

Le paradoxe apparent de REACH : contrainte et source d'innovation pour la chimie

Isabelle Rico-Lattes est Directrice de Recherche honoraire au CNRS et conseillère au Conseil Économique Social et Environnemental (CESER) de la Région Midi-Pyrénées pour la Recherche, l'innovation et le Transfert. Durant toute sa carrière au CNRS, elle a développé des travaux de recherche allant de la recherche fondamentale à la recherche finalisée avec un intérêt tout particulier pour la Chimie au service du Développement Durable et les applications biomédicales.

1 Chimie, danger et risque

Pour éviter confusions et contresens, il est bon de préciser d'abord le sens des termes d'usage – chimie, chimique, chimiste, dangers, risques, etc. On montrera ensuite comment l'industrie chimique a pris en compte les dangers et les risques liés à l'utilisation de produits chimiques, c'est-à-dire comment elle s'est adaptée à la prise en compte de la réglementation REACH¹.

1. REACH : règlement de l'Union européenne sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques, entré en vigueur le 1^{er} juin 2007, qui rationalise et améliore l'ancien cadre réglementaire sur les produits chimiques. Voir les autres chapitres de cet ouvrage *Chimie et expertise, santé et environnement*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2016.

Le chapitre illustrera ensuite la position de la chimie : elle aide cette réglementation REACH, puis en retour celle-ci l'amène à évoluer et lui fournit une source d'innovation. En conclusion, un exemple provenant de notre laboratoire sera présenté pour illustrer ce qu'est une chimie plus respectueuse de l'environnement, une chimie durable.

1.1. Quelques définitions autour de la chimie

La **Figure 1** présente un premier paradoxe : le mot « **chimie** » désigne à la fois une science et une industrie. Parallèlement, on a le mot « **chimiste** » : être chimiste, cela veut dire être un scientifique qui fait de la chimie mais cela veut aussi dire être chimiste dans une industrie. Un mot de cette liste est toujours le plus mal perçu,

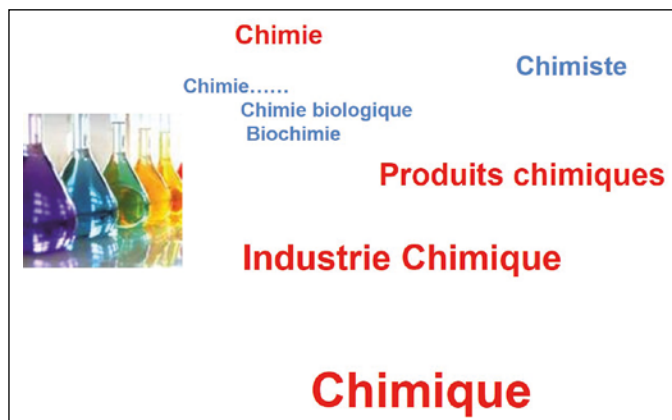


Figure 1

La notion de chimie renvoie à de nombreuses définitions et représentations, avec différentes connotations pour le grand public.

c'est le mot « **chimique** » ; on entend « *si c'est chimique ce n'est pas naturel* », alors qu'en réalité la chimie intervient partout.

Ces paradoxes sur le vocabulaire sont en fait les signes de la richesse de la chimie, qui offre un continuum entre la recherche qu'on appelle fondamentale² et la recherche finalisée, celle qui se fait pour l'industrie.

1.2. Les notions de danger et de risque

Une notion clé quand on parle de la chimie est le danger, associé au risque. Très fréquemment on mélange les deux notions, comme illustré dans l'**Encart « Danger ou**

2. Recherche fondamentale : travaux expérimentaux ou théoriques entrepris essentiellement en vue d'acquies de nouvelles connaissances sur les fondements de phénomènes ou de faits observables, sans qu'aucune application ou utilisation pratiques ne soient directement prévues.

risque ? », après le naufrage de l'Erika (**Figure 2**).

Le **danger, c'est la propriété intrinsèque d'une substance**, d'un agent ou d'une situation qui est capable de créer des effets néfastes sur un organisme vivant, sur l'environnement. La toxicologie, ou l'écotoxicologie³, mesurent ce danger.

Mais le danger, en tant que tel, n'a pas beaucoup d'importance s'il n'y a pas de risque qui l'accompagne. Ce qui compte *in fine* c'est bien le **risque, c'est-à-dire la probabilité que ces effets néfastes puissent être engendrés** par une substance, un agent, etc., dans les circonstances considérées ; plus précisément, le risque est la probabilité d'occurrence de l'effet néfaste multipliée par le danger. Interviennent donc des notions comme le temps d'exposition, la vulnérabilité en tant que telle du système, etc. (**Encart : « Définitions du danger et du risque »**). Pour l'étude d'une substance chimique, le risque peut être évalué par des études d'épidémiologie. Il ne faut donc pas confondre les deux : le danger c'est une chose, le risque c'en est une autre.

Dans un exemple « guerrier », si on prend celui des armes nucléaires, le risque a été important pendant la guerre froide ; aujourd'hui, c'est un risque faible car la probabilité de son utilisation est très faible. Si on prend maintenant la problématique du terrorisme et des armes qui sont

3. L'écotoxicologie est l'étude des conséquences écologiques de la pollution de l'environnement par les substances toxiques.

DANGER OU RISQUE ?

Après le naufrage de l'Erika, la presse française, en décembre 1999, estimait différemment les conséquences des événements :

« Un réel danger mais avec peu de risque » (Le Figaro).

« Risque réel mais sans danger ! » (La Croix).



Figure 2

Le 12 décembre 1999, l'Erika (pétrolier affrété par la société Total) a fait naufrage au large de la Bretagne, provoquant une impressionnante pollution des côtes par des nappes de mazout.

Sources : bateau Erika : www.dreuz.info.fr ; marée noire : <http://ecolonews.blog.fr>

utilisées, le danger relativement est moindre – utiliser une kalachnikov est moins dangereux qu'une arme nucléaire –, mais le risque qu'il puisse y avoir un attentat est plus fort. Il faut vraiment bien distinguer les deux notions : un produit chimique peut être dangereux mais quels sont les risques ? La chimie est une activité humaine comme une autre et elle s'intègre dans un ensemble, et **c'est l'ensemble qu'il faut prendre en compte lorsqu'on considère le risque de la chimie à partir du danger intrinsèque.**

1.3. Risques chimiques : quelques accidents majeurs

Historiquement, le risque chimique a souvent été lié

à des explosions d'usines⁴. Examinons deux exemples :

– **Seveso**, en Italie : en 1976 s'est produite une explosion suivie d'émission de dioxine, un produit dangereux. Cet accident n'a pas causé de morts, mais 193 cas de chloracné⁵ ; par ailleurs, il a été décidé d'abattre un certain nombre de bêtes qui pouvaient poser problème. L'émotion causée par cet accident a été très forte car l'usine était très proche des lieux d'habitation. En ré-

4. Voir *Chimie et expertise, sécurité des biens et des personnes*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2015.

5. Chloracné (ou acné chlorique) : trouble dermatologique rare causé par l'intoxication par des agents chlorés (dioxines) ou benzéniques.

DÉFINITIONS DU DANGER ET DU RISQUE

Danger (Hazard) : propriété intrinsèque d'une substance ou un agent (ou d'une situation) capable de créer des effets néfastes sur un organisme vivant, sur l'environnement.

Ex : La toxicologie mesure le danger d'une substance.

Risque (Risk) : la probabilité que des effets néfastes puissent être engendrés dans des circonstances particulières par une substance, un agent, sur un organisme, une population, un système écologique.

Ex : Le risque peut être évalué par les études d'épidémiologie.

