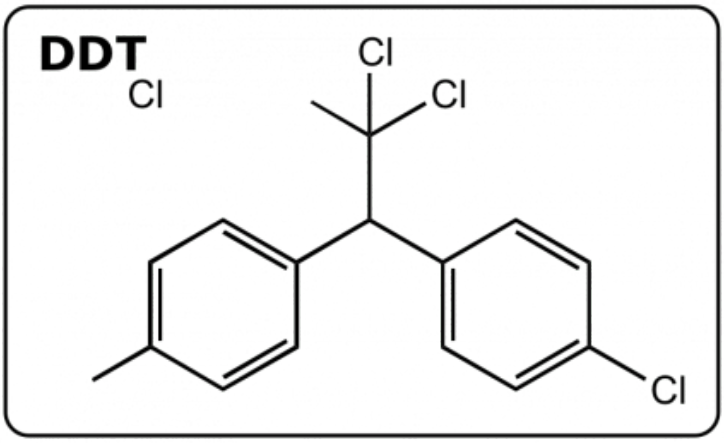
Introduction à la chimie verte

Publié le 15.06.05 | Par Hagop Demirdjian

L'industrie chimique s'est considérablement développée au cours du vingtième siècle, et plus particulièrement après la deuxième guerre mondiale. La chimie fait aujourd'hui partie de notre quotidien : l'essentiel des produits que nous consommons ou utilisons ont, au moins à une étape de leur fabrication, un lien avec l'industrie chimique.

1. Introduction

L'industrie chimique s'est considérablement développée au cours du vingtième siècle, et plus particulièrement après la deuxième guerre mondiale. La chimie fait aujourd'hui partie de notre quotidien : l'essentiel des produits que nous consommons ou utilisons ont, au moins à une étape de leur fabrication, un lien avec l'industrie chimique (voir à ce titre la fiction « Et si les chimistes arrêtaient tout ».)



Auteur(s)/Autrice(s) : Hagop Demirdjian – Licence : CC-BY-NC-ND

Cependant, l'image de la chimie auprès du public s'est progressivement dégradée au rythme de catastrophes aux conséquences humaines ou écologiques lourdes. Par exemple, on découvre en 1961 que la thalidomide, prescrite comme antinauséeux, provoque des malformations du nouveau-né lorsqu'elle est administrée aux femmes enceintes durant les premiers mois de la grossesse. Vers la même période, le DDT[1] (insecticide longtemps considéré comme une solution miracle dans la lutte contre le paludisme en raison de son efficacité dans l'éradication des moustiques vecteurs de la maladie) se révèle être un polluant organique persistant : on en retrouve dans l'environnement longtemps après l'épandage et il s'insère dans la chaîne alimentaire de l'homme ; son utilisation est aujourd'hui très réglementée, il est interdit dans de nombreux pays.

Accordeon
Titre
En savoir plus sur les polluants organiques persistants
Texte
Les Polluants Organiques Persistants (POP) sont des substances chimiques organiques présentant des propriétés physiques et chimiques telles qu'une fois rejetés dans le milieu naturel :

- ils restent stables extrêmement longtemps (plusieurs années) ;
- ils se répandent largement par le biais de processus naturels mettant en jeu le sol, l'eau et, surtout, l'air ;
- ils s'accumulent dans les tissus adipeux des organismes vivants, dont l'être humain, et atteignent des concentrations très élevées en haut de la chaîne alimentaire ;
- ils sont toxiques pour les êtres humains, la flore et la faune.



Incendie de l'usine chimique de Seveso (Italie), 1976.

De plus, les accidents industriels comme ceux de Seveso (Italie 1976), Bhopal (Inde 1984) ou plus récemment l'explosion de l'usine AZF (Toulouse 2001) ont marqué durablement les esprits. Cependant, la fréquence de ces évènements était et reste encore très faible. En revanche, tout au long de sa phase d'expansion intense, l'industrie chimique a libéré des substances de manière non-contrôlée dans les airs, les eaux ou les sols. En effet, la dilution était alors considérée comme la meilleure solution aux problèmes de pollution ! La prise de conscience relativement récente de l'étendue et des effets de cette pollution a imposé la nécessité de changer le mode de développement de l'industrie chimique.

