

## Apports de la chimie verte au lycée

### Réalisé par :

Émeline LEAU, Élisabeth MASSOT, Zineb ZIYAT

### L3 Biologie des organismes et écologie

Responsables : Laurent coutte et Florence Hulot (Université Paris-Saclay)

### UE Risques chimiques et écotoxicologie 2019-2020 :

Responsable : Florence Hulot (Université Paris-Saclay)

Remerciements : nous tenons à remercier Mme Christine Ducamp (ENSFEA), qui a pris le temps de nous partager son expérience, nous a conseillées et fourni des documents.

## **Introduction**

Ce sujet a émergé de la constatation d'une contradiction entre la réglementation des produits chimiques dangereux et les programmes d'enseignement au lycée. Cette contradiction pose de nombreux problèmes tels que l'exposition d'élèves mineurs à des produits chimiques dangereux ainsi qu'une difficulté de choix des travaux pratiques pour les enseignants.

Pour pallier à ces nombreux problèmes, diverses pistes peuvent être explorées, notamment celle de la « chimie verte » et plus généralement des mesures de gestion du risque. Comment la chimie verte avec ses mesures de gestion du risque peut apporter des solutions intéressantes face à ce problème ?

Dans un premier temps, nous exposerons la contradiction qui existe entre le cadre juridique imposé par la loi en matière d'utilisation de produits chimiques dangereux et les programmes d'enseignements de chimie au lycée. Dans une deuxième partie, nous présenterons les perspectives offertes par la chimie verte ainsi que l'application de mesures de gestion du risque. Enfin, en dernier lieu, nous discuterons des possibilités offertes par ces approches.

Cette étude sera restreinte aux élèves mineurs étudiant au lycée en filière générale. En effet, les travaux pratiques en chimie au collège ne posent pas de problèmes particuliers de gestion du risque et les filières technologiques ou professionnelles (STL par exemple) bénéficient de dérogations et d'un suivi médical particulier.

## **1. Contradiction entre le cadre juridique et les programmes de chimie**

### **1.1 Cadre juridique**

L'utilisation de produits chimiques par des élèves mineurs est très stricte. Elle est régie par des notes de service internes [1,2]. Bien qu'il n'y ait pas de produits formellement interdits hormis le benzène, l'Inspection demande de ne pas utiliser les produits CMR [3] (C : cancérogènes, M : mutagènes, R : nocifs pour la reproduction). Le code du travail [4] interdit également un certain nombre de produits « relatifs aux dangers physiques, aux dangers pour la santé ou aux dangers pour l'environnement ». Les élèves, n'étant pas salariés, ne sont pas soumis au code du travail mais celui-ci peut servir de cadre pour restreindre l'usage des produits chimiques. Ces derniers sont classés en différentes listes : dangereux, soumis à des dérogations ou nécessitant une surveillance médicale particulière. Ces listes alertent sur les risques potentiels et sont modifiées régulièrement en fonction de l'évolution des connaissances.

Il y a donc obligation pour les enseignants, avant l'utilisation de produits chimiques par les élèves, de vérifier la possibilité d'utiliser les produits, de respecter l'environnement et de prévenir les

risques, c'est-à-dire de connaître les dangers potentiels et de prévoir les règles de sécurité adéquates. Pour prévenir les risques, l'enseignant doit s'informer (sur le site de l'INRS notamment [5]) sur la nocivité des produits et prévoir les manipulations en conséquence (petites quantités, port d'équipement de sécurité, etc...).

## **1.2 Contradiction entre le cadre juridique et les programmes**

Le cadre juridique est extrêmement restrictif. Cependant, les programmes d'enseignements ainsi et l'Inspection académique de l'Education nationale demandent d'utiliser des produits chimiques qui seraient interdits à des mineurs salariés : en effet, « si le produit n'est pas CMR mais a le pictogramme dangereux pour la santé, on l'utilise avec précaution » [3]. On peut citer par exemple le cyclohexane, souvent utilisé dans les travaux pratiques comme solvant.

De ce fait est née la nécessité de chercher des alternatives permettant la bonne formation des élèves, tant au respect de la réglementation, au bon sens et à la prévention du risque. Chercher des alternatives permettrait d'améliorer les conditions de travail des personnels et des élèves.

## **2. Principes de la chimie verte**

### **2.1 Les principes de chimie verte**

Le principal objectif de la chimie verte est de réduire au maximum les substances néfastes pour l'environnement en utilisant des procédés plus respectueux des principes de développement durable [6]. Elle établit un équilibre entre les aspects économiques, sociaux et environnement en se basant sur 12 points [7,8].