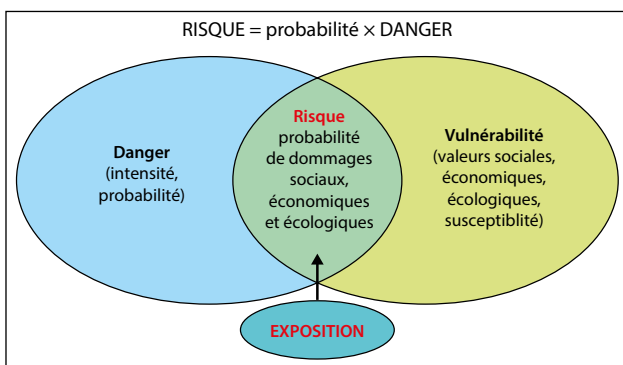


Figure 3

Le risque est l'intersection de nombreux facteurs formant un système complexe.

action, les pouvoirs publics ont promulgué la Directive Seveso⁶, une étape importante dans l'organisation de la protection des populations.

– À **Bhopal**, en Inde : en 1984 s'est produite une explosion

6. Directive Seveso (ou directive 96/82/CE) : directive européenne qui impose aux membres de l'Union européenne d'identifier les sites industriels présentant des risques d'accidents majeurs. La directive, officialisée le 1^{er} juin 1982, est nommée ainsi d'après la catastrophe de Seveso qui a incité les États européens à se doter d'une politique commune en matière de prévention des risques industriels majeurs.

très forte dans une usine chimique. Une importante émission d'isocyanate de méthyle, un produit extrêmement toxique, a eu lieu et a été cause d'un grand nombre de morts (3 500 le premier jour et de 20 000 à 25 000 au total) et de très nombreux blessés. Le responsable de l'usine était la multinationale américaine Union Carbide qui s'est vue reprocher de ne pas avoir suffisamment formé son personnel. Le produit lui-même est dangereux, mais le risque a été augmenté du fait d'erreurs au niveau de l'entreprise.

On peut aussi citer, naturellement, les accidents liés à l'industrie du nitrate d'ammonium, un produit qui entre dans la fabrication des engrais. À **Oppau**, en Allemagne, le nitrate d'ammonium était manipulé très fréquemment ; des milliers de fois, des tas de nitrates colmatés ont été soumis à l'action de la dynamite (détonateur) pour être dispersés et rendus propres à l'emploi. Et puis un jour, le 21 septembre 1921, alors qu'apparemment le mode opératoire était le même, tout a sauté – résultat : 561 morts, 2 000 blessés, une ville entièrement dévastée (Figure 4).

Le même accident s'est produit à l'usine **AZF** à **Toulouse** le 21 septembre 2001. C'est encore du nitrate d'ammonium qui a explosé. Résultat : 31 morts et 2 500 blessés.

7. AZF : usine chimique (AZote Fertilisants) située à Toulouse, dont l'activité principale était la synthèse d'ammoniac, d'urée et de nitrates à partir de gaz naturel, produits destinés à l'agriculture (engrais azotés) et à l'industrie (explosifs de mines notamment).

On ne sait toujours pas, aujourd'hui, pourquoi ce tas de nitrate a explosé. Cet accident laisse une blessure qui reste encore ouverte dans la ville de Toulouse.

1.4. La chimie peut être source de risques... mais aussi de leur solution

À côté des risques d'accidents, on a aussi affaire aux risques diffus et/ou chroniques dus par exemple à la pollution de l'atmosphère. Un exemple en est donné par le « trou d'ozone » (Figure 5), une pollution due à l'utilisation de fluorocarbones dans les aérosols. La chimie a fourni un remède à cette pollution : on a su substituer d'autres molécules aux fluorocarbones et le trou d'ozone est en train de se résorber. Là, la chimie a été source d'un problème mais en même temps en a permis de trouver une solution.

Il en a été de même pour les « pluies acides » (Figure 6), qui étaient dues à la présence de soufre dans le pétrole ou dans le charbon utilisés comme sources d'énergie. Le soufre donnait du dioxyde de soufre⁸ SO₂ et, sous l'effet de la pluie, de l'acide sulfurique. Il a suffi de purifier correctement le charbon et le pétrole pour régler le problème des pluies acides. Là encore, la chimie a pu trouver une solution.

8. Le dioxyde de soufre est un gaz incolore, dense et toxique, dont l'inhalation est fortement irritante, libéré dans l'atmosphère terrestre par les volcans et par de nombreux procédés industriels, ainsi que par la combustion de certains charbons, pétroles et gaz naturels non désulfurés.



Figure 4

A) Le cratère sur le site de synthèse d'ammoniac exploité par BASF à Oppau, en Allemagne, après l'explosion de 1921, causant 531 morts, 2 000 blessés et la dévastation de la ville.

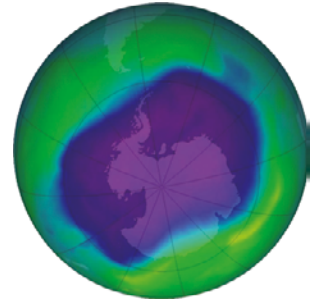


Figure 5

Les fluorocarbures des aérosols ont créé un trou dans la couche d'ozone centré sur le pôle sud.



Figure 6

Les pluies acides peuvent avoir un effet dévastateur sur les forêts.

On peut aussi citer un exemple de pollution naturelle : l'éruption du **volcan Pinatubo**, volcan actif situé dans l'ouest de l'île de Luçon aux Philippines (Figure 7). L'éruption a duré trois à quatre mois pendant l'été 1991. Le volcan a perdu 250 mètres de hauteur, a éjecté 10 km³ de particules, certaines jusqu'à 34 km d'altitude, et a refroidi l'atmosphère terrestre de 0,6 °C et



Figure 7

La puissante éruption du volcan Pinatubo de 1991 a montré que la destruction de l'ozone pouvait provenir de sources non chimiques. Volume éjecté : 10 km³, particules éjectées jusqu'à 34 km d'altitude, causant 1 000 morts et un refroidissement de l'atmosphère de 0,6 °C.



Figure 8

La pollution au mercure de Minamata (1932-1968) a provoqué des atteintes motrices et des déformations physiques importantes chez les enfants.



Figure 9

L'incendie de l'usine Sandoz de Bâle (1986) a été le point de départ d'une pollution du Rhin.

causé une destruction importante de l'ozone de l'atmosphère ; par ailleurs, il y a eu 1 000 morts par suite de cette éruption.

1.5. Le rôle de la composante humaine dans les accidents chimiques

Il n'est pas rare que des accidents de pollution, même importants, soient le résultat d'actions humaines délibérées ou de négligences.

Ce qu'on a appelé « le scandale de Minamata », au Japon, en donne un exemple. Il s'agit d'une pollution de la mer au mercure, causée entre 1932 et 1968 par une usine pétrochimique. Les poissons, nourriture principale des habitants de la région, ont été contaminés, et la population (en particulier les femmes enceintes) a été victime d'atteintes importantes, neurologiques, sensorielles ou motrices ; résultat : 13 000 victimes, 900 morts. La photo de la **Figure 8** où l'on voit une femme qui baigne son fils avec beaucoup d'amour a fait le tour du monde. Ce qui est terrible c'est que les médecins du travail qui travaillaient dans l'entreprise savaient et n'ont rien dit pour que le directeur ne perde pas son honneur...

Le deuxième cas que nous citerons est celui de **Sandoz**, qui a connu un incendie en 1986 à Bâle, en Suisse (**Figure 9**). L'eau des pompiers a entraîné des polluants dans le Rhin ; toutes les anguilles sont mortes. À cette occasion, de nombreuses entreprises riveraines se sont débarrassées de leurs polluants personnels

dans la rivière, pensant que ces rejets seraient masqués par l'accident principal...

1.6. Les substances chimiques dangereuses

Des listes de nombreuses substances chimiques dangereuses ont été établies. En voici une (très) courte sélection (**Encart : « Des substances chimiques connues pour leur danger »**).

