



un aspect des difficultés des élèves béninois en stéréochimie : la visualisation mentale des représentations sémiotiques de Cram et de Newman

Destin Mangane, Isabelle Kermen

► To cite this version:

Destin Mangane, Isabelle Kermen. un aspect des difficultés des élèves béninois en stéréochimie : la visualisation mentale des représentations sémiotiques de Cram et de Newman. Recherches en Didactiques, 2016. <hal-01742666>

HAL Id: hal-01742666

<https://hal.science/hal-01742666v1>

Submitted on 25 Mar 2018

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.



HAL Authorization

UN ASPECT DES DIFFICULTÉS DES ÉLÈVES BÉNINOIS EN STÉRÉOCHIMIE: LA VISUALISATION MENTALE DES REPRÉSENTATIONS SÉMIOTIQUES DE CRAM ET DE NEWMAN

Destin MANGANE
Isabelle KERMEN

Université Paris Diderot, Université d'Artois, Université de Cergy-
Pontoise, Université Paris-Est Créteil, Université de Rouen
Laboratoire de didactique André Revuz (EA 4434)

INTRODUCTION

Les représentations sémiotiques sont au cœur du processus d'enseignement/apprentissage de la chimie et notamment de la chimie organique. En effet la chimie organique use abondamment de représentations en deux dimensions des molécules, objets tridimensionnels inaccessibles à la perception commune.

De nombreuses études (Coleman et Gotch, 1998 ; Harle et Towns, 2011 ; Oliver-Hoyo et Sloan, 2014 ; Carlisle, Tyson et Nieswandt, 2015) s'attachent à montrer les difficultés que représentent pour les débutants la mise en oeuvre de capacités de visualisation spatiale pour accéder aux informations spatiales

que renferment les représentations sémiotiques en deux dimensions. Mais s'agissant de molécules organiques il est aussi essentiel de connaître la géométrie d'un tétraèdre, les codes du système de représentation adopté et certaines règles chimiques, par exemple le nombre de liaisons établies par un atome de carbone. À l'égal des recherches faites sur la lecture du dessin technique (Hamon, 2009), il apparaît que lors de l'utilisation de représentations sémiotiques de molécules sont mobilisés de façon concomitante plusieurs champs conceptuels, la géométrie, la sémiologie et la chimie en adaptant les propos de Vérillon (1996).

L'étude que nous présentons ici se propose d'analyser certains raisonnements et difficultés d'apprentissage d'élèves de terminale D (classe spécialisée en sciences de la vie et de la terre) au Bénin concernant les représentations sémiotiques de Cram et de Newman des molécules organiques (voir annexe) plus précisément sous l'angle de la visualisation mentale. Nous considérons que les productions des élèves (représentations externes) sont l'expression d'une représentation interne, et qu'elles peuvent constituer un « moyen de transmission des représentations mentales » (Baldy et Chatillon, 1992).

Il s'agit d'appréhender le fonctionnement cognitif des élèves dans les tâches d'apprentissage et d'utilisation des représentations sémiotiques, et de proposer des conditions didactiques qui leur permettraient de s'approprier effectivement ces représentations sémiotiques.

CADRE D'ANALYSE

Un système sémiotique est appelé registre sémiotique s'il permet les trois activités cognitives que sont la formation, le traitement et la conversion d'une représentation en une représentation d'un autre système (Duval, 1993). Les systèmes sémiotiques de Cram et de Newman introduits dans le programme national d'enseignement de la stéréochimie en terminale D au Bénin permettent ces trois activités cognitives, ce sont des registres sémiotiques.

La résolution des problèmes de stéréochimie nécessite la visualisation mentale des représentations sémiotiques d'une molécule (Wu et Shah, 2004). Nous désignons par visualisation, la manière de voir une représentation sémiotique. Elle est dite mentale lorsqu'une image mentale est générée et manipulée (Marchand, 2006).

Trois facteurs sont identifiés comme des dimensions majeures de la capacité de visualisation mentale (Lohman, 1979 cité par Harle et Towns, 2011):

- la visualisation spatiale: la capacité à appréhender la structure tridimensionnelle des molécules à partir d'une représentation sémiotique plane;

- l'orientation spatiale: la capacité à imaginer comment une représentation sémiotique de la molécule serait vue dans une perspective différente, par exemple visualiser dans l'espace la disposition des constituants 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 C—C' (figure 1);

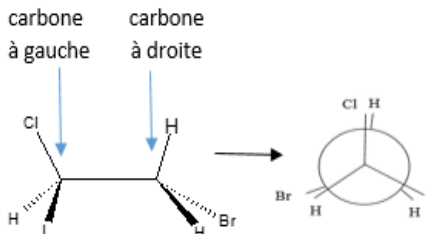


Figure 1: exemple de conversion du registre de Cram vers le registre de Newman (à droite), l'observateur étant situé à gauche de la représentation de Cram face à l'axe C-C.

- les relations spatiales: la capacité de rotation²

mentale d'un objet dans un plan ou dans l'espace, ou toute 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.

RECHERCHES ANTÉRIEURES SUR LES DIFFICULTÉS DES ÉTUDIANTS ET DES ÉLÈVES À VISUALISER LES REPRÉSENTATIONS SÉMIOTIQUES DE CRAM ET DE NEWMAN

Une grande partie de l'enseignement introductif de la chimie organique repose sur la stéréochimie, c'est-à-dire l'étude de l'arrangement spatial des atomes dans une molécule. En effet, 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

¹ Le trait (—) dans la représentation C—C symbolise la liaison chimique entre deux noyaux d'atomes de carbone

² La rotation mentale est l'aptitude à faire tourner mentalement l'image d'un objet en deux ou en trois dimensions autour d'un axe (Hoyek et al., 2010). Par exemple, une rotation mentale est requise pour trouver les positions des substituants des carbones d'une molécule dans une autre conformation

stéréoisomérisation de conformation³ (Barlet et Plouin, 1997) ou de configuration⁴. 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.