Une réflexion sur une « réforme de la chimie » s'est engagée, réflexion qui s'insère dans le cadre de travaux de plus grande ampleur sur l'impact des activités humaines sur l'environnement :

- 1972 : Sommet des Nations Unies sur l'Homme et l'Environnement à Stockholm. Premier des sommets de ce type, il marque la prise de conscience, au niveau global, de l'impact des activités humaines sur l'environnement.
- 1987 : après une consultation internationale, la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (« commission Bruntland ») publie son rapport. « Our common future » (« Notre avenir à tous »). Il définit et popularise le concept de développement durable (« sustainable development ») :

> Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs.
>
> — Rapport de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (1987)

- 1990 : les États-Unis adoptent la loi de prévention de la pollution (« Pollution Prevention Act »). Elle marque un changement d'attitude radical : plutôt que de traiter les déchets produits, il s'agit d'opérer une réduction à la source pour prévenir la pollution. De nombreuses disciplines doivent être impliquées dans cet effort de réduction, dont la chimie.

Le concept de « chimie verte » (« green chemistry ») a été développé aux États-Unis au début des années 1990 dans le but d'offrir un cadre à la prévention de la pollution liée aux activités chimiques.

2. Définition

En 1991, l'agence américaine pour la protection de l'environnement (« U.S. Environmental Protection Agency ») lance la première initiative de recherche en chimie verte en proposant la définition suivante :

La chimie verte a pour but de concevoir et de développer des produits et des procédés chimiques permettant de réduire ou d'éliminer l'utilisation et la synthèse de substances dangereuses.

Dans cette définition, le terme « dangereuses » est pris au sens le plus large : le danger peut être physique (substance inflammable, explosive...), toxicologique (cancérigène, mutagène...) ou global (destruction de la couche d'ozone, changement climatique...)

Cette définition a été développée en douze principes par les chimistes américains Anastas et Warner, qui ont contribué à faire naître et à populariser ce concept :

1. Prévention
   Mieux vaut éviter de produire des déchets que d'avoir ensuite à les traiter ou s'en débarrasser.
2. Économie d'atomes
   Mise en œuvre de méthodes de synthèse qui incorporent dans le produit final tous les matériaux entrant dans le processus.
3. Conception de méthodes de synthèse moins dangereuses
   Dans la mesure du possible, les méthodes de synthèse doivent utiliser et produire des substances peu ou pas toxiques pour l'homme et l'environnement.
4. Conception de produits chimiques plus surs
   Mise au point de produits chimiques atteignant les propriétés recherchées tout en étant le moins toxiques possible.
5. Solvants et auxiliaires moins polluants
   Renoncer à utiliser des auxiliaires de synthèse (solvants, agents de séparation, etc.) ou choisir des auxiliaires inoffensifs lorsqu'ils sont nécessaires.
6. Recherche du rendement énergétique
   La dépense énergétique nécessaire aux réactions chimiques doit être examinée sous l'angle de son incidence sur l'environnement et l'économie, et être réduite au minimum. Dans la mesure du possible, les opérations de synthèse doivent s'effectuer dans les conditions de température et de pression ambiantes.
7. Utilisation de ressources renouvelables
   Utiliser une ressource naturelle ou une matière première renouvelable plutôt que des produits fossiles, dans la mesure où la technique et l'économie le permettent.
8. Réduction du nombre de dérivés
   Éviter, si possible, la multiplication inutile des dérivés en minimisant l'utilisation de radicaux bloquants (protecteurs/déprotecteurs ou de modification temporaire des processus physiques ou chimiques) car ils demandent un surplus d'agents réactifs et peuvent produire des déchets.
9. Catalyse
   L'utilisation d'agents catalytiques (aussi sélectifs que possible) est préférable à celle de procédés stœchiométriques.
10. Conception de produits en vue de leur dégradation
    Les produits chimiques doivent être conçus de telle sorte qu'en fin d'utilisation ils se décomposent en déchets inoffensifs biodégradables.
11. Observation en temps réel en vue de prévenir la pollution
    Les méthodes d'observation doivent être perfectionnées afin de permettre la surveillance et le contrôle en temps réel des opérations en cours et leur suivi avant toute formation de substances dangereuses.
12. Une chimie fondamentalement plus fiable
    Les substances et leur état physique entrant dans un processus chimique doivent être choisis de façon à prévenir les accidents tels qu'émanations dangereuses, explosions et incendies.