Le **Distilbène®**, utilisé au départ pour le traitement péri-ménopause, a ensuite été utilisé pour des troubles gynécologiques. Son usage a entraîné des conséquences extrêmement graves en termes de cancers, non seulement chez les femmes, mais même pour leur descendance éventuelle. Cette molécule a posé d'énormes problèmes et n'est plus utilisée aujourd'hui.

Le **Médiator®**, que malheureusement tout le monde connaît aujourd'hui, a été utilisé pendant longtemps pour le traitement du diabète, utilisation pour laquelle il donnait parfaitement satisfaction. Il a ensuite été dévoyé comme coupe-faim, nouvel usage dans lequel on a vu apparaître des cas d'hypertension pulmonaire extrêmement graves. Là encore, c'est le caractère humain qui est à incriminer : on a voulu utiliser ce produit là où on ne devait pas l'utiliser...

Le **bisphénol A**⁹, qui est encore en discussion, est consi-

9. Le bisphénol A entre dans la composition de polymères utilisés dans de nombreux plastiques alimentaires.

DES SUBSTANCES CHIMIQUES CONNUES POUR LEUR DANGER

- Distilbène® (traitement de la ménopause) : cancérigène
- Médiator® (traitement du diabète, utilisé comme coupe-faim !) : provoque de l'hypertension pulmonaire
- Bisphénol A (utilisé pour fabriquer des plastiques et résines) : perturbateur endocrinien
- Parabènes (utilisés longtemps comme conservateurs en cosmétique et dans l'industrie pharmaceutique) : certains peuvent être des perturbateurs endocriniens
- Phtalates (utilisés comme additifs pour rendre les plastiques plus souples) : perturbateurs endocriniens pour les plus hydrophobes

déré comme un perturbateur endocrinien¹⁰.

Les **parabènes**, qui ont longtemps été utilisés comme conservateurs dans les cosmétiques et dans l'industrie pharmaceutique, sont soupçonnés d'être des perturbateurs endocriniens. On voit maintenant apparaître la mention « sans parabènes » sur certains produits.

Les **phtalates**¹¹ sont avérés comme étant des perturbateurs endocriniens. Les perturbateurs endocriniens sont une classe de molécules fort importante, étudiée en France depuis 2005 dans le cadre du Programme national de

recherche sur les perturbateurs endocriniens (PNRPE) sous la tutelle du ministère de l'Écologie. Incidemment, cela illustre le temps qui est nécessaire aux programmes de recherches.

2 Chimie et réglementations : contrainte... et innovation

2.1. La Charte « Responsible care » (1985)

L'industrie chimique s'est développée, avec de nombreuses nouvelles productions, essentiellement au XX^e siècle et pendant une partie du XIX^e; la responsabilité des industriels dans les éventuels dommages de ces substances est importante. Leur activité était, depuis 1985, encadrée par la charte « **Responsible Care** » mise en place initialement par la Fédération Canadienne (**Encart : « Responsible Care »**); le logo aux deux mains protectrices est éloquent (**Figure 10**).

En 1990, la France est associée à cette politique d'enga-

10. Perturbateur endocrinien : molécule qui mime, bloque ou modifie l'action d'une hormone et perturbe le fonctionnement normal d'un organisme.

11. Phtalates : composés chimiques dérivées de l'acide phtalique, couramment utilisés comme plastifiants des matières plastiques, notamment du polychlorure de vinyle (PVC), et incorporés comme fixateurs dans de nombreux produits cosmétiques : vernis à ongles, laques pour cheveux, parfums...

RESPONSIBLE CARE (1985)

En 1985, la Fédération Canadienne de l'Industrie Chimique a lancé l'opération « Responsible Care » (R.C.) demandant aux industries chimiques :

- d'améliorer leurs performances dans les domaines de la santé, de la sécurité et de l'environnement ;
- de respecter une transparence totale sur leurs activités et résultats dans ces domaines ;
- de coopérer avec toutes les parties prenantes, gouvernements, pouvoirs locaux, associations.

En 1990, la France s'est associée à cette demande, en français : Engagement de Progrès, retenue par 52 pays dans le monde.

Le 5 février 2006 à Dubaï : charte mondiale du R.C., adoptée par l'Union des industries chimiques (UIC) en France le 16 novembre 2006 : promesse de s'engager à avancer dans la voie du développement durable, poursuivre l'amélioration des performances dans les domaines de l'environnement, de la santé et de la sécurité, soutenir et faciliter l'extension du R.C le long de la chaîne de valeur, répondre aux attentes et interrogations des parties prenantes.



Figure 10

Responsible Care : une prise de conscience et de responsabilité des industriels concernant les risques de l'industrie chimique.

gement de progrès retenue par 52 pays dans le monde, avec une charte en 2006. Remplacée à partir de 2007 par REACH dans les pays européens, « Responsible Care » est toujours en vigueur dans de nombreux pays.

2.2. Mise en place de REACH et objectifs

Le règlement **REACH** est entré en vigueur en 2007 en Europe (**Encart : « Le règlement REACH »**). Que signifie REACH ?

R, pour **Registration**, c'est l'enregistrement obligatoire des substances ;

E, c'est l'**Évaluation** des dossiers par l'agence européenne, l'Agence Européenne d'Hel-sinki (ECHA), en Finlande.

A, c'est l'obtention de l'**Auto-ri-sation** pour l'utilisation des substances **CHimiques**, et l'incitation à le faire en restreignant les volumes utilisés – puisque cela diminue les risques potentiels.

Au départ, 30 000 substances devaient être examinées dont

LE RÈGLEMENT REACH (2007) (Figure 11) REGISTRATION, EVALUATION AND AUTHORIZATION (AND RESTRICTION) OF CHEMICALS

R : Enregistrement obligatoire par les fabricants et les importateurs de substances à plus d'une tonne par an, avec transmission d'un dossier à l'ECHA. Fabricants et importateurs sont responsables de la fourniture des données et de l'évaluation des risques ;

E : Évaluation des dossiers par l'Agence Européenne ;

ACH : Autorisation pour l'utilisation des substances chimiques dites extrêmement préoccupantes ;

30 000 substances potentiellement dangereuses doivent ainsi être examinées (100 000 substances sont utilisées en Europe).

Les substances les plus dangereuses, cancérrogènes, mutagènes ou reprotoxiques (dites CMR, réparties en catégories 1, 2) doivent désormais être soumises à autorisation.



Figure 11

Le pré-enregistrement REACH des substances chimiques a eu lieu avant le 30 novembre 2008.

les plus dangereuses citées et répertoriées, qu'on appelle les **CMR**¹² (**cancérogène, mutagène ou reprotoxique**). Une mise en place des procédures doit s'échelonner entre 2007 et 2018.

Il y a lieu de souligner les quatre objectifs les plus importants de cette réglementation (**Encart : « Objectifs de REACH »**) : 1) la maîtrise des risques chimiques, 2) mieux protéger la santé humaine et l'environnement, 3) favoriser la libre circulation des substances au sein du marché

12. Composés cancérrogènes, mutagènes, reprotoxiques (CMR) : « mutagènes » désigne les composés capables de provoquer une mutation au sein d'un individu ; « cancérrogènes » désigne les composés pouvant entraîner la survenue d'un cancer suite à un mode d'action génotoxique ou non ; « reprotoxiques » sont ceux qui affectent les capacités reproductrices, en réduisant la fertilité ou en entraînant des anomalies du développement prénatal.

européen, tous les membres étant assujettis à la même règle et 4) renforcer la compétitivité et l'innovation européenne : **REACH ce n'est pas seulement une contrainte, c'est aussi une source d'innovation.**

2.3. REACH et les substances dangereuses

Le règlement REACH comporte une annexe (l'annexe XIV) très importante qui liste les substances soumises à autorisation. Il s'agit des substances les plus préoccupantes, pour lesquelles il est souhaité que l'on définisse des produits de substitution ou, lorsque ce n'est pas possible, que l'on impose des restrictions à leur emploi.

