60° autour de l'axe C—C dans le registre de Cram, aucun d'eux n'a également effectué l'angle de rotation demandé. Le caractère rustique des modèles moléculaires ne leur permet pas de rectifier l'erreur commise avec la représentation de Cram.

➤ **Conversion inter registre modèle moléculaire – Cram**

A la question 5.b, nous demandons de représenter le modèle moléculaire obtenu à la question précédente en représentation spatiale, puis d'expliquer le raisonnement. Nous nous intéressons uniquement aux onze élèves ayant répondu à la question 5.a.

• **Positions du modèle moléculaire par rapport à l'observateur**

Tous les élèves positionnent le modèle moléculaire de telle sorte que le plan vertical passant par l'axe C—C soit parallèle à leur plan frontal³⁰. Ils le regardent légèrement de haut. Le modèle moléculaire est à gauche de E1 et E16, ils le voient de droite. E2, E5, E6, E7, E10, et E13, le laissent à leur droite, ils le voient de gauche. E3, E4 et E12, le regardent légèrement de haut, frontalement (vue de dessus, cf. figure 26 p. 39).

Les modèles moléculaires de E1, E3, E4, E5, E6, E7, E10, 14 et E16 sont en conformation éclipsée ; ceux de E2 et E13 en conformation décalée.

• **Caractéristiques des représentations de Cram réalisées**

Cinq élèves (E4, E5, E6, E12 et E16) réussissent la symbolisation des bâtons de liaison en traits de liaison. Les bâtons de liaisons en avant, en arrière et dans le plan vertical passant par le bâton de liaison C—C, sont respectivement représentés par un trait gras, hachuré et simple.

Les représentations spatiales de E4 et E12 correspondent à des représentations spatiales correctes pouvant être obtenues par rapport à leur vue.

Celles de E5, E6 et E16 sont des représentations d'une vue de dessus, alors qu'ils auraient dû dessiner une vue de gauche (E5 et E6) et une vue de droite (E16). Ces élèves réalisent la conversion du modèle moléculaire en représentation spatiale sans prendre en compte la disposition des bâtons de liaison par rapport à la position de l'observateur. Ils n'en sont peut-être pas conscients.

Six élèves (E1, E2, E3, E7, E10 et E13) ne réussissent pas la symbolisation des bâtons de liaison en traits de liaison. E1, E2, E3 et E13 inversent les conventions de représentation des bâtons de liaisons en avant et en arrière du plan vertical passant par le bâton de liaison C—C: ils les

³⁰ Un plan frontal est un plan vertical transversal coupant le corps humain parallèlement au plan du front et le divisant en une partie antérieure et une partie postérieure

représentent, respectivement, par les traits de liaison hachuré, et gras. E7 représente les bâtons de liaison en avant du plan vertical par des traits simples, et E10 attribue les symboles au hasard.

- **Angles entre les traits de liaisons**

E1, E2, E3, E4, E12, E13 et E16, n'ont pas respecté la valeur des angles entre les traits de liaisons.

Résumé

La plupart des élèves ayant manipulé le modèle moléculaire tourne le groupement demandé (E1, E2, E3, E4, E5, E12 et E13). Seuls quatre (E6, E7, E10 et E16) ne le font pas. Aucun ne réalise l'angle de la rotation demandé. A la question supplémentaire portant sur la manipulation de modèles moléculaires, tous déclarent n'avoir jamais manipulé, auparavant, un modèle moléculaire, cela peut expliquer leur échec.

Lors de la conversion du modèle moléculaire en représentation spatiale, la plupart du temps, les élèves répondent sans prendre en compte leur position d'observateur par rapport au modèle moléculaire. Ils ont tendance à réaliser une représentation de Cram obtenue à partir d'un modèle moléculaire vu de face et légèrement déplacé vers le bas (vue de dessus), alors qu'ils ne lui font pas face. Cela montre bien que le passage du modèle moléculaire (objet physique) à la représentation de Cram n'est pas intuitif : il s'apprend. Par ailleurs, le symbolisme des bâtons de liaison dans le registre de Cram n'est pas réussi par certains (E1, E2, E3, E7, E10 et E13).

III.3.6. Conclusion partielle

Nous apportons dans cette partie, les éléments de réponses à nos questions spécifiques de recherche, QSR9 à QSR11.

Signification de la représentation de Cram et les renseignements qu'on peut en tirer

La question spécifique de recherche 9 (QSR9) comprend deux volets. Le premier est identique à la première question spécifique de recherche (QSR1) de l'étude 1 (Cf. § III.1.1) et porte sur les connaissances des élèves à propos de la signification de la représentation de Cram, et le second sur les renseignements qu'on peut extraire de cette représentation.

- QSR9 : Quelle signification les élèves donnent-ils à la représentation de Cram ? Quels est leur degré de maîtrise des renseignements qu'on peut tirer de cette représentation ?

Concernant le premier volet de la question spécifique de recherche, les réponses d'élèves à la question 1 (Cf § III.3.5.1) révèlent que pour la plupart d'entre eux, un dessin constitué par l'emploi de signes appartenant au système de Cram est une représentation d'une molécule. Pour certains, cette représentation revêt un caractère tridimensionnel. Pour d'autres, la représentation de la molécule a un caractère bidimensionnel, ou le dessin est une molécule, ce qui traduit une appropriation erronée de l'activité de communication que permet le système de Cram.

A propos du second volet de la question spécifique de recherche 9, la majorité des élèves manifeste une maîtrise partielle des renseignements qu'on peut tirer d'une représentation de Cram, elle cite des activités de communication ou de traitement que permet ce système ; aucune mention n'est faite de l'activité de conversion.

Opérations de rotation autour de l'axe de la liaison C—C dans le registre de Cram, et de conversion inter registre Cram-Newman

La question spécifique de recherche 10 concerne les raisonnements utilisés par les élèves pour réaliser les opérations de rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe C—C dans le registre de Cram, et de conversion inter registre Cram-Newman

- QSR10 : Quels raisonnements, spatial ou non-spatial, adoptent les élèves pour réaliser les opérations de rotation autour de l'axe C—C dans le registre de Cram, et de conversion inter registre Cram-Newman ?

L'analyse des résultats révèle que les élèves utilisent diverses stratégies pour répondre aux questions relatives aux opérations de rotation des substituants du carbone autour de l'axe C—C, et de conversion inter registre Cram Newman. De manière générale, ils engagent rarement des comportements manifestes (gestes métaphoriques ou procéduraux) indiquant qu'ils ont un raisonnement spatial. Ils font valoir confusément l'information spatiale (valeur des angles entre les liaisons, leur position dans l'espace) intégrée dans les représentations sémiotiques de Cram et de Newman données. La plupart du temps, ils ne visualisent pas les représentations sémiotiques, ils font plutôt preuve de comportements qui suggèrent qu'ils s'engagent dans la production et la manipulation systématique des représentations sémiotiques en utilisant des procédés spécifiques qui ne nécessitent pas un raisonnement spatial. Cependant, certains comportements indiquent que des élèves essaient d'employer le raisonnement spatial pour générer des solutions, mais sans succès (c'est le cas de E2, dans son deuxième raisonnement). Les proportions d'élèves recourant à un raisonnement spatial est à chaque fois très faible.

Opération de rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe C—C

Concernant l'opération de rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe C—C, aucun élève ne la réussit (Cf III.3.5.4), seuls 4 élèves cherchent à répondre à la question en utilisant un raisonnement spatial. Ce raisonnement spatial consiste à réaliser l'opération de rotation mentalement. Aucun d'élève ne la mène avec succès, et ce, pour les raisons suivantes :

- insuffisance des capacités de rotation mentale, qui gêne la visualisation des positions exactes des substituants des carbones après rotation (Tuckey et al., 1999), et conduit ainsi à une inversion de configuration de la représentation ;
- identification incorrecte de l'axe de rotation (Tuckey et al., 1999) ;
- méconnaissance de la valeur de l'angle dièdre, empêchant de ce fait la réalisation de l'angle de rotation demandé.

Les élèves ayant un raisonnement non spatial procèdent à tort :

- à une permutation circulaire substituants du carbone, par manque de connaissance de la valeur de l'angle dièdre ;
- à une permutation de deux substituants du carbone ;
- ou à une représentation de l'image de la représentation de Cram dans un miroir plan, et cela, parce qu'ils confondent la rotation autour d'un axe avec une symétrie par rapport au plan.

La réalisation de l'opération de rotation autour de l'axe C—C de la représentation de Cram a également mis en évidence des erreurs se rapportant à la disposition relative des traits de liaison gras et hachuré issu d'un même carbone d'une conformation décalée (Pellegrin, 1999, Pellegrin et al., 2003), et des angles entre les traits de liaison.

Conversion inter registre Cram Newman

Dans le cas de la conversion inter registre Cram Newman (Cf. III.3.5.2), seul un élève cherche à répondre à la question en utilisant un raisonnement spatial. Ce raisonnement spatial correspond à la méthode de conversion inter registre proposé par les enseignants. Cette méthode consiste à regarder la molécule en représentation de Cram, à gauche ou à droite, suivant l'axe de la liaison C—C, et à projeter les liaisons établies entre les atomes de carbone et leurs voisins dans un plan perpendiculaire à cet axe ; le carbone le plus proche de l'observateur est symbolisé par un point situé au point d'intersection des trois autres liaisons afférentes, le carbone le plus éloigné par un cercle duquel partent ses trois liaisons, figurées par des segments radiaux.

La plupart ne maîtrise pas les étapes de la méthode de conversion inter registre Cram Newman, et utilise des raisonnements non spatiaux inadéquats, et souvent confus, pour réaliser la conversion inter registre Cram. Nous en retenons particulièrement deux. Le premier et le plus utilisé, consiste à dessiner une représentation de Newman de forme globale, éclipsée ou décalée, identique à celle de Cram, puis à distribuer les substituants des carbones aléatoirement. Dans le second, la forme globale de la représentation de Cram est représentée en Newman, puis les atomes situés sur des traits de liaison identiques sont répartis diamétralement opposés ; ce raisonnement est dû au fait que la représentation de Cram est vue, à tort, comme une figure plane.

Nous relevons également que certains élèves ne maîtrisent pas les conventions de représentation dans le registre de Newman (valeurs des angles entre les traits de liaison, symbolisme des carbones et des traits de liaison), et raisonnent comme s'ils avaient appris à ne regarder qu'à droite la représentation de Cram.

Outre la mauvaise appropriation de la méthode de conversion inter registre Cram Newman, la majorité d'élèves présente des difficultés d'orientation spatiale (Cf § III.35.3), ce qui rend l'apprentissage de cette méthode plus que difficile.

Manipulation et interprétation d'un modèle moléculaire.

La question spécifique de recherche 11 concerne l'usage de modèle moléculaire et son passage en représentation de Cram.

QSR11 : Quel est le degré de maîtrise des élèves concernant les gestes procéduraux liés à la manipulation d'un modèle moléculaire ? Comment réalisent-ils le passage d'un modèle moléculaire en représentation de Cram ?

Les élèves interrogés n'ont jamais manipulé un modèle moléculaire avant notre entretien. Malgré cela, pour une première manipulation, certains font preuve d'une maîtrise partielle des gestes procéduraux. Pour passer d'une conformation de modèle moléculaire à une autre, ils ne tournent qu'un groupement de carbone autour de l'axe C—C. L'erreur commise consiste à ne pas respecter l'angle de rotation demandé, par ignorance de la valeur de l'angle dièdre. D'autres ne témoignent d'aucune maîtrise des gestes procéduraux.

Aucun d'eux ne réussit la conversion inter registre modèle moléculaire Cram. Ils peinent à établir la correspondance entre le modèle moléculaire et la représentation de Cram, ce qui les conduit à ne pas préserver l'ordre circulaire des substituants des carbones lors de cette conversion. Le symbolisme des bâtons de liaison dans le registre de Cram n'est pas également

respecté. De plus, la représentation de Cram est réalisée sans prendre en compte leur position relative par rapport au modèle moléculaire (Pellegrin, 1999) ; il ne suffit pas de voir un modèle moléculaire pour parvenir à dessiner une représentation de Cram correcte.

IV. Conclusion

Le travail présenté dans ce chapitre a pour but de faire le point sur les raisonnements et les difficultés des élèves béninois lors de l'utilisation et l'interprétation des représentations sémiotiques de Cram et de Newman, et des modèles moléculaires. Nous utilisons comme cadre d'analyse, la visualisation mentale et les gestes. Les résultats des recherches antérieures nous conduisent à orienter notre travail autour de certaines activités cognitives (communication, traitement et conversion) que permettent les systèmes de Cram et de Newman. Les activités choisies se rapportent aux capacités attendues des élèves, à la fin de l'apprentissage de la stéréochimie. Trois études ont été réalisées, et nous proposons aux élèves des tâches relatives à :

- la signification de la représentation de Cram (activité de communication, études 1 et 3) et le degré de maîtrise des renseignements qu'on peut en tirer (étude 3);
- la reconnaissance de stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Newman (activité de traitement, étude 1) et de Cram (activité de traitement, étude 2) ;
- la reconnaissance de stéréoisomères de configuration parmi une série de molécules en représentation de Cram par la méthode de la double permutation (activité de traitement, étude 2) ;
- la rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe de la liaison C—C dans le registre de Cram (activité de traitement, études 2 et 3);
- la conversion inter registre formule semi-développée Cram (activité de conversion, étude 1) ;
- la conversion inter registre Cram Newman (activités de conversion, études 1, 2 et 3) ;
- la manipulation d'un modèle moléculaire (rotation des substituants du carbone autour du bâton de liaison C—C) et sa conversion en représentation de Cram (étude 3).

La plupart des élèves connaissent l'activité de communication que permet le système de Cram, toutefois une proportion non négligeable est incapable de réaliser cette représentation, sans se tromper sur le symbolisme des liaisons (étude 1: 24%) ou les valeurs des angles entre les traits de liaison (étude 1: 41%, étude 2 : 74%, étude 3 : 3 représentations sur douze). Ces résultats

révèlent bien une insuffisance de connaissances relatives aux conventions de représentations dans le registre de Cram, ce qui compromet évidemment la réalisation des activités de traitement intra registre et de conversion inter registre.

Peu d'élèves font preuve d'une maîtrise des activités de traitement intra registre et de conversion inter registre.

Dans le cas des opérations de reconnaissance des stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Newman ou de Cram, près de la moitié des élèves identifie les molécules stéréoisomères : 42% lorsque les molécules sont en représentation de Newman, et 51% lorsqu'elles sont en représentation de Cram. Certains d'entre eux choisissent des stéréoisomères de conformation de tout type, d'autres, de nature différente ou semblable. Les raisonnements avancés montrent qu'une proportion minimale (7% quand les molécules sont en représentation de Newman, et 3% quand elles sont en représentation de Cram) témoigne d'une bonne maîtrise de la notion de stéréoisométrie de conformation. La compréhension partielle de cette notion expliquerait l'identification exclusive des stéréoisomères de nature différente ou semblable. Dans le cas où les connaissances relatives à cette notion sont inexactes, ce qui semble être le cas d'une proportion importante d'élèves (31% lorsque les molécules sont en représentation de Newman, et 32% lorsqu'elles sont en représentation de Cram), les formes globales, similaires ou dissemblables, sont considérées, à tort, comme les critères d'identification des molécules stéréoisomères : la méconnaissance de la notion de stéréoisométrie de conformation a une incidence négative sur les capacités des élèves à reconnaître les stéréoisomères de conformation.

A propos de l'application de la méthode de la double permutation, seule 9% d'élèves semble connaître les propriétés qui la régissent. Pour la majorité, l'identification des couples d'énantiomères par cette méthode est donc improbable.

Quant à l'opération de rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe de la liaison C—C dans le registre de Cram, le taux de réussite est à chaque fois nul dans les deux études, 2 et 3. Ils sont très peu à mener avec succès l'opération de conversion inter registre Cram Newman. Nous rappelons que la résolution de ces opérations nécessite une utilisation et une interprétation des représentations sémiotiques en jeu. Cela implique bien entendu la construction d'un raisonnement spatial, et nécessite des capacités de visualisation spatiale, d'orientation spatiale et de relation spatiale. Ces capacités essentielles manquent aux élèves, ce qui explique pourquoi ils échouent dans la réalisation de ces opérations. D'une part, ils ont du mal à tourner

mentalement les substituants du carbone autour de l'axe de la liaison C—C. D'autre part, ils peinent à imaginer la disposition des substituants d'une molécule en représentation de Cram observée, à gauche ou à droite, suivant l'axe de la liaison C—C; ce qui constitue d'emblée un frein à la réalisation de l'opération de conversion inter registre Cram Newman. De plus, la projection mentale des substituants des carbones de la représentation de la molécule observée n'est pas avérée. Outre les difficultés de visualisation mentale, la méconnaissance par les élèves de la valeur approximative des angles dièdres, dans une molécule à deux carbones tétraédriques, est également un facteur annihilant toute possibilité de réussite de ces opérations.

Les élèves ne maîtrisent pas les gestes procéduraux liés à la manipulation d'un modèle moléculaire (dans le cas de l'opération de rotation des substituants du carbone autour de l'axe du bâton de liaison C—C, ils ne respectent pas l'angle de rotation), ou ne réussissent pas la conversion du modèle moléculaire en représentation de Cram (ils changent l'ordre circulaire des substituants ou ratent le symbolisme des bâtons de liaison dans le registre de Cram), principalement parce qu'aucun ne l'a jamais réalisée avant notre entretien.

Les PCK et les connaissances du contenu disciplinaire des enseignants nous renseigneront peut-être sur l'origine de certaines de leurs difficultés.

Chapitre 4 : PCK et connaissances du contenu disciplinaire des enseignants

Ce chapitre est consacré à l'analyse de certaines connaissances professionnelles des enseignants en stéréochimie, à savoir leurs connaissances pédagogiques du contenu (Pedagogical Content Knowledge, PCK) et leurs connaissances du contenu disciplinaire. Nous présentons dans un premier temps notre cadre d'analyse (§ I), puis développons nos questions de recherche (§ II), notre approche méthodologique (§ III), et enfin les résultats obtenus (§ IV).

I. Cadre d'analyse

Nous débutons cette partie par une description des modèles de PCK (§ I.1.). D'une part, nous précisons la typologie des connaissances professionnelles des enseignants proposée par Shulman (1986a, 1986b, 1987) qui marque une orientation nouvelle dans la recherche en éducation, et qui le premier parle des PCK, et les points de vue d'autres chercheurs à propos des PCK des enseignants (I.1.1.). D'autre part, nous décrivons les composants du modèle de PCK que nous avons retenu (§ I.1.1.). Nous présentons ensuite les connaissances du contenu disciplinaire (§ I.2).

I.1. PCK (Pedagogical Content Knowledge)

I.1.1. Les différents modèles

Les enseignants, dans l'exercice de leurs fonctions, sont soumis à un ensemble de tâches définies par les programmes scolaires ou par des instructions officielles diverses (système prescripteur) (Butlen & Peltier-Barbier, 2004). Leur activité consiste en l'appropriation de ces tâches, énoncées par le système prescripteur, en leur renégociation ou redéfinition, pour conduire effectivement leur enseignement (Butlen & Peltier-Barbier, 2004). Cela exige d'eux des connaissances professionnelles bien précises qui ont un impact sur tous les aspects de leur enseignement, et sur l'apprentissage des élèves (Magnusson et al., 1999). Dans ses travaux sur les connaissances professionnelles des enseignants relatives à la fois à leur discipline et à l'enseignement, Shulman (1986a, 1986b, 1987) a repéré des connaissances diversifiées. Au départ, il distingue trois catégories de connaissances (1986b), toutes liées au contenu : les connaissances disciplinaires du contenu (Subject Matter content Knowledge : SMK), les connaissances pédagogiques du contenu (Pedagogical Content Knowledge : PCK) et les connaissances sur les programmes (Curricular Knowledge). Par la suite il affine ces trois

catégories dans une liste plus complète de sept catégories (1987): les connaissances disciplinaires (Content Knowledge or Subject Matter Knowledge, SMK), les connaissances sur les programmes (Curricular Knowledge), les connaissances pédagogiques du contenu (Pedagogical Content Knowledge, PCK), les connaissances pédagogiques générales (general pedagogical knowledge), les connaissances sur les élèves et leurs caractéristiques (knowledge of learners and their characteristics), les connaissances sur le contexte de l'établissement, de la classe (knowledge of educational context), et les connaissances sur les buts et les valeurs de l'éducation (knowledge of educational ends, purposes, and values, and their philosophical and historical backgrounds).

La prise en compte des PCK dans la typologie des connaissances des enseignants proposée par Shulman est une nouveauté à cette époque. Ces PCK apparaissent comme un amalgame particulier de contenu et de pédagogie qui est uniquement du ressort de l'enseignant; ce dernier combine sa compréhension sur un sujet avec des stratégies d'enseignement pour promouvoir l'apprentissage des élèves (Shulman, 1987).

Shulman (1987) les décrit comme la capacité d'un enseignant à transformer sa connaissance du contenu dans des formes pédagogiquement puissantes et adaptées aux variations de la capacité de travail présentées par les élèves. Les PCK peuvent être perçues comme un ensemble d'attributs spéciaux, permettant à l'enseignant de transformer les connaissances d'un contenu dans des formes accessibles aux élèves (Geddis et al., 1993, cité par Veal et al. 1999), leur mise en évidence peut donc d'une certaine manière permettre de comprendre le processus d'enseignement.

Le modèle de PCK proposé par Shulman (1987) comprend deux composants: les connaissances «*des représentations et des stratégies d'enseignement* » et les connaissances «*des difficultés d'apprentissage*» des élèves (Shulman, 1987, cité par Kind, 2009). Toutefois, la question de savoir quel type de connaissance doit être inclus dans les PCK a été au centre de nombreuses recherches, ce qui a abouti à des modifications du modèle de PCK proposé par Shulman.

Certains chercheurs comme Fernandez-Balboa et Stiehl (1995), Koballa, Gräber, Coleman, et Kemp (1999), Marks (1990), Cochran, Deruiter, et Kingal (1993), Veal, Tippins, et Bell, (1999), Banks, Leach, et Moon, (2005), incluent dans les PCK, les connaissances du contenu disciplinaire (cité par Kind, 2009).

D'autres comme Grossman (1990), Magnusson, Krajcik et Borko (1999) par contre, considèrent, comme Shulman, que les connaissances du contenu disciplinaire sont une catégorie

distincte des PCK. Dans son modèle de PCK, Grossman ajoute, en plus des composants proposés par Shulman, deux autres composants : les buts de l'enseignement et les connaissances sur le programme d'enseignement ; Magnusson et al., en revanche, en ajoutent trois : les orientations de l'enseignement des sciences, les connaissances sur le programme d'enseignement et les connaissances sur l'évaluation.

Pour Magnusson et al. (1999), les PCK sont le résultat de la transformation de connaissances de différents domaines :

- les connaissances du contenu disciplinaire (SMK): elles se réfèrent aux connaissances en lien avec une discipline, que l'enseignant est chargé de transmettre aux élèves. Shulman souligne (1986a) qu'elles ne se limitent pas uniquement à celles qu'il doit enseigner. Les connaissances du contenu disciplinaire sont de deux natures : les connaissances sur l'organisation des concepts, faits, théories et principes fondamentaux de la discipline, et les connaissances sur les règles qui régissent les preuves établies pour vérifier la qualité des données et du savoir;
- les connaissances de la pédagogie : il s'agit des connaissances générales de l'enseignant à propos de l'enseignement, qui ne concernent pas un contenu disciplinaire, par exemple leurs connaissances de la gestion de la classe ;
- les connaissances du contexte : elles renvoient aux connaissances de l'enseignant à propos du contexte de l'établissement dans lequel il enseigne (situation sociale, etc.) et de l'origine des élèves (communauté, etc.), et qu'il mobilise au cours de son enseignement.

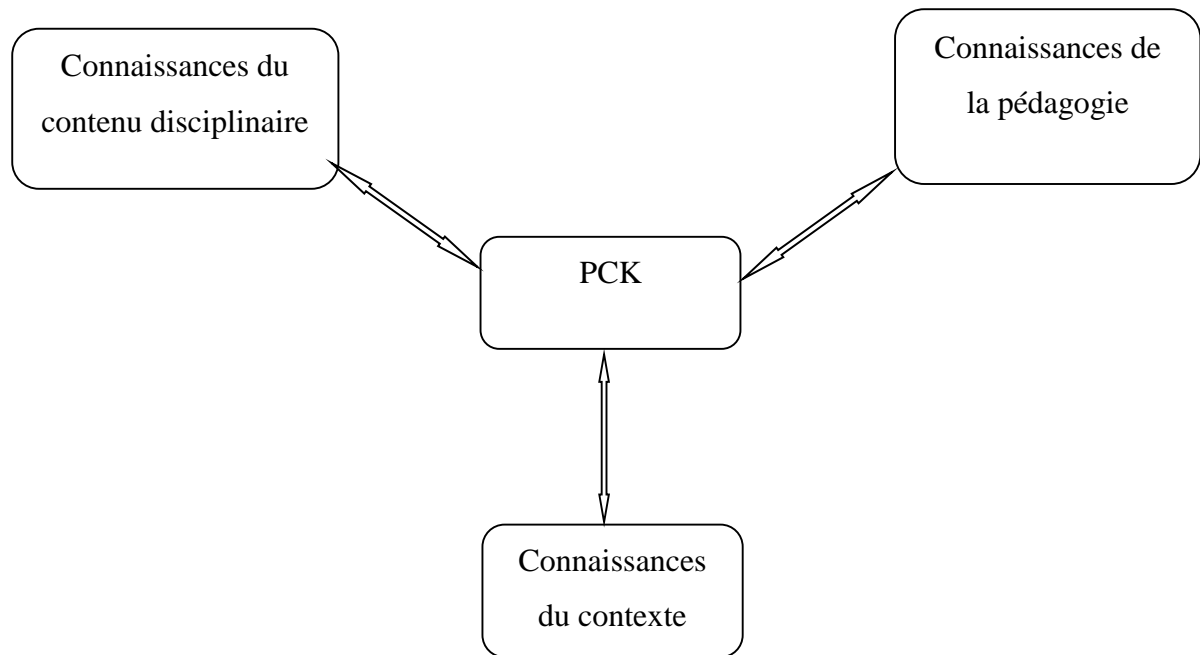


Figure 41 : relations entre les différents domaines de connaissances professionnelles des enseignants selon Magnusson, Krajcik et Borko (1999)

Légende :

↔ : influence

Selon Magnusson et al., les PCK comportent cinq composants: (1) les orientations de l'enseignement des sciences, (2) les connaissances sur le programme d'enseignement, (3) les connaissances sur la compréhension qu'ont les élèves de la discipline, (4) les connaissances sur les stratégies d'enseignement de la discipline, (5) et les connaissances sur l'évaluation de l'apprentissage de la discipline; les quatre derniers composants sont chapeautés par le premier. Les différents composants comprennent eux-mêmes des sous-composants.

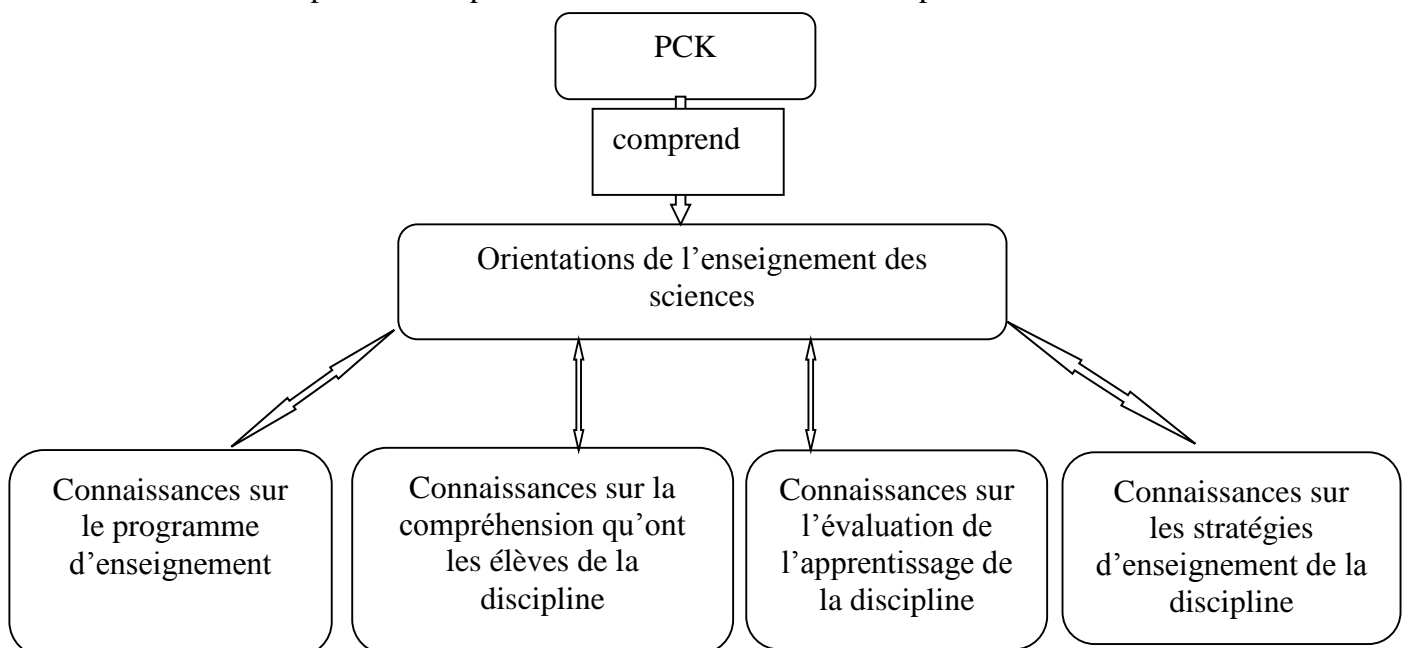


Figure 42 : composants de PCK proposés par Magnusson, Krajcik et Borko (1999)

Légende :

↔ : influence

Magnusson, Krajcik et Borko (1999) n'incluent pas les connaissances du contenu disciplinaire dans leur modèle de PCK, et les considèrent comme une forme distincte de connaissance qui influence le développement de PCK, mais ne font pas partie de celui-ci.

Le modèle de PCK proposé par Magnusson et al. nous intéresse particulièrement, car il apporte un cadre d'analyse pertinent à notre recherche. En effet, il donne une vue d'ensemble des connaissances que les enseignants doivent avoir pour enseigner le savoir de manière efficace, c'est-à-dire menant à l'apprentissage des élèves (Padilla & Van Driel., 2011).

I.1.2. Les composants

Dans ce paragraphe, nous décrivons les différents composants de PCK du modèle de Magnusson et al.(1999) tout en essayant de faire un lien, lorsque cela est possible, avec la stéréochimie, et précisons à la fin les composants retenus pour notre recherche.

I.1.2.1. Les orientations de l'enseignement des sciences

Ce composant se réfère aux connaissances des enseignants à propos des buts et des valeurs de l'enseignement des sciences à un niveau d'étude particulier. Elles orientent les décisions des enseignants sur les objectifs à atteindre, le contenu à enseigner aux élèves, l'utilisation de manuels scolaires, l'évaluation de l'apprentissage des élèves ou les stratégies d'enseignement (Borko & Putman, 1996, cité par Magnusson et al., 1999). Magnusson et al. considèrent les orientations de l'enseignement des sciences comme une vue générale ou conceptualisation de l'enseignement des sciences. Ils en distinguent neuf, et décrivent chacune d'elles suivant deux caractéristiques : les buts de l'enseignement des sciences que l'enseignant viserait avec une orientation particulière (cf. tableau 41) et les caractéristiques de l'enseignement qu'il mènerait avec une orientation particulière (cf. tableau 42). Un même enseignant peut suivre une seule ou plusieurs orientations, et ce, en fonction du contenu traité, de la classe dans laquelle il enseigne etc.

Orientations	Buts de l'enseignement des sciences
Processus	Aider les élèves à développer les compétences liées aux procédés scientifiques
Rigueur académique	Représenter un domaine particulier de connaissances
Didactique	Faciliter le développement de connaissances scientifiques
Changement conceptuel	Faciliter le développement de connaissances scientifiques en confrontant les élèves à des situations qui remettent en cause leurs connaissances naïves.
Conduite par l'activité	Promouvoir le contact des élèves avec le matériel, les objets, mettre la main à la pâte.
Découverte	Procurer aux élèves des opportunités de découvrir par eux-mêmes des concepts scientifiques ciblés.
Science basée sur des projets	Impliquer les élèves pour trouver des solutions à des problèmes authentiques.
Investigation	Représenter la science comme une investigation
Investigation guidée	Constituer une communauté d'apprenants dont les membres partagent la responsabilité de la compréhension du monde physique, particulièrement avec l'utilisation des outils de la science.