Aujourd'hui, dans de nombreux pays, sont financés des programmes de recherche qui visent à incorporer un ou plusieurs de ces 12 principes lors de la mise en oeuvre d'une synthèse ou d'un procédé chimique. Ils sont parfois développés dans le cadre d'instituts spécialement dédiés à la chimie verte dont l'objectif premier est son développement, la diffusion de ses procédés et leur incorporation en recherche fondamentale et industrielle.

3. Exemples

En une quinzaine d'années, la chimie verte a connu un développement considérable à un niveau mondial et dans la plupart des domaines de recherche. Il est impossible d'en indiquer ici toutes les applications et leur nombre ne cesse de s'accroître (il existe

une revue internationale dédiée à la chimie verte). Les exemples suivants sont choisis dans des champs de recherche différents : méthodologie de synthèse, procédés...

3.1. Une approche méthodologique : l'économie d'atomes

L'économie d'atomes est une approche qui cherche à maximiser le nombre d'atomes de réactifs transformés en produit au cours de la synthèse. Elle permet de réduire la quantité de résidus de réaction, voire de les supprimer totalement. Son cadre théorique propose un classement des réactions en fonction de l'économie d'atomes qu'elles offrent, classement qui permet d'optimiser les schémas de synthèses.

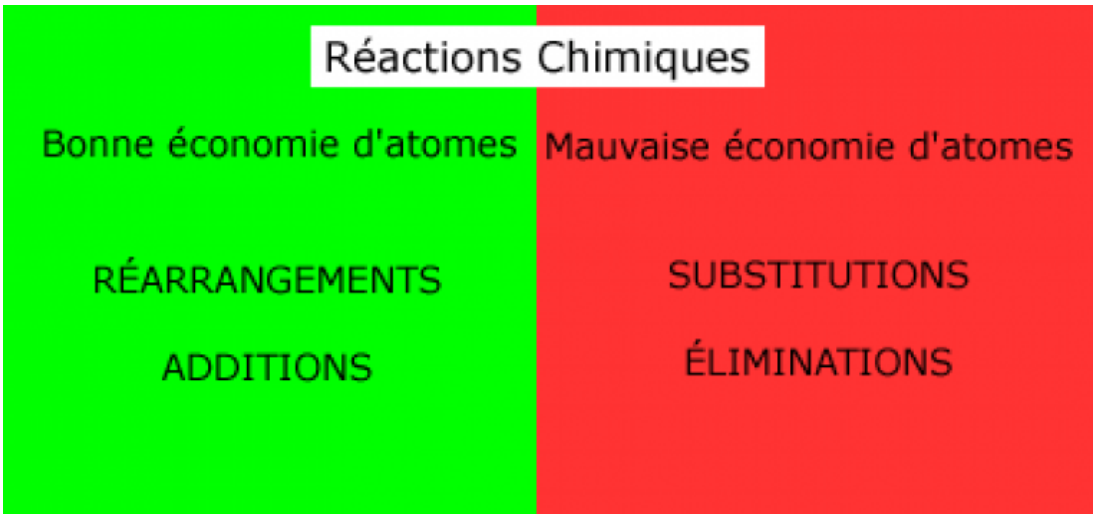


Figure 1 - Notion d'économie d'atomes

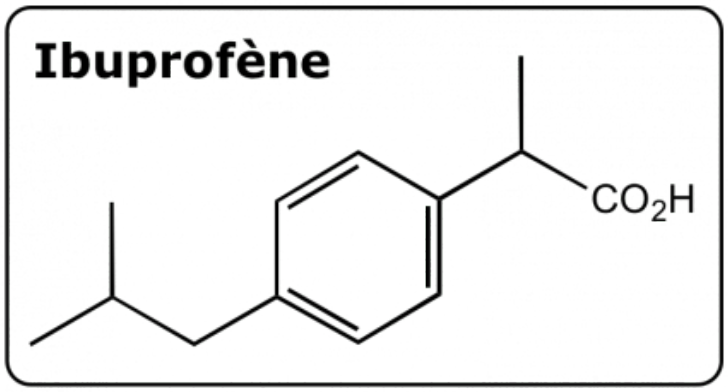
Auteur(s)/Autrice(s) : Hagop Demirdjian

- réarrangement : c'est la réorganisation des atomes constituant une molécule, tous les atomes du réactif se retrouvent dans le produit (exemples : la transposition de Beckmann).
- addition : les atomes du réactif et du substrat sont tous présents dans le produit (exemple : la réaction de Diels-Alder, la condensation aldolique).
- substitution : le substituant remplace un groupe partant. Il y a donc génération d'un produit secondaire. L'économie d'atomes est moins bonne que pour les réactions précédentes, elle dépend du choix du réactif et du substrat (exemples : les substitutions nucléophiles de type SN1 et SN2 comme la synthèse de Williamson (SN2)).
- élimination : le réactif perd des atomes au cours de la réaction. C'est la réaction la moins efficace en terme d'économie d'atomes (exemples : les éliminations de type E1 et E2).

