

L'actuel défi de la chimie organique : son enseignement

David Lafarge

Résumé

Face aux difficultés récurrentes repérées chez les étudiants et à la perception erronée qu'ils ont de la chimie organique, des explications ont été apportées et beaucoup de propositions d'amélioration de cet enseignement ont été décrites. Cependant, l'enseignement de la chimie organique a peu évolué au cours des dernières décennies. De récents travaux de recherche ont permis d'ouvrir la voie à une refondation de son enseignement. Ainsi la chimie organique pourra réellement montrer ce qu'elle est : une chimie créatrice et respectueuse de l'environnement à travers les problématiques de la synthèse organique, une science qui articule et fait évoluer ses modèles pour résoudre des problèmes de plus en plus complexes. Les premiers effets de ce changement sont visibles dans le nouveau programme de terminale S et ceux de CPGE, mais beaucoup reste à accomplir par la communauté des enseignants de chimie organique.

Mots-clés

Chimie organique, enseignement, apprentissage, didactique des sciences, JIREC 2013.

Abstract

The current challenge in organic chemistry: its teaching

Organic chemistry as it is taught in the first two undergraduate years is reputed to be difficult. Many suggestions have been made for improving its teaching, which has however changed little in last decades. Recent research has paved the way for a reshape of organic chemistry teaching, so that the organic chemistry which students are taught is consistent with the nature of this science. The first effects of this change appear in the new national grade 12 physics and chemistry curriculum, and in the new national curriculum of preparatory classes for selective postgraduate schools, but much remains to be done by the chemistry education community.

Keywords

Organic chemistry, teaching, learning, science education, JIREC 2013.

« J'aime pas la chimie orga ! » Cette sentence semble partagée par de nombreux étudiants de par le monde, car il s'agit d'un cours pénible, nécessitant un énorme effort de mémorisation, sans l'assurance d'une réussite à l'examen. Le malaise est suffisamment profond pour que soient réalisés de nombreux travaux et écrits sur le sujet et que soient tenus des colloques visant à réduire le « traumatisme » causé par cet enseignement⁽¹⁾.

Pourquoi la chimie organique est-elle si difficile à apprendre ?

Le volume important des connaissances et le peu de temps disponible pour les traiter sont souvent cités par les auteurs. En particulier, Scudder dénonce la tyrannie du contenu, la majorité des livres qui ont plus de mille pages, les cours qui deviennent des concours de rapidité d'écriture et les examens des exercices de restitution de ce contenu [1].

Le symbolisme de la chimie organique n'a pas de signification claire pour la plupart des étudiants des premières années universitaires [2-4]. Ourisson dénonçait les non-dits, les ambiguïtés, voire le laxisme dans l'utilisation du symbolisme [5] (figure 1). Les chimistes pensent utiliser des idéogrammes, alors qu'il s'agit en fait de pictogrammes qui n'ont pas de signification en eux-mêmes mais une signification que chacun s'est construite. Ainsi le système symbolique, comme celui des flèches courbes dans les mécanismes, s'apprend à l'occasion de son utilisation par l'enseignant, sans qu'en soient explicitées les règles de fonctionnement [6].

Le savoir de référence en chimie organique est complexe. Dès 1835, Wöhler compare la chimie organique à « une forêt tropicale primitive, un hallier monstrueux et sans limite, sans

voie de sortie, dans lequel on a peur de pénétrer » [7]. À cette époque, les livres traitent la chimie organique selon une approche descriptive qui se focalise sur l'origine biologique et l'usage médical [8]. Gerhardt propose une rationalisation des connaissances de l'époque et classe les espèces chimiques en « séries », en faisant un lien entre leur structure et leurs propriétés. Il propose dès 1845 une classification d'après les « fonctions chimiques ». La chimie organique connaît ensuite deux ruptures épistémologiques fondamentales [9], la première étant la théorie de Lewis au début du XX^e siècle. La prise en compte du milieu vient ensuite compléter l'approche électronique et intègre les phénomènes « sociomoléculaires » dans l'analyse de la réactivité (solvant, agrégats, complexation... et le volet macroscopique qu'est la thermodynamique). La théorie quantique constitue une seconde rupture épistémologique par rapport aux raisonnements découlant de la théorie de Lewis. Actuellement, la résolution de problèmes en chimie organique par les experts nécessite d'articuler différents modèles compétitifs, issus de différents champs : thermodynamique, cinétique, classique (Lewis, électrostatique), quantique [3, 10].