Tableau 41: Buts des différentes orientations de l'enseignement des sciences (Magnusson et al., 1999)

Orientations	Caractéristiques de l'enseignement
Processus	L'enseignant conduit les élèves aux raisonnements utilisés par les scientifiques pour acquérir de nouvelles connaissances. Les élèves s'engagent dans des activités afin de développer la pensée scientifique.
Rigueur académique	Les élèves sont confrontés à des problèmes et des activités difficiles. Les séances de TP et les démonstrations expérimentales sont utilisées pour vérifier les concepts scientifiques en démontrant les relations entre des concepts particuliers et des phénomènes.
Didactique	L'enseignant présente des informations, en général sous forme de cours magistral ou de discussion. Les questions posées aux élèves ont pour but de vérifier qu'ils connaissent les faits produits par la science.
Changement conceptuel	Les élèves sont interrogés sur leurs visions du monde et sur la pertinence d'explications alternatives. L'enseignant facilite la discussion et le débat nécessaire pour établir des connaissances valables.
Conduite par l'activité	Les élèves participent à des activités où ils mettent la main à la pâte à des fins de vérification ou de découverte.
Découverte	Centré sur l'élève. Les élèves explorent le monde réel en fonction de leur propre intérêt et découvrent des modèles permettant de décrire comment il fonctionne.
Science basée sur des projets	L'activité de l'enseignant et des élèves est orientée par une question de conduite, qui organise les concepts, les principes et les activités au sein d'un sujet d'étude. A travers l'investigation, les élèves développent un certain nombre d'instruments (des productions) qui reflètent leurs compréhension.
Investigation	L'enseignant aide les élèves à définir et investiguer des problèmes, tirer des conclusions et évaluer la validité des connaissances issues de leurs conclusions.
Investigation guidée	L'enseignant et les élèves participent à définir et investiguer un problème, construire des modèles, inventer et tester des explications et évaluer l'utilité et la validité de leurs données et la cohérence de leurs conclusions. L'enseignant étaye les efforts des élèves pour utiliser le matériel et les outils intellectuels de la science jusqu'à ce qu'ils acquièrent une autonomie.

Tableau 42: Caractéristiques de l'enseignement en fonction de l'orientation de l'enseignant (Magnusson et al., 1999)

Le fait qu'un enseignant puisse avoir plusieurs orientations rend difficile leur étude (Hammoud, 2012). De plus, l'inclusion des orientations dans le modèle des PCK est critiquée par d'autres chercheurs (e.g Anderson et al., 2000, Bryan & Abell, 1999, Sweeney et al., 2001 cités par Jameau, 2012 ; Abell, 2007; Hammoud, 2012). Par exemple, Abell (2007, p.2007, notre traduction) souligne que : « *premièrement, une orientation est théorisée comme une vue généralisée de l'enseignement de la science, et non pas comme des connaissances sur des sujets précis. Ces vues générales de l'enseignement et l'apprentissage des sciences sont souvent étudiées comme une interaction entre les connaissances, les croyances et les valeurs, et non pas uniquement comme des structures de connaissances* ». Les résultats des recherches menées

par Jameau (2012) vont dans le même sens. Ce dernier a travaillé sur les connaissances professionnelles mobilisées par les enseignants pendant la préparation et lors de la mise en œuvre de l'enseignement de la mécanique, en classe de troisième de collège, et d'électricité en classes de cycle 3. Pour cela, il a utilisé comme cadre de référence le modèle de Magnuson et al. (1999) sur les connaissances professionnelles des enseignants, les travaux de Pastré (1997) et Leplat (2006) à propos des boucles de régulation (l'activité enseignante), ainsi que les travaux de Vergnaud (1996) concernant les schèmes en tant qu'organisation invariante de la conduite pour une classe de situations données. Il a observé dans ses résultats, une interaction entre les connaissances et les croyances dans les décisions d'orientations prises par les enseignants, et en a conclu que « *l'étude des orientations ne peut pas être réduite à celle d'une connaissance* » (Jameau, 2012, p. 205). Hammoud (2012) partage également les points de vue d'Abell. Elle ajoute qu'« *étant donné que ces orientations correspondent, par définition, à une vue globale des approches générales de l'enseignement, elles ne peuvent donc pas être spécifiques d'un contenu disciplinaire* » (p.68). Ces orientations pilotent peut-être les actions de l'enseignant, mais indépendamment d'un contenu spécifique (ibid.). En clair, elles ne forment pas un composant des PCK.

I.1.2.2. Connaissances sur le programme d'enseignement de la stéréochimie

Ce composant englobe deux sous-composants : les connaissances des buts et objectifs du programme, et les connaissances du matériel nécessaire à l'enseignement.

➤ Connaissances des objectifs

Il s'agit des connaissances des enseignants à propos des objectifs du programme d'enseignement de la stéréochimie (attentes nationales). Qu'il s'agisse du programme PPO ou APC et de leurs commentaires, aucun d'eux ne mentionne explicitement l'objectif général de l'enseignement de la stéréochimie. Le commentaire du programme PPO³¹ stipule que « *le but de l'enseignement de la chimie organique dans les classes terminales est d'apporter des notions de stéréochimie pour expliquer la réactivité des molécules surtout dans la chimie du vivant* » (cf. chapitre 2 § I.1 et III.1) ; nous en déduisons que l'objectif général de l'enseignement de la stéréochimie est d'apporter des notions susceptibles d'expliquer les réactivités des molécules dans la suite du programme de chimie organique. Entre autres, nous avons des notions liées aux opérations de traitement des représentations sémiotiques de Cram et de Newman telles que la

³¹ Nous citons le commentaire PPO car le commentaire APC n'en parle pas.

stéréoisomérisation de conformation et la stéréoisomérisation de configuration. Diverses autres notions se rattachent à celle de la stéréoisomérisation de configuration : l'énantiomérisation, la diastéréoisomérisation et l'activité optique.

Ces connaissances comprennent également les connaissances des enseignants sur l'articulation des lignes directrices du programme de stéréochimie avec les programmes d'autres enseignements, et leurs connaissances sur le curriculum vertical dans leur discipline, c'est-à-dire sur ce que les élèves ont appris au cours des années précédentes et sur ce qu'ils sont censés apprendre dans les années ultérieures. Le commentaire du programme PPO de chimie organique stipule également que l'enseignement de la chimie organique en terminale D a pour but de montrer son importance pratique et de donner les notions de base de cette chimie en relation avec les sciences de la vie et de la terre. Nous pensons que l'enseignement de la stéréochimie s'articule à l'enseignement des sciences de la vie et de la terre, particulièrement dans l'apprentissage des sucres, des protéines (acides α -aminés) etc. Les notions apprises par les élèves dans les classes antérieures sont celles d'isomérisation, et celles qu'ils doivent apprendre dans les années ultérieures concernent par exemple les configurations R et S des composés à plus de deux carbones.

➤ **Connaissances du matériel**

Les connaissances du matériel se rapportent aux connaissances des enseignants concernant les ressources documentaires et matérielles pertinentes pour l'enseignement de la stéréochimie. Entre autres ressources documentaires, nous pouvons citer le manuel de chimie terminale D recommandé par les auteurs du programme. A cela peuvent s'ajouter d'autres manuels de chimie terminale D ou universitaires, des sites web pédagogiques, des photos de modèles moléculaires etc. Les principales ressources matérielles nécessaires à l'enseignement de cette discipline sont des modèles moléculaires, des logiciels de visualisation des structures moléculaires et des «polaroïds» utilisés en polariseur et en analyseur.

I.1.2.3. Connaissances sur l'évaluation de l'apprentissage de la stéréochimie

Ce type de connaissance regroupe les connaissances des résultats de l'apprentissage qui sont importants à évaluer (les connaissances, les savoir-faire, les capacités, les valeurs, les attitudes etc. qui doivent être évalués) et les connaissances des méthodes par lesquelles l'apprentissage peut être évalué.

➤ **Connaissance des résultats de l'apprentissage des élèves qui sont importants à évaluer en stéréochimie**

Ces aspects sont étroitement liés aux objectifs pédagogiques du programme, et donc aux capacités attendues des élèves décrites dans l'analyse du programme et son commentaire, ainsi que dans le manuel officiel (cf. résumé dans le chapitre 2, tableaux 3 p.59 et 5 p.70).

➤ **Connaissance des méthodes d'évaluation**

Ce sous-composant de PCK se rapporte aux connaissances des enseignants à propos des méthodes et moyens qui pourraient être utilisés pour évaluer les capacités des élèves en stéréochimie. Il peut s'agir d'une évaluation collective ou individuelle, de tests, d'interrogations écrites ou orales, de devoirs maisons ou sur table, proposés avant, pendant et après l'apprentissage. Ceci dans le but de découvrir ce que les élèves connaissent au début de l'enseignement (évaluation diagnostique), de vérifier en cours d'enseignement le niveau de compréhension des élèves et leurs capacités (évaluation formative) et de noter ce qu'ils ont acquis en fin d'enseignement de la stéréochimie (évaluation sommative).

I.1.2.4. Connaissances sur les stratégies d'enseignement de la stéréochimie

Ce composant englobe les connaissances de stratégies générales et les connaissances des stratégies spécifiques à un thème.

➤ **Connaissances de stratégies générales**

Il s'agit des connaissances sur la stratégie générale adoptée dans l'enseignement des sciences de manière générale, c'est-à-dire qui peut être utilisée pour plusieurs sujets. Les enseignants peuvent par exemple adopter les stratégies recommandées par les instructions officielles (cf. chapitre 2 § V.1) : travail individuel de l'élève, travail en groupe d'élèves, travail collectif, planification d'une situation d'apprentissage en trois phases (introduction, réalisation, retour et projection).

➤ **Connaissances de stratégies spécifiques à un thème**

Ce sous-composant concerne les connaissances des enseignants à propos des stratégies nécessaires pour aider les élèves à comprendre des notions ou des concepts spécifiques de la stéréochimie. Ces connaissances peuvent être relatives :

- A la manipulation et l'interprétation de représentations sémiotiques et de modèles moléculaires ;

- A l'utilisation de logiciels de construction et de visualisation des molécules en trois dimensions ;
- aux illustrations ou aux analogies ;
- à des activités ou méthodes permettant une meilleure compréhension des concepts ou notions.

I.1.2.5. Connaissances sur la compréhension de la stéréochimie par les élèves

Ce composant de PCK renvoie aux connaissances que doivent avoir les enseignants sur les élèves afin de les aider à développer des connaissances en stéréochimie. Il comprend deux sous-composants de connaissances: les requis nécessaires à l'apprentissage de la stéréochimie, et les parties de stéréochimie que les élèves trouvent difficiles.

➤ Connaissances des requis nécessaires à l'apprentissage

Il s'agit des connaissances des enseignants à propos des acquis préalables dont les élèves ont besoin pour l'apprentissage de la stéréochimie, par exemple : le schéma de Lewis pour comprendre la tétravalence du carbone, les bases de l'isomérisation, les notions de géométrie dans l'espace telles que les angles d'un tétraèdre et la rotation autour d'un axe pour mieux manipuler et interpréter la représentation de Cram, la symétrie par rapport à un plan pour représenter des molécules images dans un miroir plan.

➤ Connaissances des difficultés d'apprentissage des élèves

Ce sous-composant concerne les connaissances des enseignants sur les idées fausses ou préconçues des élèves sur un contenu disciplinaire, ou sur tout autre obstacle potentiel à l'apprentissage de la discipline. Elles incluent également leurs connaissances à propos des moyens permettant aux élèves de surmonter ces difficultés. Parmi les difficultés liées à la stéréochimie, il y a celles recensées dans nos analyses des réponses des élèves aux questionnaires et entretiens (cf. chapitre 3), par exemple les difficultés de visualisation mentale qu'impliquent certaines opérations de traitement (rotation des substituants des carbones autour de l'axe C—C) et de conversion inter registre Cram Newman, d'identification de représentations de molécules identiques parmi une série de molécules dans le registre de Cram ou de Newman, et de respect de leurs conventions de représentation.

La description des composants de PCK du Modèle de Magnusson et ses collègues (1999) que nous venons de réaliser, montre que la prise en considération des orientations de l'enseignement

des sciences en tant que composant de PCK est problématique. Nous estimons comme Hammoud (2012, p.64) qu'elles « font partie des connaissances professionnelles en interaction avec les PCK d'un sujet d'étude, mais elles ne peuvent pas être incluses dans les PCK en tant qu'une de leurs composantes ». Nous ne nous intéressons donc qu'aux quatre autres composants du modèle de PCK de Magnusson : les connaissances sur le programme d'enseignement, les connaissances sur la compréhension qu'ont les élèves de la discipline, les connaissances sur l'évaluation de l'apprentissage de la discipline, et les connaissances sur les stratégies d'enseignement de la discipline. Nous les désignerons, respectivement, par PCK/programme, PCK/compréhension, PCK/stratégies et PCK/évaluation.

I.2. Connaissances du contenu disciplinaire

Trois domaines de connaissances contribuent au développement des PCK (Magnusson et al., 1999), et la possession de bonnes connaissances du contenu disciplinaire est considérée comme un prérequis (Daehler & Shinohara, 2001; De Jong & Van Driel, 2004; Halim & Meerah, 2002; Van Driel et al, 2002; Veal, 1999 cité par Kind, 2009), et un attribut essentiel pour enseigner. Le rôle de l'enseignant est d'aider les élèves à construire leur propre savoir ; et cela exige de lui une connaissance approfondie des principaux concepts, des faits, des principes, ou théories qui sont au cœur de la discipline enseignée. La plupart des chercheurs s'accordent sur le fait que les connaissances du contenu disciplinaire doivent être prises en considération lors de l'étude des PCK (e.g Van Driel et al., 1998, 2011, Magnusson et al. 1999, Kind, 2009). Nous allons donc nous intéresser également aux connaissances du contenu disciplinaire de stéréochimie des enseignants.

II. Questions spécifiques de recherche

Dans notre travail de recherche, nous cherchons dans un premier temps, à reconstituer certains composants des connaissances pédagogiques du contenu (PCK) mobilisées par les enseignants, pour enseigner le cours de stéréochimie, particulièrement :

- leurs connaissances du programme d'enseignement de stéréochimie c'est-à-dire ses objectifs, les ressources documentaires et matérielles nécessaires à son enseignement. Il s'agit pour nous d'explorer les questions suivantes : quels sont les objectifs d'enseignement de la stéréochimie selon les enseignants ? De quelles ressources documentaires et matérielles disposent-ils pour concevoir et dispenser leur cours ?

- leurs connaissances des stratégies d'enseignement c'est-à-dire des représentations, des activités, des explications et des méthodes leur permettant de rendre le sujet compréhensible pour les élèves ; nous considérons les questions suivantes : quelles stratégies utilisent-ils pour enseigner la stéréochimie ? Sur quelles méthodes s'appuient-ils pour rendre le sujet compréhensible aux élèves ?
- leurs connaissances sur l'évaluation de la stéréochimie c'est-à-dire les résultats de l'apprentissage qu'ils estiment importants d'évaluer. Nous nous sommes posé les questions suivantes : Quelles notions de stéréochimie et capacités des élèves évaluent-ils ? Quels types d'évaluation proposent-ils ?
- leurs connaissances des aspects de la stéréochimie compris par les élèves et de leurs difficultés d'apprentissage. Les questions posées ici sont : Quelles sont leurs connaissances des aspects de stéréochimie compris facilement par les élèves ? Connaissent-ils leurs difficultés à propos de la stéréochimie ?

Nos analyses des réponses d'élèves (cf. chapitre 3) montrent que les opérations de traitement et de conversion des systèmes sémiotiques de Cram et de Newman sont difficiles à réaliser. Nous cherchons, dans un deuxième temps, à savoir si, face à des réponses d'élèves erronées, les enseignants :

- repèrent l'erreur et/ou la difficulté des élèves, et fournissent des raisons plausibles ;
- mettent en œuvre des connaissances disciplinaires solides pour évaluer cette erreur et/ou cette difficulté.

Nous formulons la question de recherche suivante:

- Quelles sont les connaissances des enseignants à propos des opérations de traitement intra registre de Cram et de conversion inter registre Cram Newman ?

III. Approche méthodologique

Dans cette partie, nous présentons notre outil de collecte de données (§ III.1.), les conditions dans lesquelles elle s'est réalisée (§ III.2.), et la méthodologie de traitement et d'analyse des données recueillies (§ III.3.).

III.1. Protocole d'entretien

La revue de littérature révèle que trois types de méthodes sont utilisés par les chercheurs pour identifier les PCK des enseignants :

- la première consiste à reconstruire des connaissances sur l'action, à partir de ce que les enseignants disent sur leurs connaissances et leur pratique, et ce, au moyen des questionnaires ou entretiens individuels (e.g. De Jong, 1998 ; Padilla & Van Driel, 2011). Un lien indirect est ainsi fait entre ce que l'enseignant dit de ses connaissances et de sa pratique et ce qu'il fait dans sa pratique ;
- la deuxième repose sur une reconstruction des connaissances dans l'action, à partir des observations des pratiques de classe des enseignants (e.g. Cross, 2010) ;
- la troisième est une combinaison des deux premières méthodes (e.g. Jameau 2012).

La première méthode présente l'avantage d'être utilisée sur un échantillon plus grand et en un temps plus court, que ne l'exigeraient les deux autres. Elle répond aux contraintes que nous nous sommes imposées (réunir un échantillon d'au moins dix enseignants), et celles que l'institution nous impose (durée limitée de la thèse). Bien que cette méthode soit critiquée par certains chercheurs qui considèrent, d'une part, que le lien fait entre ce que l'enseignant dit de ses connaissances et de sa pratique et ce qu'il fait dans sa pratique, est loin d'être clair (Kagan, 1992; Carter, 1993, cités par Cross, 2010), et d'autre part, que les PCK se développent dans l'action (Cross, 2010), nous estimons qu'il existe une certaine cohérence entre ce qui est dit et ce qui est fait par les enseignants,. D'ailleurs, les recherches menées par Park et Oliver (2008a) ont révélé que les PCK mises à jour dans le discours de l'enseignant sur sa pratique peuvent être similaires à celles identifiées dans l'action, ce qui conforte notre décision d'utiliser la première méthode.

Pour approcher les PCK des enseignants de terminale D, nous proposons des conditions dans lesquelles certains composants de ces PCK peuvent se manifester (De Jong, 1998 ; Van Driel, 1998 ; Padilla & Van Driel, 2011). Nous procédons à une discussion sur leurs expériences personnelles relatives à l'enseignement et l'apprentissage de thèmes spécifiques (Kermen, 2007 ; Lafarge, 2010), et à une confrontation à des réponses authentiques d'élèves à une tâche donnée (Kermen, 2007) au moyen d'entretiens individuels.

Le protocole d'entretien comprend 13 questions ouvertes et fermées. Huit (1 à 7, et 9) ciblent la stéréochimie de manière générale, c'est-à-dire ne focalisent pas sur un aspect, un thème ou une notion particulière de stéréochimie. Elles s'articulent autour de quatre composants de PCK : (1) connaissances sur le programme de stéréochimie, (2) connaissances sur les stratégies d'enseignement de la stéréochimie, (3) connaissances sur l'évaluation de l'apprentissage de la stéréochimie, et enfin (4) connaissances sur la compréhension de la stéréochimie par les élèves. Les cinq autres questions (8, 10 à 13) que nous qualifions de complémentaires, concernent des aspects précis de stéréochimie sur lesquels les élèves rencontrent des difficultés mises en évidence dans les études 1 et 2 notamment. Il s'agit de la rotation des substituants du carbone autour de l'axe C—C d'une molécule en représentation de Cram, de la conversion inter registre Cram-Newman, de la reconnaissance des molécules identiques parmi une série de molécules en représentation de Cram, de la représentation des traits de liaison gras et hachuré de la représentation de Cram d'une molécule en conformation décalée, et de la MDP.

III.1.1. Questions portant sur les composants de PCK

Le tableau ci-dessous indique les composants de PCK auxquels se réfèrent les questions 1 à 7, et 9. Pour un même composant de PCK, les questions afférentes peuvent ne pas être consécutives (cf. tableau 43).

Connaissances	Questions	Type
du programme de stéréochimie	5,6, et 7	Ouvertes
de l'évaluation de l'apprentissage de la stéréochimie	9	Ouverte
des stratégies d'enseignement de la stéréochimie	3, 4	Ouvertes
de la compréhension de la stéréochimie par les élèves	1 et 2	Ouvertes

Tableau 43 : thèmes abordés dans les questions portant sur les composants de PCK

➤ Connaissances sur le programme de stéréochimie

Trois questions (5, 6 et 7) portent sur les connaissances du programme et des ressources d'enseignement. Nous interrogeons sur les objectifs de l'enseignement de la stéréochimie dans le programme (question 5), les ressources documentaires et matérielles disponibles dans l'établissement scolaire (question 6), ainsi que sur d'autres ressources existantes non disponibles dans l'établissement scolaire mais utilisées dans l'enseignement de la stéréochimie (question 7).

➤ **Connaissance sur l'évaluation de l'apprentissage de la stéréochimie**

La question (9) se rapporte aux connaissances des notions évaluées en stéréochimie et la manière de les évaluer. Que cherchent-ils à évaluer, et comment procèdent-ils ?

➤ **Connaissance sur les stratégies d'enseignement de la stéréochimie**

Deux questions (3 et 4) concernent leurs connaissances sur les stratégies d'enseignement. Nous questionnons sur les aides apportées aux élèves pour surmonter les difficultés d'apprentissage de la stéréochimie (question 3), et la manière d'enseigner la stéréochimie (question 4).

➤ **Connaissances sur la compréhension de la stéréochimie par les élèves**

Les questions (1 et 2) sont liées aux connaissances de la compréhension qu'ont les élèves de la stéréochimie. Dans la question 1, nous demandons si la stéréochimie est une partie du programme que les élèves comprennent bien, et quels peuvent être les aspects bien compris. Dans la question 2, nous interrogeons sur les difficultés d'apprentissage de la stéréochimie repérées au cours de leur expérience professionnelle.

III.1.2. Questions complémentaires portant sur les PCK et les connaissances du contenu disciplinaire

Cinq questions (8, 10, 11, 12 et 13) portent particulièrement sur les résultats obtenus dans nos enquêtes élèves précédentes (cf. chapitre 3), et proposés pour appréciation aux enseignants. Cela nous permet de vérifier certaines hypothèses d'interprétation faites lors de ces enquêtes, et de repérer les causes plausibles des difficultés ou erreurs d'élèves qu'ils donnent. C'est aussi un moyen de compléter notre description de certains composants de leurs PCK et d'inférer leurs connaissances du contenu disciplinaire stéréochimie.

Dans les études 1 et 2, nous avons analysé les raisonnements et les difficultés des élèves à propos de la reconnaissance des stéréoisomères de conformation parmi une série de représentations, de Cram et de Newman de molécules. Les résultats nous ont révélé qu'un certain nombre d'élèves se centre uniquement sur la forme globale pour identifier les stéréoisomères de conformations, négligeant l'identité des molécules représentées. Nous avons supposé que cela est dû à un enseignement qui repose uniquement sur les conformations de la molécule d'éthane. En effet, les élèves ne distinguant pas les positions des atomes d'hydrogène après leur rotation autour de l'axe C—C, pensent que seule la différence de formes des représentations de molécules détermine la relation de stéréoisomérisation de conformation, négligeant l'identité des molécules. A travers la question 8 nous vérifions, d'une part, notre

supposition sur l'objet d'enseignement de la stéréoisométrie de conformation qui serait la molécule d'éthane (question 8.a), d'autre part, leurs connaissances à propos des implications de cette façon d'enseigner sur l'apprentissage de la notion de stéréoisométrie de conformation. Nous leur demandons sur quel(s) exemple(s) ils s'appuient pour enseigner la notion de conformation (question 8.a); en l'absence de précision sur la démarche d'enseignement utilisée, nous les invitons à expliquer comment ils procèdent. Nous questionnons ensuite sur les répercussions pour l'apprentissage de la notion de conformation que peut avoir le fait de s'appuyer uniquement sur les conformations de l'éthane (question 8.b).

Dans la question 10, nous présentons des réponses d'élèves correctes et erronées aux questions 2, 3 et 4 de l'étude 2 (nous reviendrons sur leur particularité au § IV.2.2) et demandons aux enseignants ce qu'ils en pensent. Ces questions portent respectivement, sur l'opération de rotation mentale dans le registre de Cram (consigne a), la conversion inter registre Cram-Newman (consigne b), et la reconnaissance des stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Cram (consigne c). L'objectif est de mettre en évidence les connaissances du contenu disciplinaire des enseignants et leurs connaissances des difficultés des élèves sur ces aspects précis de stéréochimie.

Les questions 11 et 12 concernent la méthode de la double permutation (MDP). Dans la question 11, nous montrons un résultat de l'application de la MDP (réponses erronées d'élèves concernant les propriétés qui régissent cette méthode) obtenu dans l'étude 2 (question 1), et sollicitons le point de vue des enseignants. Nous les interrogeons à la question 12 sur les difficultés des élèves liées à l'application de cette méthode.

Dans la question 13, nous présentons un extrait de réponses d'élèves sur les représentations spatiales de molécules à la consigne b de la question 10, et demandons ce qu'ils en pensent. Nous nous intéressons ici, à leurs connaissances des représentations des traits de liaison gras et hachurés d'une molécule en conformation décalée dans le registre Cram.

III.2. Passation de l'entretien

La collecte des données est basée sur un échantillon de onze enseignants volontaires, dix hommes et une femme, de quatre établissements scolaires (désignés par les lettres Ct, M, D et I) des villes de Porto-Novo et d'Ikpilè. Le tableau 44 indique leurs caractéristiques et, afin de préserver leur anonymat, chacun d'eux est désigné par Li (i allant de 1 à 11). Leur ancienneté en terminale D varie de 3 à 20 ans. Huit ont un diplôme académique de maîtrise en physique,

trois une maîtrise de chimie, neuf un diplôme professionnel de l'enseignement secondaire (CAPES).

Les entretiens individuels ont duré de 20 min à 1h05, et ont eu lieu un à deux mois (avril - mai 2012) après l'enseignement de la stéréochimie. L'un des entretiens a été court, car L8 s'est montré très bref dans ses réponses et n'a pas répondu aux questions relatives à la confrontation aux réponses d'élèves ; L10 bégayait légèrement, ce qui explique pourquoi son entretien a été très long, voire très difficile.

Le programme APC étant à peine entré en application, les enseignants se sont presque tous appuyés sur leur expérience du programme PPO, pour répondre aux questions.

	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11
Ancienneté en terminale D (en année)	7	4	5	17	20	3	3	12	9	3	14
Diplôme académique	P	P	C	P	C	P	C	P	P	P	P
CAPES	O	O	O	O	O	N	O	O	O	N	O
Etablissement *	Ct	Ct	Ct	M	M	M	D	D	D	D	I
Autres établissements**	2	3	2	2	1	0	0	1	1	0	2
Durée des l'entretiens	37min31s	40min27s	35min21s	52min50s	48min51s	33min37s	57min54s	20min30s	36min42s	1h2min55s	26min39s

Tableau 44 : profil des enseignants

Code utilisé

P : physique ; C : chimie O : oui ; N : non

* : établissements où ont lieu les entretiens

** : autres établissements où les enseignants travaillent³²

³² Au Bénin, le déficit des enseignants en science de manière générale, et en physique chimie en particulier, se fait sentir ; pour combler ce vide, un enseignant peut donc travailler dans plusieurs établissements scolaires.

Nous effectuons des prises de notes sur un support papier ; les entretiens, semi-directifs (ceci dans le but de laisser à l'enseignant la possibilité de développer et d'orienter librement ses propos et de pouvoir recueillir plus d'informations), sont enregistrés à l'aide d'un dictaphone. Nous déplorons toutefois le fait que, malgré nos efforts de relances et de reformulation des questions, les enseignants aient été peu expressifs sur leur manière d'enseigner et d'évaluer. A certains moments, il nous a semblé que la langue française a été un frein au bon déroulement de l'entretien. Certains enseignants ont semblé avoir du mal à exprimer le fond de leurs pensées en français³³.

III.3. Méthodologie de traitement des données et d'analyse

Les enregistrements audio sont transcrits intégralement. Pour analyser les propos tenus, nous choisissons de ne considérer que leur sens et non leur forme. Deux méthodes d'analyse, presque similaires, sont utilisées : une, en rapport avec les «questions relatives aux composants de PCK », et une autre relative aux « questions complémentaires portant sur les PCK et les connaissances du contenu disciplinaire ».

➤ Analyse des «questions relatives aux composants de PCK »

Le processus d'analyse suit une procédure systématique, qui comprend les étapes suivantes : (i) dans un premier temps les transcriptions sont lues à plusieurs reprises afin d'obtenir un aperçu des entretiens (ii) les propos de chaque enseignant sont divisés en unités de signification, qui sont alors réparties en catégories thématiques liées aux différents composants de PCK, (iii) ces catégories thématiques sont enfin discutées.

➤ Analyse des « questions complémentaires portant sur les PCK et les connaissances du contenu disciplinaire ».

Nous procédons à une classification des propos des enseignants en des catégories thématiques déterminées selon les objectifs assignés à la question posée. Ces catégories sont ensuite analysées et discutées, puis les connaissances du contenu disciplinaire et certains composants de PCK des enseignants sont inférés.

³³ Le français est la langue officielle d'enseignement au Bénin, et il est enseigné à l'école primaire. Cependant, d'autres langues sont utilisées dans la vie quotidienne.

IV. Analyse des réponses d'enseignants

Notre protocole d'entretien comprenait deux catégories de questions: des questions relatives aux composant de PCK en stéréochimie, et des questions dites complémentaires, se rapportant à des thèmes spécifiques de stéréochimie (cf. § III.1). L'analyse des réponses d'enseignants à la première catégorie de questions nous permet de proposer une première description des composants de PCK des enseignants (§ IV.1), et celles de la seconde catégorie, une description complémentaire de leurs PCK ainsi que les caractéristiques de leurs connaissances du contenu disciplinaire (§ IV.2). Une synthèse des profils PCK des enseignants est également réalisée (§ IV.3).

IV.1. PCK des enseignants

Cette partie est consacrée à la description des certains composants de PCK mobilisés par les enseignants pour enseigner le cours de stéréochimie, à savoir : leurs connaissances du programme (PCK/programme), des stratégies d'enseignement (PCK/stratégies), de l'évaluation (PCK/évaluation), et de la compréhension qu'ont les élèves de la stéréochimie (PCK/compréhension).

IV.1.1. PCK/programme

Nous distinguons dans ce composant de PCK, les sous-composants suivants : les connaissances des objectifs de l'enseignement de la stéréochimie dans le programme et les connaissances du matériel nécessaire à cet enseignement.

IV.1.1.1. Objectifs de l'enseignement de la stéréochimie

Les connaissances des enseignants à propos des objectifs de l'enseignement de la stéréochimie dans le programme, sont mises en évidence à travers la question 5. :

Question 5 : Quels sont, selon vous, les objectifs de l'enseignement de la stéréochimie dans le programme ?

Les objectifs proposés sont classés en deux catégories. La première est liée à la stéréochimie, et la seconde à l'isométrie.

Le tableau 45 reprend les objectifs proposés par les enseignants.

Catégories des objectifs		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	Total	
Objectifs liés à la stéréochimie	(O1) permettre l'acquisition des connaissances de stéréochimie préalables à l'étude de la chimie organique en terminale							x					1	
	(O2) permettre l'acquisition des connaissances de stéréochimie préalables à des études universitaires de chimie									x			1	
	(O3) rendre compte des différentes positions que les atomes d'une molécule peuvent occuper dans l'espace et leur impact sur la réactivité chimique de molécules			x		x	x							3
	(O4) Identifier la structure plane ou spatiale de molécules	x												1
	(O5) Montrer la disposition des liaisons d'une molécule dans l'espace	x	x											2
	(O6) Introduire la notion de configurations de molécules et montrer leur impact sur les propriétés optiques de substances				x								x	2
Objectifs liés à l'isomérie	(O7) Ecrire les formules semi-développées	x											1	
Absence d'indication des objectifs									x		x		2	

Tableau 45: objectifs de l'enseignement de la stéréochimie cités par les enseignants

L'examen du tableau montre que la plupart des enseignants (neuf, L1 à L7, L9 et L11) proposent des objectifs liés à l'enseignement de la stéréochimie. Cependant, aucun objectif n'est cité par une majorité d'enseignants. Deux enseignants (L8 et L10) n'énoncent aucun objectif, faisant preuve d'un manque de maîtrise des objectifs de l'enseignement de la stéréochimie.

➤ **Objectifs liés à l'enseignement de la stéréochimie**

Quatre enseignants soulignent un réinvestissement des connaissances ou des notions de stéréochimie dans la suite du programme de chimie organique terminale D, parmi lesquels :

- (O1) permettre l'acquisition des connaissances de stéréochimie préalables à l'étude de la chimie organique en terminale D (L7);
- (O3) rendre compte des différentes positions que les atomes d'une molécule peuvent occuper dans l'espace et leur impact sur la réactivité chimique de molécules (L3, L5 et L6).