En février 2012, il devait y avoir 14 molécules sur cette liste – probablement davantage maintenant (**Encart : « Les substances soumises à autorisation »**).

OBJECTIFS DE REACH (2007-2018)

- 1 - Maîtrise des risques chimiques
- 2 - Mieux protéger la santé humaine et l'environnement
- 3 - Favoriser la libre circulation des substances au sein du marché européen
- 4 - Renforcer la compétitivité et l'innovation européenne



Figure 12

REACH, un vaste chantier !

SUBSTANCES SOUMISES À AUTORISATION (Annexe XIV de REACH)

REACH prévoit que les risques résultant de substances extrêmement préoccupantes soient valablement maîtrisés et que ces substances soient progressivement remplacées par d'autres ou par des technologies appropriées.

En conséquence, l'ensemble des fabricants, importateurs et utilisateurs aval qui demandent une autorisation, doivent analyser la disponibilité de solutions de remplacement et examiner les risques qu'elles comportent, ainsi que leur faisabilité technique et économique. Ces substances, au nombre de 14 au 18 février 2012, composent l'Annexe XIV (<http://echa.europa.eu/fr/addressing-chemicals-of-concern/authorisation/recommendation-for-inclusion-in-the-authorisation-list/authorisation-list>)

SUBSTANCES SVHC (SUBSTANCE VERY HIGHLY CONCERNED)

Les substances officiellement identifiées comme préoccupantes du fait de leur impact sur l'environnement et/ou sur la santé humaine en raison de leurs propriétés intrinsèques sont qualifiées de « SVHC » dans REACH, et regroupées dans une liste qui en compte 138 au 19 décembre 2012*.

Figurer dans cette liste entraîne des obligations réglementaires tant pour les importateurs et les producteurs d'articles que pour les distributeurs de substances et préparations : notification auprès de l'ECHA lorsqu'elles sont présentes dans les articles et transmission d'informations le long de la chaîne d'approvisionnement pour les substances et préparations.



Figure 13

Les substances extrêmement préoccupantes doivent désormais figurer sur une listes officielle.

*Voir <http://echa.europa.eu/fr/candidate-list-table>

Sur le **Tableau**, on retrouve des familles de perturbateurs endocriniens, les phtalates, des chromates, l'arsenic, qui peuvent être cancérigènes. Ensuite, on pourrait discuter parce que les chromates sont effectivement interdits en Europe mais on en trouve sur des chromages réalisés en Chine et réimportés...

Une autre catégorie est constituée par les substances qu'on appelle « *Very Highly Concerned* » (VHC), ou substances extrêmement préoccupantes (**Encart : « Substances SVHC »**). Ce sont des substances potentiellement dangereuses, préoccupantes. En décembre 2012, on en répertorie 138, mais le chiffre a pu évoluer. Les listes de ces substances sont relativement restreintes volontairement, de façon à ce qu'on puisse vraiment identifier les produits qui sont les plus critiques pour lesquels il faut vraiment trouver des solutions et les substituer quand c'est possible.

2.4. REACH : le bilan actuel

La mise en œuvre de REACH se révèle plus complexe qu'initialement envisagé : l'hypothèse initiale était qu'il concernerait 27 000 sociétés, 180 000 préinscriptions et déciderait sur 30 000 produits. Le bilan actuel, ce sont 65 000 sociétés, 2 700 000 préinscriptions et 143 000 produits ! Conséquence : les coûts liés à ce programme pour la prochaine décennie, prévus initialement entre 1,6 et 2 milliards d'euros, seraient en fait de 9 milliards. Cette contrainte financière obligera à se

Tableau

Les substances figurant sur l'annexe XIV de REACH en février 2012. Elles ont des caractéristiques et des utilisations variées mais sont toutes soumises à autorisation.

Nom du produit	Numéro EC	Numéro CAS	Date d'échéance	Dernière date d'utilisation	Catégories d'utilisations exemptées
Hexabromocyclo-dodécane (HBCDD), alpha-hexabromocyclododécane, bêta-hexabromocyclododécane, gamma-hexabromocyclododécane	221-695-9, 247-148-4	3194-55-6, 25637-99-4, 134237-50-6, 134237-51-7, 134237-52-8	21/08/2015	21/02/2014	
2,4-Dinitrotoluène (2,4-DNT)	204-450-0	121-14-2	21/08/2015	21/02/2014	
Tris(2-chloroéthyl) phosphate (TCEP)	204-118-5	115-96-8	21/08/2015	21/02/2014	
Diarsenic pentaoxyde	215-116-9	1303-28-2	21/05/2015	21/02/2014	
Diarsenic trioxyde	215-481-4	1327-53-3	21/05/2015	21/11/2013	
Sulfochromate de plomb jaune (C.I. Pigment Yellow 34)	215-693-7	1344-37-2	21/05/2015	21/11/2013	
Chromate de plomb	231-846-0	7758-97-6	21/05/2015	21/11/2013	
Rouge de chromate, de molybdate et de sulfate de plomb (C.I. Pigment Red 104)	235-759-9	12656-85-8	21/05/2015	21/11/2013	
Benzyl butyl phthalate	201-622-7	85-68-7	21/02/2015	21/08/2013	Utilisations dans le conditionnement primaire des médicaments couverts en vertu du règlement (EC) N° 726/2004, Directive 2001/82/EC, et/ou Directive 2001/83/EC
Bis(2-éthylhexyl) phthalate (DEHP)	204-211-0	117-81-7	21/02/2015	21/08/2013	
Dibutyl phthalate (DBP)	201-557-4	84-74-2	21/02/2015	21/08/2013	
Disobutyl phthalate (DIBP)	201-553-2	84-69-5	21/02/2015	21/08/2013	
5-tert-butyl-2,4,6-trinitro-m-xylène (Musk xylène)	201-329-4	81-15-2	21/08/2015	21/02/2013	
4,4'-Diaminodiphénylméthane (MDA)	202-974-4	101-77-9	21/08/2015	21/02/2013	



Figure 14

La chimie : une science aux multiples facettes, dont l'innovation est continue.

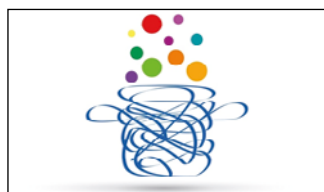


Figure 15

REACH : un tremplin inattendu pour l'innovation en chimie.

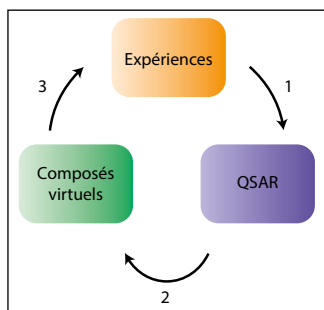


Figure 16

Les démarches QSPR et QSAR permettent de trouver de nouvelles molécules par simulation sur ordinateur.

contenter d'une expérimentation minimale et par exemple de limiter le recours aux expérimentations animales.

2.5. De la contrainte à l'innovation : la chimie au service de REACH...

La réglementation REACH réclame de nombreuses expériences et caractérisations qui font appel à la chimie ; une conséquence en est d'ailleurs que la chimie sera largement sollicitée pour des objectifs innovants (substances de substitution, nouvelles méthodes de caractérisation,...) (Figure 14 et 15). Elle est évidemment sollicitée dans REACH pour tout ce qui concerne les analyses ; la chimie analytique est à la base de la constitution des dossiers, en renseignant les propriétés des différents sous-produits, etc. L'accroissement de ses performances (sensibilité des dosages, nouvelles méthodes...) est vivement recherché.