De nombreux secteurs d'activité, notamment industriels, ont déjà adapté la conception de leurs produits aux règles de la chimie verte (agromatériaux, biocarburants, biosolvants, produits chimiques divers,...). Cependant, l'application de ces principes nécessite une main d'œuvre et du matériel adapté pour des employés : l'application de ces points en milieu scolaire n'est pas toujours applicable (les points 5, 9 10 ou 11 par exemple). Une liaison entre demande des consommateurs, contraintes environnementales, efficacité économique et innovations scientifiques est établie. A l'inverse, dans le milieu scolaire, les contraintes pédagogiques et celles du développement durable sont plus difficiles à lier [9].



Anastas, P. T.; Warner, J. C. Green Chemistry: Theory and Practice, Oxford University Press, Oxford, 1988, p. 30.

Figure 1 : les 12 principes de la chimie verte

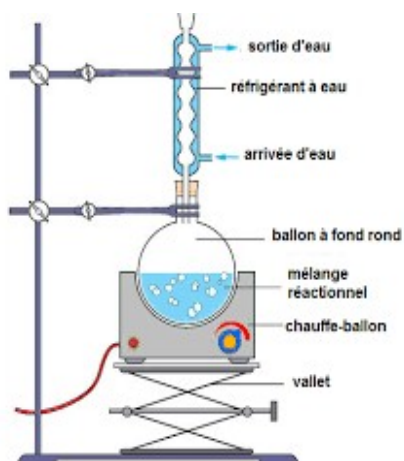


Figure 2 : montage à reflux [16]

## 2.2 Les objectifs d'application de chimie verte au lycée

Pour commencer, il faut rappeler les objectifs d'un enseignement de la chimie au lycée :

- tout d'abord, former des scientifiques qui seront sensibles à la démarche expérimentale, incluant le respect de la sécurité au cours de la réalisation d'expériences rigoureuses ;
- ensuite, former des chimistes qui auront un aperçu de ce qui se fait réellement en chimie, tant pour le matériel utilisé que pour les voies de synthèse, purification, identification ;
- enfin, être capable de raisonner de manière quantitative (calculs précis, évaluation des incertitudes).

L'apport de la chimie verte serait :

- sensibiliser les élèves à l'économie d'énergie et de matière premières ;
- les sensibiliser à la prévention du risque ;
- ouverture au monde des médias et de la recherche scientifique.

Cependant ces objectifs de mise en place de chimie verte amènent des contraintes économiques [10]. Le manque de matières voire même une modification du type de matières utilisées, la modification des espaces de manipulation impactent les objectifs de la formation suivie par les élèves par rapport aux types d'expériences qui sont simplifiées mais accessibles. Les enseignants doivent s'adapter aux règles d'applications de la chimie verte tout en maintenant les modalités du niveau d'étude [11].

## 3. Discussion : propositions d'adaptations au lycée

Il n'est pas toujours possible de respecter *tous* les principes de la chimie verte en même temps, mais le but est d'améliorer les protocoles existants et de sensibiliser les élèves. Nous nous concentrerons sur les trois points cités ci-dessus [12].

### 3.1 Économie d'énergie et de matières premières

Bien qu'il ne soit pas toujours possible ou souhaitable de renoncer à un protocole, il faut toujours essayer d'adapter les protocoles pour économiser l'énergie ou les matières premières.

Par exemple lors des titrages redox, le permanganate de potassium est souvent utilisé car c'est un oxydant fort coloré. Cependant, comme tout oxydant fort, il est dangereux pour l'environnement car il peut pénétrer dans le cytoplasme des bactéries et oxyder certains acides aminés comme la cystéine, provoquant la dénaturation ou l'agglomération des protéines conduisant à l'apoptose ou la nécrose de la bactérie [13]. Heureusement, sa couleur est suffisamment intense pour être visible à faible concentration : il faut donc pour chaque titrage proposé aux élèves rechercher la concentration et le volume minimum permettant de réaliser le titrage.

Dans un autre domaine de la chimie, lors des synthèses en chimie organique, certains contournent la difficulté en proposant des synthèses nécessitant peu de matériel (colle de lait [14], bioplastiques par exemple [15]). Cependant, dans le cadre de la formation des futurs ingénieurs, il est nécessaire de présenter aux élèves un montage à reflux (figure 2) : celui-ci permet en effet de discuter des choix expérimentaux de manière pointue et visuelle. Il n'est pourtant pas indispensable que chaque binôme réalise le montage. Celui-ci peut être présenté sur le bureau du professeur et les élèves réaliseront la synthèse en tube à essai, ce qui permet de diminuer à la fois les réactifs, les produits et l'énergie nécessaire. Ceci est possible par exemple avec les synthèses classiques de lycée comme la synthèse du savon ou celle des esters [17,18].