Ces objectifs se rapprochent de celui énoncé dans les commentaires du programme (cf. § I.1.2.2 ou chapitre 2 § III.1).

L9 fait plutôt le lien entre l'acquisition des connaissances de stéréochimie et les études universitaires de chimie en général : permettre l'acquisition des connaissances de stéréochimie préalables à des études universitaires de chimie (O2). Il n'y a pas dans cet objectif une intention de connexion entre la stéréochimie et la suite du programme de chimie organique.

Quatre autres enseignants proposent des objectifs spécifiques aux notions de stéréochimie, et ne font aucun lien entre la stéréochimie et la suite du programme de chimie organique :

- (O4) identifier la structure plane ou spatiale de molécules (L1);
- (O5) montrer la disposition des liaisons d'une molécule dans l'espace (L1 et L2);
- (O6) introduire la notion de configurations de molécules et montrer leur impact sur les propriétés optiques de substances (L4 et L11).

Bien que L3 et L9 énoncent les objectifs de l'enseignement de la stéréochimie, ils estiment comme L8 que cet enseignement n'est pas important dans le programme, puisque le reste de la partie chimie organique peut être appris sans bases de stéréochimie (L3), et qu'au baccalauréat, elle est rarement évaluée, à peine une ou deux questions s'y rapportent dans le cas où elle l'est (L8, L4, L5, q5). A leurs yeux, la partie stéréochimie semble être sans grande incidence sur la suite du programme de chimie organique ou sur les épreuves du baccalauréat; il faut donc la

supprimer du programme de chimie terminale D (L8). Cela peut expliquer pourquoi certains ne formulent pas d'objectif mettant en jeu la stéréochimie et la suite du programme.

Certains aspects des propos des enseignants se rapportent à d'autres niveaux d'enseignement, c'est-à-dire au curriculum vertical.

En déclarant que l'objectif de l'enseignement de la stéréochimie est de faire acquérir des connaissances préalables à des études universitaires de chimie, L9 fait allusion à ce que les élèves sont censés apprendre dans et pour les classes futures; ce que laissent également supposer les propos de L3, qui mentionne que la stéréochimie a plus d'importance en pharmacie et dans l'étude des réactions chimiques :

- **L3** : [...] la stéréochimie est beaucoup plus utilisée en pharmacie, les...les médicaments [...].

Les aspects de la connaissance du curriculum vertical repérés dans les propos de ces enseignants se réfèrent à ce que les élèves sont supposés apprendre dans et pour la suite du programme, ou dans les classes ultérieures ; aucune référence sur les notions apprises par les élèves dans les classes antérieures n'est relevée dans leurs déclarations.

Nous remarquons qu'aucun enseignant ne met en relief le fait que les notions de stéréochimie peuvent servir dans une autre discipline de terminale D (en sciences de la vie et de la terre par exemple).

IV.1.1.2. Ressources documentaires et matérielles nécessaires à l'enseignement de la stéréochimie

Deux questions, 6 et 7, se rapportent aux connaissances des enseignants concernant les ressources documentaires et matérielles nécessaires et disponibles pour l'enseignement de la stéréochimie.

Question 6 : De quelles ressources documentaires et matérielles disposez-vous dans l'établissement pour l'enseignement de la stéréochimie?

Question 7 : Utilisez-vous des ressources documentaires et matérielles autres que celles disponibles dans l'établissement ?

Nous présentons dans le tableau 46 les réponses obtenues.

		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11
Ressources matérielles	Modèles moléculaires	1	1	1* et 2	1* et 2	1	4 et 2	1* et 2	4 et 2	1	1	4
Ressources documentaires	Manuel français recommandé	3	3 et 4	1	1	1	1	3 et 4	1	3	3 et 4	3
	Autres manuels français	3			1					3		
	Manuels béninois		3	1	1			3			3	3

Tableau 46: réponses des enseignants à propos des ressources documentaires et matérielles

Code utilisé

1 : matériel ou document présent dans l'établissement

1 : matériel ou document présent dans l'établissement mais d'utilisation peu commode*

2 : matériel ou document emprunté à un autre établissement

3 : matériel ou document personnel

4 : matériel ou document non présent dans l'établissement.

Tous les enseignants interrogés déclarent utiliser le manuel français de chimie terminale D recommandé par les instructions officielles (cf. tableau 46). Six (L2, L3, L4, L7, L10 et L11) se servent, en plus de ce manuel, des manuels béninois qui sont des recueils de résumés de cours et d'exercices corrigés ; trois (L1, L4 et L9), utilisent, en plus, d'autres manuels français des années 1989 et 1983. Les ressources documentaires utilisées sont, pour la plupart du temps, personnelles pour six enseignants (L1, L2, L7, L9, L10 et L11), car les établissements n'en ont pas en quantité suffisante ou pas du tout.

Certains enseignants mettent en avant la pertinence de l'usage de modèles moléculaire dans l'enseignement de la stéréochimie. Ils déplorent le fait que, dans certains établissements scolaires, les modèles moléculaires soient inadaptés aux utilisations (absence de boules à quatre trous pour symboliser l'atome de carbone, L3, L4 et L7) ou absents (L6, L8 et L11). Les enseignants sont donc obligés d'en emprunter dans d'autres établissements scolaires. A certains moments, les opinions sur les ressources matérielles d'un même établissement sont contradictoires : L4 et L5 (enseignants dans l'établissement M), L9 et L10 (enseignants dans l'établissement D), par exemple, déclarent qu'il y a des modèles moléculaires dans l'établissement, alors que L6 (enseignant dans l'établissement M) et L8 (enseignant dans l'établissement D), donnent une opinion contraire. Ceux qui déclarent l'inexistence de matériel ne se sont peut-être pas renseignés sur le matériel d'enseignement de stéréochimie disponible,

ou essaient de justifier la non-utilisation de modèles moléculaires dans leurs cours, ce qui semble être une décision volontaire.

Résumé

Nous relevons des PCK/programme chez tous les enseignants interrogés. Les deux sous-composants « connaissances des objectifs » et « connaissances du matériel » sont mis en évidence chez dix d'entre eux (L1 à L7, L9 et L11), et un seul, les « connaissances du matériel », chez L8 et L10.

« Connaissances des objectifs »

L3 est le seul à avoir énoncé, à la fois, un objectif d'enseignement similaire à celui des instructions officielles et un élément du curriculum vertical. L9 a également cité un élément du curriculum vertical, mais n'a qu'une connaissance partielle des objectifs d'enseignement.

Les « connaissances des objectifs » de L1, L2, L4, L5, L6, L7, et L11 ne se rapportent qu'à l'objectif d'enseignement de la stéréochimie. Cet objectif d'enseignement n'est que partiellement connu par L1, L2, L4 et L11.

Aucun enseignant ne parle de l'articulation entre le programme de stéréochimie et celui d'autres disciplines de terminale D.

L'examen de ce sous-composant montre que l'objectif de l'enseignement de la stéréochimie dans le programme est problématique. En effet, si pour les auteurs du programme PPO, l'un de ses objectifs est l'acquisition de connaissances susceptibles de comprendre la suite de la chimie organique dans le programme (les extraits des différentes parties du programme montrent par exemple que la notion de chiralité est reprise dans l'étude des acides α -aminés, cf. chapitre 2, paragraphe III.1), certains enseignants estiment, cependant, que les notions de stéréochimie ne sont pas réutilisées efficacement dans la suite du programme de chimie organique terminale D (L3, L4, L5, L8 et L9). Et, la rareté des questions d'évaluation portant sur la stéréochimie dans les épreuves du baccalauréat les laisse dubitatifs quant à son importance dans le programme. La suppression de cet enseignement est même souhaitée.

Des objectifs spécifiques de stéréochimie cités, nous pouvons supposer que, pour les enseignants, les points les plus importants sur lesquels il faut insister à propos de la stéréochimie sont : la structure spatiale des molécules (O4 et O5); la stéréoisomérisation de configuration et l'activité optique d'une substance organique (O4 et O6). L'analyse du programme et du manuel montre que l'enseignement de ces notions repose essentiellement sur les représentations

sémiotiques et les modèles moléculaires. Les enseignants doivent donc mettre également l'accent sur leur manipulation et leur interprétation.

« *Connaissances du matériel* »

L'étude du sous-composant « connaissance du matériel » révèle que deux types de ressources sont mobilisés pour l'enseignement de la stéréochimie : documentaires et matérielles.

Concernant les ressources documentaires, quatre enseignants (L5, L6, L8, L9) n'ont connaissance que du manuel de chimie recommandé par les instructions officielles. Sept (L1, L2, L3, L4, L7, L10 et L11), par contre, en utilisent d'autres.

Tous les enseignants ne citent qu'un seul type de matériel, les modèles moléculaires. Bien que l'usage du polaroid soit recommandée par les instructions officielles, aucun d'eux ne le mentionne, peut-être parce qu'ils ne pensent pas à l'utiliser ou que les établissements scolaires n'en disposent pas.

IV.1.2. PCK/stratégies

Les questions 3 et 4 ont pour but de mettre en évidence les connaissances des enseignants à propos des stratégies d'enseignement de la stéréochimie. La question 3 concerne les stratégies mise en place pour aider les élèves à surmonter leurs difficultés en stéréochimie, et la question 4 la façon de présenter le savoir, de façon générale et spécifique à la stéréochimie, aux élèves.

Question 3 : Comment aidez-vous les élèves à surmonter ces difficultés ? (en parlant des difficultés de stéréochimie que les enseignants ont repéré chez les élèves)

Question 4 : Comment enseignez-vous cette partie du programme?

Les enseignants se montrent très peu diserts à la question 4 (q4). Certains énoncent simplement les notions enseignées (L1) ou restent imprécis dans leur réponse, si bien que nous n'avons rien pu savoir (L10). Nous avons relevé, à cette question, des éléments de « stratégies générales » (L5 et L11) et de « stratégies spécifiques » (L2, L3, L4, L6, L7, L8 et L9).

D'autres éléments de « stratégies spécifiques » sont repérés dans les déclarations des enseignants aux questions 1 (q1), 2 (q2), 3 (q3) et (q8).

IV.1.2.1. Stratégies générales

Nous n'avons identifié les « connaissances de stratégie générale » que chez deux enseignants (L5 et L11, q4). Leur leçon débute par un travail de recherche individuel ou en petits groupes: l'enseignant propose une activité qui peut permettre à l'élève d'énoncer seul le sujet ou d'expliquer le phénomène (étape 1). Les élèves confrontent ensuite leurs idées ou propositions, le tout sous la supervision de l'enseignant. Cette confrontation débouche sur une synthèse des idées correctes émises (étape 2).

Les deux étapes repérées dans ces stratégies correspondent, respectivement, aux phases d'*introduction* et de *réalisation* d'une situation d'apprentissage telles que décrites dans le commentaire du nouveau programme (cf. chapitre 2 paragraphe V.1). Les enseignants conduisent leurs cours de manière à se conformer aux recommandations de ce commentaire (L11, q4).

Le discours des enseignants ne met pas en avant la troisième phase *retour et projection*, la manière de réaliser cette phase nous est inconnue. Aucun d'eux ne cite également les différentes activités proposées.

IV.1.2.2. Stratégies spécifiques

L'enseignement de la stéréochimie n'est pas aisé (L11, q2). Les difficultés sont en partie dues, au fait que les établissements scolaires ne sont pas pourvus de matériel (modèles molécules) nécessaires à cet enseignement (L11, q1).

Seuls quatre enseignants (L2, L4, L7³⁴ et L9, q4,) s'appuient sur des modèles moléculaires pour expliciter les notions de stéréochimie; leur cours est à la fois « théorique » et expérimental. D'autres proposent un cours exclusivement théorique (L3, L6 et L8, q4), axé sur l'utilisation et l'interprétation des représentations sémiotiques (L8) ; ce qui peut affecter l'apprentissage des élèves. Nous rappelons que L6 et L8 ont déploré l'absence de modèles moléculaires dans leurs établissements scolaires, alors que d'autres enseignants ont déclaré qu'il y en avait (cf. § V.1.1.2.). Dans le cas où ils ont raison, cela peut expliquer leur choix d'un cours théorique, dans le cas contraire, ce choix est peut-être dû à la difficulté de concevoir des activités adaptées à l'utilisation de modèles moléculaires. Concernant L3, il a déclaré que les modèles

³⁴ L4 et L7 ont déclaré qu'il n'y a pas de modèles moléculaires dans leur établissement (cf. § IV.1.1.2.), ils empruntent ceux d'autres établissements scolaires.

moléculaires, de son établissement scolaire, étaient inadaptés aux utilisations, et cela a été confirmé par L4 et L7 (cf. § IV.1.1.2.), son choix d'un cours théorique semble justifié.

Les enseignants utilisent des stratégies particulières pour aider les élèves à comprendre certaines notions de stéréochimie. Il s'agit principalement d'analogies (quatre enseignants : L1, L3, L7 et L11, q3) et d'illustrations (L7), ceci pour pallier l'absence de modèles moléculaires et constituer des aides à la visualisation et à la compréhension de la représentation spatiale de molécules.

Un enseignant (L7, q3) utilise comme illustration, des photocopies du dessin de la représentation de Cram d'une molécule: les élèves ont à mémoriser la disposition des traits de liaison à partir du dessin fourni, et ce, avant sa présentation en cours. Cette stratégie découle du fait que, la recopie dans l'immédiat, de la représentation de Cram dessinée au tableau, leur pose problème. La stratégie adoptée leur permet de mieux la dessiner (L7).

Deux enseignants (L1, q3 et L11, q2) utilisent des analogies telles qu'un pied de micro et des stylos de différentes couleurs, respectivement, pour visualiser l'environnement tétraédrique du carbone et la représentation spatiale de la molécule.

- **L1** : [...] là où on devrait représenter les liaisons en avant, en arrière et dans le plan, ils (élèves) ne comprenaient pas et j'ai pris seulement l'exemple d'un pied micro. Quand vous prenez le pied d'un pied micro, vous avez trois liaisons comme ceci (indique les trois positions avec ses doigts), et il y a une liaison qui pique vers le haut. Très tôt ils ont compris la notion de...de liaison tétraédrique là (liaisons du carbone tétraédrique). J'ai pris cet exemple là
- **L11**: [...] ce que moi je fais de façon banale c'est de prendre des stylos à bille de différentes couleurs, pour pouvoir représenter les différentes liaisons dans l'espace, et là, lorsque les enfants voient, en...en projetant les sommets de ces liaisons-là, ils voient que...vraiment ça dessine, ça donne une figure géométrique qu'ils connaissent bien. A partir de là, toutes les autres représentations on peut projeter ça dans le plan, c'est-à-dire au tableau et là, la difficulté devient un peu plus...c'est-à-dire on surpasse un peu les difficultés.

Des citrons et des brindilles de balai sont utilisés en remplacement, respectivement, des atomes de carbone et des axes de liaisons, pour expliquer la possibilité de rotation autour de la liaison simple C—C (L1, q8).

- *L1 : Bon, pour montrer les isomères de conformation, j'ai l'habitude de donner l'exemple de deux citrons. Vous prenez deux citrons et vous essayez de les perforer par une brindille de balai et là c'est pour voir si...est ce que la rotation là est facile ? Ils vont te dire oui. Maintenant, doubler le nombre de brins là, pour voir si vous pouvez encore tourner ! Ils disent non ! Qu'en voulant tourner là, on risque de casser une liaison. Si la rotation n'est plus facile, ça veut dire qu'on ne peut plus parler de conformation, ça fait des configurations. Donc pour les isomères de configuration on est obligé de détruire d'abord la double liaison. Pour l'isomère de conformation, je tourne la molécule là, je vais avoir une autre forme.*

Bien que cette analogie rende compte de la possibilité de rotation autour de la liaison C—C et de son impossibilité autour de la double liaison C=C, le discours nous laisse également supposer que, pour L1, la stéréoisométrie de configuration ne concerne que des molécules ayant une double liaison C=C, écartant ainsi toute possibilité de stéréoisométrie configurationnelle entre les molécules ayant des liaisons simples C—C.

Des exemples de la vie courante sont également employés par deux autres enseignants (L3 et L7, q3), par exemple des parties du corps humain (mains, pieds) et les chaussures pour expliquer, la chiralité d'une molécule et l'énantiométrie.

Certains enseignants (L4, L6, L7 et L9, q3) considèrent également les séances d'exercices comme un moyen pouvant permettre aux élèves de mieux assimiler les notions de stéréochimie, par exemple l'énantiométrie. Ces séances impliquent une forte participation des élèves : l'un d'entre eux corrige l'exercice au tableau avec l'aide de ses camarades, et l'enseignant apporte des éclaircissements si cela s'avère nécessaire (L7).

Résumé

Les deux sous-composants « connaissances de stratégies générales » et « connaissances de stratégies spécifiques » sont inférés chez un seul enseignant (L11). Nous n'avons identifié qu'un seul sous-composant chez les dix autres: les « connaissances de stratégies générales » chez L5, et les « connaissances de stratégies spécifiques » chez les neuf autres (L1 à L4, L6 à L10).

L'étude du premier sous-composant montre que certains enseignants (L5 et L11) se conforment aux stratégies générales recommandées par les instructions officielles (commentaire du programme); cela suppose qu'ils ont connaissance des instructions officielles (PCK/programme), et que leurs PCK/stratégies sont liés à leurs PCK/programme.

Celle du deuxième nous permet de recenser deux types d'enseignements. Le premier, théorique, recourt uniquement à l'utilisation et l'interprétation des représentations sémiotiques pour expliquer les notions de stéréochimie (L3, L6 et L8), ce qui peut avoir de graves conséquences sur l'apprentissage des élèves, d'autant plus que la majorité des élèves présente des difficultés relatives à l'emploi des représentations sémiotiques (d'après les résultats de nos études à propos des difficultés des élèves, cf. chapitre 3). Le second, à la fois théorique et expérimental, use des représentations sémiotiques et des modèles moléculaires (L2, L4, L7 et L9), ce qui peut favoriser une meilleure utilisation de représentations sémiotiques.

L'absence de modèles moléculaires explique le recours à un enseignement théorique ; elle incite certains enseignants (L1, L3, L7 et L11) à utiliser des moyens palliatifs tels que des analogies (pied de micro, stylos, citron et brindilles) et des illustrations, ce qui aide les élèves à mieux visualiser et comprendre les représentations sémiotiques de Cram. Ceci traduit un lien entre les PCK/programme et les PCK/stratégies.

IV.1.3. PCK/évaluation

Les connaissances des enseignants à propos de l'évaluation de l'apprentissage de la stéréochimie sont inférées de leurs réponses à la question 9.

Questions 9 :

a. Que cherchez-vous à évaluer en stéréochimie ?

b. Pouvez-vous m'expliquer comment vous procédez ?

Nous distinguons des connaissances relatives aux résultats de l'apprentissage qu'ils trouvent important à évaluer, et des connaissances se rapportant aux méthodes d'évaluation.

IV.1.3.1. Résultats de l'apprentissage importants à évaluer

Les résultats de l'apprentissage évalués par les enseignants sont regroupés selon qu'ils se rapportent à la stéréochimie, ou à l'isomérisation, qui n'est pas toujours un préalable à l'évaluation des connaissances de stéréochimie. Le tableau 47 rassemble les questions d'évaluations posées aux élèves.

Thèmes évalués		Questions d'évaluation	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	Total	
Conformation (C)		(C1) Représenter les conformations du cyclohexane		X										1	
		(C2) Représenter en Newman, une autre conformation d'une molécule déjà en représentation de Newman		X											1
Configuration	(E) énantiomérisie	(E1) Trouver le C* dans une molécule en FSD*	X		X				X	X				4	
		(E2) Reconnaître une molécule chirale								X					1
		(E3) Trouver la représentation Cram d'une molécule à partir de sa formule brute						X							1
		(E4) A partir d'une molécule en FSD* dont le C* a été identifié, représenter des couples d'énantiomères en représentation de Cram	X					x							2
		(E5) Identifier des molécules énantiomères (ou identiques) parmi une série de molécules en représentation spatiale	X			x	X	X		X	X				6
	(Ac) activité optique	(Ac1) Après avoir trouvé le C* dans la molécule d'une substance organique, dire si elle présente une activité optique	X												1
		(Ac2) Calculer le pouvoir rotatoire				x					X				2

Thèmes évalués		Questions d'évaluation	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	Total
Configuration	(D) diastéréoisomérisation	(D) Ecrire les représentations Z et E d'un alcène										x		1
Isomérisation		(I1) Identifier le type d'isomérisation pouvant exister entre une série de représentations de molécules	X		X							X	X	4
		(I2) Déterminer la formule brute d'une molécule	X					X					X	3
		(I3) Ecrire les FSD* des isomères d'une molécule											X	X

Tableau 47: réponses des enseignants à propos des questions d'évaluation

Cellules colorées : notions non en lien avec la stéréochimie

C* = carbone asymétrique

FSD* = formule semi-développée

Dix enseignants (L1 à L10) questionnent sur les notions de stéréochimie, dont deux (L1 et L3) qui interrogent également sur les notions d'isomérisation. Un seul (L11) questionne uniquement sur l'isomérisation.

➤ **Stéréochimie**

Seules deux questions d'évaluation, (C1) et (C2), sont liées à la stéréoisomérisation de conformation. Huit (E1 à E5, Ac1, Ac2 et D) concernent la stéréoisomérisation de configuration.

Stéréoisomérisation de conformation

Les questions d'évaluation de la stéréoisomérisation de conformation se rapportent à la représentation des conformations chaise et bateau du cyclohexane (C1), et à la représentation de Newman d'une autre conformation d'une molécule déjà en représentation de Newman (C2). Elles sont proposées uniquement par L2.

Bien que L2 ne précise pas dans quel registre sémiotique doit être réalisée la représentation des conformations chaise et bateau du cyclohexane, l'analyse du programme, son commentaire et le manuel nous laisse penser qu'il s'agit de celui de la perspective. Les questions d'évaluation (C1) et (C2) renvoient à des opérations de traitement intra registre.

Stéréoisomérisation de configuration

Parmi les questions d'évaluation relatives à la stéréoisomérisation de configuration, nous distinguons celles liées à l'énantiomérisation (E), l'activité optique (Ac) et la diastéréoisomérisation (D).

Dans les questions d'évaluation liées à l'énantiomérisation, nous avons des questions relatives à :

- la recherche du carbone asymétrique dans une molécule en formule semi-développée (E1 : trois enseignants, L1, L3 et L7) : il s'agit d'une opération de traitement intra registre ;
- la reconnaissance d'une molécule chirale (E2 : L8) : aucune information à propos de la représentation sémiotique utilisée n'est fournie par les enseignants ; les analyses réalisées dans le chapitre 2 montrent qu'il s'agit de la représentation de Cram (opération intra registre) ;
- la conversion inter registre formule semi-développée représentation de Cram (E3 : L6) ;
- la représentation des couples d'énantiomères dans le registre de Cram (opération intra registre) (E4 : deux enseignants, L1 et L6) ;

- l'identification de molécules énantiomères (ou identiques) parmi une série de molécules en représentation de Cram (opération intra registre) (E5 : six enseignants, L1, L4, L5, L6, L9 et L10).

Deux questions d'évaluation se rapportent à l'activité optique. Dans la première, il est demandé de dire si, après avoir trouvé le carbone asymétrique dans une molécule, cette dernière présente une activité optique (Ac1 : L1) ; la seconde porte sur le calcul du pouvoir rotatoire (Ac2 : L4 et L8).

Une seule question d'évaluation concerne la diastéréoisomérisation, elle vise l'écriture des représentations Z et E des alcènes (opération intra registre) (D : L10) ; le registre sémiotique concerné est celui de la formule semi-développée (d'après analyse du programme, son commentaire et le manuel).

Les résultats obtenus montrent que les notions relatives à la stéréoisomérisation de conformation, l'activité optique et la diastéréoisomérisation sont peu évaluées. Des questions d'évaluation relatives à la définition des notions ne sont pas posées, et aucune ne concerne la conversion inter registre Cram Newman. Aucune, également, ne se réfère à l'utilisation des modèles moléculaires ou à la mise en évidence de l'activité optique d'une solution à l'aide d'un polaroïd utilisé en polariseur et en analyseur. Plusieurs raisons peuvent expliquer cela :

- le peu de temps accordé à l'enseignement de la discipline (6h) : les enseignants ont peut-être de la peine à évaluer toute la stéréochimie en si peu de temps, ils sont obligés d'être sélectifs quant au choix des notions à évaluer ;
- la rareté des questions de stéréochimie dans les épreuves du baccalauréat soulignée par les enseignants (cf. § V.1.1.) : ils ne voient éventuellement pas l'importance d'évaluer des connaissances liées aux notions de stéréochimie ;
- la difficulté à concevoir des questions d'évaluation afférentes, soulignée clairement par L4 :

L4 : [...] sur les épreuves beaucoup de professeurs n'arrivent pas à évaluer ça. Ils se disent : bon, quelles sont les questions que je peux poser aux élèves ?

L'absence de ressources matérielles dans certains établissements scolaires (cf. § V.1.2.) peut également être l'une des raisons pour lesquelles des questions d'évaluation relatives à

l'utilisation des modèles moléculaires, ou à la mise en évidence de l'activité optique d'une solution à l'aide d'un polaroïd utilisé en polariseur et en analyseur, ne sont pas formulées.

Nous rappelons qu'aucun objectif spécifique de stéréochimie énoncé par les enseignants ne mentionne la stéréoisométrie de conformation (cf. § V.1.1), cela peut aussi expliquer pourquoi elle est à peine évaluée. Les PCK/programme semblent donc affecter sur les résultats de l'apprentissage que les enseignants évaluent.

Le tableau ci-dessous indique les capacités attendues des élèves auxquelles se rapportent les questions d'évaluation.

Questions d'évaluation posées par les enseignants	Capacités attendues des élèves, recensées dans le programme, son commentaire et le manuel scolaire
C1	Cp16
C2	Cp15
E1, E2 et Ac1	Cp20
E3	Cp12
E4	Cp7
E5	Cp6
Ac2	Cp11
D	Cp2
Total	8

Tableau 48 : lien entre les questions d'évaluation et les capacités attendues des élèves recensées dans l'analyse du programme, son commentaire et le manuel

Sur les 24 capacités attendues, recensées lors de l'analyse du programme, son commentaire et le manuel, seules 8 d'entre elles se rapportent aux questions d'évaluation énoncées par les enseignants ; les deux autres tiers ne sont pas évalués. Deux des capacités évaluées (E3 et E5) concernent celles que nous cherchons à mettre en évidence dans les questionnaires élèves. L'absence de questions d'évaluation sur la conversion inter registre Cram Newman peut expliquer l'échec de la plupart des élèves dans les études 1, 2 et 3.

➤ **Isométrie**

Près de la moitié des enseignants déclare évaluer des notions d'isométrie. Deux types de questions sont données aux élèves : (D1) identifier le type d'isométrie pouvant exister entre une série de représentations de molécules (cinq enseignants : L1, L3, L6, L10 et L11), et (D2) déterminer la formule brute d'une molécule (trois enseignants : L1, L6 et L11). Il convient de

préciser que tous proposent par la suite des questions d'évaluation de la stéréochimie, excepté L11. Les questions liées à l'isomérisation servent à introduire celles de stéréochimie (L1 et L6).

Nous relevons d'autres commentaires, que nous jugeons importants d'inclure dans cette analyse :

L1 (q5) a souligné que des enseignants n'évaluent pas certaines parties du programme de stéréochimie, à savoir la libre rotation autour de la liaison C—C, la représentation de Newman et la représentation des conformations du cyclohexane ; lui-même n'a pas enseigné ces conformations cette année. Selon lui, les enseignants n'évaluent pas ces notions, car ils pensent que les élèves ne voient pas leur utilité et ne les comprennent pas. Ces propos témoignent de l'impact du degré de motivation et de compréhension des élèves sur les décisions des enseignants à propos des notions à enseigner, et des résultats de l'apprentissage à évaluer : les notions non comprises par les élèves ne sont pas évaluées.

Les enseignants (L4, L5, L8) déclarent qu'au baccalauréat, la stéréochimie est rarement évaluée, à peine une ou deux questions s'y rapportent dans le cas où elle l'est. Cela est probablement l'une des causes pour laquelle les élèves ne voient pas l'intérêt de certaines notions de stéréochimie.

IV.1.3.2. Méthodes d'évaluations

Pour connaître le degré de maîtrise des connaissances de stéréochimie des élèves, les enseignants n'utilisent que des interrogations écrites. Toutefois, l'un d'eux (L3) émet le souhait de faire des évaluations pratiques reposant sur une manipulation de modèles moléculaires, si ces derniers sont disponibles.

- L3 : [...] *Si on avait le matériel on peut mettre l'élève devant et dire réalise moi telle chose, telle ou telle forme, fais telle conformation !*

Ces évaluations sont sommatives (L9, q1). Elles n'ont donc pas un caractère diagnostique, et ne permettent pas aux enseignants d'avoir des informations sur la compréhension des élèves à résoudre des problèmes (ou des situations) complexes et nouveaux (ou nouvelles). Le temps consacré à l'enseignement/apprentissage de la stéréochimie ne leur permet peut-être pas de réaliser une évaluation diagnostique.

La plupart des questions d'évaluation peuvent être regroupées dans un seul exercice d'après L1 et L6. Leurs propos révèlent une progression conceptuelle, dans une certaine logique, des questions d'évaluation proposées.

- L1 : calculer la formule brute → trouver la formule semi-développée → trouver le C* → représenter les couples d'énantiomères → reconnaître des molécules identiques.
- L2 : déterminer la formule brute → déterminer la formule spatiale → représenter des molécules énantiomères → distinguer molécules énantiomères et molécules identiques.

Résumé

Nous décelons des « connaissances sur les résultats de l'apprentissage importants à évaluer » en stéréochimie chez dix enseignants (L1 à L10), et des « connaissances sur les méthodes d'évaluation », qui se réduisent à une seule, chez les onze.

« Connaissances sur les résultats de l'apprentissage importants à évaluer »

Les résultats obtenus révèlent des opinions diversifiées quant aux résultats de l'apprentissage importants à évaluer. La plupart se rapportent aux opérations de traitement intra registre, et ceux liés à l'énantiométrie, sont plus prisés que ceux liés aux notions de conformation, de diastéréoisométrie et d'activité optique d'une substance. Cela traduit, de la part des enseignants, une connaissance partielle des aspects de l'apprentissage importants à évaluer (tels que le recommandent les auteurs du programme), ou peut-être leur marge de manœuvre quant aux résultats de l'apprentissage utiles à évaluer. Ces résultats étant liées aux capacités attendues des élèves, nous supposons qu'il existe bien un lien entre leurs PCK/programme et leurs PCK/évaluation. Aucune des questions d'évaluation proposées ne se réfère aux capacités de conversion inter registre Cram Newman, et aux capacités expérimentales des élèves.

« Connaissances sur les méthodes d'évaluation »

Ce composant est peu développé. Tous les enseignants n'adoptent qu'une seule procédure d'évaluation de l'apprentissage des élèves, l'interrogation écrite. L9 est le seul à préciser la fonction de cette évaluation (sommatrice), L1 et L6 les seuls à exemplifier les items.

IV.1.4. PCK/compréhension

Les PCK/compréhension des enseignants sont mis en évidence à partir de leurs réponses aux questions 1 et 2. La question 1 porte sur les aspects de la stéréochimie compris par les élèves, la question 2 les difficultés d'apprentissage repérées chez les élèves.

Question 1 : La stéréochimie est-elle une partie du programme que les élèves comprennent bien ?

[(si rien n'est précisé) quels sont les aspects qui sont bien compris ?]

Question 2 : Avez-vous repéré des difficultés particulières dans l'apprentissage de la stéréochimie chez les élèves?

IV.1.4.1. Aspects de la stéréochimie compris par les élèves

Seuls trois enseignants (L4, L10 et L11, q1) estiment que la stéréochimie est une partie du programme que les élèves comprennent bien.

Lorsque nous interrogeons les enseignants sur les aspects compris par les élèves, ils citent des notions d'isomérisation et de stéréochimie.

Notions d'isomérisation

L'isomérisation, partie du programme figurant également dans celui de la première D, est bien comprise par les élèves (L1, L4, L5 et L10). Car elle a déjà été enseignée dans les classes antérieures (L1 et L9).

Ces enseignants semblent considérer l'isomérisation comme une partie de la stéréochimie, peut-être parce que ce programme débute par un rappel des notions d'isomérisation.

Notions de stéréochimie

Pour deux enseignants (L2 et L7), le symbolisme des liaisons dans la représentation de Cram ne pose pas de problème aux élèves. Certains aspects notionnels et des opérations de traitement dans des systèmes sémiotiques sont également compris.

Parmi les aspects notionnels, les enseignants citent :

- les conformations (L4) et les configurations d'une molécule (L4 et L5), il s'agit essentiellement des configurations Z et E (L5);
- l'activité optique des substances organiques et le calcul du pouvoir rotatoire d'une substance optiquement active (L11).