La chimie est également sollicitée dans la démarche de substitution de nouvelles substances à celles qui ont été déclarées dangereuses. Plus précisément, l'accent des recherches en chimie est mis sur les propriétés des substances interdites ou limitées par REACH : on veut davantage restaurer la fonction remplie par la substance interdite que retrouver une molécule directement équivalente. Si l'on interdit les phtalates, par exemple, qui déterminent les qualités des plastiques, on recherchera d'autres conditions pour assurer ces mêmes propriétés.

La chimie est encore sollicitée dans de nombreuses autres études, comme la toxicologie ou l'écotoxicologie – domaines éminemment interdisciplinaires. À titre d'exemple, on peut citer les applications de la chimie théorique aux études que l'on désigne sous le nom de « *quantitative structure-property or activity relationships* » (QSPR ou QSAR¹³), dont le but est de corréler de manière quantitative les structures des produits avec leurs propriétés ou leur activité (pour les applications pharmaceutiques). À partir de ces études de corrélation, on peut établir des banques de produits virtuels (Figure 16) et définir des produits à tester concrètement. Cette application de la chimie théorique est susceptible de diminuer le recours à l'expérimentation animale comme il est souvent demandé de le faire.

La démarche REACH a potentiellement un profond effet sur la conception des produits chimiques ; elle renforce les objectifs de l'écoconception où l'on développe l'**analyse du cycle de vie**, pour anticiper comment un nouveau produit se comportera dans l'environnement et comment il pourra éventuellement être recyclé. Cette démarche est puissamment porteuse d'innovations. Elle est par exemple associée aux synthèses et procédés qualifiés de « verts » (Figure 17).

13. Voir *Chimie et expertise, sécurité des biens et des personnes*, chapitre de P. Toulhoat, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2015.

Il est intéressant d'insister sur la double face de REACH, que l'on voit à travers les questions qui se posent à la chimie (**Encart : « La chimie pour REACH »**). D'un côté se trouve la contrainte – puisque les expertises vont avoir pour résultat d'interdire ou de limiter l'emploi de certaines substances.

Mais d'un autre côté, en stimulant la recherche de nouveaux produits pour pallier ces interdictions, REACH stimule l'innovation. Cette démarche, comme on l'a vu, a donné naissance à de nouveaux concepts, comme celui de la chimie verte. La chimie verte fait largement appel à l'approche systémique : on envisage globalement le choix des matières premières, l'écoconception des produits, la durabilité de leurs propriétés, etc. (**Figure 18**) Il s'agit là d'évolutions riches et passionnantes de la chimie qui sont très prometteuses d'innovations (**Figure 19**).



Figure 18

REACH contraint les entreprises à modifier leurs procédés industriels.

Source : CNRS Photothèque – Médard Laurence

Figure 17

Les molécules de substitution potentiellement vertes et possédant des propriétés équivalentes participent à l'émergence d'une « chimie verte » (« green chemistry »).

LA CHIMIE POUR REACH

On doit distinguer :

1) Ce qui pose des problèmes à l'industrie à court terme (jusqu'en 2018) et donc appelle des réponses rapides :

- la substitution des substances à risques pour la santé et l'environnement ;
- l'impact sur l'industrie des matériaux organiques, sur l'industrie des formulations, sur les industries des secteurs aval.

2) Ce qui entre dans la mise en place de nouveaux concepts :

Approche systémique : réflexions sur les choix de matières premières ; écoconception ; modélisation des propriétés ; choix des réactions et des procédés avec, à toutes les étapes, analyses de risques et analyses toxicologiques et écotoxicologiques...



Figure 19

L'application de la réglementation REACH renouvelle l'innovation en chimie par un changement de paradigme pour aller vers l'éco-innovation dans une démarche de Développement Durable simultanément issue aussi des constats sur : le réchauffement climatique et l'état des ressources fossiles.



Figure 20

Le développement durable vise à la préservation et au respect de l'environnement.

3 Chimie, REACH et développement durable

3.1. Définition et réflexions sur le développement durable

Le **développement durable** (Figure 20) (définition de 1987) est « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Il s'agit en quelque sorte d'une démocratie participative avec des gens qui n'existent pas encore ; on parle finalement au nom des générations futures, un exercice un peu particulier (Encart : « Définition du Développement Durable »).

Le concept de « développement durable » remonte aux débuts de l'écologie (Figure 21), que l'on peut situer aux années 1960. Le livre de

Rachel Carson *Le printemps silencieux*, paru en 1962, était provocateur à l'époque, car il disait que continuer à utiliser le DTT (dithiothréitol) revenait à faire disparaître les oiseaux : c'est évidemment exagéré mais cela a conduit les gens à prendre conscience qu'effectivement notre milieu, notre environnement, était un bien précieux qui appartenait à tous et qu'il fallait vraiment le maintenir en place. La Figure 22 montre la première page de ce livre historique.

Le concept a évolué et aujourd'hui, « développement durable » n'est pas uniquement le **respect de l'environnement** ; c'est cela mais avec le **développement économique** et avec l'**acceptation sociale**. Ce mariage des trois composantes était alors tout à fait nouveau ; il est aujourd'hui tout à fait naturel, sinon parfaitement pris en compte.



Figure 21

Une prise de conscience des problèmes d'environnement est nécessaire à la préservation de la planète.

DÉFINITION DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

« Un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs »

1987 – Mme Gro Harlem Bruntland,
Premier Ministre Norvégien
Commission mondiale pour l'environnement
et le développement
Rapport « Notre avenir à tous »

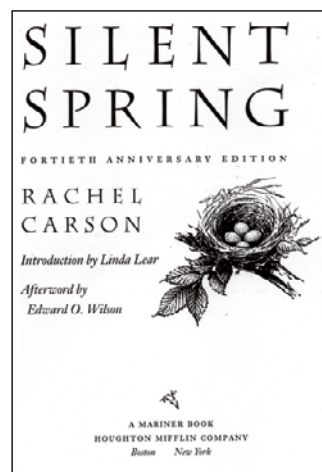


Figure 22

Silent Spring de Rachel Carson : un livre provocateur, invitant ses lecteurs à prendre conscience de la nécessité de préserver notre environnement.



Figure 23

A) Affiche de François Mitterrand pour les élections de 1965 : une autre époque et une vision radicalement différente du développement économique ; B) affiche électorale de François Mitterrand en 1981, qui reflète l'évolution de l'opinion publique sur la question du développement.

La **Figure 23A** reproduit l'affiche électorale de François Mitterrand en 1965. Qui pourrait imaginer aujourd'hui qu'on puisse mettre une affiche électorale de ce type, avec un pylône haute tension et des cheminées qui fument ? C'était l'époque du développement à tous crins. La **Figure 23B**, qui date de 1981 et lui a permis de gagner, n'avait plus le même caractère : on retrouvait la petite église, c'était très sympathique. La société avait déjà bien évolué dans le sens du développement durable.

3.2. Qu'est-ce que la « chimie verte » ?

La prise en compte des impératifs du développement durable a conduit à une sélection des produits et des procédés qu'on a appelé la « **Chimie pour le développement durable** », aujourd'hui plus volontiers désignée par la « **chimie verte** ». Cette expression désigne donc une chimie respectueuse de l'environnement (en anglais on parle de « *green chemistry* »).

Un avertissement n'est pas ici hors de propos car l'expression « chimie verte » a gardé chez certains son ancien sens de « chimie des agroressources » ; il faut éviter de faire la confusion entre les deux sens.

Le concept de chimie verte a été développé par Paul Anastas en 1991 (**Encart : « Green Chemistry »**) aux États-Unis. Un nouvel avertissement est ici nécessaire. Ne pas confondre la chimie verte avec la « chimie pour l'environnement », qui, elle, s'occupe de questions comme l'évolution et les effets des substances polluantes dans l'environnement.