Pour réussir l'apprentissage et la résolution des problèmes de chimie organique en général, et de stéréochimie en particulier, il faut développer des aptitudes de construction, d'interprétation et de conversion des systèmes sémiotiques (Stull et al., 2012). Lors de la réalisation de la conversion inter registres Cram-Newman par exemple, les étudiants et les chimistes experts utilisent une variété de stratégies allant de raisonnements purement analytiques à des raisonnements uniquement spatiaux (Stieff et Raje, 2010). Un raisonnement analytique renvoie à l'application d'un ensemble de règles en remplacement de transformations spatiales complexes, sans recourir à des images mentales (Stieff et al., 2010). Un raisonnement spatial par contre se réfère spécifiquement au processus de production et de manipulation d'images mentales (Hegarty, 2004). Il relève de la visualisation mentale. Les deux types de raisonnement prennent en compte les propriétés géométriques des structures. Voici deux exemples de raisonnements possibles, l'un analytique et l'autre spatial, à propos de la conversion inter registres Cram-Newman de la figure 1. Qu'il s'agisse d'un raisonnement analytique ou d'un raisonnement spatial, une connaissance des codes de représentation utilisés et des transformations géométriques lors de la projection des hauteurs d'un tétraèdre sur un plan est nécessaire.

Un raisonnement analytique peut être constitué des étapes suivantes, en plaçant l'observateur à gauche:

- les atomes de carbone, respectivement à gauche et à droite dans la représentation de Cram, sont figurés par un point et un cercle dans le registre de Newman;

³ Les conformations d'une molécule désignent les différentes dispositions spatiales résultant d'une rotation des atomes autour d'un axe internucléaire. Cette propriété est la traduction du mouvement continu des noyaux et électrons d'une molécule dans le cadre du modèle de liaison adopté et constitue une forme de règle chimique.

⁴ On appelle configuration d'une molécule, la disposition relative de ses atomes constitutifs indépendamment des rotations autour des axes internucléaires. Pour une même formule chimique, la permutation de deux atomes autour d'un carbone asymétrique (qui a quatre substituants différents) conduit à deux configurations énantiomères (c'est-à-dire symétriques par rapport à un plan et non superposables), soit deux structures moléculaires qui ont des propriétés différentes. Elles portent d'ailleurs des noms différents.

- les atomes H et Br portés par les traits de liaison hachurés (▨) dans la représentation de Cram, sont représentés à gauche du cercle dans la représentation de Newman à l'extrémité de tirets simples (—);

- les atomes I et H portés par les traits de liaison gras (▮) dans la représentation de Cram, sont symbolisés à droite du cercle dans la représentation de Newman à l'extrémité de tirets simples (—);

- les atomes Cl et H portés par les traits de liaisons en tirets simples dans la représentation de Cram, sont reportés à l'extrémité de traits verticaux dans la représentation de Newman.

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, 2011; Stull et al., 2012). Ils ne parviennent pas souvent à appréhender correctement leur utilisation (Taagepera et Noori, 2000).

En utilisant un raisonnement spatial, la conversion inter registres Cram-Newman pourrait comprendre les étapes cognitives suivantes:

- visualisation de la molécule dans l'espace à partir de sa représentation de Cram;

- positionnement de l'observateur, face à l'axe internucléaire C—C (capacité d'orientation spatiale);

- projection mentale des substituants des carbones sur un plan perpendiculaire à l'axe internucléaire C—C (capacités de relations spatiales);

- représentation des carbones, des traits de liaisons afférentes, et des angles que ces traits forment selon les conventions de représentation dans le registre de Newman.

Réaliser une telle suite d'opérations mentales est une tâche complexe, peu souvent réussie. Une étude a par exemple révélé que, lors de la réalisation de la conversion inter registres Cram-Newman, de futurs enseignants algériens de physique chimie échangent les positions de deux substituants ce qui provoque une inversion des configurations absolues des carbones asymétriques (Boukhechem et al., 2011).

Toutes les situations proposées aux élèves et étudiants ne font pas appel aux conversions entre systèmes sémiotiques, l'enseignement de la stéréochimie utilise aussi la modification des représentations sémiotiques des molécules au sein d'un même registre, le traitement de ces représentations.

Toutefois, les étudiants peinent à les voir dans l'espace et/ou à les manipuler mentalement; en représentation de Cram par exemple, des étudiants sud-africains de premier cycle ont des difficultés à identifier les axes de rotation, et à visualiser les positions des atomes après rotation (Tuckey et al., 1999).

À notre connaissance, aucune étude sur les difficultés et les raisonnements des élèves, à propos de la stéréochimie, n'a été réalisée au Bénin. Examiner cette question revêt donc une importance particulière, d'autant plus qu'une étude préliminaire a montré par exemple que certains élèves béninois éprouvent des difficultés à convertir une représentation de Cram en une représentation de Newman. Cette étude vise à analyser certaines tendances précédemment repérées, la méconnaissance des conventions de représentation dans le registre de Newman et la permutation des positions des substituants des carbones lors de la conversion entre registres Cram-Newman, en prenant aussi en compte la visualisation mentale des représentations sémiotiques.