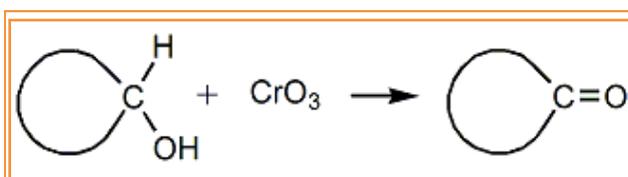
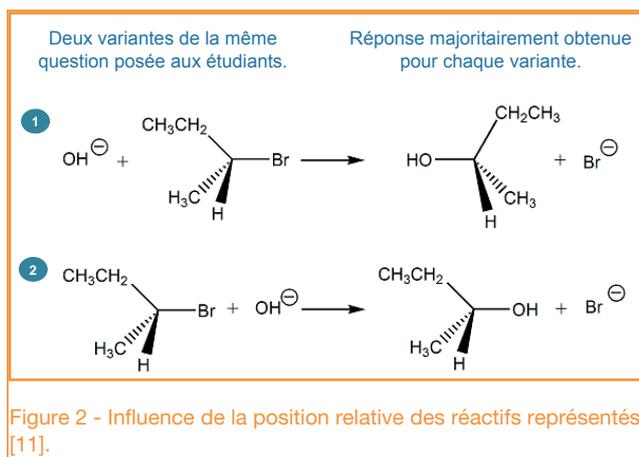


Figure 1 - Sur cet exemple, Guy Ourisson montre comment les chimistes organiciens modifient la convention d'écriture des espèces et des réactions chimiques [5].



Les étudiants peuvent-ils raisonner plutôt que mémoriser ?

De nombreuses publications rapportent les difficultés des étudiants, leur croyance qu'il faut essentiellement mémoriser pour réussir et leur incapacité à raisonner en utilisant les modèles de la réactivité⁽¹⁾. Par exemple, il existe un décalage entre étudiants et enseignants lorsqu'il s'agit de déterminer la nature des capacités cognitives nécessaires pour réussir en chimie organique [9]. Pour les enseignants, il s'agit avant tout de « comprendre », « raisonner » et « structurer », alors que pour les étudiants, il s'agit certes de « comprendre », mais aussi d'« apprendre » et « mémoriser ». En effet, lors de la résolution de problèmes en chimie organique, la plupart des étudiants reprennent des séquences d'étapes mémorisées et reconstituent un puzzle [4]. Les concepts sous-jacents et les modèles ne sont retenus que sous forme de mots vides de sens : les étudiants sont capables de les restituer tels qu'ils ont été formulés par l'enseignant, lorsqu'ils reconnaissent une situation déjà vue en cours, mais ils sont désarmés devant de nouveaux problèmes [3].

Il est remarquable d'observer que face à une question qui leur est posée, les étudiants essaient de s'en sortir en utilisant des stratégies parfois inattendues. Par exemple, quand il est demandé à des étudiants de deuxième année de prévoir le produit obtenu lorsqu'on fait réagir l'ion hydroxyde avec un bromoalcane (figure 2), leur réponse dépend majoritairement de la position initiale des réactifs représentés plutôt que des caractéristiques de la réaction elle-même [11]. La même étude montre que si dans la question les réactifs sont représentés en trois dimensions, les étudiants proposent une substitution ; si les mêmes réactifs sont représentés en deux dimensions, alors ils optent pour une élimination ; si la formule du substrat est compacte, la réaction proposée dépendra de la représentation des réactions que l'étudiant choisira lui-même (figure 3). Ceci serait lié au fait que leurs enseignants [11] et les auteurs de livres [12] auraient tendance à présenter les mécanismes de substitution nucléophile en trois dimensions, alors que les mécanismes d'élimination sont représentés avec des formules planes.

Pourquoi les étudiants utilisent-ils des stratégies alternatives plutôt que celle fondée sur un raisonnement avec les modèles de la chimie organique ? Est-ce parce que l'utilisation des modèles est plus difficile ? Les modèles sont-ils vraiment opérationnels ? Les modèles utiles sont-ils enseignés ? Mais finalement, les questions qui sont posées aux étudiants, les tâches données par l'enseignant peuvent-elles être réellement réalisées à l'aide de raisonnements utilisant les modèles de la réactivité issus des différents champs théoriques ?