Différents aspects en lien avec les opérations de traitements des systèmes sémiotiques sont cités :

- la représentation de Cram d'une molécule (L6) ;
- la reconnaissance de couples énantiomères parmi une série de molécules (L8), avec une absence de précision sur la nature de la représentation sémiotique utilisée ; l'analyse du

programme et du manuel nous permet de supposer qu'il s'agit de la représentation de Cram ;

- la représentation de couples d'énantiomères pouvant être obtenus à partir de la formule semi-développée d'une molécule (L9), sans plus de précision sur la nature de la représentation sémiotique des molécules énantiomères. Nous présumons toutefois qu'il s'agit de la représentation de Cram, car la conversion de formules semi-développées en représentation de Newman n'est pas enseignée.

IV.1.4.2. Difficultés des élèves

La plupart des enseignants (huit, L1 à L3 et L5 à L9) s'accordent sur le fait que la stéréochimie est une partie du programme que les élèves ne comprennent pas bien (q1).

Lorsque nous les questionnons sur les difficultés particulières repérées dans son apprentissage (q2), deux catégories de réponses sont proposées : l'une liée aux opérations de traitements des représentations sémiotiques, et l'autre à la compréhension des notions.

Réponses en lien avec les opérations de traitement des représentations sémiotiques

Il s'agit des aspects suivants :

- « représentation des conformations chaise et bateau du cyclohexane » ;
- «représentation d'une molécule dans l'espace» ;
- « représentation d'une molécule en Newman » ;
- « recherche d'un carbone asymétrique » ;
- « reconnaissance des couples d'énantiomères ou des molécules identiques » ;
- « visualisation l'opération de rotation dans le système de Newman ».

Ces sous-catégories de réponses désignent à la fois des propos d'enseignants y faisant allusion ou les mentionnant clairement.

Exemple de propos mentionnant la représentation spatiale :

- *L0 : Avez-vous repéré des difficultés particulières dans l'apprentissage de la stéréochimie chez les élèves ?*
- *L7 : [...] Les liaisons, comment représenter les liaisons là ! les liaisons à l'arrière du plan, les liaisons en avant du plan...pour pouvoir les représenter correctement, respecter effectivement les angles...bon à peu près les angles là, c'est là le problème.*

Exemple de déclaration faisant allusion à la reconnaissance de couples d'énantiomères ou de molécules identiques :

- **L7** : - - *sinon quand on dit que...il faut représenter les énantiomères...ah voilà encore un autre problème ! pour pouvoir retrouver les énantiomères ou bien des molécules identiques.*

Exemple de propos faisant allusion à la visualisation de l'opération de rotation dans le système de Newman :

- **L1** : *Quand je prends les isomères de conformation nous avons les représentations de Newman, c'est-à-dire les deux formes : la forme éclipsée ou bien la forme décalée. Maintenant c'est surtout la rotation autour des liaisons carbone-carbone...c'est sur ça qu'il faut... que nous devons insister, mais ils (les élèves) ne voient pas ça de cette manière.*

Aspects en lien avec la compréhension des notions

Nous distinguons dans cette catégorie de réponses, les notions suivantes : « conformation », « configuration » et « activité optique ».

Les catégories « conformation » ou « configuration » comprennent les propos d'enseignants citant ou faisant allusion à ces notions ou aux stéréoisométries afférentes. Par exemple :

- **L1** : *Hum c'est ça que je viens de dire tout à l'heure. Il y a les notions de...d'isomères de conformation, d'isomères de configuration [...].*

La catégorie « activité optique » contient les propos mentionnant ce terme ou la notion de mélange racémique, la loi de Biot ou le calcul du pouvoir rotatoire. Par exemple :

- **L1** : *[...] la partie qui parle des activités optiques, surtout quand on énonce la loi de Biot, ça ne dit pratiquement rien aux élèves.*

Le tableau 49 regroupe les réponses d'enseignants à propos des difficultés d'apprentissage des élèves. Il s'agit des difficultés citées spontanément (q2).

Difficultés citées		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	Total
Traitement de représentations sémiotiques	Représentation d'une molécule dans l'espace		2	1		1		1	2 et 1*			2*	6
	Représentation des conformations chaise et bateau du cyclohexane					1							1
	Reconnaissance des couples d'énantiomères et de molécules identiques							2		1	1		3
	Recherche d'un carbone asymétrique									1			1
	Représentation d'une molécule en Newman	2						2	2	1			4
	Visualisation de l'opération de rotation des substituants du carbone dans le système de Newman	2											
Compréhension des notions	Conformation	2*			2 et 1*								2
	Configuration	2*			2 et 1*								2
	Activité optique	2*		2 et 1*			2					2 et 1*	4

Tableau 49: réponses des enseignants à propos des difficultés d'apprentissage

Code utilisé

1 : difficulté citée à la question 1

1 * : citée dans les aspects compris à la question 1

2 : difficulté citée à la question 2 ; Cellule colorée : déclarations contradictoires

Le tableau montre que peu de difficultés sont citées par une majorité d'enseignants. Certains donnent des avis contradictoires sur certains aspects du programme de stéréochimie. Ils estiment que, pour un même aspect, tantôt il est compris (q1), tantôt il est incompris par les élèves (q2). C'est le cas de L4 sur les notions de conformation et de configuration, de L8 sur la représentation spatiale d'une molécule, de L3 et L11 sur l'activité optique d'une substance. Dans notre analyse, nous ne prenons donc en compte que les avis des enseignants n'ayant pas varié dans leurs réponses.

Les difficultés des élèves relatives à l'apprentissage de la stéréochimie sont liées à la :

- compréhension des notions de stéréochimie en général (L1 à L3 et L5 à L9, q1), de conformation et de configuration en particulier (L1, q2):
 - o par manque de modèles moléculaires (L11, q1, L4, L6 et L8, q2) ;
 - o les notions de stéréochimie étant rarement évaluées au baccalauréat, cela affecte le degré de motivation des élèves quant à leur apprentissage (L8, q2) ;
 - o les connaissances en géométrie dans l'espace et les capacités de visualisation mentale sont des préalables à l'apprentissage des notions de stéréochimie, et elles font défaut aux élèves (L3, q1) ; cet enseignant mobilise ici ses « *connaissances des requis nécessaires à l'apprentissage* » de la stéréochimie.
- compréhension de la notion d'activité optique (L1, L6 et L11, q2) : les difficultés à calculer le pouvoir rotatoire d'une substance activement optique sont dues au fait que les élèves ne savent pas faire les conversions d'unités des grandeurs utilisées ;
- représentation d'une molécule dans le registre de Cram (L2, L3, L5, L7, L7, L9, L11, q2) : les élèves ont du mal à respecter la valeur des angles entre les traits de liaison (L3, L7, q2) ;
- représentation d'une molécule dans le registre de Newman (L2, L7, L8, et L9, q2) : l'un des problèmes rencontrés par les élèves est la symbolisation des carbones proche et éloigné de l'observateur (L8, q2) ; étant donné que le carbone éloigné de l'observateur est éclipsé par le carbone proche, ils estiment qu'il doit être représenté par un point, et le carbone proche, mieux vu, par un cercle ; les symboles en point et en cercle des carbones sont associés à leurs tailles dans la visualisation de la molécule suivant l'axe C—C ; nous supposons qu'ils s'appuient ici sur une approche en perspective du dessin : ce qui est loin est dessiné plus petit. Rappelons que les conventions de représentation de Newman visent la distinction entre les atomes des carbones 1 et 2 et leurs liaisons connexes, et non la reproduction de la représentation

mentale de la réalité dans laquelle l'observateur ne voit pas l'atome de carbone 2, puisqu'il est masqué par l'atome de carbone 1 (Pellegrin, 1999) ; le raisonnement des élèves peut donc être dû à une incompréhension de la visée de cette représentation ;

- représentation des conformations chaise et bateau du cyclohexane (L5, q2) : aucune précision sur le système sémiotique utilisé n'est donnée, l'analyse du programme et du manuel permet de supposer qu'il s'agit de celui de la perspective.
- visualisation de l'opération de rotation des substituants du carbone autour de l'axe de la liaison carbone-carbone lors du passage d'une conformation d'une molécule à une autre dans le système de Newman (L1, q2);
- réalisation de certaines opérations de traitement telles que, la reconnaissance des couples d'énantiomères ou de molécules identiques parmi une série de représentations de molécules (L7, L9, L10, q2) et la recherche du carbone asymétrique dans une représentation de molécule (L9) dans ce système : aucune précision n'est donnée sur le registre sémiotique dans lequel le traitement est réalisé; l'analyse du programme et du manuel permet de supposer qu'il s'agit des registres de Cram et de Newman.

Pour résumer, nous repérons les deux sous-composants de PCK/compréhension, les « *connaissances des requis nécessaires à l'apprentissage* » et les « *connaissances des difficultés d'apprentissage* », chez un seul enseignant (L3). Les PCK/compréhension des autres enseignants ne renferment que les « *connaissances des difficultés d'apprentissage* ». Peu de difficultés sont citées spontanément : L1 est le seul à en mentionner plus de cinq, L7 et L9 en évoquent trois, L2 et L5 deux, L3, L6, L8, L10 et L11 un seul, L4 aucun. L1 et L8 sont les seuls à expliciter l'origine de quelques difficultés repérées chez les élèves : d'une part, l'incompréhension des notions de stéréochimie, par manque de connaissances en géométrie dans l'espace et de capacités de visualisation mentale (L3), d'autre part, l'incompréhension de la représentation de Newman, en raison de l'interprétation erronée du symbolisme des carbones (L8). La plupart du temps, les enseignants ne détaillent pas la nature et les causes des difficultés d'apprentissage décelées : leur connaissance des difficultés des élèves se limite à la reconnaissance d'une difficulté sans un second stade qui procure son explication.

Quelques difficultés mentionnées coïncident avec celles que nous repérons dans l'analyse des questionnaires élèves. Il s'agit de celles liées :

- à la compréhension des notions de conformation et configuration ;
- aux conventions de représentation spatiale (angles entre les traits de liaison) et de représentation de Newman (symbolisme des carbones) d'une molécule ;
- à l'opération de reconnaissance des molécules énantiomères parmi une série de molécules en représentation de Cram ;
- à la conversion inter registre Cram Newman.

Nous relevons également des difficultés auxquelles nous ne nous attendions pas : la notion d'activité optique, et la recherche du carbone asymétrique dans la représentation de Cram d'une molécule, parce que ces aspects n'ont pas été testés dans nos questionnaires élèves.

IV.2. Description complémentaire des PCK et connaissances du contenu disciplinaire des enseignants

Cette partie porte sur l'analyse des questions 8, 10, 11, 12 et 13. Nous présentons les résultats obtenus à chacune des questions, puis en inférons les connaissances du contenu disciplinaire et certains composants des PCK des enseignants.

IV.2.1. Sur la stéréoisométrie de conformation

La question 8 a un double objectif : vérifier si l'enseignement de la notion de stéréoisométrie de conformation ne repose que sur les conformations de la molécule d'éthane, et mettre en évidence les connaissances des enseignants à propos de l'impact que peut avoir cette démarche sur les connaissances des élèves.

Question 8 :

a. Lors de l'enseignement de la notion de conformation sur quel(s) exemple(s) vous appuyez-vous ?

[(si absence de précision et si oui), pouvez-vous m'expliquer comment vous enseignez la notion de conformation ?]

b. Pensez-vous que le fait de s'appuyer uniquement sur les conformations de l'éthane peut avoir des conséquences sur l'apprentissage de la notion de conformation ?

[(si absence de précision et si oui), lesquelles ?]

Trois enseignants (L3, L10 et L11) déclarent ne pas s'appuyer uniquement sur la molécule d'éthane pour enseigner la notion de conformation. Ils utilisent également ses dérivés et le cyclohexane.

Quatre autres (L4, L7, L8 et L9) disent ne s'appuyer que sur l'éthane. Un nombre identique (L1, L2, L5 et L6) déclare ne pas avoir d'exemples précis quant à l'enseignement de la notion de conformation.

Aucun n'explique comment il procède pour enseigner cette notion.

Concernant les conséquences que peut avoir, sur les connaissances des élèves, le fait de s'appuyer uniquement sur la molécule d'éthane pour enseigner la notion de conformation, la majorité (dix : L1 à L3, L5 à L11) déclare en être consciente ; toutefois quelques-uns seulement évoquent la nature de ces conséquences :

- 1- les substituants des carbones (les hydrogènes) étant identiques, il n'est pas facile de distinguer leur position après la rotation du groupement CH_3 qu'ils forment autour de l'axe $\text{C}-\text{C}$ (L1, L3 et L10);
- 2- les élèves auront tendance à penser qu'on ne se limite qu'à des molécules à deux carbones (L2) ;

Aucune des conséquences citées ne mentionne la difficulté relative à la notion de stéréoisomérisation de conformation inférée dans l'analyse des raisonnements et difficultés des élèves (cf. chapitre 3 § III.1.5.3. et III.2.5.3) : avec l'exemple de la molécule d'éthane, les élèves ne distinguent pas les positions des atomes d'hydrogène de la molécule d'éthane après leur rotation autour de l'axe $\text{C}-\text{C}$; ce qui peut les inciter à penser que seule la différence de formes des représentations de molécules détermine la relation de stéréoisomérisation de conformation, négligeant l'identité des molécules.

Nous constatons que la première conséquence exprime le problème de différenciation des atomes d'hydrogène soulevé dans notre analyse des raisonnements et difficultés des élèves, sans toutefois souligner son impact sur la compréhension de la notion de stéréoisomérisation de conformation : les enseignants ne voient pas que ce problème peut générer une conception erronée de la stéréoisomérisation de conformation. La seconde conséquence mentionnée ne cadre pas avec des difficultés d'apprentissage précises.

En résumé, peu d'enseignants proposent des exemples variés pour exposer la notion de conformation. Pour certains, la molécule d'éthane est le seul exemple sur lequel ils s'appuient.

Cela peut expliquer pourquoi la notion de stéréoisomérisation n'est pas bien assimilée par les élèves interrogés.

IV.2.2. Sur la rotation autour de l'axe C—C, la conversion inter registre Cram-Newman, et l'identification de stéréoisomères de conformation

Pour étudier les connaissances des enseignants relatives au contenu disciplinaire (SMK) et leurs connaissances des difficultés des élèves sur certains aspects précis de stéréochimie (PCK/compréhension), nous leur soumettons pour appréciation certaines réponses des élèves de l'étude 2.

IV.2.2.1. Présentation des consignes

Nous rassemblons quelques réponses d'élèves pour construire notre échantillon de questions à poser. Cet échantillon comprend 3 consignes a, b et c groupées dans la question 10.

Pour repérer les erreurs ou difficultés des élèves, les enseignants doivent d'abord répondre à la consigne proposée puis comparer leurs réponses à celles des élèves. Cette démarche nous permet à la fois, de découvrir leurs capacités à résoudre les consignes proposées (connaissances du contenu disciplinaire stéréochimie) et de voir s'ils repèrent les erreurs et/ou les difficultés des élèves (connaissances des difficultés des élèves).

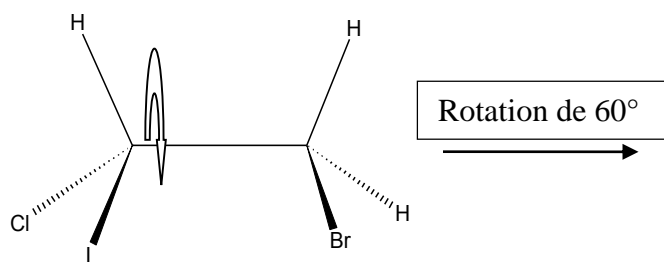
Nous présentons dans les paragraphes suivants les consignes et les réponses d'élèves soumises aux enseignants.

Question 10

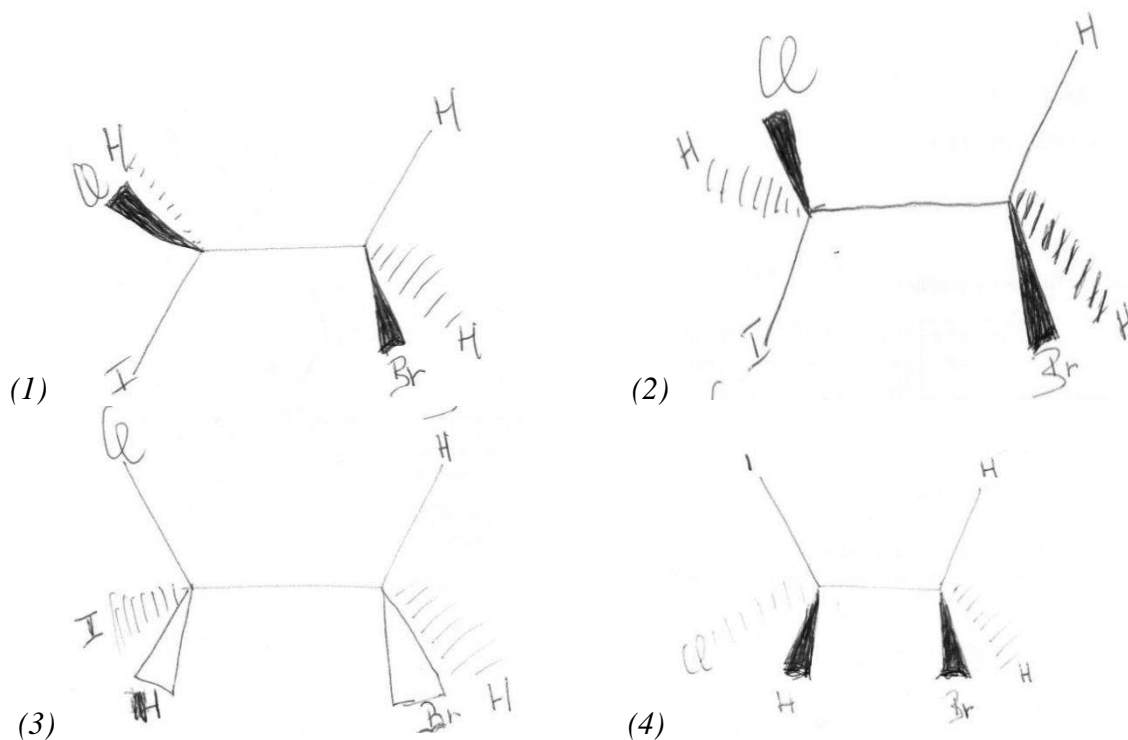
Voici quelques productions d'élèves effectuées lors d'un questionnaire papier-crayon, qu'en pensez-vous ? (nous présentons les papiers sur lesquels figurent les consignes et les productions d'élèves)

Consigne a

Complétez la figure suivante en dessinant une nouvelle représentation spatiale qui indique la position des atomes, après une rotation de 60° du groupement —CHCl autour de l'axe de la liaison C—C.



Réponses d'élèves:

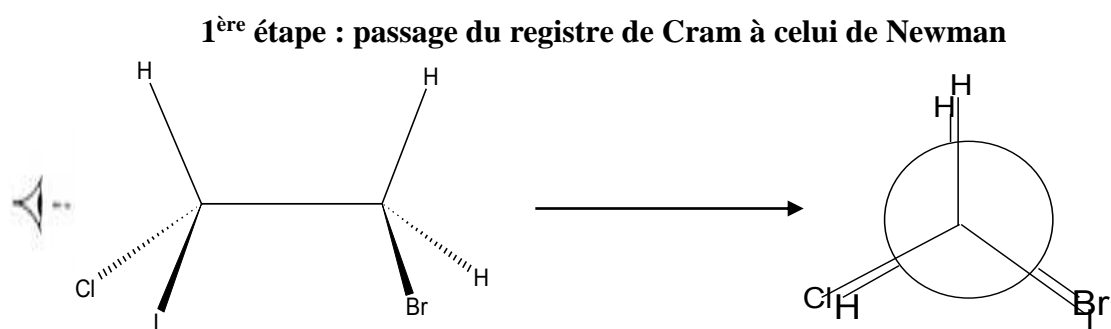


Cette consigne porte sur l'opération de rotation mentale qu'implique le passage d'une conformation de molécule à une autre (opération de traitement intra registre de Cram). Elle se rapporte à la question 2 de l'étude 2.

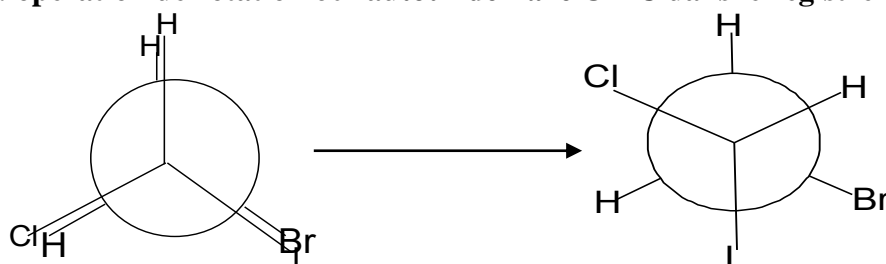
Pour trouver la réponse correcte attendue, les enseignants ont deux possibilités :

1^{ère} possibilité : procéder directement à une rotation mentale de la représentation spatiale de la molécule fournie dans le registre de Cram ;

2^{ème} possibilité : convertir d'abord cette représentation dans le registre de Newman, réaliser ensuite l'opération de rotation autour de l'axe C—C, puis convertir cette représentation de Newman dans le registre de Cram. Ces opérations sont réalisées sur un papier.



2^{ème} étape : opération de rotation 60° autour de l'axe C—C dans le registre de Newman



3^{ème} étape : passage du registre de Newman à celui de Cram

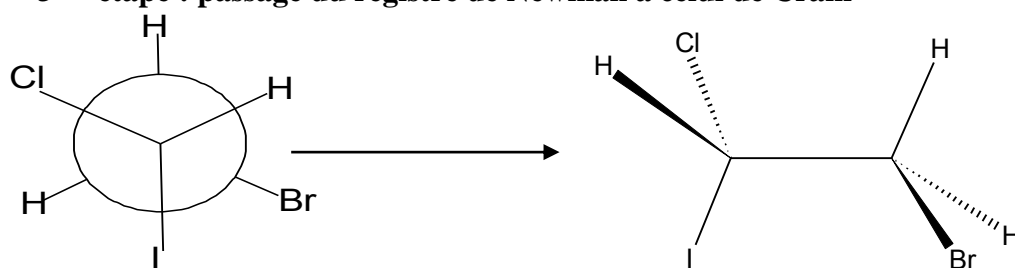
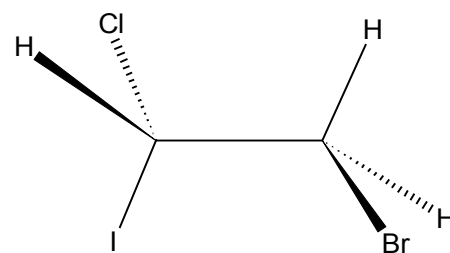


Figure 43: étapes de l'opération de rotation de 60° autour de l'axe C—C dans le registre de Cram avec appui sur le registre de Newman

La réponse correcte attendue est présentée ci-contre. Aucune des réponses d'élèves proposées n'est correcte. Nous rappelons dans le tableau ci-dessous les catégories auxquelles elles correspondent, les difficultés et les erreurs que nous avons inférées dans l'étude 2.

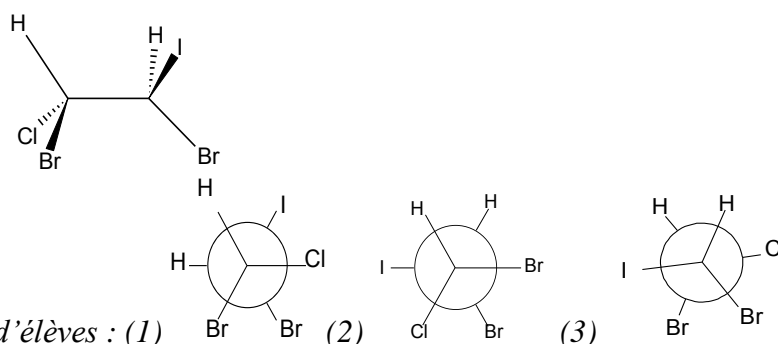


Réponses	Catégories	Difficulté	Erreurs
1	C1b	Incapacité à réaliser la rotation mentale des substituants du carbone autour de l'axe C—C	Disposition correcte des traits de liaison et incorrecte des symboles des atomes
2	C1c		Disposition correcte des symboles d'atomes, et non conforme des traits de liaison gras et hachuré
3	C2a		Rotation de 120° autour de l'axe C—C
4	C2b		Rotation de 120° autour de l'axe C—C et inversion de configuration de la molécule

Tableau 50: récapitulatif des difficultés et erreurs des élèves inférées à la consigne a

Consigne b :

Quelle représentation de Newman peut-on obtenir à partir de la représentation spatiale de la molécule suivante :



Cette consigne concerne la conversion inter registre Cram-Newman. Elle est liée à la question 4 de l'étude 2.

Pour y répondre, les enseignants doivent, d'une part, savoir qu'à la représentation spatiale de la molécule fournie, selon que l'observateur est à gauche ou à droite de l'axe de la liaison C—C, deux représentations de Newman peuvent être obtenues, et d'autre part, réaliser les représentations de Newman dans les deux cas.

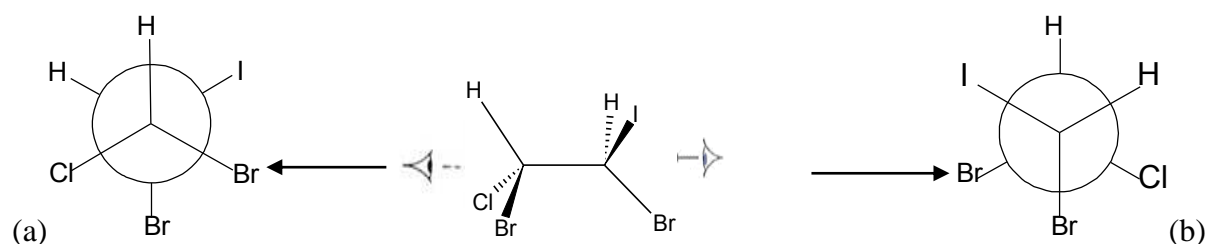


Figure 44: représentations de Newman pouvant être obtenues à partir de la représentation spatiale fournie

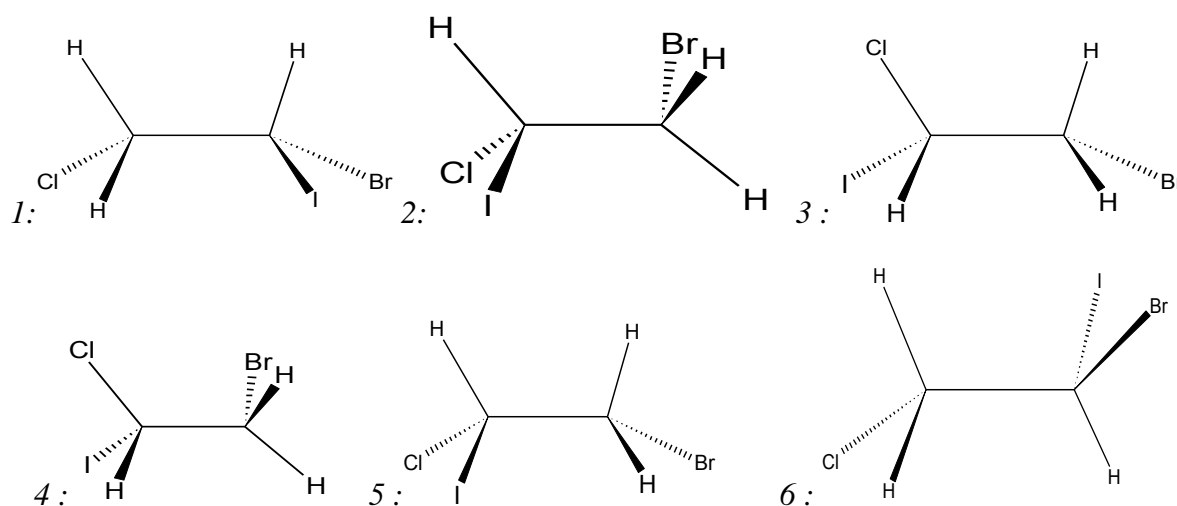
Par la suite, ils procèdent à la comparaison des représentations de Newman obtenues avec les réponses d'élèves proposées, ce qui leur permet de repérer les erreurs³⁵.

Aucune des représentations de Newman des élèves ne correspond à la représentation de Newman (a). Dans le cas où ils ont observé la représentation de Cram de la molécule à gauche, les erreurs commises sont : permutation des substituants Br et Cl du carbone proche dans la représentation de Newman 1, permutation des substituants H et I du carbone éloigné dans la représentation de Newman 2, et inversion des symboles des carbones dans la représentation de Newman 3. Les élèves ayant présenté les représentations de Newman 1 et 2 présentent des difficultés d'orientation mentale et de projection mentale, ceux ayant dessiné la représentation de Newman 3 confondent le symbolisme des carbones proche et éloigné de l'observateur.

La représentation de Newman (b) correspond à la représentation de Newman (3). Si les élèves ont observé la représentation de Cram de la molécule à droite, alors ils font les erreurs suivantes : inversion des symboles des carbones et permutation des substituants H et I du carbone proche dans la représentation de Newman 1, inversion des symboles des carbones et permutation des substituants Br et Cl du carbone éloigné dans la représentation de Newman 2. Ils présentent des difficultés d'orientation mentale et de projection mentale de la représentation de Cram et confondent le symbolisme des carbones dans le registre de Newman.

Consigne c

Indiquez parmi la série de représentations spatiales, celles qui correspondent à des conformations d'une même molécule, justifiez.



³⁵ Nous précisons qu'il s'agit d'un raisonnement parmi d'autres, nous n'excluons donc pas que les enseignants en proposent un différent.

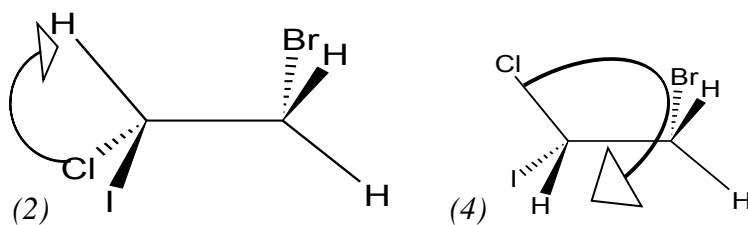
Réponses d'élèves :

a : (2, 4 et 6) ; (1, 3, et 5).

b : (1 et 4) ; (1 et 2) ; (5 et 6) ; (6 et 3)

Cette consigne porte sur la reconnaissance des stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Cram. Pour y répondre, les enseignants peuvent s'appuyer sur deux méthodes différentes.

- **1^{ère} méthode³⁶ (raisonnement analytique):** identification des représentations de Cram de molécules correspondantes, et de leur configuration par une méthode de comparaison des sens de lecture ou de rotation des substituants des carbones (a → b → c). Si les sens sont les mêmes alors les molécules sont identiques (stéréoisomères de conformation), dans le cas contraire, ce sont des stéréoisomères de configuration. Par exemple dans les représentations 2 et 4, les substituants des carbones sont identiques, ainsi que le sens de lecture des substituants Cl, H et I.



- **2^{ème} méthode (raisonnement spatial):** rotation mentale des substituants du carbone d'une des représentations de la molécule; la tâche peut s'effectuer alors en cinq étapes : identification des représentations de Cram de molécules correspondantes, représentation mentale de l'une des molécules à partir de sa représentation de Cram, transformation par rotation de la représentation mentale autour de l'axe C—C, représentation de Cram de la représentation mentale obtenue après rotation, et enfin comparaison de cette dernière avec les représentations mentales de Cram des autres molécules.

Les réponses des élèves sont toutes erronées. Les triplets de représentations choisies dans la réponse a ont des formes identiques (décalée-décalée-décalée et éclipsée-éclipsée-éclipsée) et ne se rapportent pas à une même molécule ; les couples proposés dans la réponse b sont ceux des représentations de formes différentes (éclipsée-décalée ou décalée-éclipsée) et ne symbolisent pas une même molécule. Les élèves s'appuient sur la similitude des formes des

³⁶ Cette méthode figure dans le manuel, cf. chapitre 2 § II.2

représentations de molécule ou sur leur dissemblance, sans vérifier si les représentations choisies sont celles d'une même molécule.

IV.2.2.2. Résultats globaux

Face aux productions d'élèves à la question 10, comme nous l'avons prévu, la plupart des enseignants ont cherché à répondre à la question posée, avant d'apprécier les réponses des élèves.

Certains ne se sont pas prononcés sur le caractère correct ou incorrect des réponses des élèves.

Aucun n'explique les causes des difficultés ou des erreurs d'élèves.