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

L'enseignement de la stéréochimie dans les lycées du Bénin s'effectue avec une pénurie de matériel didactique. Peu de lycées sont équipés de modèles moléculaires qui sont un substitut tangible des molécules objets réels inaccessibles à la perception, encore moins d'ordinateurs sur lesquels pourraient être montrées des structures moléculaires en trois dimensions via des logiciels de visualisation. Dès lors les enseignants en sont réduits à montrer aux élèves des photos de modèles moléculaires, ce qui ne lève que partiellement la difficulté qui consiste à imaginer une structure tridimensionnelle à partir d'une représentation plane, ou à user d'analogies.

QUESTIONS DE RECHERCHE

Comparer des conformations de molécules dans le registre de Cram est une tâche à savoir réaliser pour pouvoir décider si leurs configurations sont identiques ou non et déterminer si elles sont énantiomères⁵, diastéréoisomères⁶ ou identiques (capacité attendue des élèves d'après le programme). Cela nécessite de savoir passer d'une conformation de molécule à une autre

⁵ Voir note 4.

⁶ Deux structures moléculaires correspondant à une même formule chimique qui ne sont pas symétriques par rapport à un plan et qui ne sont pas superposables sont dites diastéréoisomères.

par une rotation. Dans le registre de Cram cela peut s'effectuer par un raisonnement spatial nécessitant des capacités de rotation mentale. Les recherches de Tuckey et al. (1999) révèlent que les étudiants peinent à repérer la place occupée par chaque substituant après la rotation dans le registre de Cram. Nous faisons l'hypothèse que les élèves rencontrent également ces difficultés. La première question de recherche interroge leurs capacités à réaliser la rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe internucléaire C—C d'une molécule en représentation de Cram.

Selon le registre de représentation sémiotique des molécules organiques considéré, certaines propriétés de la structure spatiale sont plus faciles à visualiser que d'autres. Parvenir à passer d'un registre à un autre revêt donc une importance pratique qui s'ajoute au bénéfice que constitue la coordination de plusieurs registres (Duval, 1993) pour conceptualiser la structure d'une molécule⁷. Pour réaliser la conversion inter registres Cram-Newman (capacité attendue des élèves d'après les instructions officielles), les enseignants apprennent aux élèves un raisonnement spatial tel que celui proposé plus haut. La deuxième question de recherche vise à identifier leurs capacités à repérer les positions des substituants du carbone lorsque la représentation de Cram est observée suivant l'axe de la liaison C—C.

Comment les élèves visualisent-ils mentalement les positions des substituants des carbones d'une représentation de Cram d'une molécule pour réaliser l'opération de conversion inter registres Cram-Newman ?

MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

Instrument de collecte des données

Nous construisons un questionnaire papier-crayon comportant deux questions, respectivement, ouverte et fermée à choix multiples.

Dans la première, nous nous intéressons à la construction, par les élèves, du contenu lié à l'opération de rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe internucléaire C—C lors du passage d'une conformation à une autre (opération intra registre) dans le registre de Cram. Nous

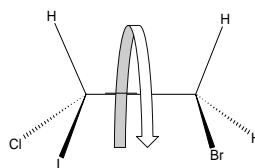


Figure 2 : Schéma proposé aux élèves à la question 1

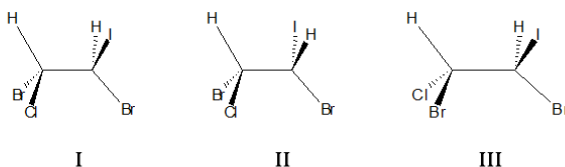
⁷ Molécule tridimensionnelle adoptant une infinité de conformations dont certaines sont plus stables que d'autres.

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 (figure 2).

Dans la deuxième, nous examinons la conversion inter registres Cram-Newman (opération inter registres) d'une molécule à deux carbones.

Nous proposons trois stéréoisomères en représentation de Cram et trois en représentation de Newman (figure 3), et demandons de choisir la position de l'observateur [à gauche de la représentation de Cram (a), à droite de la représentation (b), ni à gauche et ni à droite(c)] parmi une série de trois propositions afin de déterminer s'il est possible d'obtenir chaque représentation de Newman à partir d'une des représentations de Cram fournies.

Représentations de Cram



Représentations de Newman

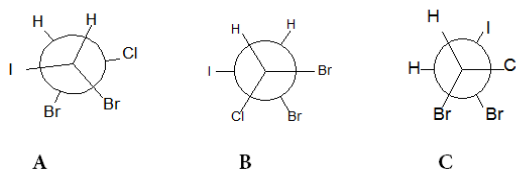


Figure 3: représentations de Cram et de Newman proposées aux élèves à la question 2

Pour répondre à la question 1, les élèves peuvent générer l'image mentale de la représentation de Cram et procéder à une rotation mentale (ce qui exige au minimum à la fois des capacités de visualisation spatiale et de relations spatiales) ou bien ils peuvent user d'un raisonnement analytique.

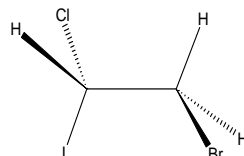


Figure 4: réponse attendue à la question 1

La réponse attendue est la représentation de Cram (figure 4), en conformation décalée.

Une façon de répondre à la question 2 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. La figure 5 montre que les représentations de Newman (C) et (A) sont obtenues en observant, respectivement, la représentation de Cram (I) à gauche (a) et la représentation de Cram (III) à droite (b), et qu'aucune position de l'observateur (c) ne permet d'obtenir les représentations de Newman proposées à partir de la représentation de Cram (II).

