COLLECTION **BULLES DE SCIENCES**

STÉPHANE SARRADE

Quelles sont les ressources de la chimie verte ?

EDP SCIENCES

Extrait de la publication

Quelles sont les ressources de la chimie verte ?

STÉPHANE SARRADE

Ouvrage dirigé par
FRÉDÉRIC DENHEZ

ILLUSTRATIONS DE THOMAS HAESSIG

EDP SCIENCES

17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

Extrait de la publication

Conception de la maquette et de la couverture : Zoé Production
Illustration de couverture : Thomas Haessig
Imprimé en France
ISBN : 978-2-86883-989-3

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinés à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.
© EDP Sciences, 2008

Extrait de la publication

This page intentionally left blank

Extrait de la publication

À Caroline, Hugo, Christophe et Freddy,
chimistes, fils et petit-fils de chimistes et bien au-delà…

SOMMAIRE

Introduction 7

Partie 1. AVANT LA CHIMIE VERTE... 15

Chapitre 1. Tout est chimie... 17
Comment serait un monde sans chimie ? 17
La chimie pour quoi faire ? 21

Chapitre 2. C'est quoi la chimie ? 53
Les grands domaines de la chimie : des disciplines bien définies. 53

Chapitre 3. Une évolution sans révolution est-elle possible ? 61
Les limitations de la chimie industrielle : se préoccupe-t-on assez de la toxicité ? 62
Affrontons nos angoisses et changeons pour une chimie durable .. 72

Chapitre 4. La solution chimie verte 75
Les quatre concepts de base 77
Les 12 principes de la chimie verte 80
Et après ? L'ingénierie verte ! Et ses 12 principes... 90
Alors, qui est concerné par la chimie verte ? 95

Partie 2 : AGIR GRÂCE À LA CHIMIE VERTE 97

Chapitre 5. Utiliser au mieux les matières premières 99
Membranes et procédés membranaires : des outils pour l'ingénierie verte au niveau de la molécule 99
Séparation membranaire au niveau moléculaire pour les aliments compatibles avec la chimie verte 102
Les membranes empêcheront-elles la Terre de manquer d'eau douce ? 104

Extrait de la publication

Chapitre 6. Favoriser les solvants propres 107
Les fluides supercritiques : à quoi ça sert ?..... 110
Les fluides supercritiques : pour quoi faire ? 114
Extraction par CO_2 supercritique : comment ça marche ? 116
Imprégnation par CO_2 supercritique : en sens inverse ça marche aussi ? 122

Chapitre 7. Utiliser au mieux l'énergie 127
Comment produire moins de GES et moins de polluants atmosphériques dans les transports automobiles ? 128
Les biocarburants et la chimie verte : un problème de génération... 129
Les membranes, les piles à combustible et l'énergie du futur 134
Vers une énergie propre et disponible ? 139

Chapitre 8. Produire des quantités minimales de déchets 141
Réactions et synthèses chimiques en phase supercritique 141
L'eau supercritique et le traitement ultime des déchets et des effluents organiques 143

Chapitre 9. Diminuer l'impact de nos activités sur l'environnement..... 147
Ça chauffe pour les produits réfrigérants verts !..... 147
Une mousse pour aider l'environnement... 151
De petits composants pour un petit impact : l'ère des microréacteurs 156

Chapitre 10. Annoncer la nouvelle chimie du XXIe siècle 161
Les forces motrices en route vers la chimie verte..... 162
Les limitations de la chimie verte..... 173

Conclusion 177

Lexique des termes de chimie pratique et des abréviations 183

Références des ouvrages cités 193

Extrait de la publication

INTRODUCTION

Tout le monde se rappelle ce qu'il faisait le 11 septembre 2001 lorsque les échos et les images de la catastrophe des *Twin Towers* de New York nous sont parvenus. À ce même titre, quelques jours plus tard, le 21 septembre, je me souviens exactement de ce que je faisais.

Le temps était magnifique. Je présidais un jury de thèse à l'École des Mines d'Albi-Carmaux. L'étudiant, Martial Sauceau, venait de soutenir brillamment son mémoire sur les fluides supercritiques et, comme de coutume, en cette fin de matinée le jury venait de se retirer pour délibérer.

Au milieu de la délibération, une personne envoyée par le directeur de l'école entra précipitamment dans la salle et nous communiqua trois informations alarmantes :

– une usine venait d'exploser à Toulouse et personne ne savait laquelle ;

– c'était un acte terroriste ;

– un nuage toxique était en train de se diriger vers nous.