3.2. La catalyse : un pilier de la chimie verte

La catalyse joue un rôle central dans la chimie moderne, en effet elle permet en général de

- réduire la consommation d'énergie, ce qui présente un intérêt économique et environnemental,
- diminuer les efforts de séparation puisqu'elle augmente la sélectivité des réactions,
- diminuer la quantité de réactifs utilisés.



Auteur(s)/Autrice(s) : Hagop Demirdjian – Licence : CC-BY-NC-ND

L'exemple de la synthèse de l'ibuprofène est particulièrement représentatif. Cet anti-inflammatoire, principe actif de plusieurs anti-douleurs commerciaux, est synthétisé en quantités industrielles depuis les années 1960 par le procédé Boots. Cette synthèse se déroule en six étapes et génère des quantités très importantes de déchets qu'il faut séparer et éliminer : la production annuelle de 13000 tonnes d'ibuprofène génère plus de 20000 tonnes de déchets. Au début des années 1990, la société BHC a développé et mis en exploitation industrielle un procédé catalytique en trois étapes qui génère une quantité beaucoup plus faible de produits secondaires. Ces sous-produits sont par ailleurs récupérés et valorisés, ce processus ne génère finalement pas de déchets !

3.3. Réactifs verts

Les « réactifs verts » sont des réactifs faiblement ou non toxiques pour les humains et sans conséquences sur l'environnement. De nombreux efforts sont entrepris pour substituer des réactifs verts aux réactifs toxiques dans les synthèses industrielles. La synthèse de l'isocyanate, composé de base de l'industrie des polymères, est à cet égard un exemple parlant.

Les polyuréthanes sont des polymères très répandus, utilisés dans un grand nombre d'applications commerciales. Le monomère uréthane est obtenu à partir d'isocyanate traditionnellement synthétisé par l'action du phosgène sur une amine. Or le phosgène est un gaz extrêmement toxique. La société Monsanto a développé un procédé de synthèse où le phosgène est remplacé par le dioxyde de carbone, non-toxique :

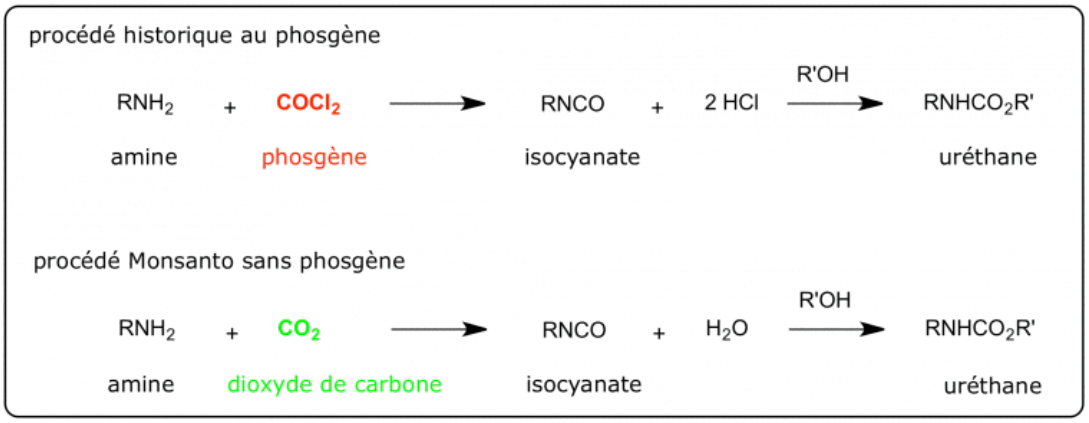


Figure 2 - Voies de synthèse de l'isocyanate

Auteur(s)/Autrice(s) : Hagop Demirdjian – Licence : CC-BY-NC-ND

3.4. Solvants et conditions de réactions verts

Beaucoup de solvants traditionnels ont un impact environnemental élevé (CFC**[2]**, Composés Organiques Volatils ...) et leur usage est aujourd'hui soumis à des restrictions importantes. Cela a entraîné le développement de procédés faisant appels à des

solvants verts, utilisés dans des conditions de réaction particulières.