De plus, en chimie organique, il existe à présent des réfrigérants sans eau qui évitent de perdre plusieurs dizaines de litres d'eau par expérience [19].

### 3.2 Gestion du risque

Les élèves peuvent être sensibilisés à la gestion du risque en les associant à l'élaboration des protocoles.

Par exemple, le cyclohexane est souvent utilisé comme solvant organique lors des extractions car il permet de remplacer nombre d'autres solvants bien plus dangereux tels le dichlorométhane, l'éther, etc. Le cyclohexane est un dépresseur du système nerveux central à fortes doses d'expositions qui ne sont pas celles de la salle de classe [20]. Il peut néanmoins être lui-même substitué par l'huile végétale alimentaire (tournesol par exemple). Or, différents avantages et inconvénients sont liés à ces solvants : le cyclohexane est plus cher, il présente un danger, il faut le recycler, mais l'huile végétale fait souvent des émulsions lorsqu'on essaie d'extraire des molécules organiques qui jouent facilement le rôle de tensioactif. Il est alors souvent difficile de séparer les deux phases (figure 3). Seulement, le fait que le cyclohexane présente un danger n'est pas un argument pertinent : ce qui est pertinent, c'est le risque associé qui peut être calculé par [21] :

$$\text{risque} = \text{danger} * \text{exposition}$$

À l'aide des seuils donnés dans la fiche INRS, il est facile de calculer si l'exposition conduit ou non à un risque. Prenons pour exemple une classe de 9 groupes, manipulant chacun 10 mL de cyclohexane, dans une pièce de  $10\text{m} * 6\text{m} * 3\text{m} = 180 \text{ m}^3$ . Si tous les groupes cassaient en même temps leur ampoule à décanter, et que tout le cyclohexane ainsi répandu s'évaporerait instantanément, on obtiendrait une concentration de  $390 \text{ mg/m}^3$ . Or la VME en France est  $700 \text{ mg/m}^3$  [20]. Les élèves peuvent très bien comprendre que non seulement la probabilité que ça arrive (c'est-à-dire l'exposition) est franchement très faible, donc le risque également, mais que

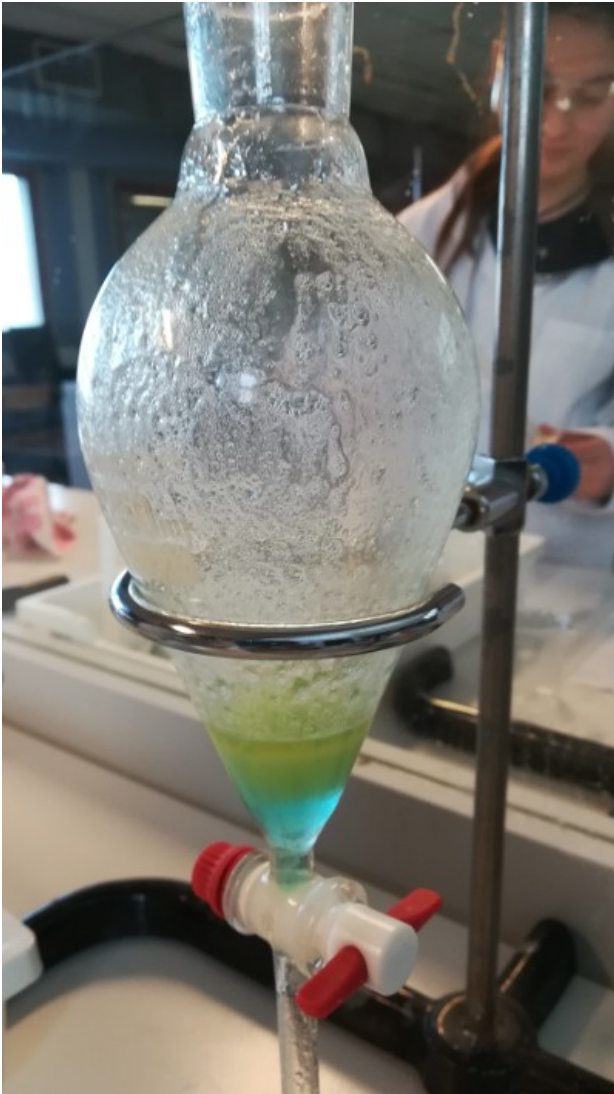


Figure 3 : aspect d'une tentative d'extraction avec de l'huile alimentaire (photo des auteurs)