		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11
Réponses des enseignants	Consigne a (q10)	Ai	Ai	Ac	Ai	Ac	Ai	Pp	Pp	Ai	Ai	Pp
	Consigne b (q10)	Ai	Ai	Ai	Ai	Ai	Ac	Pp	Pp	Ac	Ai	Ai
	Consigne c (q10)	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Pp	Pp	Ac	Ac	Ac

Tableau 51 : profil des réponses des enseignants à la question 10

Code utilisé :

Ac : avis (ou réponses) corrects attendus ;

Ai : avis (ou réponses) incorrects;

Pp : ne précise pas si les représentations d'élèves sont incorrectes ou correctes

Les réponses de la plupart des enseignants à chacune des 3 consignes (a, b et c) ne correspondent pas aux réponses correctes attendues (cf. tableau 51), ils n'identifient pas toutes les erreurs des élèves dans les productions présentées. Les réponses aux consignes a et b sont moins réussies que pour la consigne c : 2 réponses correctes aux consigne a et b contre 9 à la consigne c.

Nous classons les enseignants en trois groupes :

- ceux qui répondent correctement à la consigne, parmi lesquels : ceux qui fournissent des raisonnements corrects (consigne a : L5 ; consigne b : L9), des raisonnements erronés (consigne b : L6 ; consigne c : L1 à L5, L10 et L11), ou n'expliquent pas leur raisonnement (consigne a : L3).

- ceux qui ne répondent pas correctement aux consignes et proposent des raisonnements erronés (consigne a : L1, L2, L4, L9 et L10 ; consigne b : L1 à L5, L10 et L11) ou n'apportent pas d'argumentation (consigne a : L6).
- ceux qui ne répondent pas aux consignes parce qu'ils ne se sentent pas à l'aise (consigne a : L8 ; consigne b : L8 ; consigne c : L8) ou reconnaissent leur incapacité à répondre aux consignes (consigne a : L7 et L11 ; consigne b : L7 ; consigne c : L7).

IV.2.2.3. Raisonnements des enseignants

Ce paragraphe est consacré à l'analyse des raisonnements des enseignants face aux différentes consignes.

➤ Raisonnements relatifs à la rotation des substituants du carbone autour de l'axe C—C (consigne a)

Huit enseignants (L1 à L6, L9 et L10) se prononcent sur le caractère correct ou incorrect des réponses des élèves à la consigne a (Cf. tableau 52). Trois autres (L7, L8 et L11) ne le font pas; ils déclarent ne pas être en mesure de résoudre les consignes (L7 et L11) ou se contentent de dire que les élèves ont du mal à les réaliser (L8).

Deux enseignants seulement (L3 et L5) donnent les réponses attendues. Deux autres (L1 et L9) commettent une erreur, trois (L4, L6 et L10) deux erreurs, et l'un (L2) quatre erreurs.

Réponses des élèves	Enseignants										
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11
1	I	C	I	C	I	C	Pp	Pp	I	C	Pp
2	I	C	I	C	I	I	Pp	Pp	I	I	Pp
3	I	C	I	I	I	C	Pp	Pp	C	I	Pp
4	C	C	I	I	I	I	Pp	Pp	I	C	Pp
	nb:1	nb:4	nb:0	nb:2	nb:0	nb:2			nb:1	nb:2	

Tableau 52: qualificatifs attribués par les enseignants aux réponses d'élèves à la consigne a de la question 10

Code utilisé :

C : correct *I* : incorrect

Pp : ne précise pas si la représentation de l'élève est incorrecte ou correcte

Cellules colorées : qualificatifs corrects attendus

nb : nombre d'erreurs commises par l'enseignant dans ses appréciations

Seuls 6 enseignants (L1, L2, L4, L5, L9 et L10) expliquent leurs raisonnements, parmi lesquels 5 (L1, L4, L5, L9 et L10) réalisent la rotation des substituants des carbones autour de l'axe C—C.

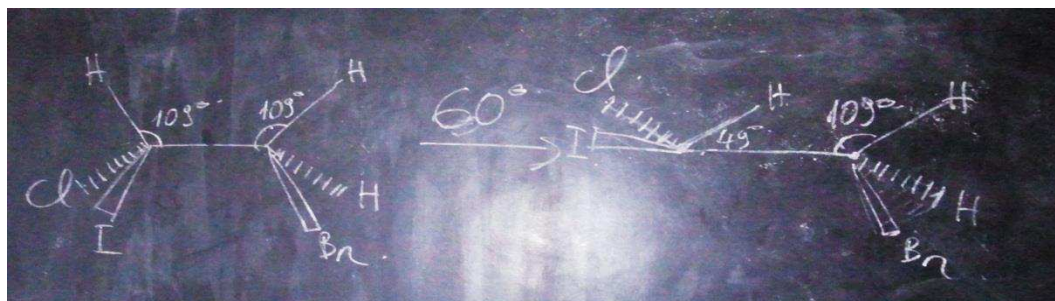
Ces 5 enseignants cherchent à répondre à la consigne, avant d'apprécier les réponses d'élèves. Deux types de raisonnements correspondant aux raisonnements possibles attendus (cf. § IV.2.2.1) sont relevés:

- Le premier implique la rotation mentale des substituants du carbone autour de l'axe C—C dans le registre de Cram ;
- Le second consiste à convertir d'abord cette représentation dans le registre de Newman, à réaliser ensuite l'opération de rotation autour de l'axe C—C, puis à convertir cette représentation de Newman dans le registre de Cram. Ces opérations sont réalisées sur du papier.

La rotation mentale des substituants du carbone autour de l'axe C—C dans le registre de Cram, est réalisée par 4 des enseignants ayant décrit leur raisonnement (L1, L4, L9 et L10), mais sans succès.

Nous relevons chez eux, des erreurs relatives:

- aux angles dièdres qu'ils supposent, à tort, égaux à 60° (L9), la rotation ainsi réalisée se traduit par une permutation circulaire des substituants du carbone ;
- au sens de la rotation, opposé à celui demandé (L1) ;
- à la disposition, non réussie, des positions des substituants du carbone après la rotation (L4) ;
- à l'axe de rotation, identifié à un axe perpendiculaire au plan de la feuille et passant par l'atome de carbone du groupement à tourner (L10, cf photo ci-dessus).



Représentation de l'opération de rotation réalisée par L10

Un seul (L2) ne procède pas à la rotation des substituants du carbone autour de l'axe C—C. Il fonde, injustement, son raisonnement sur la comparaison de l'identité des substituants des

carbones de la représentation de Cram fournie et les représentations de Newman des élèves. Nous subodorons qu'il choisit cette démarche parce qu'il a peut-être du mal à réaliser l'opération de rotation mentale.

Seul, L5, s'appuie sur le deuxième raisonnement, et ce, sans se tromper. L'adoption d'un tel raisonnement suppose que la rotation dans le registre de Cram lui paraît peut-être plus difficile à réaliser.

L3 a attribué des qualificatifs corrects aux réponses d'élèves ; étant donné qu'il ne propose aucun raisonnement, nous ne pouvons rien en dire.

Quant à L6, il propose des réponses incorrectes à la consigne et n'explique pas son raisonnement, ce qui traduit des difficultés de rotation mentale.

Il se dégage de ces résultats que les enseignants peinent à réaliser la rotation des substituants du carbone autour de l'axe C—C. Ils présentent des difficultés de rotation mentale. Ces difficultés sont accentuées par la non-maîtrise des caractéristiques géométriques de la représentation de Cram (valeur de l'angle dièdre) et des éléments de rotation (axe et sens de la rotation).

➤ **Raisonnements relatifs à la conversion inter registre Cram-Newman (consigne b)**

Neuf enseignants (L1 à L6, L9, L10 et L11) se prononcent sur le caractère correct ou incorrect des réponses des élèves à la consigne b (Cf. tableau ci-dessous). Deux autres (L7 et L8) ne le font pas, dont l'un (L7) reconnaît ne pas être capable de réaliser la conversion inter registre Cram.

Deux (L6 et L9) ne se trompent pas sur la reconnaissance des réponses correctes ou incorrectes des élèves. Deux autres (L5 et L11) se méprennent sur une réponse, trois (L1, L2 et L3) sur deux réponses, et deux (L4 et L10) sur trois réponses.

Enseignants											
Réponses d'élèves	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11
1	C	C	C	C	I	I	Pp	Pp	I	C	I
2	C	C	I	C	I	I	Pp	Pp	I	C	I
3	C	C	I	I	I	C	Pp	Pp	C	I	I
	nb: 2	nb: 2	nb:2	nb: 3	nb: 1	nb: 0			nb: 0	nb: 3	nb: 1

Tableau 53: récapitulatif des réponses des enseignants à la consigne b de la question 10

Code utilisé

C : correct I : incorrect

Pp : ne précise pas si la représentation de l'élève est incorrecte ou correcte

Cellules colorées : qualificatifs corrects attendus

nb : nombre d'erreurs commises par l'enseignant dans ses appréciations

Parmi les 9 enseignants qui répondent à la consigne, quatre (L3, L5, L9 et L11) utilisent des raisonnements spatiaux, cinq autres (L1, L2, L4, L6 et L10) fournissent des raisonnements différents, que nous qualifions de non-spatiaux.

○ **Raisonnements spatiaux**

Les raisonnements spatiaux consistent en une visualisation mentale de la représentation de Cram suivant l'axe C—C (cf. raisonnement attendu). Nous distinguons des raisonnements complets, c'est à dire utilisant les deux visualisations de la représentation de Cram, à gauche et à droite (L5 et L9); et des raisonnements partiels, c'est à dire se servant d'une seule visualisation de la représentation de Cram, en l'occurrence à gauche (L3 et L11).

Raisonnements spatiaux complets

Un seul (L9) réussit à repérer les positions exactes des traits de liaison dans l'espace, en observant la représentation de Cram à gauche et à droite. Il fait preuve de bonnes capacités de visualisation spatiale, orientation spatiale et projection mentale. Un autre (L5), peut repérer avec exactitude les positions de traits de liaison en étant à gauche de la représentation de Cram, mais échoue à droite. Les capacités d'orientation spatiale lui font défaut.

Raisonnements spatiaux partiels

Un seul (L11) visualise les positions effectives des traits de liaison dans l'espace, en observant la représentation de Cram à gauche. Un autre (L3) n'y arrive pas.

Nous constatons que trois des enseignants, utilisant un raisonnement spatial, ne réussissent pas à identifier les réponses correctes ou incorrectes des élèves. Cela est dû :

- d'une part à une assimilation partielle de la méthode de conversion inter registre Cram-Newman : ils ont tendance à n'observer la représentation spatiale suivant l'axe C—C que de la gauche (L3 et L11); ils ne sont peut-être pas conscients de la possibilité d'obtenir une représentation de Newman, en observant la représentation de Cram à droite. Cela les empêche de réaliser que la représentation de Newman 3 est dessinée à partir d'une vue de la représentation à droite ;
- d'autre part à des problèmes de visualisation mentale : la capacité de visualisation spatiale fait défaut à L3, il permute les substituants du carbone proche. La capacité d'orientation spatiale de L5 n'est pas complète : la visualisation des positions des traits de liaison de la représentation de Cram est réussie en étant à sa gauche, mais échoue à sa droite.

- **Raisonnements non spatiaux**

Cette catégorie concerne les enseignants qui déclarent observer la représentation de Cram suivant l'axe C—C à gauche et à droite (L1 et L2), uniquement à gauche (L4 et L10) ou suivant l'axe C—Subs³⁷ à gauche (L6), sans vraiment réaliser la visualisation mentale de la représentation de Cram. En effet, ces observations leur permettent simplement de trouver le symbolisme des carbones dans la représentation de Newman : carbone proche par un point, carbone éloigné par un cercle.

Nous distinguons trois types de raisonnements.

Dans le premier, L1 et L10 voient, en représentation de Cram, les substituants d'une même région de l'espace (c'est-à-dire à l'extrémité de traits de liaison identiques) diamétralement opposés.

- **L10:** [...] murmure : *hum je suis là* (indique une position de l'observateur à gauche suivant l'axe C-C) *H et Br doivent être directement opposés, et Cl et H.*
- **L0:** *C'est quel H ?*
- **L10:** *Ce H.*
- **L0:** *Ah donc le H du premier carbone (à gauche) et...*

³⁷ C—Subs représente un trait de liaison formé par le carbone et son substituant.

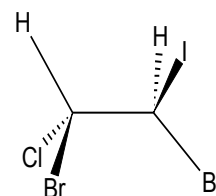
- **L10:** Le Br du deuxième carbone (à droite). Maintenant ce Cl aussi sera opposé à ce H (lié au carbone à droite). Maintenant pour Br (lié au carbone à gauche) et I, c'est aussi opposé. (vérifie l'opposition des atomes sur chaque représentation) ça c'est faux (représentation 3).
- **L0:** Pourquoi ?
- **L10:** Parce que le Br ne doit jamais être diamétralement opposé à H. il y a un seul Br qui soit diamétralement opposé à H, lui il a mis Br et H et Cl et I.
- **L0:** Ok.
- **L10:** Attendez, je vérifie encore (vérifie si les atomes sont diamétralement opposés).
- **L0:** D'accord.
- **L10 :** Le 1 et le 2, c'est bon.

Cela peut-être dû au fait que la représentation de Cram est vue comme la représentation d'une molécule à structure plane. Ils ne réalisent pas que cette représentation est celle d'une molécule à structure tridimensionnelle.

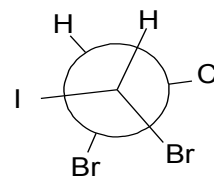
Dans le deuxième, L6 observe, à tort, la représentation de Cram suivant l'axe C—Subs, et voit les atomes à l'extrémité des liaisons du plan de la feuille (C_g -H et C_d -Br³⁸) et des plans en avant et en arrière du plan de la feuille (C_g -Cl et C_g -I, C_g -Br et C_d -H) éclipsés.

L0 : Pourquoi pensez-vous que le 3 est juste ?

- **L6 :** Moi j'ai fixé ceci.
- **L0 :** Donc le carbone qui est à gauche !
- **L6 :** Oui, mon œil est pratiquement ici (suivant l'axe de la liaison Cl-C).
- **L0 :** Oui à gauche.
- **L6 :** Maintenant je vois ceci ici...sinon quand je suis là, le Cl cache ceci (I)
- **L0 :** Donc le Cl cache le I !
- **L6 :** Oui. Donc le Cl est ici (sur la représentation 3), voici le I. Maintenant le Br qui est ici (carbone à gauche dans la représentation spatiale), ça cache le H (carbone à droite dans la représentation spatiale). Donc voici le Br ici (lié au carbone proche dans la représentation 3) et le H là (lié au carbone éloigné dans la représentation 3).



Représentation de Cram



Représentation de Newman 3

³⁸ C_g et C_d désignent, respectivement, les carbones à gauche et à droite dans la représentation de Cram.

Maintenant le H qui est ici (lié au carbone proche dans la représentation 3) ça cache le Br qui est ici (lié au carbone proche dans la représentation 3)

Enfin, dans la troisième, L2, L4 et L10 répartissent aléatoirement les substituants des carbones en représentation de Newman.

Ces éléments de raisonnements non spatiaux révèlent à la fois une mauvaise application de la méthode de conversion inter registre Cram Newman, et une interprétation, inadaptée de la représentation de Cram, des enseignants la voyant peut-être comme la représentation d'une molécule à structure bidimensionnelle.

En résumé, la plupart des enseignants n'identifient pas les productions d'élèves correctes ou incorrectes. L'analyse de leur raisonnement spatial à propos de la conversion inter registre Cram-Newman montre à certains moments des méprises. Elles sont dues, d'une part à une assimilation partielle de la méthode de conversion inter registre Cram-Newman, et d'autre part, à des problèmes de visualisation mentale. Certains adoptent des raisonnements non spatiaux qui se révèlent incorrectes.

➤ **Raisonnements relatifs à l'identification des stéréoisomères de conformation (consigne c)**

Neuf enseignants (L1 à L6, L9 à L11) estiment à bon escient qu'aucune des réponses des élèves n'est correcte. Deux autres ne donnent pas leur point de vue (L7 et L8). L7 déclare ne pas savoir; L8 souligne simplement que ces réponses sont dues au manque d'exercices, à la difficulté de comprendre le cours, et que les élèves ont du mal à reconnaître des molécules énantiomères ou identiques.

Parmi les 9 ayant estimé qu'aucune proposition n'est correcte, 7 (L1, L2, L3, L4, L5, L9, L10 et L11) expliquent leurs raisonnements. Ils utilisent partiellement le raisonnement analytique attendu³⁹ (cf. § IV.2.2), à savoir la vérification de l'identité des substituants des carbones dans les représentations. Aucun d'eux ne compare les configurations des représentations (cela est très important, car deux molécules ayant des substituants des carbones identiques peuvent présenter des configurations différentes ; dans une telle situation, on ne parlera plus de stéréoisomérisation de conformation, mais plutôt de stéréoisomérisation de conformation). Ils ne voient

³⁹ Ce raisonnement correspond à celui décrit dans le manuel scolaire (cf. chapitre 2 § II.2)

peut-être pas l'intérêt de le faire. La démarche permettant de reconnaître les stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules est partiellement connue.

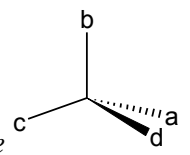
Pour résumer, la plupart des enseignants reconnaissent les stéréoisomères de conformation parmi une série de molécule en représentation de Cram. Ils s'appuient partiellement sur le raisonnement analytique proposé dans le manuel scolaire. Aucun d'eux n'explique les causes et les erreurs des élèves.

IV.2.3. Sur la méthode de la double permutation (MDP)

Nous présentons dans ce paragraphe, les connaissances des enseignants en relation avec la MDP.

➤ Appréciation des réponses d'élèves

Nous cherchons, à la question 11, à connaître le point de vue des enseignants sur le faible taux de réponses correctes à la consigne se rapportant aux propriétés qui régissent la MDP (cf. question 1, étude 2).



Question 11 : A la consigne suivante: dans une molécule chirale telle que

	<i>Pas du tout d'accord</i>	<i>Plutôt pas d'accord</i>	<i>Plutôt d'accord</i>	<i>Tout à fait d'accord</i>
<i>La permutation de deux atomes liés à l'atome de carbone conduit à une molécule qui est image de la première dans un miroir.</i>				
<i>La permutation de deux atomes liés à l'atome de carbone conduit à une molécule identique.</i>				
<i>La permutation, deux à deux, des atomes liés au carbone (a avec b, et c avec d par exemple), conduit à la même molécule.</i>				
<i>La permutation, deux à deux, des atomes liés au carbone (a avec b, et c avec d par exemple), conduit à une molécule qui est image de la première dans un miroir plan.</i>				

Seuls 9% d'élèves ont répondu de manière correcte aux quatre propositions. Qu'est-ce que vous en pensez ? (le tableau des résultats leur est présenté sur papier).

Les enseignants estiment que :

- les élèves n'ont pas compris la consigne : il fallait préciser que le carbone est asymétrique (L1) ou dessiner les représentations spatiales obtenues après les permutations (L4) ; ce qui est une façon indirecte de dire que les élèves ont du mal à reconnaître le carbone asymétrique et à réaliser les permutations des substituants d'un carbone dans la représentation de Cram d'une molécule ;
- le cours de stéréochimie n'est pas compris (L5 et L6), sans donner plus de précision sur les contenus concernés ;
- la notion de molécule chirale n'est pas maîtrisée (L10), les notions de molécules images et molécules identiques sont confondues (L3) ;
- l'enseignement de la stéréochimie étant réalisé sans travaux pratiques, particulièrement sans les modèles moléculaires, les élèves ne voient donc pas comment les atomes sont disposés dans l'espace, et par là comment les permutations sont faites (L2); cela suggère que les élèves présentent des difficultés de visualisation mentale de la représentation de Cram ;
- certains enseignants ne parlent pas de permutation impaire⁴⁰ (c'est-à-dire qu'ils ne précisent pas aux élèves qu'une seule permutation des substituants du carbone asymétrique d'une molécule, conduit à une autre molécule qui lui est image dans un miroir plan) mais uniquement de double permutation (ou permutation paire) (L9) ; cet enseignant met en avant la nécessité de préciser aux élèves les propriétés qui régissent la MDP.

➤ **Enseignement et difficultés d'application de la méthode de la double permutation (MDP)**

Nous cherchons dans la question 12, à savoir si les enseignants expliquent la MDP aux élèves, et quelles sont les difficultés rencontrées par ces derniers dans son application.

Question 12 :

a. Enseignez-vous la méthode de la double permutation aux élèves ?

⁴⁰Permutation impaire signifie que le nombre de permutations est impair dans le langage courant, par exemple 1, 3, 5.

b. *Comment passe-t-elle ?*

[si aucune réponse) avez-vous repéré des points particuliers qui posent problème dans cette méthode ?]

- **Enseignement**

La plupart des enseignants (L1 à L5, L8, L9, et L11) déclare l'enseigner. 6 d'entre eux (L1 à L5, et L8) expliquent leur démarche. Leurs discours sont considérés complets (RC) s'ils indiquent les trois étapes et les propriétés qui régissent la MDP (cf. chapitre 3, paragraphe III.2.2., pp. 125-127), et partiels (RP) dans le cas contraire.

Nous reprenons dans le tableau ci-dessous des exemples d'extraits de discours correspondant aux différentes étapes et propriétés.

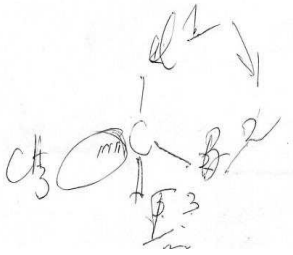

		Extraits de discours	
Etape 1 : une représentation de la molécule de référence est choisie en fonction de l'atome situé sur le trait hachuré		L1 : [...] L'essentiel c'est d'abord de fixer l'atome qui doit rester en arrière du plan. [...] Je donne un exemple ici (montre le dessin 1 ci-contre) donc pour commencer, pour moi j'ai fixé le groupe méthyle [...].	
Etape 2 : réalisation de la double permutation des substituants de la deuxième représentation de la molécule de telle sorte que le substituant sur le trait hachuré soit le même que celui de la molécule de référence.		L1 : Quand je prends la molécule qui est ici (montre le dessin 2 ci-contre), je vais faire ma permutation pour envoyer le groupe méthyle en arrière du plan. Donc ça me donne (montre le dessin 3 ci-contre).	
Etape 3 : Comparaison de la molécule de référence avec la molécule obtenue après double permutation des substituants du carbone	(a) par une règle de numérotation sur un support papier	L1 : J'ai appelé le chlore là 1 (voir dessin 3), le brome il était 2, et l'iode était 3. Et je vais voir le sens de 1, 2, 3. Je vois que les deux (en parlant des substituants Cl, Br et I des dessins 1 et 3) n'ont pas le même sens, ils forment un couple d'énantiomères. Si le sens est unique, ça forme alors une molécule identique.	
	(b) par visualisation mentale	L3 : [...] quand je fais la permutation de b et d (montre la représentation de la question 11), dans ma tête c'est b qui est là (à la place de d) et c'est d qui est là (à la place de b), ainsi que pour la suite. Maintenant celui qui n'a pas pu réaliser ça dans sa tête lui il voit toujours b, il ne pourra plus me suivre.	
Propriétés 1 : une permutation de deux atomes liés à au carbone conduit à une molécule qui est image de la première dans un miroir.		L5 : [...] je fais une permutation, juste une permutation. Et j'ai l'image, c'est l'image que j'obtiens.	
Propriété 2 : une permutation, deux à deux, des atomes liés à un carbone asymétrique, conduit à la même molécule.		L5 : [...] Mais si je dois faire une double permutation, c'est que je tombe sur une molécule identique à celle que j'ai déjà au départ.	

Tableau 54 : extraits de discours des enseignants correspondant aux étapes et aux propriétés de la MDP

	Idées Enseignants	étape 1	étape 2	étape 3		propriétés
				a	b	
Raisonnements complets	L1	X	X	X		X
	L2	X	X	X		X
	L5	X	X	X		X
Raisonnements partiels	L4	X	X	X		
	L8	X	X	X		
	L3	X	X		X	

Tableau 55 : caractéristiques du discours des 6 enseignants ayant expliqué la MDP

L'examen du tableau 55 montre que, sur les 6 enseignants ayant expliqué la MDP, 3 (L1, L2 et L5) ont un discours complet, et 3 autres (L4, L3 et L8), un discours partiel.

Le discours partiel n'explique pas ce qu'implique une simple permutation (propriété 1) ou une double permutation (propriété 2) des substituants du carbone asymétrique; cela nous laisse supposer que la démarche de L4, L3 et L8 relève de la routine.

Pour cinq enseignants (L1, L2, L4, L5 et L8), les différentes étapes de la MDP sont réalisées sur un support papier, excluant toute opération de visualisation mentale.

Seul L3 enseigne cette méthode sans réaliser les étapes 2 et 3 sur un support papier (ou un tableau), les élèves doivent le faire mentalement, ce qui exige d'eux un effort cognitif considérable.

- **Lo** : *Mais ils (en parlant des élèves) ne le font pas sur papier ?*
- **L3** : *Là ça prend du temps, ça veut dire que je vais dessiner autant de fois ce que je vais permuter, je vais finir quand ?*

Cet enseignant semble ignorer le but de cette méthode : contourner les opérations de visualisation mentale qu'implique la reconnaissance de couple d'énantiomères parmi une série de molécules en représentation de Cram. De plus, son enseignement est influencé par le facteur temps.

Dans le but de faire comprendre aux élèves que la numérotation ne se fait qu'entre les trois substituants ne se trouvant pas en arrière du plan, L1 déclare s'appuyer sur une analogie, en l'occurrence le volant d'une voiture : la branche du volant pointant vers le moteur représente la

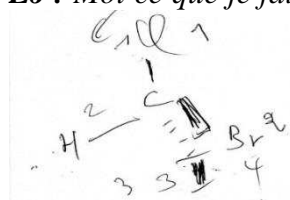
liaison de la molécule en arrière du plan de figure, et les trois rayons du volant les trois autres liaisons de la molécule.

- **L1** : [...] *Bon je prends souvent l'exemple d'un volant de voiture, on a trois axes et on a une liaison qui pointe dans le moteur, c'est à dire je considère là comme la liaison qui est en avant...en arrière (indique les axes du volant avec ces doigts) ! donc quand on tourne, on ne voit pas cette liaison-là (branche pointant vers le moteur), donc on va juste s'intéresser aux trois autres.*

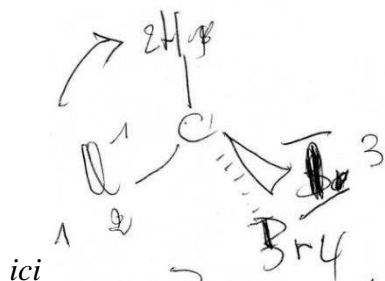
L'enseignant s'appuie sur le fait qu'on ne voit pas la branche du volant pointant vers le moteur lorsqu'on tourne le volant pour expliquer que la numérotation ne peut se faire que sur les branches visibles du volant, donc, par analogie, les liaisons de la molécule situées dans le plan et en avant du plan de figure.

Sur les 11 enseignants, seuls 3 (L6, L7 et L10) n'enseignent pas la méthode de la double permutation aux élèves. L6 ne connaît pas la méthode et en utilise une autre : il procède à une numérotation aléatoire des substituants des carbones et compare leur sens dans chaque représentation spatiale ; s'ils sont contraires, alors les molécules sont énantiomères et vice versa (méthode erronée).

- **L0** : *Vous enseignez quelle méthode finalement pour identifier les couples d'énantiomères ?*
- **L6** : *Moi ce que je fais, je choisis un sens. Ou bien je peux numéroté par exemple ceci :*



(numérote une première fois dans un sens puis dans un autre). *En fait je me fixe un sens (contraire à celui des aiguilles d'une montre). Maintenant je viens*



ici . . . *et après je compare...*

- **L0** : *Ah, vous faites juste une comparaison du sens de lecture des substituants ?*
- **L6** : *Oui.*

Cette démarche ne repose pas sur les propriétés du tétraèdre et est erronée.

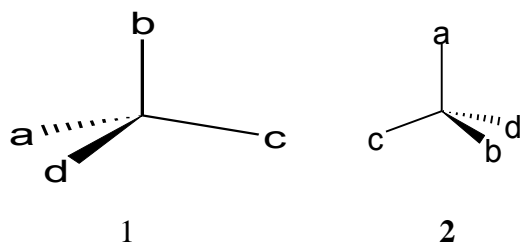
L7 a essayé d'utiliser la MDP dans le passé mais sans succès. Cela est dû au fait qu'il ne fixe pas un même substituant sur le trait de liaison hachuré dans la représentation de référence et la représentation obtenue après double permutation des atomes. Les étapes 1 et 2 ne sont donc pas respectées.

L10 ne déclare pas la méthode utilisée.

- **Difficultés d'application**

Certains enseignants (L1, L4, L5, L8 et L11) pensent que l'application de la MDP ne pose pas de problème aux élèves, d'autres (L2, L3 et L9) sont plutôt d'un avis contraire, et soulignent une erreur récurrente et une difficulté :

- les élèves commettent l'erreur de ne pas fixer le même substituant à l'extrémité du trait hachuré dans la représentation de référence et la représentation obtenue après double permutation des atomes (L2 et L9). Par exemple pour comparer les deux représentations spatiales 1 et 2 suivantes



l'élève peut considérer la représentation 1 comme celle de référence, par conséquent il réalise une double permutation des substituants du carbone de la molécule 2. Seulement, cette dernière doit se faire de telle sorte qu'on obtienne une représentation (3) dont le substituant du trait de liaison hachuré est le même que celui de la représentation de référence 1 c'est-à-dire le substituant a ; ce que les élèves ne font pas toujours.

- Visualisation mentale : les élèves ont du mal à réaliser les permutations mentalement (L3). Rappelons que ce dernier ne dessine pas les molécules obtenues après permutation au tableau, parce que le temps ne le lui permet pas (Cf. paragraphe enseignement de la MDP) ; les élèves ne voient donc pas les résultats des permutations ; ils doivent les imaginer, ce qui fait appel à des capacités de visualisation mentale qu'il faut développer, et que cet enseignant ne travaille pas spécialement. Si nous supposons que L3 n'est pas le seul enseignant à procéder de cette façon, alors c'est peut-être l'une des raisons pour lesquelles certains élèves ont des difficultés dans l'application de la MDP.

En résumé, la majorité enseigne la MDP aux élèves. L'un d'entre eux utilise une analogie pour mieux l'expliquer. Bien qu'elle soit utilisée pour aider les élèves à contourner les capacités de visualisation mentale qu'implique la reconnaissance des couples d'énantiomères parmi une série de molécules, un enseignant ne l'explique pas à bon escient. Il exige des élèves des capacités de visualisation mentale, ce qui traduit une méconnaissance de l'objectif visé par cette méthode. Peu d'enseignants reconnaissent spontanément les difficultés que pose l'application de cette méthode aux élèves. Certains citent une erreur relative au non-respect des étapes 1 et 2 de la méthode: les élèves ne fixent pas un même substituant sur le trait hachuré dans la représentation de référence et la représentation obtenue après double permutation des atomes. La confrontation aux réponses d'élèves, les conduit à mentionner des difficultés relatives à :

- la reconnaissance d'un carbone asymétrique et à la réalisation des permutations des substituants des carbones dans la représentation de Cram d'une molécule ;
- la mauvaise assimilation de la notion de molécule chirale ;
- la confusion entre molécules images et molécules identiques ;
- la visualisation de la représentation de Cram dans l'espace.

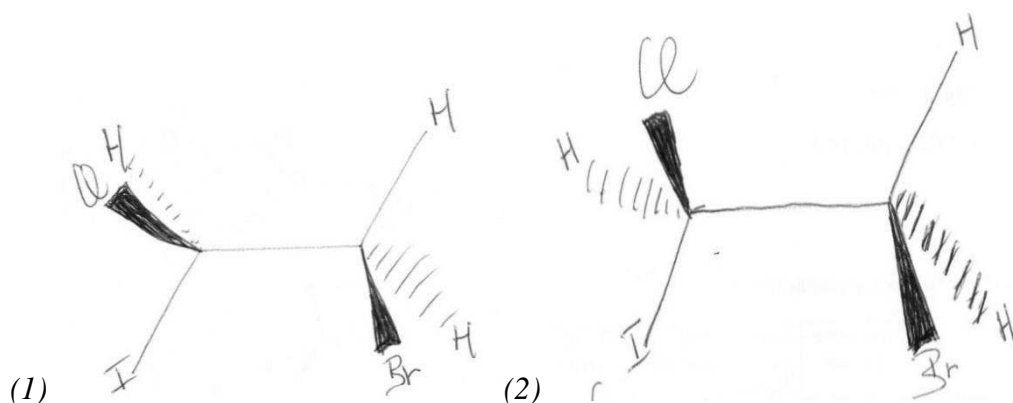
Les propriétés qui régissent la MDP ne sont pas connues des élèves car certains enseignants ne les mentionnent peut-être pas ou ne leur en parlent pas.