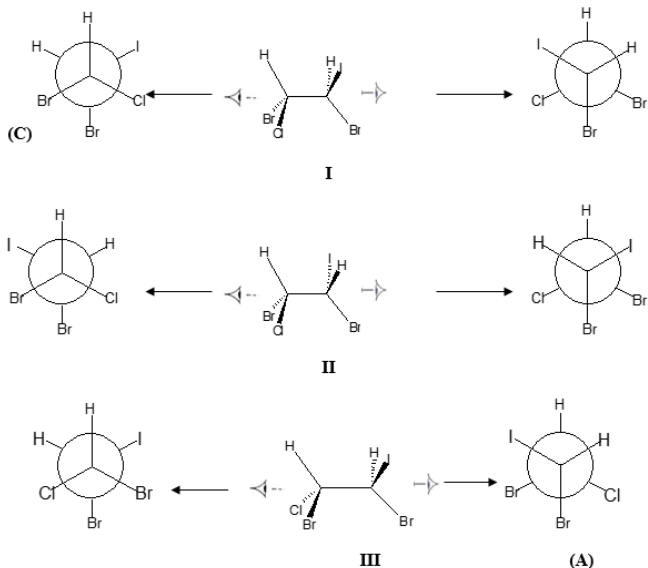


Figure 5: représentations de Newman pouvant être obtenues à partir de celles de Cram

Les réponses correctes attendues figurent dans le tableau 1ci-après.

représentations de Newman représentations de Cram	A	B	C
I	c	c	a
II	c	c	c
III	b	c	c

Tableau 1 : réponses attendues à la question 2 ; la représentation de Newman considérée correspond à (a) la représentation de Cram observée par la gauche, (b) par la droite, (c) à aucune position de l'observateur.

Collecte des données

Nous avons fait passer le questionnaire d'une durée de 30 minute à 340 élèves âgés de 17 à 21 ans, des classes de terminale D de six lycées des villes de Porto-Novo et de Natitingou (Bénin), 4 mois après enseignement de la stéréochimie, les élèves ont été prévenus quelques jours avant, et il leur a été demandé de réviser leurs cours de stéréochimie.

Analyse des données

L'analyse des réponses au questionnaire repose sur une catégorisation des réponses fondée sur les tendances de l'étude préliminaire et la revue de littérature (catégories a priori), et aussi issue de la lecture des données (catégories émergentes). Pour la première question où 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 internucléaire C—C, deux grandes catégories s'imposent, l'une comportant les réponses incluant une représentation décalée (rotation de 60° ou un multiple impair de 60°), l'autre une éclipsée (rotation de 120° ou un multiple pair de 120°). À l'intérieur de chaque catégorie, nous examinons si les positions des substituants et les conventions de représentation des liaisons sont respectées ou non. Pour la question 2, les choix effectués sont analysés en termes de respect des positions des substituants observés d'une part et de respect des positions des carbones observés d'autre part.

RÉSULTATS

Sur l'opération de rotation des substituants d'un carbone autour de l'axe C-C dans le registre de Cram

Nous catégorisons les réponses des élèves à la question 1 en fonction de la forme, décalée (C1) ou éclipsée (C2), de la représentation de Cram. Les caractéristiques des valeurs des angles entre les traits de liaison ne sont pas prises en compte pour établir les catégories.

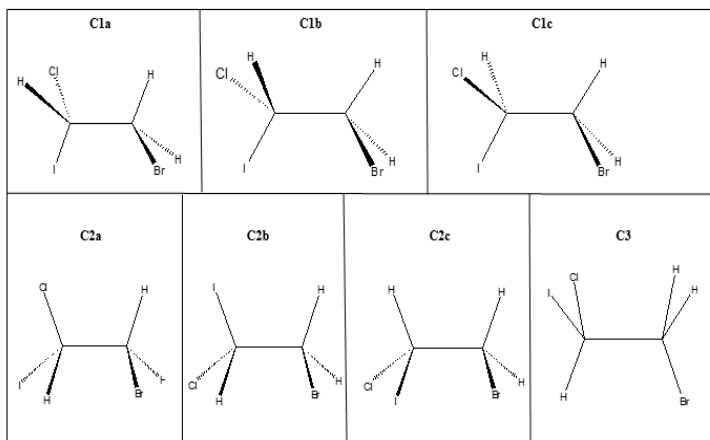


Figure 6: catégories des réponses à la question

Aucun élève ne donne la réponse correcte attendue (C1a, cf. tableau 2 et figure 6 : Pour plus de netteté, les exemples de dessins d'élèves sont reproduits avec le logiciel ChemSketch). 9% représentent une conformation décalée, dont 4% avec une disposition non conforme des traits de liaisons gras et hachuré (C1b) et 5% avec une disposition incorrecte des atomes (C1c).

Dans les représentations de la catégorie (C1b) la disposition relative des traits de liaison gras et hachuré n'est pas conforme. Pourtant les dispositions des atomes sont correctement figurées, trait de liaison C-Cl en arrière du plan de la feuille, C-H en avant et C-I dans le plan de la feuille. Donc ces élèves ont à la fois respecté les codes de représentation et correctement effectué la rotation demandée. Mais étant donné la représentation de l'autre partie de la

molécule, aucune position de l'observateur par rapport à la structure moléculaire ne permet d'obtenir une telle représentation (Pellegrin, 1999). Elle correspond à un observateur qui regarderait en même temps la structure moléculaire à gauche et à droite. Cette représentation est donc révélatrice d'une absence de vision globale de la structure spatiale.