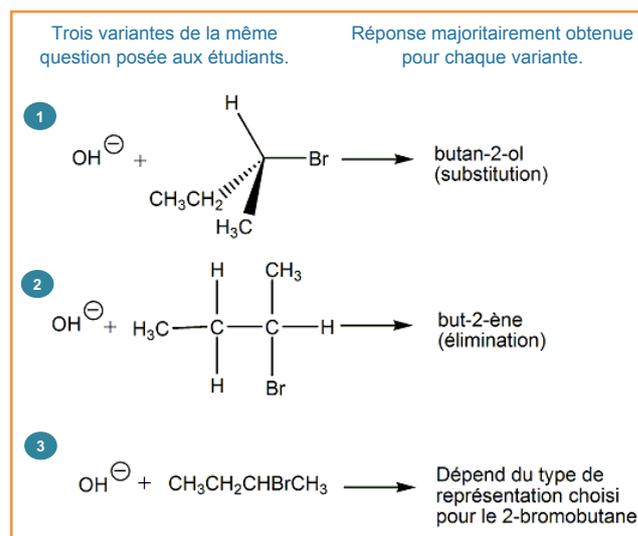


Figure 3 - Influence du mode de représentation d'un réactif [11].

Une réponse négative provient de l'analyse de 375 tâches issues d'énoncés d'examens et de concours, portant sur la réactivité et les réactions en chimie organique [10]. La réussite à l'aide de la seule stratégie de modélisation n'est pas envisageable : les buts des tâches (par exemple prévoir le produit final, établir un mécanisme réactionnel) sont impossibles à atteindre avec les modèles seuls, en ne connaissant que la structure des réactifs ; les conditions nécessaires à la réalisation des tâches ne sont pas réunies (il manque des données indispensables au fonctionnement des modèles telles que des données thermodynamiques ou cinétiques). Il est donc plus efficace pour les étudiants d'utiliser une stratégie de mémorisation-restitution qui consiste à reconnaître la nature des réactifs, puis à restituer une réaction ou un mécanisme réactionnel préalablement mémorisés. L'étude révèle aussi que la structuration historique par groupes fonctionnels, actuellement très répandue [10, 13], focalise l'attention des étudiants sur la structure moléculaire des réactifs et les incite à utiliser une stratégie de mémorisation-restitution plutôt qu'une stratégie de modélisation. Les étudiants sont donc cantonnés dans les faits à utiliser une chimie organique descriptive plus ancienne pour laquelle il faut mémoriser des réactions et leurs caractéristiques.

Pourquoi et comment refonder cet enseignement ?

De nombreuses propositions d'amélioration de cet enseignement ont été décrites⁽¹⁾. Une première approche consiste à améliorer sa mise en œuvre sans modifier fondamentalement la structuration et la nature du contenu disciplinaire : par exemple sont proposés de nouveaux supports, des travaux collaboratifs ou des activités de résolution de problèmes. Une seconde approche vise à redéfinir le contenu disciplinaire lui-même à travers son organisation et ses priorités : il est proposé d'élaguer une partie du contenu, reporter les notions trop complexes et actualiser les applications, introduire la stratégie de synthèse organique plus tôt, réorganiser la structure globale selon une spirale (ou en deux cycles), ou encore autour des mécanismes réactionnels et des modèles. Fondamentalement, ces propositions restent focalisées sur la description des réactions qu'elles organisent et présentent autrement, alors que l'objet principal de la chimie organique actuelle n'est plus la description exhaustive

Encadré 1**Un exemple de progression sur deux ans*****Partie 1 : Comment séparer et identifier des espèces chimiques organiques ? Relations structures-propriétés physiques**

Comment déterminer la structure d'une espèce chimique organique ?
Comment isoler et identifier une espèce chimique organique ?

Partie 2 : Qu'est-ce qu'une stratégie de synthèse organique ?

Comment choisir la meilleure stratégie de synthèse organique ?
Comment élaborer des stratégies de synthèse organique simples ?

Partie 3 : Que se passe-t-il pendant une réaction de chimie organique ?**Notion de mécanisme réactionnel**

Comment évaluer le rôle des réactions acido-basiques en chimie organique ?
Comment expliquer ou prévoir une réaction de chimie organique ?

Partie 4 : Comment concevoir une stratégie de synthèse organique ?**Notions de rétrosynthèse et de chimiosélectivité**

Comment partir de l'espèce chimique organique cible ?
Comment gérer les problèmes de sélectivité des aménagements de fonction ?

Partie 5 : Comment prévoir et modifier l'efficacité d'une transformation d'espèce chimique organique ? Approches thermodynamique et cinétique

Comment prévoir la faisabilité d'une réaction chimique organique ?
Comment la rendre possible ?