Nous constatons que son application n'est pas aisée pour tous les enseignants. L'erreur des élèves, relative au non-respect des étapes 1 et 2 est également commise par l'un d'entre eux. Un autre explique aux élèves une méthode qui ne permet pas, au final, de reconnaître les couples d'énantiomères.

IV.2.4. Sur la représentation des traits de liaison gras et hachuré

A l'occasion de la question 13, nous mettons les enseignants face à deux représentations spatiales d'une même molécule en conformation décalée ; l'une d'elle (représentation 2) comporte des incorrections dans la disposition des traits de liaisons gras et hachurés.

Question 13 : (reprise des productions (1) et (2) des élèves question 10 consigne b) En comparant ces deux représentations



et en oubliant la consigne qui les a générées, à votre avis est-ce qu'elles respectent toutes les deux les conventions de représentation ?

Seuls 3 enseignants (L3, L4 et L5) reconnaissent l'erreur des élèves dans la représentation 2 : permutation des positions des traits de liaison hachuré et gras du carbone gauche.

La majorité (8 : L1, L2, L6 à L11) n'identifie pas la représentation incorrecte. Six d'entre elle (L1, L2, L6, L8 à L11) considèrent toutes les représentations correctes. L7, lui, pense injustement que la représentation 1 est incorrecte, et estime que les positions des traits de liaison hachuré (C—H) et gras (C—Cl) de HICl sont permutées.

Ces résultats montrent que les erreurs relatives aux positions des traits de liaison gras et hachuré par rapport à l'observateur (Pellegrin, 1999, Pellegrin et al., 2003) ne sont pas reconnues par les enseignants, ce qui donne à penser qu'ils peuvent commettre les mêmes erreurs.

IV.2.5. Synthèse

Les résultats des analyses des réponses aux questions complémentaires nous permettent de dégager les caractéristiques des connaissances du contenu disciplinaire et certains composants de PCK des enseignants à propos de la stéréochimie.

IV.2.5.1. Connaissances du contenu disciplinaire stéréochimie

Les connaissances du contenu disciplinaire inférées se rapportent à certaines activités de traitement intra registre de Cram et de conversion inter registre Cram Newman:

- la rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe C—C dans le registre de Cram (question 10.a) ;
- la conversion inter registre Cram Newman (question 10.b) ;

- la reconnaissance de stéréoisomères de conformation parmi une série de de molécules en représentation de Cram (question 10.c) ;
- l'identification de couples d'énantiomères dans le registre de Cram avec la méthode de la double permutation (question 12) ;
- la disposition des traits de liaison gras et hachuré de la représentation de Cram d'une molécule en conformation décalée (question 13).

Le tableau ci-dessous récapitule leurs réponses aux questions 10, 12 et 13. Les cellules colorées indiquent les avis et les raisonnements corrects ou partiellement corrects.

		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11
Question 10 a	Avis global	Ai	Ai	Ac	Ai	Ac	Ai	Pp	Pp	Ai	Ai	Pp
	Nombre d'erreurs sur 4 tâches	1	4		2		2			1	2	
	Raisonnement	Ri	Ri	Ra	Ri	Rc	Ra			Ri	Ri	
Question 10 b	Avis global	Ai	Ai	Ai	Ai	Ai	Ac	Pp	Pp	Ac	Ai	Ai
	Nombre d'erreurs sur 3 tâches	2	2	2	3	1					3	1
	Raisonnement	Ri	Ri	Ri	Ri	Ri	Ri			Rc	Ri	Ri
Question 10 c	Avis global	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Ac	Pp	Pp	Ac	Ac	Ac
	Raisonnement	Rp	Rp	Rp	Rp	Rp	Rp			Rp	Rp	Rp
Question 12	MDP	Rco	Rco	Rp	Rp	Rco		Ri	Rp	Ra		Ra
	Méthode alternative à la MDP						Ri					
Question 13	Avis global	Ai	Ai	Ac	Ac	Ac	Ai	Ai	Ai	Ai	Ai	Ai
	Nombre d'erreurs sur 2 tâches	1	1				1	2	1	1	1	1

Tableau 56 : récapitulatif des avis et raisonnements des enseignants aux questions 10, 12 et 13

Code utilisé

Ai : avis incorrect

Ac : avis correct

Pp : ne précise pas si la représentation de l'élève est correcte ou incorrecte

Rco : raisonnement complet

Rp : raisonnement partiel

Ri : raisonnement incorrect

Rc : raisonnement correct

Ra : raisonnement absent

Aucun enseignant ne fait preuve d'une maîtrise de toutes les activités cognitives en jeu dans les questions 10, 12 et 13. Concernant l'opération de rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe C—C dans le registre de Cram, L5 est le seul à avoir donné un avis global correct sur les réponses d'élèves et a un raisonnement également correct ; toutefois, son raisonnement s'appuie à la fois sur les représentations de Cram et de Newman : nous ne pouvons donc pas dire s'il est capable de réaliser cette opération uniquement dans le registre de Cram. L9 est le seul à montrer une maîtrise de la conversion inter registre Cram Newman (un avis global et un raisonnement partiel corrects, cf. tableau 56). La majorité des enseignants (L1 à L6, L9 à L11) témoigne d'une connaissance partielle de la méthode d'identification des stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Cram (un Ac et un Rp). Trois (L3, L4 et L8) font preuve d'une connaissance partielle de la MDP, trois autres (L1, L2 et L5) d'une connaissance plus complète, et l'un (L7) d'une méconnaissance de la méthode.

Les profils globaux des « connaissances du contenu disciplinaire » des enseignants varient d'un enseignant à un autre, ils sont personnels; néanmoins, il existe parfois des rapprochements entre leurs connaissances sur certaines notions (concernant la MDP par exemple, L1, L2 et L5 ont tenu des raisonnements complets similaires). Avec cinq cellules colorées, L3 et L5 ont le profil le plus développé. Ils sont suivis, respectivement, de L4 et L9 (4 cellules colorées), L1, L2, et L6 (3 cellules colorées), L10 et L11 (deux cellules colorées), L8 (une cellule colorée) et de L7 (aucune cellule colorée).

Tous les enseignants font des erreurs. Le plus grand nombre (7 erreurs) est commis par L2. Il est suivi de L10 (6 erreurs), L4 (5 erreurs), L1 (4 erreurs), L6 (3 erreurs), L3, L7, L9 et L11 (2 erreurs), L5 et L8 (1 erreur).

Dans le cas de la rotation des substituants du carbone autour de l'axe C—C dans le registre de Cram, les angles dièdres sont considérés, à tort, égaux à 60° (L9). Certains enseignants n'arrivent pas à identifier précisément le sens de l'opération de rotation (L1) ou l'axe de rotation (L10). La représentation des traits de liaison après la rotation n'est pas réussie (L4). Les capacités de rotation mentale de ces enseignants sont insuffisantes.

A propos de la conversion inter registre Cram Newman, des enseignants (L1, L2, L4, L6 et L10) utilisent des raisonnements non spatiaux traduisant une mauvaise assimilation de la méthode de conversion inter registre Cram Newman ; ils voient la représentation de Cram comme celle d'une structure bidimensionnelle (L1 et L10) ou observent la représentation de Cram suivant un axe autre que C—C (L6), ou encore répartissent les substituants des carbones aléatoirement dans la représentation de Newman (L2, L4 et L10). D'autres (L3, L5, L9 et L11) maîtrisent partiellement la méthode de conversion, ils ne savent pas qu'il est possible d'obtenir la représentation de Newman à partir d'une observation de la représentation de Cram à droite (L3 et L11). Nous relevons également chez certains des difficultés d'orientation spatiale (L3 et L5).

Lorsqu'il s'agit de reconnaître les stéréoisomères de conformation parmi une série de représentations de Cram de molécule, ils procèdent uniquement à la comparaison de l'identité des substituants des carbones des représentations fournies, excluant celle des configurations absolues (L1 à L5, et L9 à L11).

En ce qui concerne la représentation des traits de liaison gras et hachuré dans la représentation de Cram d'une molécule en conformation décalée, ils ne savent pas comment disposer les traits de liaison hachuré et gras issus d'un même carbone (L1, L2, L6 à L11).

Dans le cas de l'identification des couples d'énantiomères dans le registre de Cram, la plupart des enseignants utilise la MDP (L1 à L5, L8, L9 et L11) seule une minorité a du mal à l'appliquer (L7) ou ne la connaît pas (L6). La méthode alternative proposée (L6) ne repose pas sur un raisonnement correct.

IV.2.5.2. PCK des enseignants

Certains résultats des analyses obtenus se rapportent aux PCK des enseignants. Nous avons distingué les sous-composants «connaissances des difficultés d'apprentissage» des PCK/compréhension et «connaissances de stratégies spécifiques» des PCK/stratégies.

➤ PCK/compréhension : connaissances des difficultés d'apprentissage

Les enseignants citent des difficultés qui affectent l'application de la MDP. Il s'agit des difficultés de reconnaissance d'un carbone asymétrique (L1), d'assimilation de la notion de molécule chirale (L10), de différenciation des molécules images et des molécules identiques (L3). D'autres difficultés constatées sont liées à la visualisation de la représentation de Cram dans l'espace (L2) et à la permutation des substituants des carbones dans cette représentation

(L4) : les élèves en sont incapables. A cela s'ajoute une mauvaise application de la méthode (L2 et L9), les élèves ne fixent pas un même substituant sur le trait de liaison hachuré dans la représentation de référence et la représentation obtenue après double permutation des atomes.

Aucun d'eux ne précise les difficultés des élèves concernant les opérations de rotation des substituants du carbone autour de l'axe C—C dans le registre de Cram, de conversion inter registre Cram Newman, de reconnaissance de stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Cram, et de représentation des traits de liaisons gras et hachurés dans la représentation de Cram d'une conformation décalée.

D'une part, c'est peut-être parce qu'eux-mêmes ne sont pas capables de réaliser l'opération, ce qui peut également expliquer pourquoi ils ne l'évaluent pas⁴¹; leurs connaissances insuffisantes du contenu disciplinaire semblent avoir des conséquences néfastes sur leurs PCK/compréhension et PCK/évaluation.

D'autre part (cas où ils maîtrisent l'opération de traitement intra registre de Cram ou de conversion inter registre Cram Newman), l'absence de questions d'évaluation sur l'opération peut être la principale raison, puisqu'ils n'ont jamais vu des élèves à l'épreuve; leurs PCK/évaluation paraissent avoir une incidence négative sur leurs PCK/compréhension.

Les enseignants n'ont pas également connaissance de l'effet que peut avoir, sur les connaissances des élèves concernant la stéréoisométrie de conformation, le fait de s'appuyer uniquement sur l'exemple de la molécule de l'éthane lors de l'enseignement de cette notion.

➤ **PCK/stratégies : connaissances de stratégies d'enseignement spécifiques**

Les connaissances de stratégies d'enseignement spécifiques se rapportent à :

- la notion de conformation : peu d'enseignants s'appuient sur des exemples variés de molécules pour enseigner cette notion (L3, L10 et L11). D'autres (L4, L7 à L9) ne proposent que l'exemple de la molécule d'éthane, peut-être parce qu'ils ne connaissent pas les difficultés que cela peut engendrer sur l'apprentissage des élèves. Il apparaît que les éléments de PCK/stratégies mis en évidence ici, sont une conséquence de PCK/compréhension réduites.
- la MDP : la majorité des enseignants (L1 à L5, L8, L9 et L11) explique cette méthode aux élèves pour reconnaître les couples d'énantiomères parmi une série de molécules en

⁴¹ Aucune des questions d'évaluation déclarées ne se réfèrent à ces opérations de traitement intra registre de Cram et de conversion inter registre Cram Newman (cf. § V.1.3.1)

représentation de Cram ; toutefois, ils ne déclarent pas que cela permet de contourner les capacités de visualisation mentale qu'implique la réalisation de cette opération : nous ne pouvons donc pas dire s'ils en sont conscients ou pas. Des analogies sont également utilisées pour mieux expliquer la numérotation des substituants de la MDP (L1).

IV.3. Profils PCK des enseignants

Cette partie est consacrée à l'élaboration des profils PCK des enseignants.

Le tableau 57 regroupe des éléments que nous estimons caractéristiques des composants de PCK présentés dans les paragraphes IV.1 et IV.2. Dans le tableau 58, nous présentons, pour chaque enseignant, ses éléments caractéristiques. Les cellules noires indiquent que ces éléments sont cités ou détaillés, et les grises, qu'ils ne sont mentionnés ou explicités que partiellement. Par exemple, pour les éléments caractéristiques suivants (cf. tableaux 57 et 58):

- 1 (objectif de l'enseignement) : la couleur noire traduit une déclaration complète de l'objectif de l'enseignement, alors que la grise indique une déclaration partielle;
- 11 (stéréoisométrie de conformation) : la couleur grise signifie que seule la molécule d'éthane est prise comme exemple pour expliquer la notion de stéréoisométrie de conformation, la noire, par contre, indique que les dérivés de l'éthane sont également utilisés.
- 12 (MDP) : le raisonnement complet est signalé par la couleur noire, et le raisonnement partiel par la grise.
- 19 à 25 (difficultés des élèves) : la cellule noire informe que les causes de la difficulté citée sont expliquées, la grise, en revanche, signifie qu'aucune explication sur l'origine de la difficulté citée n'est donnée.

Les cellules vides indiquent que les éléments caractéristiques sont absents.

		Sous-composant	Éléments caractéristiques	
PCK/programme	I	connaissances des objectifs	1	Objectifs d'enseignement
			2	Curriculum vertical
	II	connaissance du matériel	3	Manuel officiel
			4	Autres manuels
			5	Modèles moléculaires
PCK/stratégies	III	connaissances de stratégies générales	6	Les phases d'une situation d'apprentissage
	IV	connaissances de stratégies spécifiques	7	Utilisation de modèles moléculaires
			8	Analogies (maximum deux citées)
			9	Illustration (une seule citée)
			10	Exercices
			11	Stéréoisométrie de conformation (éthane ou éthane et ses dérivés)
12	MDP (raisonnement complet et raisonnement partiel)			
PCK/évaluation	V	connaissances sur les aspects de l'apprentissage importants à évaluer	13	Aspects évalués (maximum quatre cités)
	VI	connaissances sur les méthodes d'évaluation	14	Procédure de l'évaluation (interrogation écrite)
			15	Fonction sommative de l'évaluation
			16	Exemples de questions posées

	Sous-composant (Sc)		Éléments caractéristiques (Ec)	
PCK/compréhension	VII	connaissances des requis nécessaires à l'apprentissage	17	Requis
	VIII	connaissances des difficultés d'apprentissage	18	Aspects de l'apprentissage compris par les élèves (maximum 7 cités)
			19	Difficultés citées spontanément (maximum cinq citées)
			20	Difficultés relatives à la compréhension de la notion de stéréoisomères de conformation (maximum cinq citées)
			21	Difficultés relatives à l'application de la MDP (maximum deux citées)
			22	Difficultés relatives à la rotation autour de l'axe
			23	Difficultés relatives à la conversion inter registre Cram-Newman
			24	Difficultés relatives à l'identification de stéréoisomères de conformation
			25	Difficultés relatives à la représentation des traits de liaison gras et hachuré dans une conformation en représentation décalée.

Tableau 57 : éléments caractéristiques des composants de PCK

	PCK/programme					PCK/stratégies							PCK/évaluation				PCK/compréhension													
Sc	I		II			III	IV						V	VI			VI	VII												
Ec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18				19			20	21	22	23	24	25
L1																														
L2																														
L3																														
L4																														
L5																														
L6																														
L7																														
L8																														
L9																														
L10																														
L11																														

Tableau58 : éléments caractéristiques des PCK de chaque enseignant

Code utilisé

Sc : sous-composant

Ec : éléments caractéristiques

Globalement, les quatre composants de PCK sont inférés chez tous les enseignants interrogés (cf. tableau 58). A l'intérieur de chaque composant, nous relevons des disparités relatives au nombre d'enseignants ayant mobilisé deux sous-composants.

Concernant les PCK/programme, nous repérons les deux sous-composants, « connaissances des objectifs » et « connaissances du matériel », chez une majorité d'enseignants (neuf, L1 à L7, L9 et L11). Chez deux autres (L8 et L10), seul le premier sous-composant est identifié. Des effectifs similaires sont obtenus avec les PCK/évaluation. Deux sous-composants, « connaissances des aspects de l'apprentissage qui sont importants à évaluer » et « connaissances des méthodes d'évaluation », sont déduits chez la plupart des enseignants (neuf, L1 à L9), le premier sous-composant est absent chez deux autres (L10 et L11).

Les deux sous-composants des PCK/stratégie ou PCK/difficulté sont inférés chez un nombre minime d'enseignants: deux (L5 et L11) dans le cas des PCK/stratégies, et un seul (L3) dans celui des PCK/compréhension. Les sous-composants « connaissances sur les stratégies générales » et « connaissances sur les requis nécessaires à l'apprentissage » ne sont pas identifiés chez la plupart d'entre eux. De plus, l'examen du tableau 58 montre que les éléments caractéristiques de ces PCK (6,9, 20, 22, 23 et 24 par exemple) sont absents chez la plupart des enseignants.

Les enseignants semblent mobiliser plus facilement les sous-composants des PCK/programme et des PCK/évaluation que ceux des PCK/stratégies et des PCK/compréhension.

Les profils des PCK varient d'un enseignant à un autre, ce qui montre bien que les PCK sont personnels (Shulman, 1986a) ; toutefois, leurs connaissances sur certains points se recoupent, par exemple certains citent les mêmes questions d'évaluation. Avec 20 éléments caractéristiques⁴², le profil PCK de L1 paraît être le plus développé. Il est suivi, respectivement, de L9 (16 éléments caractéristiques), L2, L3 et L7 (15 éléments caractéristiques), L4 (14 éléments caractéristiques), L5 (11 éléments caractéristiques), L6, L10 et L11 (9 éléments caractéristiques). Les PCK de L6, L10 et L11, apparaissent comme les moins étendus (9 éléments caractéristiques). Toutefois, si nous ne prenons en compte que les éléments caractéristiques détaillés (les cellules noires), cet ordre change : L1 a toujours le profil le plus développé (14 cellules noires), mais il est suivi, respectivement, de L2 et L3 (12 cellules noires),

⁴² Le nombre d'éléments caractéristiques correspond au nombre de cellules colorées.

L9 (11 cellules noires), L7 (10 cellules noires), L4 et L8 (9 cellules noires), L6 et L11 (8 cellules noires), L5 (7 cellules noires), et L10 (4 cellules noires)

Cet ordre est également différent de celui des profils «connaissances du contenu disciplinaire », par exemple le profil «connaissances du contenu disciplinaire » le plus développé est celui de L3 et L5.

De plus, à l'intérieur de chaque composant de PCK, cet ordre n'est pas le même, et certains profils sont semblables. Dans les composants :

- PCK/programme : L3 présente le profil le plus étendu (cinq éléments caractéristiques). L1, L2, L4, L7, et L11 ont des profils analogues (quatre éléments caractéristiques), et moins allongés que celui de L3. Avec trois éléments caractéristiques, L5, L6, L8, L9 et L10 possèdent les profils les moins élargis et similaires.
- les PCK/stratégies : les profils sont tous différents. Celui de L7 est le plus allongé (cinq éléments caractéristiques), et ceux de L6 et L10 les moins développés.
- les PCK/évaluation : quatre profils sont semblables, ceux de L3, L5, L7 et L10 (deux éléments caractéristiques). Le profil de L1 est le plus large (sept éléments caractéristiques), et celui de L11 le plus étriqué (un élément caractéristique).
- PCK/compréhension : tous les profils diffèrent. A priori, L1 présente le profil le plus développé (six éléments caractéristiques), et L11 le plus petit (un élément caractéristique). Toutefois, nous relevons, dans la plupart des profils, une absence marquée des causes de la majorité des difficultés citées. L2 et L9 sont les seuls à en avoir parfois parlé.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous appuyons sur le modèle de Magnusson, Krajcik, et Borko (1999), pour analyser deux domaines de connaissances professionnelles des enseignants en jeu dans l'enseignement de la stéréochimie: les PCK et les connaissances du contenu disciplinaire. Nous formulons des questions spécifiques de recherche en rapport avec certains composants de PCK, et les connaissances du contenu disciplinaire stéréochimie. Nous apportons des éléments de réponse à ces questions dans les paragraphes suivants.

PCK

Quatre séries de questions concernent les composants de PCK.

- La première est liée aux PCK/programme : quels sont les objectifs d'enseignement de la stéréochimie selon les enseignants ? De quelles ressources documentaires et matérielles disposent-ils pour concevoir et dispenser leur cours ?

L'étude des PCK/programme nous permet de connaître les objectifs d'enseignement de la stéréochimie selon les enseignants. Certains proposent des objectifs analogues à ceux des instructions officielles, d'autres des objectifs partiellement semblables. La plupart estiment que les connaissances de stéréochimie ne sont pas assez réinvesties dans la suite du programme de chimie. Ils ne voient donc pas l'importance de cet enseignement, et évoquent même sa suppression. Une minorité propose des objectifs en lien avec l'isomérisation, faisant preuve d'une méconnaissance des objectifs d'enseignement de la stéréochimie. Nous relevons dans les propos de certains enseignants des traces de la connaissance du curriculum vertical : les notions de stéréochimie sont réutilisées dans les classes de chimie ou de pharmacie de niveau supérieur. Leurs déclarations ne nous permettent pas de mettre en évidence leurs connaissances sur l'articulation des lignes directrices du programme d'enseignement de stéréochimie avec les programmes d'autres disciplines de terminale D.

Les principales ressources documentaires et matérielles utilisées sont des manuels de chimie et des modèles moléculaires.

L'étude de ce composant nous fournit également des informations relatives au contexte de l'enseignement :

- certains établissements scolaires ne disposent pas de modèles moléculaires ;
- les épreuves du baccalauréat ne portent pas souvent sur la stéréochimie.

Les considérations des enseignants, à propos des objectifs de l'enseignement de la stéréochimie et le contexte de l'enseignement, affectent considérablement leurs choix à propos des « stratégies d'enseignement » à adopter et des « évaluations » à proposer, ainsi que l'apprentissage de la stéréochimie.

- La deuxième porte sur les PCK/stratégies : quelles stratégies utilisent les enseignants pour enseigner la stéréochimie ? Sur quelles méthodes s'appuient-ils pour rendre le sujet compréhensible aux élèves ?

L'examen des PCK/stratégies révèle deux types d'enseignement : l'un combine l'utilisation de représentations sémiotiques et de modèles moléculaires pour expliquer les notions de stéréochimie, l'autre, en raison des conditions matérielles inadéquates, ne s'appuie que sur les représentations sémiotiques, ce qui rend l'enseignement de la stéréochimie plus que difficile. Les enseignants usent parfois d'illustrations et d'analogies pour pallier l'absence de modèles moléculaires, ce qui facilite la visualisation et la compréhension de la représentation de Cram d'une molécule. La MDP est également enseignée aux élèves, et ce, pour leur permettre de reconnaître des couples d'énantiomères sans utiliser la visualisation mentale des représentations de Cram.

- La troisième série se rapporte aux PCK/évaluation : quelles notions de stéréochimie et capacités des élèves évaluent les enseignants? Quels types d'évaluation proposent-ils ?

L'analyse des PCK/évaluation du composant «connaissances sur l'évaluation » nous fournit les renseignements suivants :

- les évaluations portent essentiellement sur la stéréoisomérisation configurationnelle, la stéréoisomérisation conformationnelle semble présenter peu d'intérêt pour les enseignants ;
- elles sont sommatives et données sous forme d'interrogations écrites ;
- la plupart porte sur des opérations de traitement intra registre de la perspective, de la formule semi-développée, de Cram et de Newman, la conversion inter registre formule semi-développée Cram ;
- les définitions des notions de stéréochimie (stéréoisomérisation de configuration par exemple) et la conversion inter registre Cram Newman ne sont pas évaluées;
- seul, un tiers des capacités attendues des élèves sont évaluées, et les capacités expérimentales n'y figurent pas, à cause de l'absence de ressources matérielles, ou peut-être, des difficultés des enseignants à concevoir des évaluations adaptées.

Nous constatons également que le degré de motivation et de compréhension des élèves influencent les choix des enseignants à propos des résultats de l'apprentissage à enseigner et à évaluer : les aspects auxquels les élèves ne portent pas d'intérêt ou qu'ils ne comprennent pas ne sont pas évalués. Ce manque d'intérêt à certains résultats de l'apprentissage est dû au fait qu'ils sont à peine évalués au baccalauréat.

- La quatrième série concerne les PCK/compréhension : quelles sont les connaissances des enseignants à propos des aspects de stéréochimie compris facilement par les élèves ?
Connaissent-ils leurs difficultés à propos de la stéréochimie ?

A travers l'étude des PCK/compréhension, nous remarquons que pour un même aspect d'apprentissage, certains enseignants estiment qu'il est compris, d'autres non. Le symbolisme des liaisons dans le registre de Cram est le seul aspect d'apprentissage dans lequel les opinions des enseignants s'accordent : ils estiment tous qu'il est bien compris par les élèves. L'apprentissage de la stéréochimie est considéré comme difficile par la majorité des enseignants. Ils citent spontanément, d'une part, des difficultés des élèves auxquelles nous ne nous attendons pas (recherche du carbone asymétrique dans une représentation de Cram d'une molécule par exemple). Bien que ces difficultés soient, pour la plupart, sans rapport avec la visualisation mentale des représentations sémiotiques, elles enrichissent notre liste de difficultés d'apprentissage de la stéréochimie. D'autre part, de rares difficultés mentionnées se rapportent à celles identifiées dans nos questionnaires et entretiens élèves ; lorsque nous leur présentons les réponses erronées d'élèves, ils n'apportent que peu de précisions sur leurs causes : leurs PCK/compréhension sont limitées.

L'analyse des questions complémentaires nous permet, d'étoffer nos analyses sur certaines difficultés des élèves. Concernant la notion de stéréoisomérisation de conformation, la majorité des enseignants interrogés s'appuie exclusivement sur les conformations de la molécule d'éthane pour enseigner cette notion, ce qui peut expliquer sa mauvaise assimilation par les élèves. Dans le cas de l'application de la MDP, les élèves ne respectent pas les différentes étapes.

Connaissances du contenu disciplinaire

Une seule question spécifique de recherche est liée aux connaissances du contenu disciplinaire :

- Quelles sont les connaissances des enseignants à propos des opérations de traitement intra registre de Cram et de conversion inter registre Cram Newman ?

Les résultats de l'analyse des questions dites particulières, révèlent que la majorité des enseignants présente, comme les élèves, des difficultés de visualisation mentale des représentations de Cram et de Newman. Ces difficultés se traduisent précisément par une incapacité d'orientation spatiale et de relations spatiales (rotation mentale et projections mentales) A cela s'ajoute la méconnaissance de la valeur des angles dièdres et des différentes étapes de la méthode de conversion inter registre Cram Newman. Ils ont donc du mal à réaliser

la rotation des substituants du carbone autour de l'axe de la liaison C—C dans le registre de Cram et de conversion inter registre Cram Newman. La démarche utilisée pour reconnaître les stéréoisomères de conformation parmi une série de représentations de Cram de molécule n'est pas concluante : ils ne comparent que l'identité des substituants des carbones des représentations fournies, et ne tiennent pas compte de celle des configurations absolues. Ce qui peut, dans certaine situation, les induire en erreur. La maîtrise du contenu disciplinaire stéréochimie paraît donc partielle. Cela les empêche d'identifier certaines difficultés des élèves et/ou leurs causes, et par conséquent compromet leurs PCK/compréhension. L'impact des « connaissances du contenu disciplinaire » sur les PCK semble également se manifester sur le composant PCK/évaluation : les opérations de traitement intra registre de Cram (rotation des substituants du carbone autour de l'axe de la liaison C—C) et de conversion inter registre Cram Newman pour lesquelles les enseignants rencontrent des difficultés ne sont pas évaluées.

Nous montrons également que les profils globaux des « connaissances du contenu disciplinaire » et des « PCK » des enseignants sont personnels, c'est-à-dire qu'ils changent d'un enseignant à un autre. Toutefois, il existe un parallèle entre leurs « PCK » sur certains points : par exemple certains citent les mêmes objectifs du programme, ressources matérielles, questions d'évaluation ou difficultés d'élèves.

Les quatre composants de PCK ont été inférés chez tous les enseignants interrogés, et certains semblent être influencés par d'autres (relation inter composants de PCK).

D'une part, les stratégies générales adoptées par certains enseignants sont celles recommandées par les instructions officielles, quelques-uns usent également d'illustration ou d'analogies en guise de remplacement de modèles moléculaires : leurs PCK/programme sont en relation avec leurs PCK/stratégies. D'autre part, des PCK/évaluations semblent être liées aux PCK/programme, en effet, les résultats de l'apprentissage évalués se rapportent aux capacités attendues des élèves (d'après le programme). Ces PCK/évaluation paraissent être également en relation avec des PCK/compréhension : le fait de ne pas proposer des questions d'évaluation sur l'opération de traitement intra registre Cram (rotation des substituants du carbone autour de l'axe de la liaison C—C) ou de conversion inter registre Cram Newman (cas de ceux qui ont une maîtrise de l'opération) empêche l'identification des difficultés que les élèves rencontrent dans leur apprentissage.

Shulman (1986a) a conceptualisé les PCK/compréhension et les PCK/stratégies comme des éléments clés de PCK, et la plupart des chercheurs (Grossman, 1990 ; Magnusson et al., 1999 ;

Park & Chen, 2012 ; Tamir, 1988, Marks, 1990, Geddis et al., 1993, Fernandez Balboa & Stiehl, 1995, Hasweh, 2005, Loughran et al., 2006, cités par Park & Oliver, 2008a) sont d'accord avec lui, même si leur conception de PCK est différente . Les recherches menées par Park et Chen⁴³ (2012), sur une population d'enseignants de biologie dans le cadre de la photosynthèse et de l'hérédité, montrent par exemple que ces deux composants de PCK sont fortement liés et au centre de l'intégration des composants de PCK. La présente étude révèle que ces deux - composants sont peu développés chez la plupart des enseignants, en effet, les sous-composants « connaissances sur les stratégies générales » et « connaissances sur les requis nécessaires à l'apprentissage » n'ont pas été identifiés dans leur profil PCK. De plus, leurs « connaissances des difficultés d'apprentissage » des élèves sont partielles (peu de difficultés citées et d'explications sur leurs causes), alors qu'elles contribuent au développement des PCK (Park & Oliver, 2008a). Le caractère réduit des composants clés des PCK (PCK/compréhension et PCK/stratégies) nous laisse donc supposer que, de manière générale, leurs PCK sont réduites.

⁴³ Ces auteurs utilisent le modèle pentagone de PCK (Park & Oliver, 2008b) comme cadre conceptuel. Il s'agit d'un modèle qui met en évidence le caractère cohérent des cinq composants de PCK du modèle de Magnusson et al. (1999), c'est-à-dire qu'ils s'influencent mutuellement de façon continue et sont contextuellement liés.

Conclusion générale et perspectives

Cette partie est consacrée à la conclusion générale de notre recherche, et aux perspectives qui s'en dégagent. Nous présenterons dans l'ordre :

- les réponses à nos questions principales de recherche (§ I) ;
- les limites de notre étude (§ II) ;
- les perspectives de notre recherche (§ III).

I. Retour sur les questions principales de recherche

Nous cherchons à faire un état des lieux de l'enseignement/apprentissage, au Bénin, à propos d'un aspect de la chimie organique en terminale D : la stéréochimie. Nous tâchons de :

- mettre en exergue les capacités, les conceptions et les difficultés des élèves ;
- reconstituer certains composants des connaissances pédagogiques du contenu mobilisées par les enseignants pour enseigner le cours de stéréochimie ;
- inférer les connaissances disciplinaires des enseignants sur le contenu de stéréochimie.

Pour cela, nous orientons cette recherche autour de deux axes :

- les raisonnements et les difficultés des élèves ;
- les connaissances professionnelles des enseignants (PCK et connaissances du contenu disciplinaire).

Concernant les raisonnements et les difficultés des élèves en stéréochimie, les questions de recherche principales portent sur les systèmes de représentation de molécules (systèmes sémiotiques et modèles moléculaires) :

- quels raisonnements les élèves béninois de terminale D utilisent-ils pour résoudre les problèmes de stéréochimie ?
- quelles sont les difficultés rencontrées par ces élèves lors de l'utilisation et de l'interprétation des représentations sémiotiques et des modèles moléculaires en stéréochimie ?

A propos des connaissances professionnelles des enseignants, les questions principales de recherche suivantes sont posées :

- quelle est la nature des PCK des enseignants béninois à propos de la stéréochimie ?
- quel est leur degré de maîtrise du contenu disciplinaire stéréochimie ?