	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%	
Absence de différenciation des traits de liaison (C3)		14%	
Pas de réponse		7	

Tableau 2: répartition des réponses à la question 1

Dans les représentations de la catégorie (C1c), la disposition relative des traits de liaison est correcte mais pas celle des atomes ce qui conduit à une inversion de configuration du carbone en question. La structure obtenue ne correspond pas à la même molécule. Nous pouvons supposer que les élèves réalisent sans succès la rotation mentale ou utilisent un raisonnement analytique incorrect). Dans ce dernier cas, une rotation de 60° autour de l'axe C—C change la conformation éclipsée de la représentation initiale en conformation décalée et les substituants du carbone seraient ensuite répartis aléatoirement, ce qui explique l'inversion de configuration de la représentation initiale.

La majorité des élèves (70%) donne une conformation éclipsée (C2), dont 9% avec une disposition correcte des atomes (C2a) comme s'ils effectuaient une rotation de 120° des traits de liaison autour de l'axe internucléaire C-C. Cela peut être dû au fait qu'ils supposent, à tort, qu'en conformation éclipsée l'angle dièdre est égal à 60° . Les conformations éclipsées de 57% des élèves ont une disposition erronée des atomes (C2b) comme s'ils les permutaient indépendamment de la rotation des traits de liaison autour de l'axe de la liaison C—C. Cela peut expliquer l'inversion de configuration de la représentation initiale.

Quelques élèves (4%) donnent une représentation éclipse identique à la représentation initiale (C2c). D'autres (14%) proposent des dessins avec des conventions de figuration des liaisons non respectées (C3). Ces résultats traduisent une incapacité à réaliser la rotation mentale demandée dans la représentation de la molécule.

Bien qu'il soit difficile d'apprécier la valeur des angles entre les traits de liaison, dans leur majorité (74%) les représentations dessinées par les élèves ne correspondent pas aux valeurs attendues. Un élève sur cinq environ (19%) produit une représentation où les traits de liaison forment des angles qui respectent les conventions de représentation.

Sur l'opération de conversion inter registres Cram-Newman

Pour catégoriser les réponses d'élèves à la question 2, 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. Nous les comparons ensuite, aux représentations de Newman proposées (A, B et C), afin de repérer les incompatibilités. 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), 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) ne permettant pas de dessiner la représentation de Newman fournie. La figure 7 regroupe par exemple les catégories de réponses fournies correspondant à des positions de l'observateur, à gauche et à droite de la représentation de Cram I. 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.

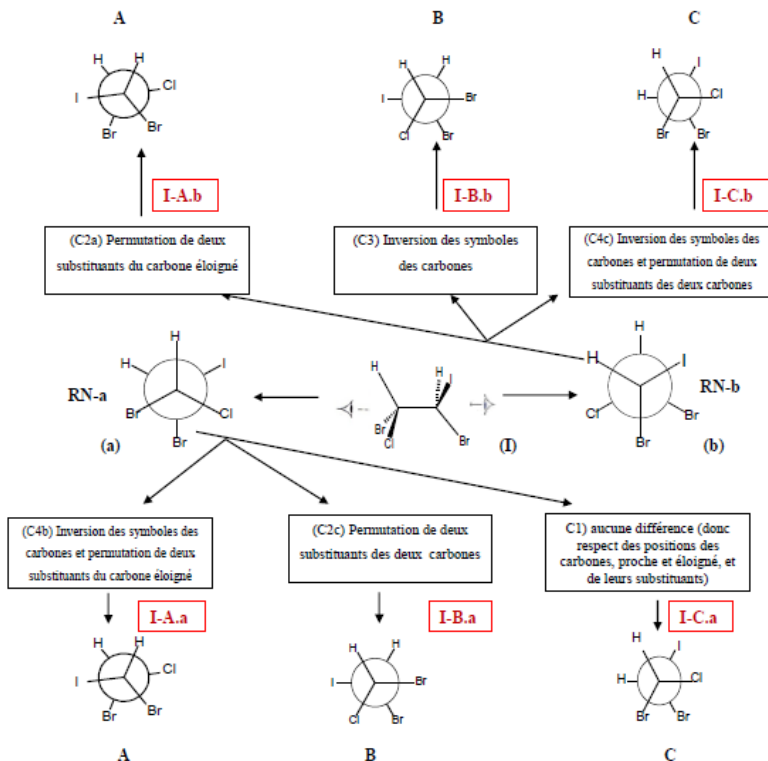


Figure 7: catégorisation des réponses fournies correspondant à des positions de l'observateur, à gauche et à droite de la représentation de Cram (I)

Trois catégories de réponses erronées (C2a, C2b et C2c), rassemblant 7 cas (cf. tableau 3, page suivante) concernent le non-respect des positions des substituants sur les carbones. La première catégorie (C2a) comporte une permutation des substituants du carbone éloigné de l'observateur (3 cas), la seconde (C2b) une permutation des substituants du carbone proche de l'observateur (2 cas) et la troisième (C2c) une permutation des substituants des deux carbones (2 cas). Une catégorie de réponses erronées (C3, cf. tableau 3) est constituée des 2 cas où les élèves inversent les symboles des carbones observés. Ils choisissent une représentation de Newman telle que cela revient à considérer qu'ils représentent le carbone de devant par un cercle, et celui de derrière par un point, soit exactement le contraire de la convention d'une

représentation de Newman, ce qui constitue un problème de compréhension ou de mémorisation du code de représentation.