- Le dioxyde de carbone CO_2, à l'état supercritique (intermédiaire entre gaz et liquide), est aujourd'hui utilisé comme substitut aux solvants organiques apolaires. Il remplace par exemple le tétrachlorométhane CCl_4, composé très toxique, dans le procédé de décaféination. CO_2 cumule de nombreux avantages : c'est un composé non-toxique, non-inflammable, renouvelable et bon marché.
- L'eau, composé vert par excellence, est également utilisée comme solvant de substitution de solvants organiques mais polaires.

4. Conclusion

La chimie verte est une approche radicalement nouvelle des problèmes posés par les activités chimiques industrielles. Jusqu'à présent, encadrés par la législation, les industriels cherchaient à minimiser l'exposition aux dangers en contrôlant les substances toxiques à tous les stades des procédés : manutention, utilisation, traitement et élimination. La chimie verte propose de traiter les problèmes à la source en développant des processus sans dangers ! Il existe bien sûr des barrières à son développement à une échelle globale : l'activité commerciale impose la rentabilité et un procédé vert ne remplacera un procédé traditionnel polluant que si son retour sur investissement est suffisamment rapide pour attirer les dirigeants et les investisseurs. Il faut pour cela compenser les coûts de démantèlement de l'ancien procédé et de mise en place du nouveau. Le principal défi de la chimie verte est sans doute maintenant de développer des procédés qui présentent également un avantage économique sur les procédés traditionnels pour être adoptés par l'industrie.

5. Bibliographie

5.1. Chimie verte

Il existe peu de ressources de référence en français. Les ouvrages en anglais suivants constituent de bonnes introductions à la chimie verte.

- Anastas, P. T. ; Warner, J. C., Green chemistry theory and practice, Oxford, Oxford university press, 1998, 135p.
- Lancaster, M., Green chemistry, an introductory text, Cambridge, Royal Society of Chemistry, 2002, 310 p.
- La revue Green Chemistry publiée par la Royal Society of Chemistry (Royaume Uni) est une revue internationale dédiée à la recherche en chimie verte.

On peut également consulter la rubrique Green Chemistry du site de l'U.S. Environmental Protection Agency, agence gouvernementale américaine de protection de l'environnement.

5.2. Développement durable

- Le site DGESCO Géoconfluences propose un dossier sur le développement durable.
- On pourra également consulter le site du Centre International de Ressources et d'Innovation pour le Développement Durable (CIRIDD).

CRÉDITS

RELECTURE SCIENTIFIQUE

Marine Pontuer-Escaffre

Professeure agrégée

AUTEUR(S)/AUTRICE(S) ET MISE EN LIGNE

Hagop Demirdjian

Docteur en chimie théorique, ancien élève de l'École Normale Supérieure Lyon, responsable éditorial du site CultureSciences-Chimie de 2004 à 2008.

LICENCE DU TEXTE DE L'ARTICLE



Creative Commons - Attribution - Pas d'utilisation commerciale - Pas de modifications

NOTES

1. Le dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT) est un insecticide très efficace contre les insectes vecteurs de maladie. Utilisé massivement dans les années 1940 dans la lutte contre le paludisme, il a permis d'éviter des millions d'infections. Cependant, ses propriétés physico-chimiques en font un polluant organique persistant : son usage est aujourd'hui très réglementé.

2. Les CFC (ou « fréons ») sont des composés chlorofluorocarbonés comme $CFCl_3$ ou CF_2Cl_2. Chimiquement inertes, ils ne sont pas nocifs pour les êtres vivants, et ont été beaucoup utilisés comme réfrigérants, solvants dans les industries électroniques, agents de propulsion dans les bombes aérosols ou les extincteurs. Soumis au rayonnement UV de la stratosphère (partie haute de l'atmosphère), ils sont transformés en composés susceptibles de détruire la couche d'ozone qui protège la terre des rayons UV. Ces composés ont été interdits en 1987.