Comment prévoir la vitesse d'une réaction chimique organique ? Comment l'accélérer ou la bloquer ?

Comment sélectionner le produit thermodynamique ou le produit cinétique en cas de compétition ?

Partie 6 : Comment contrôler la stéréochimie d'une transformation d'espèce chimique organique ? Notions de stéréosélectivité et stéréospécificité

Comment déterminer la structure tridimensionnelle d'une espèce chimique organique ?

Comment contrôler la stéréochimie lors d'une transformation d'espèce chimique ?

* Pour le détail de cette progression, avec pour chaque question la liste des apprentissages visés et le matériel empirique, on pourra consulter l'annexe de la thèse disponible en ligne [10] ou l'article [16].

et le classement des réactions connues. D'ailleurs, certains auteurs suggèrent de structurer le contenu disciplinaire selon les principes directeurs, les concepts et les modèles de la chimie organique. C'est cette piste qu'il s'agit d'explorer. Or un modèle n'existe pas pour soi, il sert à interpréter un champ expérimental par rapport auquel on pose des questions [14-15]. Il peut donc fournir des éléments de réponse à certaines questions que se pose le chimiste.

C'est donc autour des questions que le chimiste organicien peut se poser que nous proposons de restructurer en profondeur l'enseignement de la chimie organique des premières années post-bac. Il s'agit ensuite de regrouper les questions et leurs réponses autour de quelques pôles, qui sont organisés de manière à enseigner progressivement les modèles, les mécanismes réactionnels et la synthèse organique (encadré 1). La progressivité de cet enseignement n'est plus fondée explicitement sur l'augmentation de la complexité de la structure moléculaire, mais sur l'augmentation de la complexité des questions et des réponses du chimiste.

Les tâches fournies aux étudiants doivent être repensées. Leurs buts sont redéfinis et diversifiés avec davantage d'interprétations de données et de prévisions réellement accessibles. Les conditions de leur réalisation sont fournies : résultats expérimentaux à interpréter et données nécessaires au fonctionnement des modèles (table d'électronégativité, données

Encadré 2**Exemples de questions pouvant être posées dans des exercices d'initiation à la synthèse organique*****Exercice 1**

Un précurseur du patchouliol est synthétisé selon le plan de synthèse fourni. Cependant, il manque la plupart des conditions réactionnelles.

1. Pour chaque étape de la synthèse, dire de quel aménagement il s'agit.
2. À l'aide de la réactionthèque, proposer les conditions réactionnelles les plus adaptées permettant de synthétiser la molécule cible selon le plan de synthèse fourni.

Exercice 2

Nous cherchons à synthétiser l'espèce chimique **A**, utilisée contre la maladie de Parkinson. Deux plans de synthèse ont été proposés par des chercheurs, mais nous ne disposons pour chaque plan que de quelques informations et des étapes réactionnelles dans le désordre.

1. Reconstituer chacun des plans de synthèse en s'aidant de la réactionthèque.
2. En supposant que les rendements des transformations disponibles dans la réactionthèque soient les mêmes que ceux des étapes réactionnelles de ces deux synthèses, estimer leur rendement global. Conclure.

Exercice 3

En utilisant la réactionthèque, proposer une synthèse (en une ou plusieurs étapes) de chaque molécule cible à partir du précurseur associé.

* Les exercices complets sont disponibles dans l'annexe de la thèse disponible en ligne [10].

thermodynamiques, etc.). Ainsi il peut être demandé de décrire ou de compléter un mécanisme réactionnel, choisir parmi plusieurs propositions le mécanisme qui est le plus en accord avec les résultats expérimentaux et les connaissances de contrôle telles que le critère du ΔpK_a ⁽²⁾ [1], prévoir une réaction chimique proche d'une réaction dont le mécanisme a été étudié, vérifier la cohérence d'une prévision ou compléter une prévision. En matière de synthèse organique, tout est à créer à ce niveau là : schématiser une synthèse organique à partir de sa description, choisir la stratégie de synthèse la plus efficace entre deux propositions (coût, rendement, respect de l'environnement, etc.), reconnaître des aménagements de fonction ou de structure sur un schéma de synthèse, utiliser une base de données (la « réactionthèque ») pour estimer des rendements, associer des réactions aux étapes d'un plan de synthèse succinct fourni et concevoir des synthèses simples (figure 4 et encadré 2). Précisons que la réactionthèque n'a pas vocation à être mémorisée, et qu'elle est donc fournie à l'examen, au moins partiellement. Il peut cependant être utile de connaître les principaux aménagements de fonction et de structure.