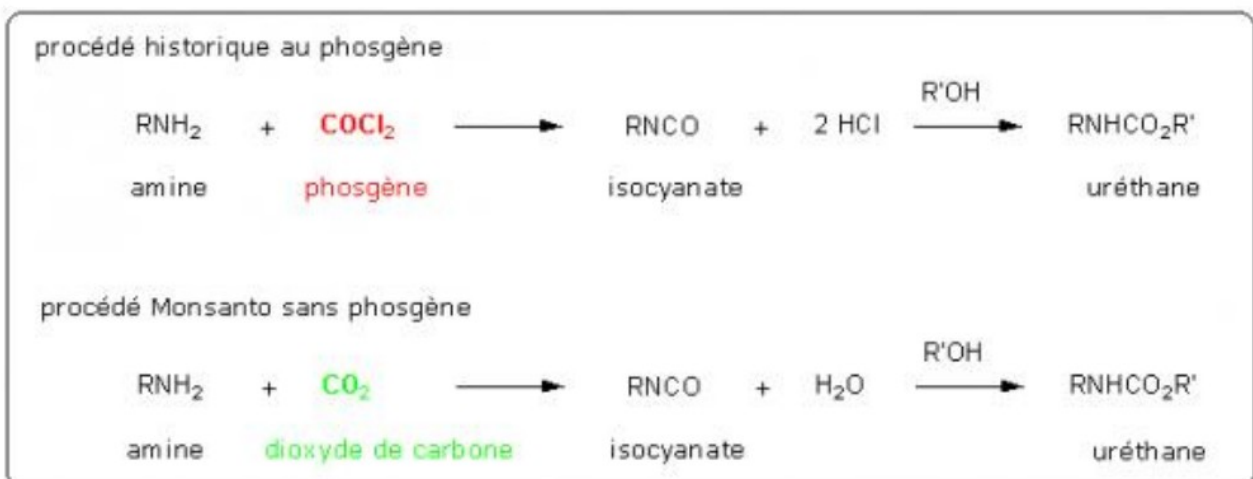


Figure 4 : exemple de réactif alternatif [28]

même dans ce cas la dose à laquelle ils seraient exposés serait inférieure aux limites légales. De plus, la VME correspond à une exposition de 8h [22], et si un accident comme celui décrit ci-dessus arrivait, on ne s'amuserait pas à rester 8h à respirer du cyclohexane...

### 3.3 Ouverture au monde des médias et de la recherche scientifique

Il reste toutefois des protocoles qui sont irréalisables en lycée. C'est le cas par exemple des synthèses dans laquelle le solvant est le dioxyde de carbone supercritique [23] : en effet, il est non toxique et facilement éliminé par dégagement gazeux à la fin de la réaction. Mais, bien qu'utilisé à basse température (31°C), il nécessite l'utilisation des réacteurs sous pression, au moins 74 bars ! [24] Or un petit réacteur de 0,5 L coûte la bagatelle de plusieurs milliers d'euros [25], ce qui est totalement inabordable pour un lycée. En revanche, les élèves peuvent effectuer des recherches documentaires sur ce sujet, ce qui permettrait de plus d'enrichir leurs connaissances des protocoles au-delà du montage à reflux.

Le dioxyde de carbone peut également être utilisé comme réactif alternatif, c'est également un des points de la chimie verte. Par exemple dans la synthèse de l'urétane, monomère servant à la synthèse du polyuréthane [26]. Le dioxyde de carbone remplace avantageusement le phosgène, extrêmement toxique (figure 4).

## Conclusion

La chimie verte apporte donc à l'enseignement de la chimie une nouvelle approche, plus respectueuse de la santé et de l'environnement, permettant ainsi de limiter la contradiction entre les recommandations du ministère du travail et les impératifs des programmes. En effet, non seulement les produits les plus dangereux sont amenés à être substitués, les quantités de produit sont ajustées au minimum, mais les élèves sont sensibilisés à la gestion du risque et à des pistes concrètes dans la protection de l'environnement. Cela est important, car une interdiction pure et simple de l'utilisation des produits dangereux ne les préparerait ni à leur vie professionnelle, ni à leur vie de citoyens.