Extrait de la publication

Le jury était composé principalement de chimistes, toulousains de surcroît. Les conjectures se mirent à pleuvoir : quelle usine venait d'exploser ? La SNPE ? ESSO ? La Grande Paroisse ? Un nuage toxique ? Du phosgène[1] ? Les parents s'inquiétèrent d'un enfant chez la nounou ou d'un collégien dans son établissement du centre-ville. Toutes les lignes de téléphone portable étaient indisponibles et les voies de circulation pour entrer dans Toulouse étaient coupées.

Spectateur impuissant de cette catastrophe, j'ai vu mes collègues et amis chimistes glisser vers une panique compréhensible, abréger le jury de thèse et prendre leur voiture pour rejoindre Toulouse coûte que coûte.

C'est dans la journée que nous apprîmes les détails de la tragédie d'AZF. Sur les trois informations données, une seule était vraie : une usine avait bel et bien explosé à Toulouse…

Au-delà de cette catastrophe industrielle, qui a fait une trentaine de victimes à ce jour, ces faits ont marqué une étape dans la prise de conscience en France des risques industriels liés à la chimie.

Après l'essor de la révolution industrielle, 44 accidents industriels de toute nature furent recensés dans le monde. Entre 1905 et 1944, 17 000 morts furent causées par ces accidents, dont un grand nombre fut lié à une nouvelle cause : les explosions d'usines. Ces usines utilisaient des produits chimiques explosibles, éventuellement dans des installations sous pression, placées dans des centres urbains ou périurbains. Ce fut le prix à payer pour une croissance industrielle dans les pays occidentaux, et malheureusement cette situation semble perdurer dans les pays émergents, notamment en Chine ou en Inde.

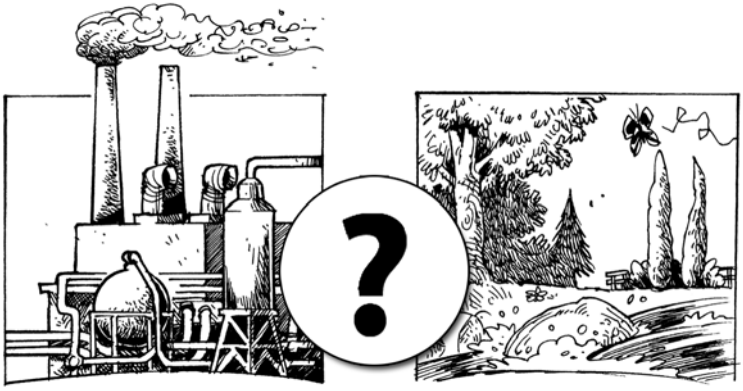
1. Le phosgène ($COCl_2$), aussi nommé dichlorure de méthanoyle, est, à température ambiante, un gaz très toxique appartenant à la classe des agents suffocants. Il fut employé comme arme la première fois par les Français durant la première guerre mondiale. Lors de la catastrophe de l'usine AZF à Toulouse, un suraccident majeur a été évité de peu, une conduite entre AZF et la Société nationale des poudres et des explosifs (SNPE) contenant du phosgène ayant résisté à l'explosion toute proche.

Extrait de la publication

Dans le dernier tiers du XXe siècle, la prise de conscience en matière de gestion des risques industriels et d'environnement s'accéléra. La chronologie des accidents de Seveso (1976), Bhopal (1984), Tchernobyl (1986) et AZF (2001) conduisit à la mise en œuvre de différentes réglementations visant à limiter les risques. À cela s'ajoutèrent bien sûr toutes les réglementations liées à la maîtrise des rejets et à la limitation de toutes les pollutions non accidentelles : contaminations solides, effluents liquides ou rejets gazeux.

Et la chimie dans tout cela ?

Il ne serait pas possible de mettre en face de ces chiffres les millions de vies sauvées par l'industrie chimique : par les médicaments de synthèse, notamment en chimiothérapie ; par les produits sanitaires et d'hygiène ; par les pesticides qui protègent les récoltes et limitent les famines… L'industrie nucléaire connaît bien ce déficit d'image, car nous associons justement au nucléaire les armes atomiques, et maintenant la catastrophe de Tchernobyl, en occultant le fait que Marie Curie (prix Nobel de physique en 1903 et de chimie en 1911) et sa fille Irène Joliot-Curie (prix Nobel de chimie 1935) ont apporté une contribution considérable au domaine de la médecine.



1 | Comment concilier l'activité industrielle chimique et son environnement ?

Extrait de la publication

La radiographie X et les traceurs radioactifs ont permis de comprendre et d'expliquer les métabolismes humains pour mieux en traiter les dysfonctionnements.