GREEN CHEMISTRY - SUSTAINABLE CHEMISTRY CHIMIE VERTE - CHIMIE POUR LE DEVELOPPEMENT DURABLE

Paul T. Anastas (1991)

Concept qui soutient la conception des produits et des procédés qui réduisent ou éliminent l'usage et la formation de substances dangereuses. Ses objectifs sont :

- Réduire et prévenir la pollution à sa source
- Minimiser les risques et optimiser l'efficacité des choix chimiques

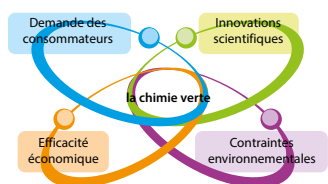


Figure 24

La chimie verte est au centre de quatre grandes problématiques.

La chimie verte est au centre de quatre grandes problématiques (**Figure 24**) : les contraintes environnementales, l'efficacité économique, les innovations scientifiques et la demande des consommateurs.

L'**Encart « Les douze principes de la chimie verte »** résume le guide proposé aux actions scientifiques et industrielles concernées. Ils datent de 1998 et portent toujours la marque d'Anastas. Ils visent à assurer la prévention (n'utiliser une substance que si elle est utile) et l'économie d'atomes, utiliser des synthèses moins dangereuses, utiliser des produits ou ressources renouvelables, etc., faire appel à la catalyse, qui est efficace dans ce contexte. Ces principes sont importants mais contraignants.

Au lieu de « chimie verte », on voit parfois la « chimie

repeinte en vert » l'où se contente de remplacer un produit dangereux par un autre peut-être moins dangereux. En fait, la chimie verte doit être entendue au niveau global quand on met en place de nouvelles méthodes de synthèse, de nouveaux produits, etc., un vrai changement de paradigme.

3.3. Des initiatives pour le développement durable

Quelques initiatives ont marqué ce positionnement « chimie et développement durable » en France : le rapport prospectif 2003 du ministère de la Recherche met en place une réflexion stratégique au niveau gouvernemental, avec le programme pluriannuel de la FFC (Fédération Française des sciences pour la Chimie) en 2005, et la création du prix Potier (**Figure 25**). Un programme interdisciplinaire du CNRS est établi de 2006 à 2012, donnant lieu à un appel d'offres mis en place parallèlement par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche).

Quelques apports techniques de la chimie verte :

- plusieurs synthèses ont maintenant été revues dans l'industrie, elles ont été rénovées et sont « devenues vertes » ; beaucoup de travaux sont développés dans l'industrie pour remplacer les solvants et conditions réactionnelles par des produits solubles dans l'eau, le CO₂ supercritique, etc. (**Figure 26**) ;
- une utilisation de plus en plus importante de la biomasse : ressources et biotechnologies. Cela a été un effort de

LES DOUZE PRINCIPES DE LA CHIMIE VERTE

(P. Anastas, 1998)

1. Prévention
2. Économie d'atomes
3. Conception de synthèses moins dangereuses
4. Conception de produits chimiques moins toxiques
5. Alternatives aux solvants polluants et aux auxiliaires de synthèse
6. Limitation des dépenses énergétiques
7. Utilisation de ressources renouvelables
8. Réduction du nombre de dérivés
9. Utilisation des procédés catalytiques
10. Conception des produits en vue de leur dégradation finale
11. Méthodologies d'analyses en temps réel pour prévenir la pollution
12. Chimie fondamentalement plus sûre pour prévenir les accidents.

pluridisciplinarité. On ne peut avoir les biotechnologies d'un côté et la chimie de l'autre : ce qui fait avancer tout cela, c'est le mélange des disciplines ;

– par ailleurs, la recherche académique s'est emparée de toutes ces questions et a entrepris de développer des choses nouvelles.

4 La chimie pour le développement durable

4.1. SMODD, un laboratoire pour le développement durable

À titre d'illustration voici le récit d'une aventure conduite par notre équipe « **Systèmes moléculaires organisés et développement durable** » (Figure 27).

4.2. Des molécules tensioactives

Les systèmes moléculaires organisés utilisent des molé-



Figure 25

La création du prix Pierre Potier est un signe de l'évolution de la société française sur la question du développement durable.

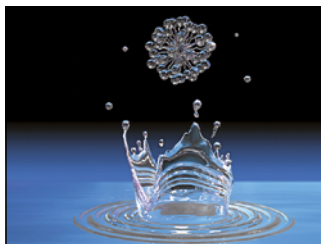


Figure 26

Une idée pour remplacer les solvants potentiellement dangereux est d'aller vers des produits solubles dans l'eau.

cules dites « tensioactives » ; ces molécules comportent une partie hydrophobe (chaîne hydrocarbonée) et une tête polaire hydrophile (soluble dans l'eau) (Figure 28).

Avec les tensioactifs, on peut fabriquer une quantité d'objets divers et variés (Figure 29), par exemple dans le domaine des matériaux (actuellement

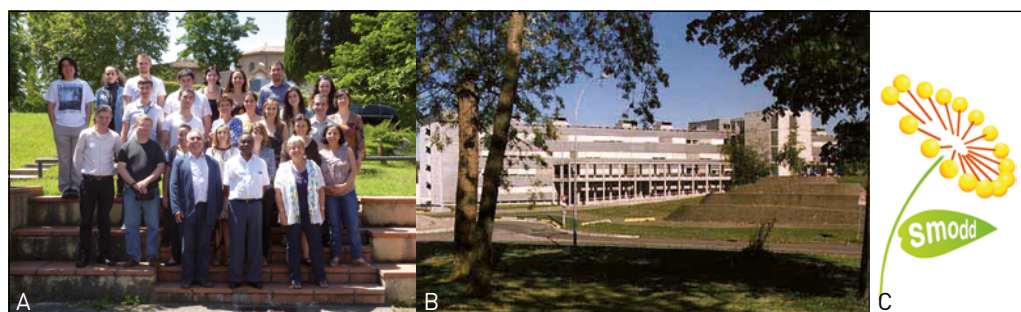


Figure 27

A) L'équipe « Systèmes Moléculaires Organisés Et Développement Durable » (SMODD) a travaillé sur les possibilités ouvertes par les molécules tensioactives ; B) le laboratoire de SMODD est situé à l'Université de Toulouse [C : le logo du SMODD permet de lier l'idée de développement durable (avec la fleur) à une représentation schématique des molécules tensioactives qui y contribuent (les pétales)].

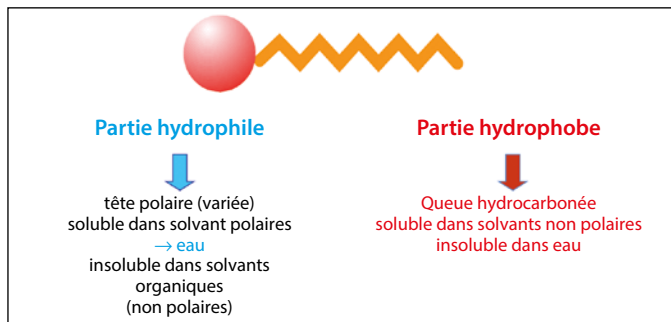


Figure 28

Les molécules tensioactives peuvent être représentées schématiquement par une tête hydrophile et une chaîne hydrophobe.

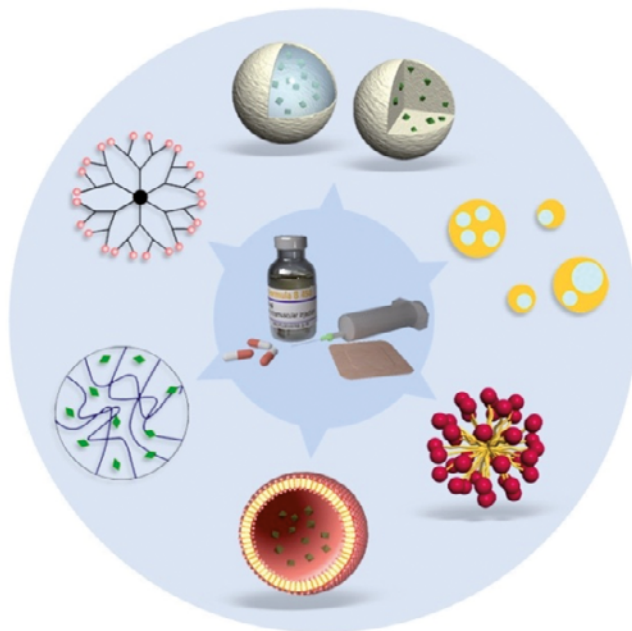


Figure 29

Les molécules tensioactives ouvrent un large champ de possibilités. Les tensioactifs peuvent par exemple permettre la mise au point d'émulsions à application dermo-cosmétique.