Trois autres catégories de réponses (C4a, C4b et C4c), rassemblant 7 cas (cf. tableau 3) concernent à la fois le non-respect des substituants sur les carbones et l'inversion des symboles des carbones observés. Les élèves choisissent une représentation de Newman comme s'ils représentaient le carbone proche de l'observateur par un cercle, et celui plus éloigné par un point, et ne respectent pas les positions des substituants sur les carbones. La première catégorie (C4a) consiste en une inversion des symboles des carbones observés et une permutation des substituants du carbone proche (2 cas), la deuxième (C4b) en une inversion des symboles des carbones observés et une permutation des substituants du carbone éloigné (3 cas), et enfin la troisième (C4c) en une inversion des symboles des carbones observés et une permutation de leurs substituants (2 cas).

Outre ces 7 types de réponses erronées correspondant aux 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 (cf. tableau 3) dans lesquels les élèves ne choisissent aucune position de l'observateur, alors que cela est possible.

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
		C4b	C2c	C1	C3	C2b	C2a	C4c	C2a	C2b
	b	24	12	15	20	19	13	14*	14	11
		C2a	C3	C4c	C2c	C4a	C4b	C1	C4b	C4a
	c	6*	10*	12	10*	14*	15*	16	13*	30*
		C1	C1	C5	C1	C1	C1	C5	C1	C1
Pas de réponse		43	55	56	55	45	55	56	56	45
Total		100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 3: Répartition des réponses d'élèves en pourcentages à la question 2
(* = réponses correctes)

La question 2 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.

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
		C4b	C2c	C1	C3	C2b	C2a	C4c	C2a	C2b
	b	42	27	34	45	35	29	32*	32	20
		C2a	C3	C4c	C2c	C4a	C4b	C1	C4b	C4a
	c	11*	21*	27	22*	25*	33*	36	29*	55*
		C1	C1	C5	C1	C1	C1	C5	C1	C1
Total		100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 4: Répartition des réponses en pourcentages à la question 2 si l'on ne prend en compte que la population d'élèves ayant répondu à chaque cas
 (*= réponses correctes)

Les réponses correctes sont en pourcentages très variables (de 11% à 55 % des élèves ayant répondu, selon les 9 cas, cf. tableau 4) et correspondent au respect des positions des carbones, proche et éloigné, et de leurs substituants (C1).

Dans certaines réponses les élèves (42%, 38% et 39%, 3 cas) ont permuté les substituants du carbone éloigné de l'observateur (C2a), dans d'autres (40% et 25%, 2 cas) les substituants du carbone proche de l'observateur (C2b), et dans d'autres encore (52% et 45%, 2 cas) les substituants des deux carbones (C2c) (cf. tableau 4). Ces erreurs peuvent être interprétées d'au moins trois manières:

- le contenu construit à partir de la représentation de Cram de la molécule (visualisation spatiale) est erroné, les positions des substituants d'un ou des deux carbones sont permutées, la raison peut être une difficulté à se représenter la structure spatiale, une méconnaissance du code de représentation des traits de liaison ou bien ces deux facteurs conjugués ;

- le contenu construit à partir de la représentation de Cram de la molécule est correct, mais le problème se pose lorsqu'il s'agit de s'orienter à gauche ou à droite de la représentation de Cram (orientation spatiale) et de faire les projections mentales des substituants des carbones sur le plan perpendiculaire à l'axe C—C (relations spatiales) : 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 ;

- les élèves ne forment pas d'image mentale et usent d'un raisonnement analytique qu'ils ne maîtrisent pas.

L'inversion des symboles de représentation des carbones (C3) est effectuée par 27% et 33% des élèves (2 cas, cf. tableau 4). Cette erreur peut être due à une méconnaissance des conventions de représentation dans le registre de Newman.

L'inversion des symboles des carbones observés et la permutation des substituants du carbone proche sont le fait de 35% et 20% des élèves (2 cas) (C4a) tandis que 47%, 29% et 32% des élèves (3 cas) intervertissent les représentations des carbones observés et permutent les substituants du carbone éloigné (C4b), et 34% et 32% des élèves (2 cas) inversent les symboles des carbones observés et font une permutation de leurs substituants (C4c) (cf. tableau 4). Ces résultats montrent que les difficultés de formation et de manipulation d'image mentale sont considérables dans la conversion inter registres Cram-Newman, et qu'à cela s'ajoute la méconnaissance des conventions de représentation dans le registre de Newman.

Selon les cas, 27% et 36% des élèves n'ont choisi aucune position de l'observateur (C5, cf. tableau 4), alors que cela est possible. 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.

DISCUSSION ET CONCLUSION

La réponse à la première question de recherche comporte plusieurs aspects. Comme les étudiants débutants (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. Les difficultés géométriques des élèves sont indéniables puisque la majorité des élèves propose une réponse où l'angle de rotation, angle dièdre, vaut 120° au lieu de 60° . Certaines difficultés des élèves ont une dimension sémiologique. Une proportion non négligeable d'élèves (14%) n'utilise pas le code de représentation et propose des dessins où tous les traits de liaison sont en tirets simples, donc tous équivalents ce qui suggère que ces élèves ne perçoivent pas que les représentations de Cram renferment des informations de nature spatiale. La forte proportion de dessins avec des angles erronés (74%), peut refléter un manque d'habitude à dessiner de telles représentations ou une prise de conscience insuffisante que ces représentations sont codifiées : les enseignants n'insistent peut-être pas suffisamment sur le respect des conven-

tions de représentation de la structure spatiale d'une molécule dans le registre de Cram.