Ce sont tous ces éléments que nous avons tenté de concrétiser dans le cadre de notre recherche [10, 16], en tâchant de respecter le contenu disciplinaire des programmes d'enseignement alors en vigueur.

Les nouveaux programmes de terminale S et CPGE

La réforme du lycée général et technologique est entrée en vigueur à la rentrée 2010, de « nouveaux » bacheliers se présentent à l'entrée des différentes formations du supérieur à la rentrée 2013. L'enseignement de physique-chimie a pour objectifs de former à la pratique de la démarche scientifique, faire acquérir des connaissances et compétences fondamentales, proposer des contenus motivants et modernes, mieux préparer la transition vers le supérieur [17]. Les programmes de CPGE (classes préparatoires aux grandes écoles) ont été conçus dans la continuité de ceux du lycée [18].

En ce qui concerne spécifiquement la chimie organique, nous observons dans les programmes de terminale scientifique (terminale S) [19] et de CPGE [20] une entrée par les questions contemporaines du chimiste organicien, le passage d'une accumulation de connaissances (familles, réactions) à des connaissances et compétences diversifiées, et la mise en

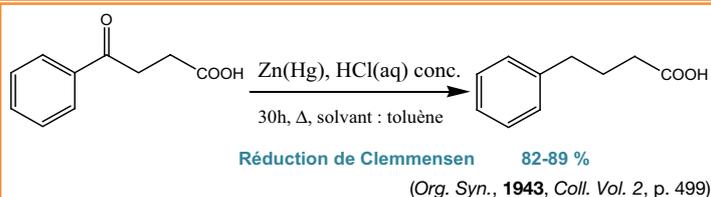


Figure 4 - Exemple de transformation issue d'une « réactionthèque ».

relief de la démarche scientifique et l'approche documentaire. Ainsi ces programmes semblent marquer le début d'une refondation de l'enseignement de la chimie organique. Jusqu'ici, les enseignants avaient peu de marge de manœuvre entre les programmes institutionnels, le manque de ressources alternatives et des habitudes d'enseignement de la chimie organique très ancrées et partagées par la communauté des enseignants de cette discipline [10]. Mais un verrou institutionnel vient d'être levé, et nous devons saisir l'occasion de faire évoluer fondamentalement cet enseignement.

Conclusion

Refonder un enseignement tel que celui de la chimie organique est une tâche colossale et représente un défi pour la communauté des enseignants de cette discipline. Après les deux ruptures épistémologiques que la chimie organique a connues, son histoire entame une nouvelle rupture, mais qui concerne maintenant son enseignement et son apprentissage.

Notes et références

- (1) Dans cet article ne sont mentionnées que quelques-unes des publications les plus représentatives. Pour obtenir une revue bibliographique plus détaillée, se référer au premier chapitre de la thèse de doctorat disponible en ligne [10].
- (2) Critère du ΔpK_a : le pK_a du groupe partant (molécule ou anion) produit par la réaction étudiée doit être au maximum à 8 unités au-dessus du pK_a du groupe entrant (molécule ou anion), afin que la réaction soit considérée comme envisageable : $pK_a(\text{groupe partant}) \leq pK_a(\text{groupe entrant}) + 8$.
- [1] Scudder P., Database vs. expert system teaching paradigms: using organic reaction mechanisms to teach chemical intuition, *J. Chem. Educ.*, **1997**, *74*, p. 777.
- [2] Anderson T., Bodner G., What can we do about "Parker"? A case study of a good student who didn't "get" organic chemistry, *CERP*, **2008**, *9*, p. 93.
- [3] Bhattacharyya G., Who am I? What am I doing here? Professional identity and the epistemic development of organic chemists, *CERP*, **2008**, *9*, p. 84.
- [4] Bhattacharyya G., Bodner G., "It gets me to the product": how students propose organic mechanisms, *J. Chem. Educ.*, **2005**, *82*, p. 1402.
- [5] Ourisson G., Le langage universel de la chimie : les idéogrammes. Ambiguïtés et laxismes, *L'Act. Chim.*, janv.-fév. **1986**, p. 41.