Figure 30

La formulation d'un produit cosmétique ou d'un médicament dépend du mode d'administration désiré : comprimés, gélules, crèmes, etc.



avec l'aéronautique pour faire des matériaux verts) et dans le domaine du médicament et de la formulation dermo-cosmétique (voir plus loin).

4.3. Un nouveau concept : les formulations bioactives

La **Figure 30** résume le concept de « formulation bioactive ». Dans un médicament ou un cosmétique, on a d'un côté le principe actif – la molécule qui produit l'effet recherché – et de l'autre son conditionnement. Ce dernier est important pour adapter le principe actif à l'utilisation du produit (crème à appliquer, gouttes à instiller, comprimé à avaler...) ; sa définition et sa mise en forme constituent une opération de formulation.

Dès le départ, dans les travaux décrits ici, on a imaginé de créer des molécules qui soient elles-mêmes des agents de formulation, des tensioactifs, et portent donc à la fois le principe actif et l'excipient de formulation, afin qu'elles puissent s'auto-formuler.

4.4. Un exemple : TriXera +®

Le premier exemple choisi est la mise au point d'une formulation bioactive verte, qu'on appelle TriXera +, issue d'une collaboration entre le CNRS et les laboratoires Pierre Fabre Dermo-cosmétique.

Le produit développé qui entre dans cette formulation s'appelle le selectiose® ; c'est un tensioactif issu du rhamnose (**Figure 31**). Il a conduit à une formulation bioactive, commercialisée sous le nom de TriXera +® dans la gamme

Avène pour traiter les peaux atopiques (peaux allergiques). Les recherches ont commencé en 1997, et le produit a été commercialisé en 2007. Pour une formulation de ce type, cette durée peut être considérée comme courte.

Le rhamnose, utilisé comme tête polaire du tensioactif, est un sucre issu de ressources renouvelables, notamment des graines provenant d'un arbre du Brésil : le Feveira Tree ; il présente des propriétés intrinsèques anti-inflammatoires, notamment au niveau des kératinocytes¹⁴. L'idée a été de faire des mo-

14. Kératinocyte : cellule constitutive de la couche superficielle de la peau (épiderme) et des ongles, cheveux, poils. Ils se renouvellent constamment et synthétisent la kératine, protéine fibreuse et insoluble dans l'eau, qui assure à la peau son imperméabilité.

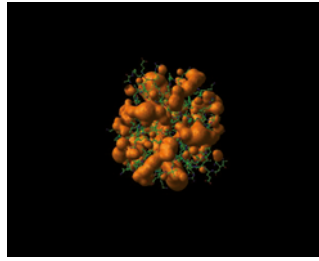


Figure 31

Les récepteurs spécifiques du rhamnose sont nombreux sur les cellules humaines.

lécules tensioactives constituées d'une tête rhamnose qui va porter l'activité anti-inflammatoire, et d'une chaîne qui va permettre de réaliser la formulation.

Selon cette stratégie scientifique, toute une gamme de produits a été synthétisée (Figure 32). Le produit qui a donné le meilleur résultat est le « pentyl rhamnoside ».

Cette chimie se fait sans solvant, grâce à l'utilisation de microémulsions (Figure 33). On utilise la propriété de ces produits de s'auto-formu-

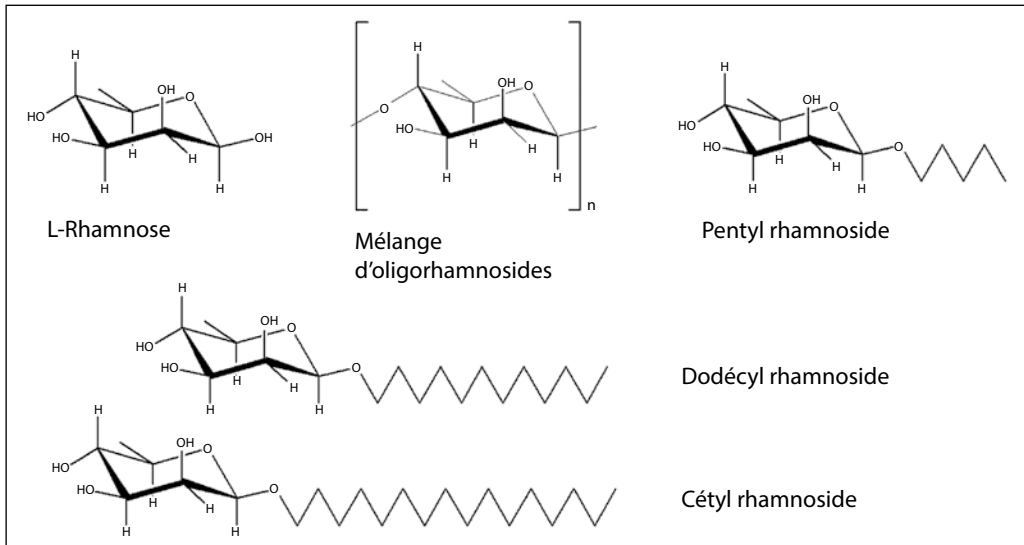


Figure 32

De nombreuses molécules ont pu être synthétisées à partir du rhamnose, dont le pentyl rhamnoside, qui a donné le meilleur résultat.

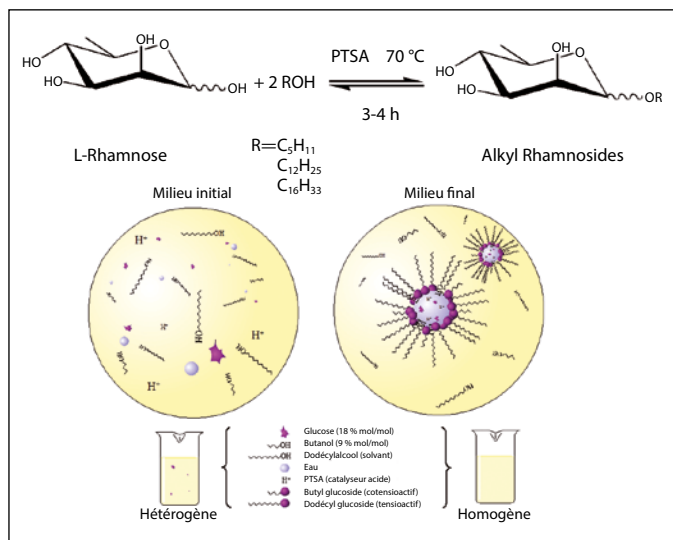


Figure 33

Le pentyl rhamnoside, ainsi que les autres dérivés du rhamnose, ont été produits via une réaction d'alkylation du L-rhamnose. Les synthèses ont été faites en microémulsion.

ler (Figure 34) : ils constituent eux-mêmes le système de microémulsions. Le produit est maintenant synthétisé par Pierre Fabre Dermo-cosmétique.

En fin de fabrication, il y a bien sûr eu lieu de vérifier que les propriétés anti-inflammatoires étaient toujours présentes. Le pentyl rhamnose bloque l'inflammation à deux niveaux : celui de la production de lymphocytes T et celui de l'afflux de ces lymphocytes T au niveau de la peau (Figure 35) (c'est ce qui donne la rougeur).