Le cas où les élèves dessinent une conformation décalée avec des traits de liaison gras et hachuré mal disposés, erreur également repérée chez des étudiants (Pellegrin et al., 2003), suggère qu'ils n'associent pas d'image mentale à la représentation plane ou seulement une image partielle (localisée à une partie de la représentation) et ne peuvent donc pas se rendre compte de l'impossibilité du point de vue de l'observateur qu'ils dessinent.

Les réponses obtenues nous permettent de proposer trois catégories de raisonnements d'élèves, tous infructueux. Le premier, spatial, consiste à réaliser l'opération de rotation mentalement ; le deuxième, analytique, à changer la forme initiale de la représentation, et à répartir les substituants du carbone aléatoirement ; et enfin le troisième, également analytique, à seulement réaliser une permutation, circulaire ou aléatoire, des substituants du carbone. Dans le programme de terminale D, la stéréoisomérie de conformation est introduite à partir des conformations limites, éclipsée et décalée, de la molécule d'éthane. Nous faisons l'hypothèse que les élèves ne différencieraient pas les positions des différents atomes d'hydrogène après l'opération de rotation, ce qui les conduirait à penser qu'ils sont répartis de manière aléatoire. Ainsi, lorsqu'il s'agit de la rotation autour de l'axe C—C dans un autre cas que celui de l'éthane, certains élèves auraient tendance à répartir les atomes aléatoirement après rotation, en ayant changé la forme de la représentation ou pas.

Étant donné qu'à la question relative à la conversion inter registres Cram-Newman (question 2), aucun élève ne donne intégralement les réponses attendues, plusieurs types de difficultés sont à prendre en compte. La première pourrait concerner la compréhension de la consigne puisque 36% des élèves n'ont pas répondu, la seconde pourrait être la longueur de la tâche puisque 26% des élèves ne répondent pas à toutes les propositions. Il n'est pas exclu que certains élèves aient répondu au hasard. D'autres difficultés concernent les raisonnements mis en place. Dans la mesure où nous considérons qu'une représentation interne a été construite par l'élève à partir de la représentation de Cram, les réponses proposées par certains élèves nous permettent de supposer que :

- ce contenu construit à partir de la représentation de Cram est inexact, 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 insuffisantes ;

- ce contenu construit à partir de la représentation de Cram est exact, mais pas les projections mentales des substituants des carbones sur le plan perpen-

diculaire à l'axe C—C, 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 et manquent vraisemblablement de connaissances géométriques.

Ces raisonnements inexacts sont obtenus en observant la représentation de Cram, aussi bien à gauche qu'à droite, et concernant les carbones proche et éloigné de l'observateur. Cela incite à supposer que la capacité d'orientation spatiale de ces élèves est insuffisante. Le problème de visualisation mentale des substituants des carbones ne dépend donc pas nécessairement de la position du carbone par rapport à l'observateur.

Un grand nombre d'élèves ayant répondu représentent le carbone proche par un cercle, et le carbone éloigné par un point. Cette erreur est-elle à mettre sur le compte d'une difficulté d'ordre sémiologique (méconnaissance du code de représentation) ou sur celui d'une difficulté d'orientation spatiale ?

L'analyse du programme de terminale D suggère que la conceptualisation de la notion de stéréoisomérie de conformation est fondée sur les capacités à passer d'une conformation d'une molécule donnée à une autre conformation dans un même registre sémiotique (qu'il soit de Cram ou de Newman) et à réaliser la conversion inter registres Cram-Newman, ce qui suppose de coordonner les informations véhiculées par les deux registres sémiotiques (Duval, 1993). Ces capacités sont étroitement liées à la formation d'une représentation spatiale interne des représentations sémiotiques qui peut inclure la visualisation mentale et qui doit mobiliser des connaissances sémiologiques, géométriques et chimiques (Vérillon, 1996). Comme nos résultats le montrent, les élèves interrogés dans leur grande majorité ne parviennent pas à conjuguer efficacement ces connaissances.

Le libellé des questions et les réponses apportées par les élèves ne permettent pas de déterminer véritablement si le raisonnement conduit est exclusivement de nature spatiale ou analytique, ou s'il s'agit d'une combinaison de ces deux types. De plus, le temps écoulé (quelques mois) entre la situation de construction du contenu en jeu et la date de passation du questionnaire papier a pu constituer un obstacle à la réminiscence des concepts de stéréochimie dans la mesure où ceux-ci ne sont pas réactivés dans la suite du programme de chimie organique. Pour mieux connaître les raisonnements des élèves, nous estimons qu'il est nécessaire, à travers une nouvelle étude, d'analyser, au moyen d'entretiens individuels réalisés immédiatement après l'enseignement de la stéréochimie, les productions écrites et verbales des élèves, et les gestes qui pourraient accompagner ces productions.

QUELQUES PISTES POUR L'ENSEIGNEMENT

Pour aider les élèves à surmonter les difficultés repérées par notre étude, en accord avec les propositions d'autres auteurs, nous suggérons aux enseignants :

- lors de la présentation des conventions de représentation d'une molécule dans les registres de Cram et de Newman, d'insister sur la rigueur dont il faut faire preuve pour respecter le symbolisme des traits de liaisons, les valeurs des angles entre les traits de liaison, etc. ;

- de faire prendre conscience aux élèves que la position relative entre l'observateur et la représentation observée détermine la position des traits de liaison gras et hachurés dans le registre de Cram (Pellegrin et al., 2003) ;

- de favoriser la manipulation personnelle de modèles moléculaires par l'élève. En effet, outre l'intérêt de mieux visualiser la structure tridimensionnelle de la molécule 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).