C'est un fait avéré que la Science n'est ni bonne ni mauvaise, elle est seulement ce que les Hommes en font. La chimie n'échappe pas à cette règle ; elle doit conquérir ses lettres de noblesse et réussir à démontrer que son existence nous est indispensable. Si nous regardons attentivement le monde qui nous entoure – papier, encre, peintures, plastiques, lessives, matériaux de construction, alliages métalliques ; produits pharmaceutiques, cosmétiques, alimentaires, agricoles, sanitaires ; sans oublier l'essence que nous mettrons dans notre véhicule – tout est chimie !

Depuis 1901, huit Français ont été lauréats du prix Nobel de chimie. Le dernier en date, Yves Chauvin, récompensé en 2005, est l'inventeur de la métathèse, une méthode de chimie qui permet de réduire le nombre de réactions nécessaires à l'obtention d'un produit. La métathèse est, signe des temps, un procédé de chimie « durable » puisqu'elle permet d'économiser des matières premières et de limiter la production de sous-produits.

Voilà donc une belle entrée en matière pour présenter un concept apparu au début des années 1990 : la chimie verte.

La chimie verte est un oxymore. En effet, comment concilier la chimie et les spectres de pollution et d'accidents qui l'entourent avec la couleur verte, symbole d'une planète indemne où il ferait bon vivre ? La chimie doit être capable de s'intégrer dans la notion de développement durable. Ce dernier concept, apparu en 1987, indique que la notion de durable doit coïncider avec un développement qui répond aux besoins actuels sans compromettre la capacité de nos enfants à satisfaire les leurs. Le développement recouvre ici trois dimensions : environnementale, économique et sociale.

Cette définition est idéologiquement satisfaisante et politiquement correcte mais techniquement floue. En effet, qui ne souhaite pas

léguer à ses enfants une planète qui leur permettra une vie saine ? Si l'idée est belle, la mise en pratique semble toutefois être plus problématique…

Pourtant, en 1990, l'idée d'une chimie répondant aux postulats du développement durable fait son chemin. C'est la naissance de la *Green Chemistry* (chimie verte), définie par deux chercheurs américains, Paul Anastas et John C. Warner. Ils développèrent les 12 principes de la chimie verte qui restent, à ce jour, la meilleure définition pratique de cette nouvelle chimie.

La chimie verte est souvent considérée comme une vision quasi-philosophique de la chimie, au sens classique du terme, auquel elle tend à se substituer. Ce n'est pas une sous-discipline mais plutôt un concept qui s'applique avec bonheur à la chimie organique, à la chimie inorganique, à la chimie analytique et à la biochimie. Elle est aussi totalement distincte de la chimie environnementale, qui tend à comprendre et modéliser les phénomènes qui apparaissent dans l'environnement.

Les 12 principes de la chimie verte, qui seront détaillés dans un chapitre de cet ouvrage, reposent sur les quatre concepts fondamentaux de développement de procédés industriels suivants :

– utiliser au maximum les matières premières qui, transformées, doivent se retrouver le plus largement possible dans le produit final, limitant ainsi la production de sous-produits ;

– utiliser des solvants propres, non toxiques et compatibles avec l'environnement ;

– utiliser au mieux l'énergie, en termes de rendement, d'économie, de sources et de rejets ;

– produire des quantités minimales de déchets et dans des formes adaptées (solide, liquide ou gazeuse) limitant leur dissémination potentielle et favorisant leur recyclage.

Ces quatre éléments se retrouvent dans les conclusions du Grenelle de l'environnement, initiative française de la fin de l'année 2007. À cela s'ajoute l'idée maîtresse de simplement minimiser les causes

d'accident, d'appliquer un principe de précaution à bon escient et de maximiser les rendements de toutes les opérations chimiques, pour que le développement soit durable et économiquement viable… Cette approche beaucoup plus concrète que la notion de développement durable a ainsi ouvert depuis plus de 15 ans un champ de recherche exceptionnellement vaste. Après avoir été pionniers dans ce domaine, les Américains sont maintenant rejoints par les Européens et les Japonais. L'enjeu majeur est de rallier toutes les communautés scientifiques et, par le biais de l'éducation, d'amener des pays comme la Chine et l'Inde à intégrer un peu plus la chimie verte à leurs préoccupations.