- [6] Agrebi S., *De la représentation symbolique au langage lors de l'apprentissage des mécanismes en chimie organique dans l'enseignement supérieur*, thèse de doctorat, Université Lumière Lyon 2-Université de Tunis, **2004**.
- [7] Extrait d'une lettre de Wöhler à Berzélius, 1835, cité par Trong Anh N. in *Introduction à la Chimie moléculaire*, Ellipses, **1994**, p. 411.
- [8] Terrien M., *Contribution à l'étude des échanges entre la recherche et l'enseignement supérieur (chimie)*, thèse de doctorat, Université d'Angers, **1998**.
- [9] Loumouamou A., *Contribution à la transposition didactique en chimie organique*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, **1998**.
- [10] Lafarge D., *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, **2010** (<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00578419/fr>).
- [11] Ladhams Zieba M., *Teaching and learning about reaction mechanisms in organic chemistry*, thèse de doctorat, University of Western Australia, Perth, **2004**.
- [12] Bucat R., Pedagogical content knowledge as a way forward: applied research in chemistry education, *CERP*, **2004**, *5*, p. 215.
- [13] Johnson A.W., The year-long first course in organic chemistry, *J. Chem. Educ.*, **1990**, *67*, p. 299.
- [14] Martinand J.-L., Apprendre à modéliser, *Changement conceptuel et apprentissage des sciences*, R.M.J. Toussaint (ed.), Recherches et pratiques, Les Éditions logiques, Québec, **2002**, p. 47-68.
- [15] Lemeignan G., Weil-Barais A., *Construire des concepts en physique*, Hachette, **1993**.
- [16] Lafarge D., Morge L., Méheut M., A new higher education curriculum in organic chemistry: what questions should be asked?, *J. Chem. Educ.*, **2014**, *91*, p. 173.
- [17] Mauhourat M.-B., Vigneron M., Chimie « vivante » et « chimie et vivant » : les nouveaux programmes du lycée, *L'Act. Chim.*, **2012**, *363*, p. 40.
- [18] Mauhourat M.-B., Garreau-de Bonneval B., Fajenwerg K., De nouveaux profils étudiants en 2013, *L'Act. Chim.*, **2013**, *374*, p. II.
- [19] Ministère de l'Éducation nationale, Enseignement spécifique et de spécialité de physique-chimie de la série scientifique – classe terminale, *Bulletin officiel spécial n° 8* du 13 oct. **2011**.
- [20] Ministère de l'Éducation nationale, Programmes de la classe préparatoire scientifique Physique, chimie et sciences de l'ingénieur (PCSI) et programme de sciences industrielles de l'ingénieur de la classe Physique et sciences de l'ingénieur (PSI), *Bulletin officiel spécial n° 3* du 30 mai **2013**.



David Lafarge, docteur en didactique de la chimie, est professeur agrégé de chimie à l'IUFM de l'Université de la Nouvelle-Calédonie* et membre associé au laboratoire ACTÉ (EA 4281) de l'Université Blaise Pascal, Clermont Université.

* IUFM de l'Université de la Nouvelle-Calédonie, 125 avenue James Cook-Nouvelle, BP X4, F-98852 Nouméa Cedex.
Courriel : david.lafarge.ubp@gmail.com

Le « Molegloo »

Fête de la science 2013, Nouvelle Calédonie, collège de Boulari

Les élèves d'un atelier scientifique ont conçu un « Molegloo » pour la Fête de la science 2013 avec leur professeur de physique chimie et leur professeur d'arts plastiques. L'idée de départ était d'étudier les polluants, et plus particulièrement les molécules qui les constituent. Les élèves devaient choisir une molécule de produit polluant et lui donner une forme en rapport avec son impact sur l'environnement ou son origine, sa source. Ils ont eu l'idée de réaliser un chemin de molécules où les gens se promèneraient. Puis ce chemin s'est transformé en une molécule de dioxyde de carbone, les trois atomes prenant la forme d'igloos, avec un thème développé par igloo. Premier igloo : la serre, avec quelques gaz à effet de serre, des molécules d'insecticides, de pesticides, etc. Deuxième igloo : l'usine, avec les polluants des usines calédoniennes. Troisième igloo : l'eau et ses polluants. Les igloos étaient reliés par des tunnels représentant les liaisons entre les atomes et les gens les traversaient en bénéficiant d'explications sur la pollution en Nouvelle-Calédonie. Les élèves ont joué le rôle de guide à l'intérieur de ce fameux « Molegloo ». Ils ont remporté le **premier prix du public de la Fête de la science** (concours organisé par l'Association Symbiose Nouvelle-Calédonie).