Pour répondre à ces questions, cette recherche franchit les étapes suivantes :

- caractérisation des systèmes sémiotiques et des modèles moléculaires utilisés en stéréochimie selon le cadre théorique des systèmes et des registres sémiotiques développé par Duval (1993) en mathématiques, afin de circonscrire les activités cognitives qu'ils permettent (chapitre 1) ;
- analyse du programme d'enseignement et du manuel scolaire sous l'angle de la sémiotique, dans le but de voir dans quelle mesure les systèmes sémiotiques et les modèles moléculaires sont utilisés dans le contenu à enseigner (chapitre 2) ;
- analyse des raisonnements et des difficultés des élèves sur quelques représentations sémiotiques et des modèles moléculaires, sous l'angle de la visualisation mentale et des gestes (chapitre 3) ;
- analyse des connaissances professionnelles des enseignants afin de dégager la nature de certains des composants de leurs PCK (Magnusson et al., 1999) et leur maîtrise du contenu disciplinaire stéréochimie (chapitre 4).

Systèmes sémiotiques et modèles moléculaires en stéréochimie

L'enseignement et l'apprentissage de la stéréochimie reposent principalement sur la manipulation et l'interprétation des représentations sémiotiques et des modèles moléculaires. Duval a proposé un cadre théorique sémiotique pour les mathématiques, articulé autour des activités cognitives de communication, de traitement et de conversion. Dans cette étude, nous adoptons la même approche pour caractériser les représentations sémiotiques et les modèles moléculaires utilisés en stéréochimie. Ainsi nous cernons les activités cognitives qu'ils permettent, et montrons l'importance de leur coordination dans l'apprentissage de cette discipline.

Programme d'enseignement et manuel scolaire

L'analyse du contenu de stéréochimie à enseigner est réalisée en plusieurs étapes.

Nous analysons les contenus textuels et les contenus sémiotiques du manuel recommandé par le programme ; c'est un manuel français antérieur au programme béninois. Nous constatons, d'une part, que la définition des notions de stéréochimie et la mise en évidence des propriétés de stéréoisomérisation reposent principalement sur deux systèmes de projection, le système de Cram et le système de Newman (et dans une moindre mesure sur les modèles moléculaires), d'autre part, que ce manuel fait la part belle aux activités de communication et de traitement, mais

qu'il ne détaille pas les méthodes de conversion inter registre Cram Newman par exemple. Nous recensons également les capacités des élèves nécessaires à la résolution des exercices proposés : toutes sont liées aux activités cognitives que permettent les représentations sémiotiques.

Lorsque nous débutons notre étude, le programme d'enseignement est conçu selon la pédagogie par objectifs (PPO). Nous vérifions donc si les objectifs pédagogiques sont comportementalistes, et cherchons à en déduire les capacités attendues des élèves, les systèmes sémiotiques et les modèles moléculaires en jeu ; ce manuel est aussi conçu d'après un programme français, nous voulons savoir s'il répond aux attentes du programme. Nous arrivons aux conclusions suivantes :

- les objectifs pédagogiques du programme sont comportementalistes ;
- le programme de stéréochimie est effectivement en adéquation avec le contenu stéréochimie du manuel, et les capacités attendues des élèves identifiées dans le programme se rapprochent de celles nécessaires à la résolution des exercices d'application proposés dans le manuel.

L'analyse ainsi réalisée révèle que les représentations sémiotiques sont au cœur du processus d'enseignement/apprentissage de la stéréochimie en terminale D.

Un nouveau programme d'enseignement conçu selon l'approche par les compétences (APC) ayant été mis en œuvre durant notre travail, nous procédons à un examen comparatif des programmes PPO (1995) et APC (2011) sur le contenu à enseigner et les capacités attendues des élèves. Les résultats de la discussion faite autour des deux programmes, montrent que les compétences exprimées dans le programme APC sont liées au contenu de stéréochimie à enseigner dans le programme PPO, que leur formulation les réduit à des objectifs opérationnels comportementalistes, et les capacités attendues des élèves sont semblables à celles déterminées dans le programme PPO. Nous concluons que ce dernier n'a pas subi de changement pouvant altérer amplement la suite de nos recherches.

Raisonnements et difficultés des élèves

Pour mettre en évidence les raisonnements et difficultés des élèves, nous réalisons trois études, plus ou moins complémentaires, durant trois années consécutives. Les résultats obtenus se rapprochent parfois de ceux obtenus par d'autres chercheurs sur un échantillon étudiantin (e.g. Tuckey et al., 1999 ; Pellegrin, 1999 ; Pellegrin et al., 2003 ; Stieff, 2007 ; Taagepera, 2007 ; Boukhecm et al., 2011).

Nous relevons, que les élèves utilisent deux types de raisonnements, spatial et analytique, pour résoudre les problèmes de stéréochimie suivants : l'identification de stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules dans le registre de Cram ou de Newman, la rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe C—C dans le registre de Cram, et la conversion inter registre Cram Newman. Nous constatons que, lorsqu'il s'agit de réaliser les opérations de rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe C—C dans le registre de Cram (activité de traitement) et de conversion inter registre Cram Newman, la plupart adoptent un raisonnement analytique qui s'avère inefficace, au détriment d'un raisonnement spatial. Le type de raisonnement utilisé ne semble donc pas dépendre de l'activité cognitive, traitement ou conversion, à réaliser. Ce résultat est différent de celui obtenu par Stieff (2010), à savoir que chez les étudiants le choix du raisonnement est tributaire de l'activité cognitive à réaliser : par exemple ils utilisent plus un raisonnement spatial lorsque l'opération à réaliser est une conversion inter registre.

Pour certains élèves, le choix d'un raisonnement analytique s'explique par le fait qu'ils ont d'une part, comme des étudiants (Tuckey et al., 2007), des difficultés de rotation mentale (cas de l'opération de rotation dans le registre de Cram) ; d'autre part ils ont des difficultés d'orientation spatiale (cas de la conversion inter registre Cram Newman), et peut-être même de visualisation spatiale et de projection mentale. Bien qu'il soit infructueux, ce raisonnement analytique apparaît bien comme une alternative pour contourner les difficultés de visualisation mentale (Stieff, 2010). Pour d'autres, le raisonnement analytique est provoqué par un manque de connaissance du contenu stéréochimie au lieu d'une incapacité à manipuler mentalement les représentations de Cram:

- dans le cas de la conversion inter registre, il s'agit :
 - o de l'ignorance de la méthode de conversion inter registre : par exemple pour réaliser cette conversion, les élèves dessinent la représentation de Newman de forme globale, éclipée ou décalée, identique à celle de Cram, puis répartissent les substituants des carbones aléatoirement ;
 - o de la méconnaissance du caractère tridimensionnel de la représentation de Cram, ce qui conduit les élèves à voir les atomes situés sur des traits de liaison de même symbolisme, diamétralement opposés ;
- concernant l'opération de rotation dans le registre de Cram, c'est :

- le manque de connaissance de la valeur des angles dièdres : les élèves supposent, à tort, qu'elle est égale à 60° ; la rotation d'un angle de 60° se traduit alors par une permutation circulaire des substituants du carbone ;
 - la confusion entre rotation autour d'un axe et symétrie par rapport au plan : les élèves représentent ainsi l'image de la représentation de Cram dans un miroir plan.
- à propos de l'identification de stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules dans les registres de Cram ou de Newman, il s'agit, comme chez certains étudiants (Boukhechem et al., 2011), d'une appropriation fragmentaire ou inexacte de la notion de stéréoisomérisation de conformation ; étant donné que l'enseignement de la stéréoisomérisation de conformation repose sur les conformations limites de l'éthane (molécule dont les substituants des carbones sont tous identiques), les élèves (plus de 30%, études 1 et 2) pensent que les formes globales sont les seuls critères permettant d'identifier les stéréoisomères de conformation et oublient de regarder la nature des substituants des carbones.

Ainsi, quand ils ont une connaissance, du contenu, relativement insuffisante par rapport à celle exigée par la tâche, leur degré de connaissance du contenu est un facteur plus influent dans la réalisation de la tâche que leurs capacités de visualisation mentale.

Un autre raisonnement analytique utilisé par les élèves est la méthode de la double permutation. Contrairement aux raisonnements analytiques cités précédemment, ce dernier a la particularité d'être proposé par les enseignants, et ce, pour identifier les couples d'énantiomères dans le registre de Cram. Toutefois, nous constatons que ce n'est pas la stratégie la plus aisée ou la plus efficace pour les élèves. Nous parvenons ainsi à la même conclusion que Stieff (2007), Taagepera et Noori (2007, cités par Stieff, 2001) à propos d'un raisonnement analytique.

Rares sont les raisonnements spatiaux des élèves ayant débouché sur des réponses correctes. Des raisons de nature différente expliquent cela :

- La première est de l'ordre de la visualisation mentale : les élèves sont dépourvus de capacités de rotation mentale (cas de l'opération de rotation dans le registre de Cram), d'orientation spatiale et de projection mentale (cas de la conversion inter registre Cram Newman) ;

- La deuxième est relative à la géométrie : les élèves sont incapables d'identifier l'axe de rotation et de réaliser l'angle de rotation demandé (cas de l'opération de rotation dans le registre de Cram) ;
- enfin, la troisième se rapporte au contenu stéréochimie : leurs connaissances des étapes de la méthode de conversion inter registre Cram Newman sont insuffisantes.

Nous arrivons à la conclusion que, comme chez les étudiants (Carter et al., 1987), les capacités de visualisation mentale influencent les performances des élèves.

Ces différents raisonnements et difficultés des élèves expliquent le fort taux de réponses erronées dans les études réalisées : 100% ne réussissent pas l'opération de rotation des substituants du carbone autour de l'axe C—C (étude 2 et 3), plus de 50% ne mènent pas à bien l'opération de reconnaissance de stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Newman (étude 1) ou de Cram (étude 2), et 91% ne maîtrisent pas les propriétés qui régissent la méthode de la double permutation. Très peu parviennent également à réaliser la conversion inter registre Cram Newman (par exemple, un seul élève sur seize le réussit dans l'étude 3).

Bien que l'usage de modèles moléculaires améliore les capacités de visualisation mentale (Copolo & Hounshell, 1995, Ferk et al., 2003), et soit recommandé par les instructions officielles, certains élèves affirment ne l'avoir jamais utilisé en classe, cela est confirmé par les propos des enseignants : certains reconnaissent ne pas les utiliser (cf. chapitre 4 § IV.1.2.2). Ainsi, ils sont incapables de les manipuler. Cet état de fait réduit leur chance de développer leurs capacités de visualisation mentale.

Des erreurs relatives aux conventions de représentation des liaisons et des angles qu'ils forment dans le registre de Cram sont régulièrement commises par une majorité d'élèves : comme les élèves français (Pellegrin, 1999) et les étudiants (Pellegrin et al., 2003), ils ne savent pas, en conformation décalée, dans quelle circonstance un trait de liaison gras doit être au-dessus ou en dessous du trait de liaison hachuré.

Connaissances professionnelles des enseignants

Nous avons identifié les composants suivants de PCK chez les enseignants : PCK/objectifs, PCK/évaluation, PCK/compréhension et PCK/stratégies. Ces derniers semblent être en interaction (relation inter composants de PCK). En effet, les choix des stratégies à adopter (PCK/stratégies) et des résultats de l'apprentissage à évaluer (PCK/évaluation) sont liés à leurs connaissances des recommandations des instructions officielles (PCK/programme). De plus,

les enseignants n'identifient pas certaines erreurs ou difficultés des élèves (PCK/compréhension), particulièrement celles liées aux opérations, de rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe C—C et de conversion inter registre Cram Newman, d'une part, parce que ces opérations ne sont pas évaluées (PCK/évaluation) et qu'eux-mêmes ne les maîtrisent pas (« connaissances du contenu disciplinaire » réduites) : nous établissons là un lien entre les PCK/compréhension et les PCK/évaluation (relation inter composants de PCK), et entre ces derniers et les connaissances du contenu disciplinaire (relation inter PCK connaissances du contenu disciplinaire).

Bien que, de manière globale, les caractéristiques des composants de PCK soient spécifiques à chaque enseignant, et que celles de chaque sous-composant varient également d'un enseignant à un autre, il existe des similitudes entre les sous-composants de PCK de certains d'entre eux sur certains points. Par exemple, la majorité s'accorde sur le fait que la stéréochimie est difficile à enseigner et utilise un même type d'évaluation (les interrogations écrites). Nous relevons que les deux premiers composants (les PCK/objectifs et les PCK/évaluation) semblent plus développés que les deux autres (les PCK/compréhension et les PCK/stratégies) chez une majorité d'enseignants interrogés. En effet, les deux sous-composants des PCK/programme (les « connaissances des objectifs » et les « connaissances du matériel ») et des PCK/évaluation (les « connaissances sur les résultats de l'apprentissage importants à évaluer » et les « connaissances sur les méthodes d'évaluation ») sont repérés chez la plupart d'entre eux, alors que ceux des PCK/stratégies (les « connaissances de stratégies générales » et les « connaissances de stratégies spécifiques ») et des PCK/compréhension (les « connaissances des requis nécessaires à l'apprentissage de la stéréochimie » et les « connaissances des difficultés d'apprentissage ») ne sont identifiés que chez une minorité. En outre, leurs PCK/compréhension ne sont que partielles : les principales difficultés des élèves (en l'occurrence celles mises en évidence dans nos études) ne sont pas connues, ainsi que les causes de la plupart des difficultés citées. Or, les PCK/compréhension et les PCK/stratégies sont des composants clés des PCK (Shulman 1986a ; Grossman, 1990 ; Van Driel et al., 1998 ; Magnusson et al., 1999 ; Park & Chen, 2012 ; Tamir, 1988, Marks, 1990, Geddis et al., 1993, Fernandez Balboa & Stiehl, 1995, Hasweh, 2005, Loughran et al., 2006, cités par Park & Oliver, 2008a), et "avoir du PCK" consiste à identifier les difficultés, leur attribuer une cause et ensuite proposer une stratégie pertinente pour les surmonter. Nos résultats montrent que les enseignants interrogés n'ont pas atteint ce stade de connaissance et de réflexion sur l'enseignement de la stéréochimie en terminale D.

II. Limites de notre étude

Bien que nous ayons réussi à caractériser les PCK des enseignants et à dresser leurs profils, nous sommes conscients que notre étude comporte des limites.

Tout d'abord, quoique les « orientations de l'enseignement des sciences » ne puissent pas être réduites à une connaissance en lien avec le contenu (Abell, 2007 ; Jameau, 2012 ; Hammoud, 2012), elles pilotent les actions de l'enseignant (Hammoud, 2012) ; par conséquent elles peuvent influencer leurs PCK. Certains chercheurs ont établi une connexion entre les « orientations » et les autres composants du modèle de PCK de Magnusson et al. (1999), à savoir, les orientations de l'enseignant (la didactique et la rigueur académique) sont liées aux PCK/stratégies et aux PCK/compréhension (Padilla & Van Driel, 2011) ou inhibent la connexion entre les PCK/compréhension et les autres composants (Park & Chen, 2012). Nous précisons que leurs études et la nôtre présentent des différences, par exemple :

- la taille et les caractéristiques de l'échantillon: l'échantillon de Padilla et Van Driel se compose de six professeurs universités, ceux de Park et Oliver de quatre enseignants du secondaire, alors que le nôtre compte onze enseignants du secondaire ;
- le sujet est complètement différent : dans leurs cas, c'est la chimie quantique (Padilla et Van Driel), la photosynthèse et l'hérédité (Park et Chen), le nôtre, la stéréochimie ;
- l'interprétation faite du modèle de PCK de Magnusson et al. (1999) : ils considèrent les orientations de l'enseignement des sciences comme un composant de PCK, alors que nous l'écartons.
- la méthodologie de collecte et de traitement des données : Park et Chen, par exemple, utilisent, comme sources de données, des observations de classe et des entretiens semi-structurés.

Au-delà du fait qu'ils aient inclus les « orientations » dans les PCK, leurs études ont le mérite d'avoir établi une connexion entre les « orientations » et les autres composants du modèle de PCK de Magnusson et al. (1999). La nature de ce lien est donc questionnée dans le cas des enseignants de stéréochimie.

Enfin, nous avons obtenu peu de détails sur les évaluations proposées, les causes de la plupart des difficultés identifiées, et les stratégies d'enseignement. L'instrument de collecte des données en est peut-être la cause. Une reconstruction des PCK des enseignants à partir des observations de leurs pratiques de classe est envisagée.

III. Quelques pistes sur l'enseignement et la formation des enseignants

Notre recherche a mis l'accent sur les raisonnements et les difficultés des élèves, et sur les connaissances professionnelles des enseignants. A l'issue des résultats obtenus, de nouvelles questions se posent.

- Quelles stratégies d'enseignement mettre en place
 - o pour que les élèves s'approprient les conventions de représentation dans les registres de Cram et de Newman?
 - o pour que les élèves utilisent et interprètent correctement des représentations sémiotiques et des modèles moléculaires en stéréochimie ?
- Quelles orientations privilégier au cours de la formation initiale ou continue pour que les enseignants prennent conscience de leurs propres difficultés et des difficultés d'apprentissage des élèves?

Adopter une stratégie adéquate pour enseigner la stéréochimie

L'analyse quantitative des réponses d'élèves montre que la plupart d'entre eux présente des difficultés relatives à l'utilisation et à l'interprétation des représentations sémiotiques de Cram et Newman, dues à une méconnaissance de leurs conventions de représentation et à un manque ou une insuffisance de capacités de visualisation mentale. Pour aider les élèves à surmonter ces difficultés, en accord avec les propositions d'autres auteurs, nous recommandons aux enseignants :

- de montrer plus de rigueur dans la présentation des conventions de représentation d'une molécule à trois dimensions sur le plan de la feuille ou du tableau dans les registres de Cram et de Newman (symbolisme des liaisons, valeurs des angles entre les traits de liaison, de l'angle dièdre etc.), car leur intention de représentation doit être claire pour que la réception du message par l'élève soit parfaitement définie (Pellegrin et al., 2003).
- d'apprendre aux élèves les différences de représentation de Cram liées au déplacement de l'observateur mais également celles liées au déplacement de la molécule-modèle moléculaire, cette distinction étant très importante puisque c'est la position relative entre l'observateur et la molécule observée qui compte en matière de représentation (Pellegrin et al., 2003). Pour les mêmes raisons, ils doivent leur apprendre également les différences de représentation de Newman liées à la position de l'observateur, à gauche ou à droite, suivant l'axe de la liaison C—C de la représentation de Cram.

- de favoriser la manipulation personnelle de modèles moléculaires par l'élève (Pellegrin et al., 2003 ; Stull et al., 2012). En effet, outre l'intérêt de mieux visualiser la structure tridimensionnelle de la molécule (Pellegrin et al., 2003 ; Stull et al., 2012) et d'améliorer les capacités de visualisation mentale (Stull et al., 2012), « *le modèle permet de représenter les angles de liaison de façon réaliste et d'éviter par exemple que les angles tétraédriques ne deviennent aigus* » (Pellegrin et al., 2003) ; évidemment cela exige des ressources matérielles, du temps... et les contraintes institutionnelles (nombre d'heures d'enseignement, effectifs d'élèves) ne permettent pas facilement une telle pratique ! (ibid).
- d'utiliser un logiciel de visualisation des structures moléculaires qui favorise la perception des trois dimensions de la structure moléculaire (perception des diverses formes géométriques et de la relation entre la formule moléculaire et la structure géométrique), et par-là les capacités de visualisation mentale (Barnea et Dori, 1999 ; Wu et al 2001).

Nous remarquons également que les élèves peinent à identifier les stéréoisomères de conformation parmi une série de molécules en représentation de Cram, cela parce qu'ils ont incorrectement ou partiellement assimilé la notion de stéréoisomérisation de conformation. Nous inférons que cette mauvaise assimilation est due au fait que les enseignants s'appuient exclusivement sur les conformations de la molécule d'éthane pour enseigner cette notion. Cette inférence suggère qu'ils doivent également utiliser des conformations d'autres molécules, par exemple des dérivés de l'éthane.

Concernant la méthode de la double permutation, les enseignants devraient insister sur les propriétés qui la régissent et sur le respect scrupuleux des différentes étapes.

Concevoir une formation d'enseignants

Le modèle des PCK a été développé dans une perspective de formation des enseignants (Shulman, 1986a). Leur description peut aider à la conception d'un programme d'enseignement, que ce soit dans le domaine de la formation initiale ou continue. La présente étude montre que, d'une part les PCK/compréhension et les PCK/stratégies des enseignants sont peu développées, alors qu'elles sont des composants clés des PCK (e.g. Shulman, 1986, van Driel et al., 1998) d'autre part que leurs connaissances du contenu disciplinaire sont insuffisantes. Cela suggère que, afin de développer les PCK, la formation doit cibler l'amélioration de ces deux sous-composants de PCK et les connaissances du contenu

disciplinaire. Il s'agira de les former sur le concept de la liaison chimique et les activités cognitives (communication, traitement et conversion) que permettent les systèmes sémiotiques de Cram et de Newman, et les modèles moléculaires. L'usage de modèles moléculaires est un moyen de développer leur perception de la structure tridimensionnelle d'une molécule et leurs capacités de visualisation mentale. Cette formation doit également mettre l'accent sur la construction des modèles moléculaires avec des « moyens du bord », par exemple des boules de cotillon et des tiges en bois.

Une partie de cette formation devrait être consacrée à une discussion sur les difficultés et les erreurs des enseignants en stéréochimie, ainsi que sur les raisonnements et difficultés d'apprentissage des élèves, mis en évidence dans cette étude. Cette discussion devrait déboucher sur un canevas de travail qui permettrait de remédier à la fois à leurs difficultés et à celles des élèves.

Bibliographie

1. Abell, S.K. (2007). Research on Science Teacher Knowledge. In S.K. Abell & N.G. Lederman (Eds.), *Handbook of Research on Science Education* (pp. 1105-1149). Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
2. Ainsworth, S. (2006). A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16, 183–198.
3. Anderson, L., Smith, D. & Peasley, K. (2000). Integrating learner and learning concerns: Prospective elementary science teachers' paths and progress. *Teaching and Teacher Education* (16), 547-574.
4. Astolfi, J.P., Darot, E., Ginsburger-Vogel, Y. & Toussaint, J. (2008). *Mots-clés de la didactique des sciences*. Paris-Bruxelles: De Boeck.
5. Banks, F., Leach, J. & Moon, B. (2005). Extract from 'New understandings of teachers' pedagogic knowledge'. *Curriculum Journal*, 16(3), 331–340.
6. Barlet, R. & Plouin, D. (1997). La dualité microscopique-macroscopique un obstacle sous-jacent aux difficultés en chimie dans l'enseignement universitaire. *Aster*, 25, 143-174.
7. Barnea, N. & Dori, Y. J. (1999). High-school chemistry students' performance and gender differences in a computerized molecular modeling learning environment. *Journal of Science Education and Technology*, 8 (4), 257-271.
8. Barnea, N. (2000). Teaching and learning about chemistry and modelling with a computer managed modelling system. In J. K. Gilbert & C. J. Boulter (eds.), *Developing Models in Science Education* (307-323). Netherlands: Kluwer Academic.
9. Besson, M.A. & Davous, D. (1991). Modèle moléculaire ou maquette de molécule ? *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 736, 1107-1126.
10. Boilevin J.-M., Davous, D. & Thibault, J. (1996). Modèles moléculaires et nouveaux programmes au lycée. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 786 (90), 1289-1306.
11. Borko, H. & Putman, R. T. (1996). Learning to teach. In D.C. Berliner & R.C. Calfee (eds), *Handbook of educational Psychology* (pp. 673-708). New York: Macmillan.
12. Boukhechem, M-S., Dumon, A. & Zouikri, M. (2011). The acquisition of stereochemical knowledge by Algerian students intending to teach physical sciences. *Chemistry Education Research and Practice*, 12, 331–343
13. Bryan, L. & Abell, S. (1999). Development of professional knowledge in learning to

- teach elementary science. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(2), 121-139.
14. Bucat, B. & Mocerino, M. (2009). Learning at the sub-micro level: Structural representations. In J. K. Gilbert & D. Treagust (Eds), *Multiple representations in chemical education: Models and modeling in science education* (Vol. 4, pp. 11–29). Dordrecht, NL: Springer.
 15. Butlen, D. & Peltier-Barbier, M-L. (2004). Pratiques effectives de professeurs d'école enseignant les mathématiques dans les quartiers sensibles sont-elles spécifiques ? : Retour au cadre théorique et à la méthodologie présentés dans la première partie. In M. PELTIER-BARBIER (Ed), *Dur d'enseigner en ZEP* (pp.63-81). Grenoble : la pensée sauvage.
 16. Calbris, G. (2001). Principes méthodologiques pour une analyse du geste accompagnant la parole. *Mots. Les langages du politique*, 67, 129-148. Disponible sur http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/mots_0243-6450_2001_num_67_1_2509
 17. Carette, V. (2009). Travailler par compétences? *Dossier XYZep*, 34. Disponible sur <http://centre-alain-savary.ens-lyon.fr/CAS/documents/publications/xyzep/les-dossiers-d-xyzep/archives-1/2008-2009/dossier%20XYZet%2034.pdf>
 18. Carter, C. S., Larussa, M. A. & Bodner, G. M. (1987). A study of two measures of spatial ability as predictors of success in different levels of general chemistry. *Journal of Research in Science Teaching*, 24(7), 645–657.
 19. Carter, K. (1993). The place of story in the study of teaching and teacher education. *Educational Research*, 22, 5-12.
 20. Cochran, K.F., Deruiter, J.A. & King, R.A. (1993). Pedagogical content knowing: An integrative model for teacher preparation. *Journal of Teacher Education*, 44(4), 263–272.
 21. Cohen, H. G. (1985). A comparison of the development of spatial conceptual abilities of students from two cultures. *Journal of Research in Science Teaching*, 22, 491–502.
 22. Copolo, C. E. & Hounshell, P. B. (1995). Using three-dimensional models to teach molecular structures in high school chemistry. *Journal of Science Education and Technology* 4 (4), 295-305
 23. Crahay, M. (2006). Dangers, incertitudes et incomplétude de la logique de la compétence en éducation. *Revue française de pédagogie*, 154, 97-110.
 24. Cross, D. (2010). Action conjointe et connaissances professionnelles de l'enseignant. *Éducation et didactique*, 4 (3), 39-60.

25. Crowder, E. M. & Newman, D. (1993). Telling what they know: the role of gestures and language in children's science explanations. *Pragmatics and Cognition*, 1, 341-376.
26. Daehler, K.R. & Shinohara, M. (2001). A complete circuit is a complete circle: Exploring the potential of case materials and methods to develop teachers' content knowledge and pedagogical content knowledge of science. *Research in Science Education*, 31, 267–288.
27. De Jong, O. (1998). Points de vue de professeurs et de futurs professeurs de chimie concernant l'enseignement de la combustion. *ASTER*, 26, 183-205.
28. De Jong, O. & Van Driel, J.H. (2004). Exploring the development of student teachers' PCK of the multiple meanings of chemistry topics. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2 (4), 277 – 491
29. De Landsheere, V. & G. (1978). *Définir les objectifs de l'éducation*. Liège : G. Thone.
30. D'Hainaut, L. (1988). *Des fins aux objectifs de l'éducation* (4^e éd.). Bruxelles : Labor.
31. Dumon, A. & Luft, R. (2008). *Naissance de la chimie structurale*. Les Ulis : EDP Sciences.
32. Dupont, C. & Le Maréchal, J.-F. (2002). The questioning Gesture in Relation to Levels of Knowledge. Case or Chemistry Laboratory Work. *ESERA Summer School, Plenary Lecture*. Radovlica (Slovénie), August 2002.
33. Duval, R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de didactique et de sciences cognitives*, 5, 37-65.
34. Duval, R. (1996). Quel cognitif retenir en didactique des mathématiques. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 16(3), 349-382.
35. Duval, R. (2005). Les conditions cognitives de l'apprentissage de la géométrie : développement de la visualisation, différenciation des raisonnements et coordination de leurs fonctionnements. *Annales de didactique et sciences cognitives*, 10, 5-53.
36. Ecollan De Coligny, I., Fontaine, G., Lautrette, M. & Tomasino, A. (1989). *Chimie terminale D*. France : Nathan.
37. Eliel, E.L. & Basolo, F. (1971). *Eléments de stéréochimie*. Paris : Ediscience
38. Ferik, V., Vrtacnik, M., Blejec, A. & Gril, A. (2003). Students' understanding of molecular structure representations. *International Journal of Science Education*, 25 (10), 1227–1245
39. Fernandez-Balboa, J.-M. & Stiehl, J. (1995). The generic nature of pedagogical content knowledge among college professors. *Teaching and Teacher Education*, 11 (3), 293–306.

40. Gandillet , E. & Le Maréchal, J.-F. (2003). Conceptions et chimie des solutions ioniques. *Troisièmes journées scientifiques de l'ARDIST* (157-164). Toulouse, octobre 2003.
41. Gandillet, E., Dupont, C. & Le Maréchal, J.-F. (2003). Students' gestures as an extra observable to scaffold the 'Entity-Quantity' alternative conception for ionic solutions chemistry. *ESERA*. Noordvikerout (Hollande), August 2003.
42. Geddis, A. N., Onslow, B., Beynon, C., & Oesch, J. (1993). Transforming Content Knowledge: Learning to Teach about Isotopes. *Science Education*, 77, 575-591.
43. Gilbert, J. K. (2010). The role of visual representations in the learning and teaching of science: An introduction. *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, 11 (1). Disponible sur http://www.ied.edu.hk/apfslt/v11_issue1/foreword/index.htm
44. Gilbert, S. W. (1991). Model building and a definition of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 73–79.
45. Gillet, P. (1991). Construire la formation: outils pour les enseignants et les formateurs. Paris : PUF.
46. Grossman, P. (1990). *The making of a teacher*. New York: Teachers College Press.
47. Halim, L. & Meerah, S.M. (2002). Science trainee teachers' pedagogical content knowledge and its influence on physics teaching. *Research in Science and Technological Education*, 2(2), 215–225.
48. Hameline, D. (1979). Les objectifs pédagogiques en formation initiale et en formation continue. Paris : ESF.
49. Hammoud, R. (2012). *Le travail collectif des professeurs en chimie comme levier pour la mise en œuvre de démarches d'investigation et le développement des connaissances professionnelles. Contribution au développement de l'approche documentaire du didactique*. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard Lyon 1 & Université Libanaise.
50. Harle, M. & Towns, M. (2011). A review of spatial ability literature, its connection to chemistry, and implications for instruction. *Journal of Chemical Education*, 88 (3), 351–360.
51. Hashweh, M. Z. (2005). Teacher pedagogical constructions: a reconfiguration of pedagogical content knowledge. *Teachers and Teaching: Theory and practice*, 11(3), 273–292.
52. Hegarty, M. (2004). Diagrams in the mind and in the world : Relations between internal and external visualizations. In A. Blackwell, K. Mariott, & A. Shimojima (Eds.),

- Diagrammatic representation and inference* (pp. 1 – 13). Berlin: Springer-Verlag.
53. Hoyek, N., Collet C. & Guillot, A. (2010). Représentation mentale et processus moteur : le cas de la rotation mentale. *Science & Motricité*, 71, 9–39
54. Ingham, A. M. & Gilbert, J. K. (1991). The use of Analogue models by students of chemistry at higher education level. *International Journal of Science Education* 13(2), 193–202.
55. Jahoda, G. & McGurk, H. (1974a). Pictorial depth perception in Scottish and Ghanaian children. *International Journal of Psychology*, 9, 255–267.
56. Jahoda, G. & McGurk, H. (1974b). Development of pictorial depth perception: cross-cultural replications. *Child Development*, 45, 1042–1047.
57. Jameau, A. (2012). Les connaissances mobilisées par les enseignants dans l'enseignement des sciences : analyse de l'organisation de l'activité et de ses évolutions. Thèse de doctorat. Université de Bretagne Occidentale.
58. Jonnaert, Ph., Lauwaers, A. & Peltier, E. (1990). *Capacités et compétences des élèves au terme de l'enseignement secondaire général*. Louvain-la-neuve : DIES, rapport de Recherche.
59. Jonnaert, Ph. (2002). *Compétences et socioconstructivisme, un cadre théorique*. Bruxelles : De Boeck.
60. Jonnaert, P., Barrette, J., Boufrahi, S. & Masciotra, D. (2005). Contribution critique au développement des programmes d'études : compétences, constructivisme et interdisciplinarité. *Revue des sciences de l'éducation*, 30 (3), 667-696.
61. Kagan, D. M. (1992). Professional Growth Among Preservice and Beginning Teacher. *Review of Educational Research*, 62(2), 129-169.
62. Kermen, I. (2007). *Prévoir et expliquer l'évolution des systèmes chimiques Observation de la mise en place d'un nouveau programme de chimie en terminale S : réactions des enseignants et des élèves face à l'introduction de l'évolution des systèmes chimiques*. Thèse de doctorat. Université Paris Didérot- Paris 7.
63. Khanfour-Armalé, R. & Le Maréchal, J.-F (2009). Représentations moléculaires et systèmes sémiotiques. *Aster*, 48, 63-88.
64. Kind, V. (2009). Pedagogical content knowledge in science education: perspectives and potential for progress. *Studies in Science Education* , 45(2), 169–204.
65. Koballa, T.R., Gräber, W., Coleman, D. & Kemp, A.C. (1999). Prospective teachers' conceptions of the knowledge base for teaching chemistry at the gymnasium. *Journal of Science Teacher Education*, 10(4), 269–286.