Dans cet ouvrage, après avoir donné dans une première partie un aperçu historique de la chimie et de ses perspectives d'évolution, nous reprendrons les quatre concepts fondamentaux et nous nous promènerons à travers les grands domaines de recherche liés en particulier à l'environnement, à la gestion de l'énergie et à l'utilisation des membranes et des fluides supercritiques, qui sont des solvants propres et sobres. Cela nous conduira à aborder les premières applications industrielles de la chimie verte dans divers domaines, de l'agroalimentaire aux nanotechnologies.

La chimie verte est-elle une utopie ? C'est la question à laquelle nous devrons répondre, et cela ne pourra pas se faire sans la connaissance et la prise en compte des éléments accélérateurs, des réglementations, de la pression des consommateurs et des freins et verrous souvent liés au coût des installations et des procédés.

En 2006, Gilles Rotillon, professeur de sciences économiques à Paris XII, cherchait à savoir « *qui veut vraiment du développement durable* ». La vie publique, politique et sociale ainsi que les intérêts privés ont intégré la notion de développement durable dans leur discours et dans leurs choix médiatisés, notamment en termes de recherche et d'innovation industrielle. Mais quels sont les moyens mis réellement à disposition ? Le niveau des aides publiques accordées depuis 20 ans par les pays riches pour le développement est de l'ordre

Extrait de la publication

de 0,4 % du produit intérieur brut (PIB). Les objectifs fixés par l'ONU sont plutôt de l'ordre de 0,7 %, et seuls le Danemark, la Norvège et les Pays-Bas dépassent cette valeur. Du côté européen, la Commission indique que « *très peu des objectifs fixés dans la stratégie en faveur du développement durable de l'UE en 2001 sont en passe d'être atteints* ». Pour atténuer ces propos pessimistes, il faut enfin citer Jean Pelin, directeur général de l'Union des industries chimiques (UIC), qui a indiqué en 2006 que la chimie verte devrait représenter 30 % de la production française dans dix ans, contre un peu moins de 10 % aujourd'hui.

Il est donc plus que temps de laisser la parole à la chimie verte. Allons découvrir ensemble ce que les chercheurs et les industriels nous proposent pour que la chimie continue de nous accompagner au quotidien. Réfléchissons ensemble au « génie des procédés », cette discipline qui permet de concevoir de nouvelles techniques et de nouveaux procédés afin que les prévisions de l'UIC soient vérifiées.

Enfilons une blouse et retroussons-nous les manches…

This page intentionally left blank

PARTIE 1

AVANT LA CHIMIE VERTE...

Extrait de la publication

This page intentionally left blank

Extrait de la publication

1

Tout est chimie…

Il suffit de regarder autour de nous : tout est chimie. Pour nous en rendre compte, posons-nous la question de ce que nous pourrions faire sans la chimie. Cette question, Armand Lattes, professeur émérite de chimie à l'université Paul Sabatier de Toulouse et président de la Société française de chimie (SFC), l'a posée dans un texte très court et très amusant intitulé *Et si les chimistes arrêtaient tout ?... Une page de science-fiction*.

COMMENT SERAIT UN MONDE SANS CHIMIE ?

Si tous les chimistes arrêtaient leurs activités, qui permettent de fabriquer, transformer, protéger, analyser… il y aurait de nombreuses conséquences. Néanmoins, il ne se passerait rien d'immédiat pour l'atmosphère et nous ne retrouverions pas dans nos cités polluées la pureté de l'air des cimes. Cela s'explique par le fait que les transports routiers sont responsables en grande partie des émissions gazeuses polluantes. Il faudrait attendre l'épuisement total des stocks d'hydrocarbures pour arriver au terme de ces émissions, mais il est possible

Extrait de la publication

d'imaginer que cela serait au prix de milliers de vies, la raréfaction du pétrole impliquant des tensions géopolitiques malheureusement prévisibles et meurtrières.

Concernant l'énergie, le pétrole n'étant plus raffiné, il faudrait se tourner vers le charbon et le bois. Le premier est extrait du sol, mais puisque les cokeries seraient fermées, il ne serait plus débarrassé chimiquement de certains de ses constituants soufrés qui, au contact de l'air, donnent des sous-produits tels que des acides (par exemple, l'acide sulfurique) qui attaquent les forêts. Sans la chimie, le bois, comme la majorité des produits agricoles, ne pourrait par ailleurs plus être intensivement cultivé puisqu'il n'y aurait plus de fongicides, et les parasites s'en donneraient alors à cœur joie. Dans les deux cas, l'utilisation de ces deux combustibles produirait des quantités massives de CO_2 dans l'atmosphère, mais de toute façon cela ne serait pas très important car il n'y aurait plus de chimiste pour les mesurer !