RÉFÉRENCES

- BALDY René, CHATILLON Jean-Francois (1992) Comparer des dessins de volumes en perspective cavalière, *Tréma*, n°2, 15-27.
- BARLET Roger, PLOUIN Dominique (1997) La dualité microscopique macroscopique un obstacle sous-jacent aux difficultés en chimie dans l'enseignement universitaire, *Aster*, n°25, 143-174.
- BOUKHECHEM Mohamed-Salah, DUMON Alain, ZOUKRI Mohamed (2011) The acquisition of stereochemical knowledge by Algerian students intending to teach physical sciences, *Chemistry Education Research and Practice*, vol 12, 331-343
- CARLISLE Deborah, TYSON Julian, NIESWANDT Martina (2015). Fostering spatial skill acquisition by general chemistry students. *Chem. Educ. Res. Pract.*, vol 16, n°3, 478-517.
- COLEMAN Sharon L., GOTCH Albert J. (1998) Spatial Perception Skills of Chemistry Students, *Journal of Chemical Education*, vol 75, n°2, 206-209.
- DUVAL Raymond (1993), Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée, *Annales de didactique et de sciences cognitives*, n°5, 37-65.
- HEGARTY Mary (2004) Diagrams in the mind and in the world: Relations between internal and external visualizations, dans BLACKWELL Alan,

- MARIOTT Kim, SHIMOJIMA Atsushi (Eds.), *Diagrammatic representation and inference*, Berlin: Springer-Verlag, 1-13.
- HAMON Christian (2009) Graphismes techniques: tâches, nature et causes des difficultés des apprenants. *Aster*, n°48, 39-62.
- HARLE Marissa, TOWNS Marcy (2011) A Review of Spatial Ability Literature, Its Connection to Chemistry, and Implications for Instruction, *Journal of Chemical Education*, vol 88, n°3, 351-360.
- HOYEK Nady, COLLET Christian, GUILLOT Aymeric (2010), Représentation mentale et processus moteur: le cas de la rotation mentale, *Science et Motricité*, n°71, 9-39
- MARCHAND Patricia (2006) Comment développer les images mentales liées à l'apprentissage de l'espace en trois dimensions ? *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives*, n°11, 103 - 121.
- OLIVER-HOYO Maria, SLOAN Caroline. (2014) The development of a Visual-Perceptual Chemistry Specific (VPCS) assessment tool, *Journal of Research in Science Teaching*, n°51(8), 963-981.
- PELLEGRIN Valdo (1999) Les représentations graphiques bidimensionnelles des molécules en chimie organique avec un crayon et un papier, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 811, 263-290.
- PELLEGRIN Valdo, SIVADE André, BARLET Roget (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*, n°97(855), 909 – 931.
- STIEFF Mike, RAJE Sonali (2010) Expertise algorithmic and imagistic problem solving strategies in advanced chemistry, *Spatial Cognition et Computation*, n°10, 53-81.
- STIEFF Mike, HEGARTY Mary, DIXON Bonnie (2010) Alternative strategies for spatial reasoning with diagrams, dans GOEL Ashok, JAMNIK Mateja, NARAYANAN Hari (dir.), *Proceedings of the 6th international conference on Diagrammatic representation and inference*, Berlin: Springer, 115-127.
- STIEFF Mike (2011) When is a molecule three dimensional? A task-specific role for imagistic reasoning in advanced chemistry, *Science Education*, n°95(2), 310-336.
- STULL Andrew, HEGARTY Mary, DIXON Bonnie, STIEFF Mike (2012) Representational Translation with concrete models in organic chemistry, *Cognition and Instruction*, n°30 (4), 404-434.
- TAAGEPERA Mare, NOORI S. (2000) Mapping students' thinking patterns in learning organic chemistry by the use of knowledge space theory, *Journal of Chemical Education*, n°77 (9), 1224 – 1229.

TUCKEY Helen, SELVARATNAM Mailoo, BRADLEY John (1991) Identification and rectification of student difficulties concerning three-dimensional structures, rotation, and reflection, *Journal of Chemical Education*, n°68 (6), 460-464.

VERILLON Pierre (1996) Approche psychologiques et didactique en technologie: l'exemple du dessin technique, *Aster*, n°22, 127-147.

WU Hsin-Kai, SHAH Pritti (2004) Exploring visuospatial thinking in chemistry Learning, *Science Education*, n° 88 (3), 465-492.

Annexe



Système sémiotique de Cram: il permet la représentation d'une molécule dans l'espace : autour de l'atome de carbone, deux liaisons situées dans le plan de la feuille sont représentées par un trait normal (—); 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°.



Figure 7: représentation de Cram de la molécule de méthane

Système de représentation de Newman

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 de l'observateur 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. Les symboles des atomes liés à ces carbones sont ajoutés au bout de ces segments.

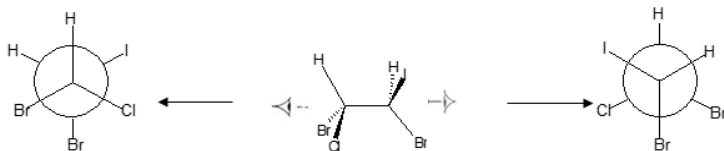



Figure 8: exemples de représentations de Newman pouvant être obtenues à partir d'une représentation de Cram⁸

Les angles de 109° entre deux liaisons d'un carbone dans l'espace, donnent des angles de 120° en projection.

⁸ Le dessin  indique la position de l'œil de l'observateur.