De manière plus générale, la sensibilisation des élèves au développement durable est une préconisation qui date... de la conférence des Nations Unies à Stockholm en 1972. L'école française a tardé plus que celles d'autres pays à s'intéresser à cette question, mais la loi n°2013-595 du 8 juillet 2013 a introduit l'environnement et le développement durable dans le code de l'éducation. L'enseignement de la chimie verte serait donc une bonne occasion de mettre ces questions en pratique.



## Bibliographie

- [1] Article « Chimie : produits chimiques interdits » de Micheline Izbicki  
<https://national.udppc.asso.fr/index.php/espace-labo-sp-1127088026/securite/21-espacelabo/securite/96-liste-des-produits-chimiques-interdits>
- [2] Note de service n°93-209 du 19 mai 1993 BO n°18 au 27 mai 1993
- [3] Courrier de Madame Zentilin, Inspectrice de l'Éducation Nationale, en date du 3 mars 2020
- [4] Articles D4153-17, R4411-6 et R4412-60 du code du travail
- [5] Site de l'institut national de recherche et de sécurité <http://www.inrs.fr/>
- [6] Article « Chimie verte » Lycée Heinlex <https://heinlex.paysdelaloire.e-lyco.fr/developpement-durable/chimie-verte/>
- [7] Article « Les douze principes de la chimie verte » <http://www.unesco.org/new/fr/natural-sciences/science-technology/basic-sciences/chemistry/green-chemistry-for-life/twelve-principles-of-green-chemistry/>
- [8] ZOUIOUCHE-ARIBI, LOUISA, 2012/11/07, Chimie verte, chimie durable : implications en chimie fine  
[https://www.researchgate.net/publication/310003877\\_chimie\\_verte\\_chimie\\_durable\\_implications\\_en\\_chimie\\_fine](https://www.researchgate.net/publication/310003877_chimie_verte_chimie_durable_implications_en_chimie_fine)
- [9] Article « Chimie verte » <http://www.lesmetiersdelachimie.com/Tendances/Chimie-verte>
- [10] <https://innovatheque-pub.education.gouv.fr/innovatheque/consultation-action/4317/nav-context>
- [11] Article « La chimie verte » de A.Lessentier en date du 7 janvier 2012  
<http://www2.ac-lyon.fr/etab/lycees/lyc-69/bernard/spip.php?article1675>
- [12] Idées et conseils de Madame Christine Ducamp, entretien du 14 avril 2020
- [13] Cours sur le stress oxydant par Kévin Hardonnière
- [14] Fabriquer une colle à base de lait, par exemple  
<http://www.ac-grenoble.fr/loubet.valence/userfiles/file/Disciplines/Sciences/SPC/TS/Materiaux/colles.pdf>
- [15] Synthèse d'un bioplastique, par exemple [https://www.chimie magique.fr/?page\\_id=64](https://www.chimie magique.fr/?page_id=64)
- [16] Documents de Mme Prigent, lycée Léonard de Vinci, Saint Michel sur Orge, <http://leonardvinci.e-monsite.com/medias/files/14.chauffage-reflux.pdf>
- [17] TP : synthèse d'un savon, [https://eduscol.education.fr/rnchimie/di/vm/tp\\_savon.pdf](https://eduscol.education.fr/rnchimie/di/vm/tp_savon.pdf)
- [18] La synthèse d'espèces chimiques, <https://mhautefeuillescph.weebly.com/cours1.html>
- [19] Test oxydation de l'éthanol, rapport de stage de BTS de Charlotte Petit, non publié
- [20] Cyclohexane, fiche toxicologique n°17, INRS
- [21] Cours de toxicologie humaine par Armelle Biola-Vidamment
- [22] Cours de biogéochimie par Thomas Boddart
- [23] Utilisation du CO<sub>2</sub> supercritique dans le domaine agro-alimentaire :  
[http://pedagogie.ac-limoges.fr/physique-chimie/IMG/pdf/CO2\\_Supercritique.pdf](http://pedagogie.ac-limoges.fr/physique-chimie/IMG/pdf/CO2_Supercritique.pdf)
- [24] Propriétés du dioxyde de carbone : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Dioxyde\\_de\\_carbone\\_supercritique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dioxyde_de_carbone_supercritique)
- [25] 0-5l-high-pressure-supercritical-co2-reactor : <https://french.alibaba.com>

[26] La chimie verte, publication ENS/eduscol, <http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/la-chimie-verte-1055#d0e181>