2 | Dans le monde qui nous entoure, tout est chimie…

Extrait de la publication

Sans la chimie, nous dirions en même temps adieu à l'énergie nucléaire et à l'électricité abondante, car sans contrôle possible des réactions nucléaires à l'aide de composés chimiques et sans les procédés chimiques mis en œuvre notamment pour l'enrichissement de l'uranium ou pour son retraitement, les ingénieurs seraient obligés d'arrêter les centrales nucléaires, faute de combustibles et de moyens de garantir la sûreté des centrales.

Concernant l'énergie, pour le chauffage et les transports nous sommes donc intimement liés à la chimie. Il nous resterait l'exercice de nous réchauffer en nous déplaçant à bicyclette ! Au détail près que sans chimistes il n'y aurait plus de pneus pour les véhicules, ni d'ailleurs de bitume pour fabriquer des routes. Cruel détail. Il ne resterait plus qu'à brancher notre vélo d'appartement sur une grosse dynamo pour alimenter nos appareils électroménagers. Là aussi, les matériaux plastiques nous manqueraient, surtout pour les câbles d'alimentation et les connexions.

Plus de télévisions ni de radio ou d'ordinateurs ; il nous resterait du temps pour la lecture. Pas pour très longtemps : le papier et l'encre d'imprimerie sont fabriqués par voie chimique !

Tout cela risquerait de provoquer un sacré mal de tête, et ce serait dommage, car il n'y aurait plus d'aspirine. L'acide acétylsalicylique, qui est le principe actif de l'aspirine, est synthétisé chimiquement. Aïe ! Cela fait mal… Dommage, les molécules phares de nos pharmacies, le paracétamol et l'ibuprofène, ne seraient plus disponibles. Mais il y a plus grave : la plupart des principes actifs de l'industrie pharmaceutique sont obtenus et/ou purifiés par voie chimique. Donc s'il n'est plus possible de fabriquer des anticancéreux et des médicaments contre le sida (pour la trithérapie par exemple), alors l'humanité n'est plus capable d'assurer la santé de ses contemporains et l'espérance de vie décroîtrait rapidement.

L'alimentation humaine et la production d'eau potable se trouveraient aussi sévèrement touchées. Les engrais et les pesticides n'étant plus produits, l'alimentation du bétail et la nôtre seraient

Extrait de la publication

Composition : Facompo à Lisieux

Dernières parutions de la collection

L'Hydrogène, énergie du futur ?

Thierry Alleau

Et si nous avions trouvé LA solution à nos problèmes d'énergie ? Une énergie bon marché, non polluante, aux ressources illimitées... ? C'est vers cet avenir fantastique que nous entraîne l'auteur, en prenant à bras-le-corps la complexe mais prometteuse question de l'hydrogène (du dihydrogène, en toute rigueur).

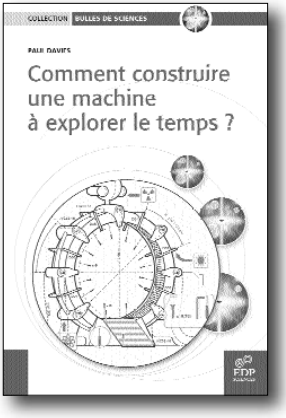
• 2007 • 978-2-86883- 990-9 • 216 p. • 16 €

Comment reconstituer la Préhistoire ?

Romain Pigeaud

La Préhistoire n'est pas la science du passé, c'est la science de l'expérience du passé. La fouille, l'analyse et l'interprétation constituent les trois niveaux de recherche du préhistorien, qui bénéficie aujourd'hui des techniques et matériels modernes des autres disciplines scientifiques. Cet ouvrage décrit le quotidien du préhistorien, son travail, ses déceptions, ses doutes. Une belle rencontre entre les mondes d'hier, d'aujourd'hui, et de demain...
Cet ouvrage a obtenu le "Prix de la Science se Livre 2008".

• 2007 • 978-2-86883-921-3 • 192 p. • 16 €



Comment construire une machine à explorer le temps ?

Paul Davies

Cet ouvrage explique les différents concepts physiques comme la théorie de la relativité, les trous noirs... qui statuent sur la faisabilité pour l'homme de se déplacer dans le temps. Un chapitre est consacré à la réalisation d'une machine à explorer le temps tandis qu'un autre aborde des questions plus existentielles. C'est un best-seller en Grande-Bretagne et aux États-Unis (plus de 50 000 exemplaires vendus).

• 2007 • 978-2-86883-941-1 • 128 p. • 13 €

Extrait de la publication