Principe actif qualifié, le sélectiose® a été conditionné pour donner naissance au produit final. Ainsi, le sélectiose® est commercialisé

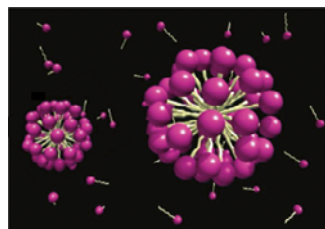


Figure 34

Les tensioactifs forment des micelles dans le contexte d'émulsions ou de microémulsions.

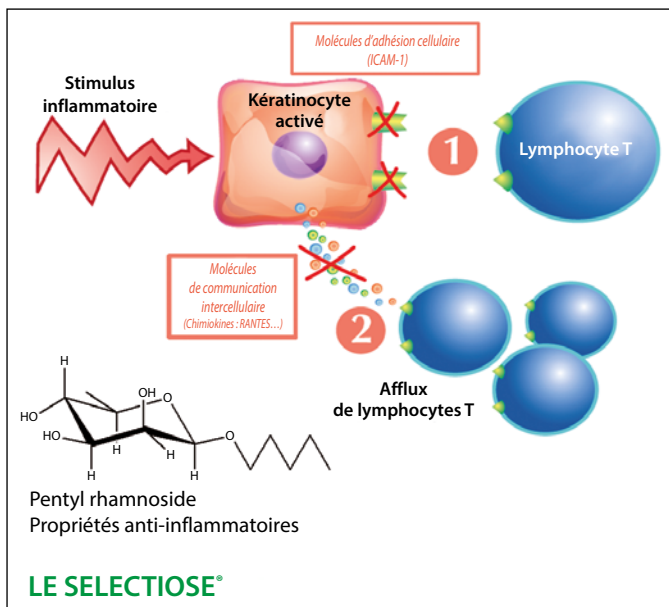


Figure 35

Les kératinocytes peuvent être activés par un stimulus inflammatoire et provoquer un afflux de lymphocytes T ; cette action peut être entravée par l'action de substances comme le pentyl rhamnoside. Celui-ci, plus simplement appelé sélectiose®, est recommandé pour ses propriétés anti-inflammatoires.

depuis 2007 en pharmacie sous le nom TriXera +[®] (**Encart : « TriXera +[®] »**). Il est issu de deux brevets et a été distingué par le prix Pierre Potier en 2011. Selon la même démarche, un

autre dérivé du rhamnose a fourni un autre principe actif, l'efectiose, et un nouveau cosmétique TriAcnéal[®] (**Encart : « TriAcnéal[®] »**), distribué également par Pierre Fabre Dermo-cosmétique.

TRIXERA +[®]

Les laboratoires Pierre Fabre commercialisaient une formulation appelée TriXera[®], cosmétique aux effets anti-inflammatoires (**Figure 36**). Pour corriger certains défauts secondaires (irritation cutanée dans certains cas, notamment chez l'enfant), il a été décidé de la modifier par l'ajout de sélectiose[®], d'efficacité appropriée.

Une partie de l'excipient a été substituée par le sélectiose[®], et le produit obtenu a été commercialisé sous le nom de TriXera + (sélectiose)[®] avec un très large succès commercial.

Le produit est prescrit par les dermatologues ; en fait, ce cosmétique a pratiquement une activité de médicament. Il est ainsi utilisé pour les cas d'eczéma (en particulier chez les enfants) et également pour traiter les radiodermites secondaires aux traitements par rayons dans les centres anticancéreux.

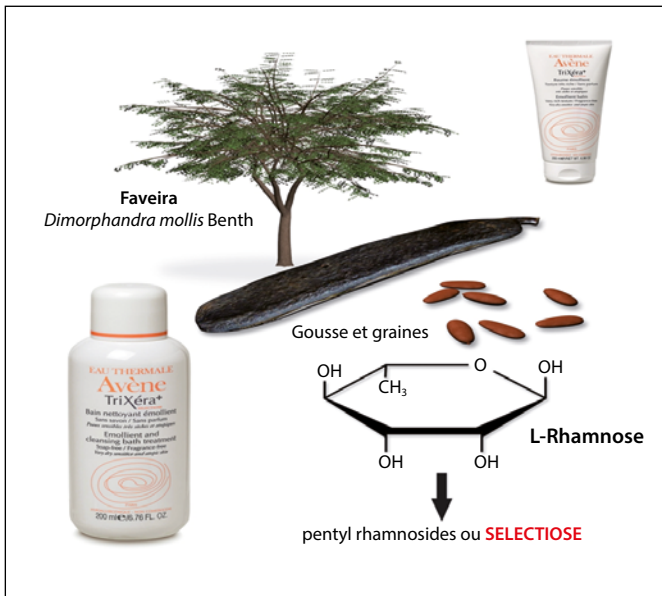


Figure 36

TriXera +[®] a comme principe actif le selectiose[®], ou pentyl rhamnoside, produit à partir du rhamnose, lui-même issu de l'arbre faveira (ainsi que la gousse et les graines). TriXera +[®] a reçu le prix Pierre Potier en 2011.

*Les radiodermites sont des lésions cutanées induites par les radiations ionisantes.

TRIACNÉAL®

TriAcnéal® (**Figure 37**), mis en vente en 2010, est un produit actif contre l'acné avec une bonne efficacité. Il a pris la suite du DiAcnéal®, qui, après ajout d'un dérivé du rhamnose, est devenu TriAcnéal®. Son principe actif dérivé du rhamnose est l'efectiose, et la démarche scientifique de sa découverte repose, comme pour TriXera +®, sur le concept de formulation bioactive.



Figure 37

TriAcnéal® a été mis en vente sous la gamme Avène. Il a comme principe actif l'efectiose ou undécyl rhamnoside, produit à partir du rhamnose, lui-même issu de l'arbre faveira (ainsi que la gousse et les graines).

Chimie d'aujourd'hui, chimie pour l'avenir

Le XX^e siècle a réorienté la chimie, et le XXI^e s'inscrit profondément dans cette prescription. Il l'a placée devant un objectif qu'elle n'avait pas initialement : veiller à la préservation de l'avenir des hommes tout en améliorant leur vie aujourd'hui. Chimie Verte, Chimie Pour le Développement Durable sont des concepts qui sont aujourd'hui les moteurs de cette nouvelle chimie. À ce titre elle entre dans un cycle important de respect de notre planète.

Comme le disait Saint-Exupéry : « *Nous n'héritons pas de la terre de nos ancêtres, nous l'empruntons à nos enfants* » : l'écrivain pressentait

déjà les impératifs qui ont donné naissance au concept (en comparaison un peu technocratique) du développement durable.

Pour mettre également en relief la délicate mission du chercheur, on peut aussi citer Pierre-Gilles de Gennes, dans *Les objets fragiles*, qui décrivait le métier de chercheur comme se rapprochant de celui d'une danseuse de cordes le long d'un fil : « d'un côté comme dans l'autre il faut prévenir la chute, ne tomber ni dans l'extrême appliqué, ni dans un fondamental excessif ». Il faut avancer pas à pas, un peu vers la gauche, un peu vers la droite, jamais brusquement.

Le respect de l'éthique est aussi ce qui fait la beauté de la chimie, cet équilibre et cette richesse que l'on peut exploiter suivant son goût, du fondamental à l'appliqué. Les impératifs de REACH sont enfin un stimulant concret dans cette direction de la chimie du futur, et déjà du présent.

Et pour terminer, arrêtons-nous sur ces deux aquarelles (*Figure 38*) pour rappeler qu'il nous faut préserver une nature avec des saisons, un climat, qui soient doux, la mer, le ciel... tout ce qui fait la beauté de notre Terre.



Figure 38

La chimie pour le développement durable, encouragée et stimulée par REACH, doit nous permettre de transmettre aux générations futures un cycle des saisons préservé.

Aquarelles d'Isabelle Rico-Lattes.