66. Kozma, R. B. & Russell, J. (1997). Multimedia and understanding: Expert and novice responses to different representations of chemical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 34, 949–968.
67. Kozma, R. B., Chin, E., Russell, J. & Marx, N. (2000). The role of representations and tools in the chemistry laboratory and their implications for chemistry learning. *Journal of the Learning Sciences*, 9, 105–144.
68. Kozma, R. B. (2003). The material features of multiple representations and their cognitive and social affordances for science understanding. *Learning and Instruction*, 13, 205–226.
69. Kozma, R. B. & Russell, J. (2005). Students becoming chemists: Developing representational competence. In J. K. Gilbert (Ed.), *Visualizations in science education: Models and modeling in science education* (pp. 121–146). Dordrecht, NL: Springer.
70. Krajcik, J.S. (1991). Developing students' understanding of chemical concepts. In S.M. Glynn, R.H. Yeany & B.K. Britton (Eds.), *The psychology of learning science: International perspective on the psychological foundations of technology-based learning environments* (pp. 117 - 145). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
71. Kuo, M-T., Jones L. , Pulos, S. M. & Hyslop, R. M. (2004). The relationship of molecular representations, complexity, and orientation to the difficulty of stereochemistry problems. *The Chemical Educator*, 9, (5), 321-327.
72. Lafarge, D. (2010). *Analyse didactique de l'enseignement-apprentissage de la chimie organique jusqu'à bac+2 pour envisager sa restructuration*. Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II
73. Larkin, J. & Simon, H.A. (1987). Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive Science*, 11, 65–100.
74. Lasnier, F. (2000). Réussir la formation par compétences. Montréal: Guérin.
75. Leplat, J. (2006). Les contextes de formation. *Education Permanente*, 166, 29-48.
76. Lohman, D. F. (1979). *Spatial ability: A review and reanalysis of the correlational literature* (Technical Report No. 8). Stanford, CA: Aptitudes Research Project, School of Education, Stanford University.
77. Loughran, J., Berry, A., & Mulhall, P. (2006). Understanding and developing science teachers' pedagogical content knowledge. Rotterdam, The Netherlands: Sense Publishers.
78. Loumouamou A. (1998). *Contribution à l'étude de la transposition didactique en chimie organique*. Thèse de doctorat. Université Grenoble 1.

79. Mager, R.F. (2005). *Comment définir des objectifs pédagogiques* (2^e éd. rev. et aug.).
80. Magnusson S., Krajcik J. & Borko H., (1999). Nature, sources, and development of the pedagogical content knowledge for science teaching. In J. Gess-Newsome & N. G. Lederman (eds.), *Examining pedagogical content knowledge* (pp. 95-132). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
81. Marchand, P. (2006). Comment développer les images mentales liées à l'apprentissage de l'espace en trois dimensions ? *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives*, 11, 103 - 121.
82. Marks, R. (1990). Pedagogical content knowledge: From a mathematical case to a modified conception. *Journal of Teacher Education*, 41(3), 3–11.
83. McNeill, D. (1985). So you think gestures are nonverbal? *Psychological Review*, 92, 350-371.
84. McNeill, D. (1992). *Hand and mind: What gestures reveal about thought*. Chicago: University of Chicago Press.
85. Méheut, M. (2006). Recherches en didactique et formation des enseignants de sciences. In Eurydice (Ed), *L'enseignement des sciences dans les établissements scolaires en Europe. États des lieux des politiques et de la recherche* (pp. 55-76). Bruxelles : Eurydice. Disponible sur <http://www.eurydice.org>.
86. Meirieu, P. (1990). *Apprendre ... Oui, mais comment?* Paris : ESF, (5^{ième} éd.).
87. Meirieu, P. (1991). *Apprendre ... Oui, mais comment?* Paris : ESF, (8^{ième} éd.).
88. Ouarda, O. & Ginestié, J. (2009). Conceptions didactiques et épistémologiques de cinq enseignants tunisiens de sciences physiques. *Didaskalia*, 35, 101-138.
89. Padilla, K. & Van Driel, J. (2011). The relationships between PCK components: The case of quantum chemistry professors. *Chemistry Education Research and Practice*, 12, 367-378.
90. Pallascio, R. (2000). *Une analyse structurante des mathématiques du primaire dans le nouveau curriculum québécois*. Université Laval, conférence lors du congrès *Des mathématiques pour le monde*, 5. 6 et 7 mai 2000.
91. Paolini, L. (1985). La représentation des molécules en chimie : une image de la réalité ou la réalité d'une image ? *L'Actualité Chimique*, n° 5, 47-52.
92. Park, S., & Chen, Y.C. (2012). Mapping out the integration of the components of pedagogical content knowledge (PCK): Examples from high school biology classrooms. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(7), 922-941.
93. Park, S. & Oliver, J.S. (2008a). Revisiting the Conceptualisation of Pedagogical Content

- Knowledge (PCK): PCK as a Conceptual Tool to Understand Teachers as Professionals. *Research in Science Education*, 38 (3), 261-284.
94. Park, S., & Oliver, J. S. (2008b). National Board Certification (NBC) as a catalyst for teachers' learning about teaching: The effects of the NBC process on candidate Teachers' PCK development. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(7), 812–834.
 95. Pastré, P. (1997). Didactique professionnelle et développement. *Psychologie française*, 42 (1), 89-100.
 96. Pavelin, B. (2002). *Le geste et la parole*. Toulouse : Presses universitaire du Mirail-Toulouse.
 97. Pellegrin, V. (1999). Les représentations graphiques bidimensionnelles des molécules en chimie organique avec un crayon et un papier. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 811, 263-290.
 98. Pellegrin, V., Sivade, A. & Barlet, R. (2003). Représentation spatiale des molécules organiques, confrontation entre les représentations graphiques et les représentations des étudiants à l'université. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 97(855), 909 – 931.
 99. Perrenoud, Ph., (1997). *Construire des compétences dès l'école*. Paris : ESF.
 100. Raynal, F. & Rieunier, A. (1997). *Pédagogie : dictionnaire des concepts clés. Apprentissage, formation et psychologie cognitive*. Paris : ESF.
 101. Raynal, F. & Rieunier, A. (1998). *Pédagogie: dictionnaire des concepts clés - apprentissage, formation, psychologie cognitive (2^e édition)*. Paris : ESF.
 102. Rey, O. (2008). De la transmission des savoirs à l'approche par compétence. *Dossier d'actualité de la Veille Scientifique et Technologique*, 34. Disponible sur <http://ife.ens-lyon.fr/vst/DA-Veille/34-avril-2008.pdf>
 103. Rey, B., Carette, V., Defrance, A. & Kahn, S. (2012). *Les compétences à l'école, apprentissage et évaluation*. Bruxelles : De Boeck.
 104. Robert, A. & Bouillaguet, A. (2002). *L'analyse de contenu (2^e édition)*. PUF : Paris.
 105. Roegiers, X. (1999). Savoirs, capacités et compétences à l'école : une quête de sens. *Forum-pédagogies*, mars 1999, 24-31.
 106. Rozzelle, A. & Rosenfeld, S. M. (1985). Stereoscopic projection in organic chemistry: Bridging the gap between two and three dimensions. *Journal of Chemical Education*, 62 (12), 1084–1085.
 107. Sabena, C. (2008). On the semiotics of gestures. In L. Radford, G. Schumbring & F. Seeger (Eds.), *Semiotics in Mathematics Education: Epistemology, History,*

- Classroom, and Culture* (pp. 19-38). Rotterdam, Netherlands: Sense Publishers.
108. Shulman, L. (1986a). Those who understand: A conception of teacher knowledge. *American Educator*, 10(1), 9–15, 43–44.
 109. Shulman, L. (1986b). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15 (2), 4–14.
 110. Shulman, L. (1987). Knowledge and teaching: Foundations of the New Reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), 1–22.
 111. Simon, D. (1998). Enseignement des modèles de liaison chimique. *Didaskalia*, 12, 117-131.
 112. Soetewey, S., Duroisin N. & Demeuse, M. (2011). Le Curriculum oublié: analyse des programmes des sciences en Communauté française de Belgique. *Revue internationale d'éducation de Sèvres*, 56, 123-134.
 113. Stieff, M. & Mc Combs, M. (2006). Increasing representational fluency with visualization tools. In S. Barab, K. E. Hay & D. T. Hickey (Eds.), *Proceedings of the Seventh International Conference of the Learning Sciences (ICLS)* (Vol. 1, pp. 730–736). Mahwah, NJ: Erlbaum.
 114. Stieff, M. (2007). Mental rotation and diagrammatic reasoning in science. *Learning and Instruction*, 17(2), 219 –234.
 115. Stieff, M. & Raje, S. (2010). Expertise algorithmic and imagistic problem solving strategies in advanced chemistry. *Spatial Cognition & Computation*, 10, 53–81.
 116. Stieff, M., Hegarty, M. & Dixon, B. (2010). Alternative strategies for spatial reasoning with diagrams. In A. K. Goel, M. Jamnik & N. H. Narayanan (Eds.), *Proceedings of the 6th international conference on Diagrammatic representation en inference* (pp. 115-127). Berlin: Springer.
 117. Stieff, M. (2011). When is a molecule three dimensional? A task-specific role for imagistic reasoning in advanced chemistry. *Science Education*, 95(2), 310–336
 118. Stull, A., Hegarty, M., Dixon, B. & Stieff, M. (2012). Representational Translation with concrete models in organic chemistry. *Cognition and Instruction*, 30 (4), 404-434
 119. Sweeney, A., Bula, O. & Cornett, J. (2001). The role of personal practice theories in the professional development of a beginning high school chemistry teacher. *Journal of Research in Science Teaching*, 38 (4), 408–441.
 120. Taagepera, M. & Noori, S. (2000). Mapping students' thinking patterns in learning organic chemistry by the use of knowledge space theory. *Journal of Chemical*

Education, 77 (9), 1224 – 1229.

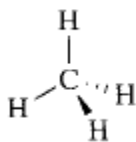
121. Tamir, P. (1988). Subject matter and related pedagogical knowledge in teacher education. *Teaching and Teacher Education*, 4, 99–110.
122. Tuckey, H., Selvaratnam, M. & Bradley, J. (1991). Identification and rectification of student difficulties concerning three-dimensional structures, rotation, and reflection. *Journal of Chemical Education*, 68 (6), 460–464.
123. Van Driel J. H., De Vos, W., Verloop, N. & Dekkers, H. (1998). Developing secondary students' conceptions of chemical reactions: the introduction of chemical equilibrium. *International Journal of Science Education*, 20, 379-392.
124. Van Driel, J., de Jong, O. & Verloop, N. (2002). The Development of Preservice chemistry teachers' pedagogical content knowledge. *Science Education* 86 (4) 572 -590
125. Veal, W.R. (1999, march). The TTF model to explain PCK in teacher development. Paper presented at the *Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching* Boston, MA.
126. Veal, W. & MaKinster, J. (1999). Pedagogical Content Knowledge Taxonomies. *Electronic Journal of Science Education*, 3(4). Disponible sur <http://unr.edu/homepage/crowther/ejse/vealmak.html>
127. Veal, W., Tippins, D.J. & Bell, J. (1999, March). The evolution of pedagogical content knowledge in prospective secondary physics teachers. Paper presented at the National American Research in Science Teaching Conference, San Diego, CA.
128. Vergnaud, G. (1996). Au fond de l'action, la conceptualisation. In J. Barbier (Éd.), *Savoirs didactiques et savoirs d'action*. Paris : PUF.
129. West, T. G. (1991). In the mind's eye: Visual thinkers, gifted people with learning difficulties, computer images, and the ironies of creativity. Buffalo, NY: Prometheus Books.
130. Wu, H.-K., Krajcik, J. S. & Soloway, E. (2001). Promoting understanding of chemical representations: Students' use of a visualization tool in the classroom. *Journal of Research in Science Teaching*, 38, 821–842.
131. Wu, H-K. & Shah, P. (2004). Exploring visuospatial thinking in chemistry Learning. *Science Education*, 88, 465-492.

Annexe

Questionnaire élève 1

Durée : 30min

1. Voici une formule spatiale de la molécule de méthane.



- a. Que représentent les traits dans cette représentation spatiale ?

- b. Pourquoi sont-ils dessinés différemment ?

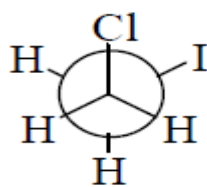
2.

- a. Dessinez une représentation spatiale en conformation éclipsée correspondant à la formule semi-développée suivante $\text{BrCH}_2\text{-CH}_2\text{Br}$.

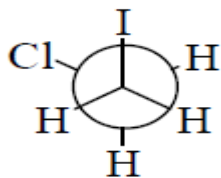
- b. A partir de la représentation spatiale que vous avez proposée, donnez sa représentation de Newman.

Expliquez comment vous avez procédé pour dessiner cette représentation de Newman.

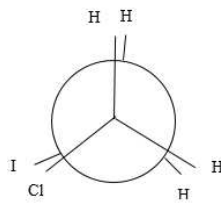
3. Lesquelles parmi ces molécules sont des stéréoisomères de conformation ? Justifiez.



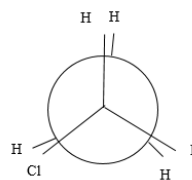
(1)



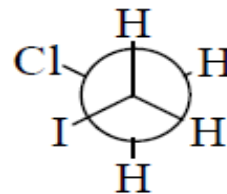
(2)



(3)



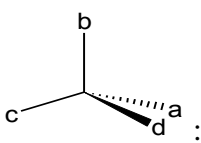
(4)



(5)

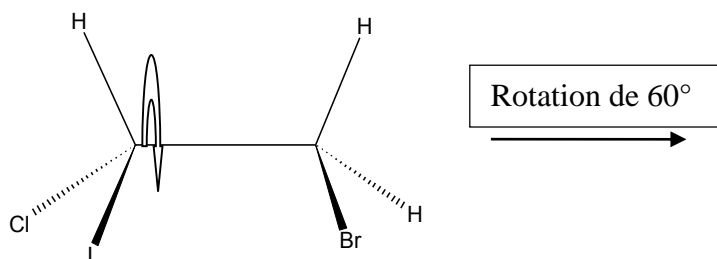
Questionnaire élève 2

Durée : 1h

1. Dans une molécule chirale telle que  :

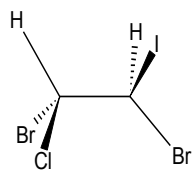
	Pas du tout d'accord	Plutôt pas d'accord	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord
La permutation de deux atomes liés à l'atome de carbone conduit à une molécule qui est image de la première dans un miroir.				
La permutation de deux atomes liés à l'atome de carbone conduit à une molécule identique.				
La permutation, deux à deux, des atomes liés au carbone (a avec b, et c avec d par exemple), conduit à la même molécule.				
La permutation, deux à deux, des atomes liés au carbone (a avec b, et c avec d par exemple), conduit à une molécule qui est image de la première dans un miroir plan.				

2. Complétez la figure suivante en dessinant une nouvelle représentation spatiale qui indique la position des atomes, après une rotation de 60° du groupement $-\text{CHCl}$ autour de l'axe de la liaison $\text{C}-\text{C}$.

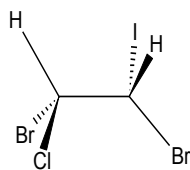


4. Voici des stéréoisomères dans différentes représentations de Cram et de Newman :

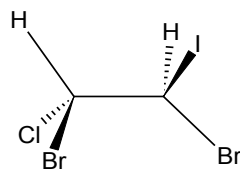
Représentations de Cram :



I

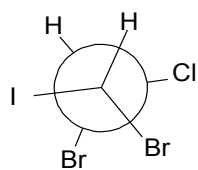


II

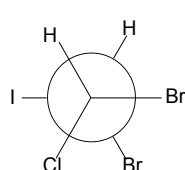


III

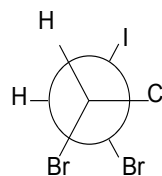
Représentations de Newman :



A



B



C

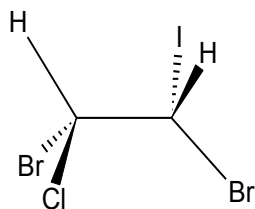
Complétez le tableau suivant en indiquant à chaque fois parmi les propositions suivantes a., b., et c., celle qui convient le mieux.

- a. La représentation de Newman a été obtenue en plaçant l'œil de l'observateur à gauche de la molécule en représentation de Cram suivant la liaison C—C.
- b. La représentation de Newman a été obtenue en plaçant l'œil de l'observateur à droite de la molécule en représentation de Cram suivant la liaison C—C.
- c. La représentation de Newman ne peut être obtenue en plaçant l'œil de l'observateur à gauche ou à droite de la molécule en représentation de Cram suivant la liaison C—C.

représentations de Newman \ représentations de Cram		A	B	C
		I		
II				
II				

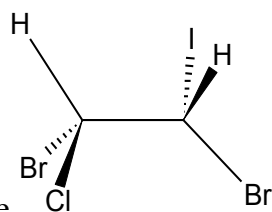
Protocole d'entretien élève

Question 1

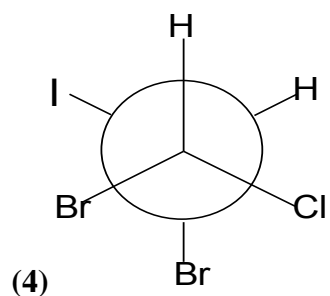
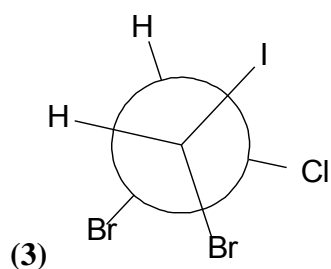
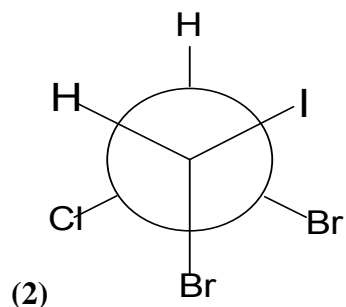
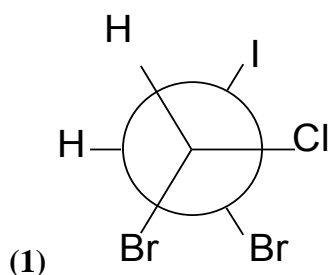


- Quand vous voyez ce dessin qu'est-ce qu'il signifie pour vous ?
- Quels renseignements pouvez-vous en tirer ?

Question 2



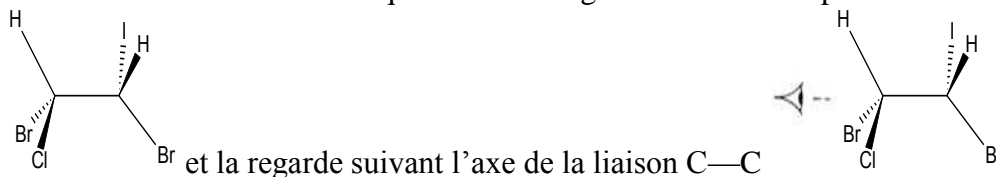
Voici une représentation spatiale d'une molécule et une série de quatre représentations de Newman



- Quelle(s) représentation(s) de Newman peut-on obtenir à partir de la représentation spatiale fournie ?
- Expliquez-moi comment vous raisonnez.

Question 3

Vous êtes un observateur qui se met à gauche de la représentation spatiale suivante



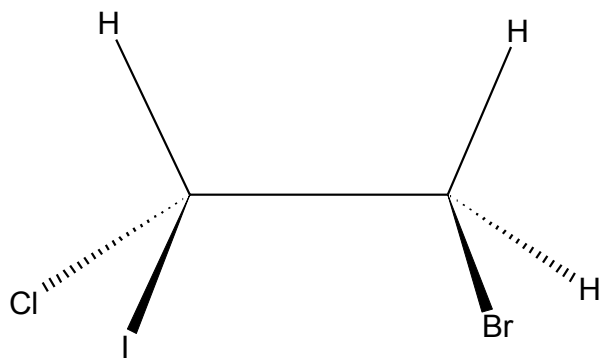
- a. Comment voyez-vous la représentation ?

[En l'absence de précision sur les positions des liaisons dans sa réponse, nous enchaînons avec des questions précises sur la manière de voir les liaisons (b et c)].

- b. Est-ce qu'il peut y avoir des traits qui en cachent d'autres ? si oui, lesquels ?
c. Est-ce qu'il y a des traits sur votre gauche ou votre droite ? si oui lesquels ?

Question 4

- a. Voici une représentation spatiale d'une molécule.



, dessinez moi une autre représentation spatiale obtenue après rotation de 60° du groupement CHICl autour de l'axe C—C.

- d. Expliquez-moi comment vous faites.
e. A quoi pensez-vous quand vous le faites ?

Question 5

Voici un modèle moléculaire représentant une conformation d'une molécule.

- a. Pouvez-vous réaliser une rotation de 60° du groupement qui est devant vous autour de l'axe carbone-carbone ?
b. Dessinez-moi une représentation de ce que vous avez obtenu.
c. Expliquez-moi comment vous avez fait

Merci.

Protocole d'entretien enseignant

Je mène une recherche sur l'apprentissage des élèves en stéréochimie. J'aimerais en discuter avec vous.

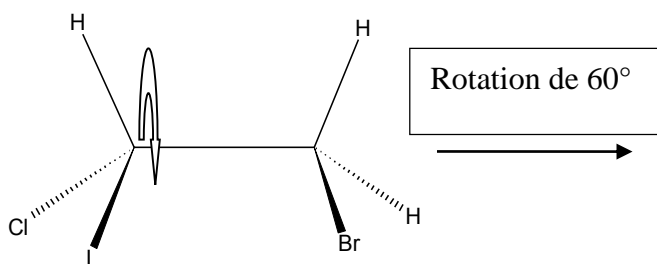
1. La stéréochimie est-elle une partie du programme que les élèves comprennent bien ?
[(*si rien n'est précisé*) quels sont les aspects qui sont bien compris ?]
2. Avez-vous repéré des difficultés particulières dans l'apprentissage de la stéréochimie chez les élèves?
[(*si absence de précision et si oui*), lesquelles ?]
3. Comment aidez-vous les élèves à surmonter ces difficultés ?
4. Comment enseignez-vous cette partie du programme?
5. Quel est selon vous les objectifs de l'enseignement de la stéréochimie dans le programme ?
6. De quelles ressources documentaires et matérielles disposez-vous dans l'établissement pour l'enseignement de la stéréochimie?
7. Utilisez-vous des ressources documentaires et matérielles autres que celles disponibles dans l'établissement ?
[(*si absence de précision et si oui*), lesquelles ?]
8.
 - a. Lors de l'enseignement de la notion de conformation, sur quel(s) exemple(s) vous appuyez-vous?
[(*si explications absentes*) pouvez-vous m'expliquer comment vous procédez ?]
 - b. Pensez-vous que le fait de s'appuyer uniquement sur les conformations de l'éthane peut avoir des conséquences sur l'apprentissage de la notion de conformation ?
[(*si absence de précision et si oui*), lesquelles ?]
9.
 - a. Que cherchez-vous à évaluer en stéréochimie ?

b. comment procédez-vous ?

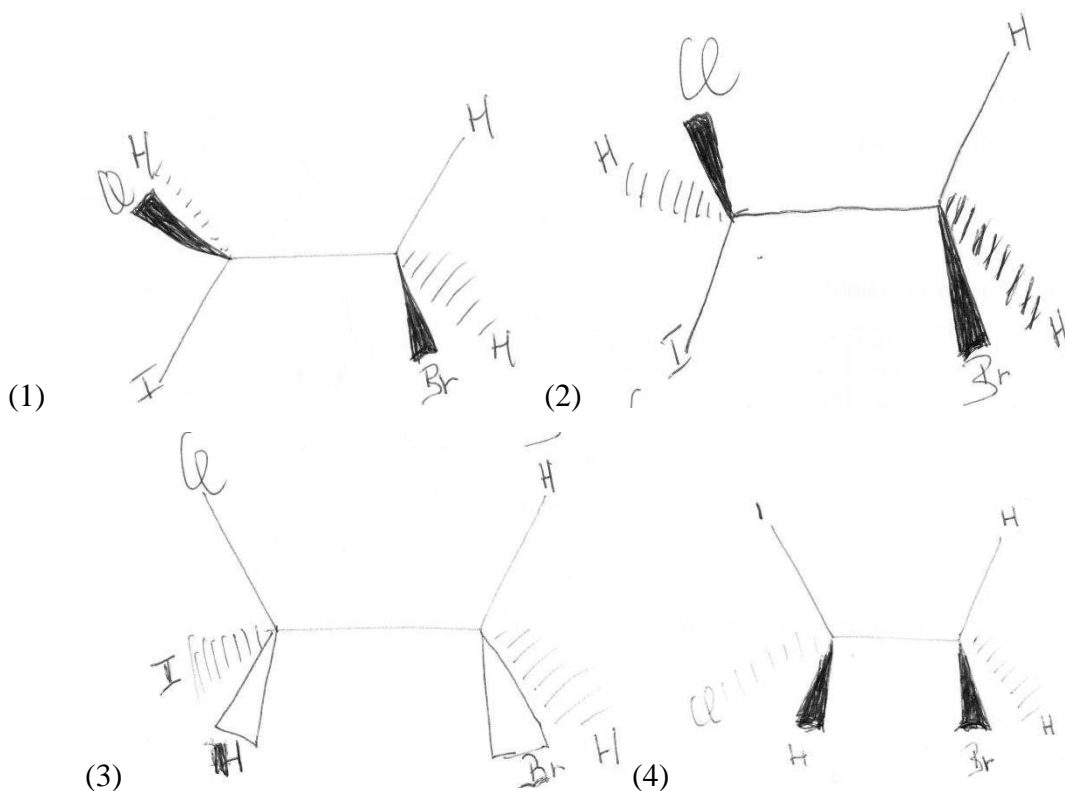
[(si nécessaire) quels types de questions posez-vous ?]

10. Voici quelques productions d'élèves lors d'un questionnaire papier-crayon, qu'en pensez-vous ?

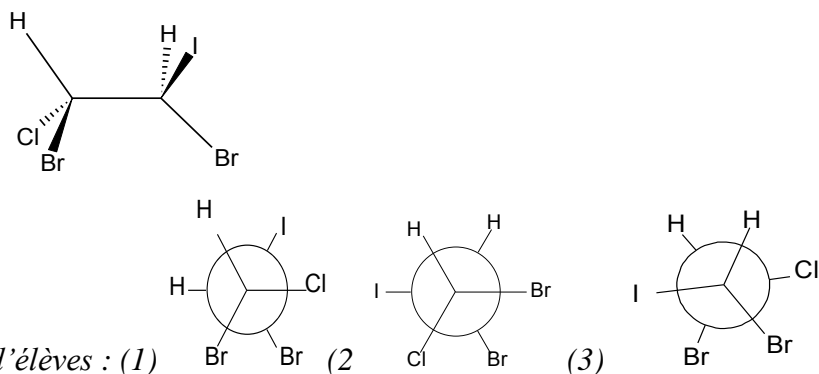
a. **Consigne :** complétez la figure suivante en dessinant une nouvelle représentation spatiale qui indique la position des atomes, après une rotation de 60° du groupement $-CHICl$ autour de l'axe de la liaison $C-C$.



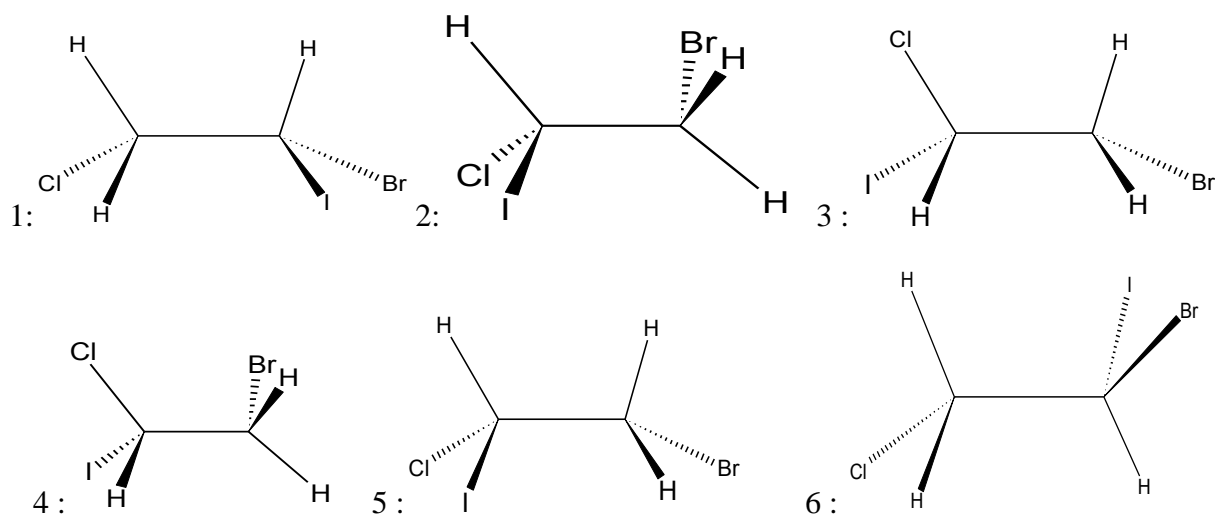
Réponses d'élèves:



b. **Consigne:** Quelle représentation de Newman peut-on obtenir à partir de la représentation spatiale de la molécule suivante :



c. **Consigne** : Indiquez parmi la série de représentations spatiales, celles qui correspondent à des conformations d'une même molécule, justifiez.

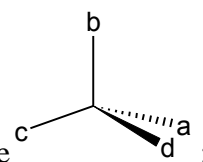


Réponses d'élèves :

a : (2, 4 et 6) ; (1, 3, et 5).

b : (1 et 4) ; (1 et 2) ; (5 et 6) ; (6 et 3)

11. A la consigne suivante: Dans une molécule chirale telle que



	<i>Pas du tout d'accord</i>	<i>Plutôt pas d'accord</i>	<i>Plutôt d'accord</i>	<i>Tout à fait d'accord</i>
<i>La permutation de deux atomes liés à l'atome de carbone conduit à une molécule qui est image de la première dans un miroir.</i>				
<i>La permutation de deux atomes liés à l'atome de carbone conduit à une molécule identique.</i>				
<i>La permutation, deux à deux, des atomes liés au carbone (a avec b, et c avec d par exemple), conduit à la même molécule.</i>				
<i>La permutation, deux à deux, des atomes liés au carbone (a avec b, et c avec d par exemple), conduit à une molécule qui est image de la première dans un miroir plan.</i>				

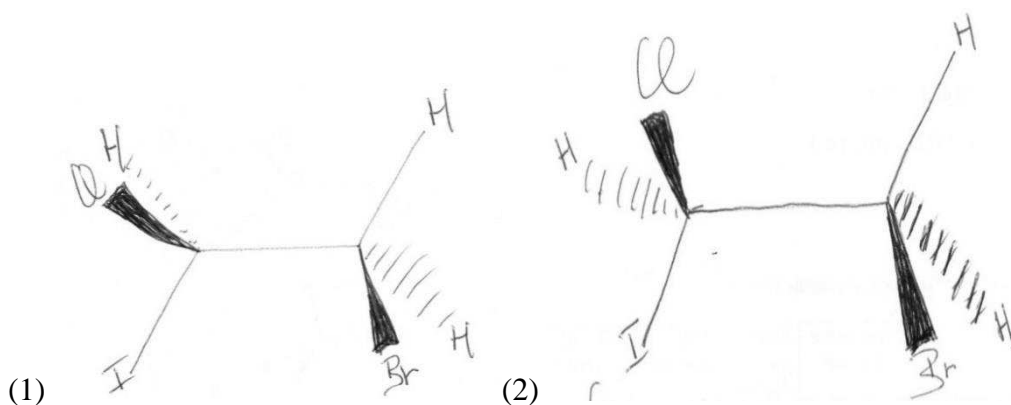
seuls 9% d'élèves ont répondu de manière correcte aux quatre propositions. Qu'est ce que vous en pensez ?

12.

- Enseignez-vous la méthode de la double permutation aux élèves ?
- Comment passe-t-elle ?

[(*si aucune réponse*) avez-vous repéré des points particuliers qui posent problème dans cette méthode ?]

- 13.** (*reprise des productions (1) et (2) des élèves, question 10 consigne b*) En comparant ces deux représentations



et en oubliant la consigne qui les a générées, à votre avis est-ce qu'elles respectent toutes les deux les conventions de représentation ?

Est-ce que vous avez des remarques à ajouter après notre discussion ?

Je vous remercie...