

Chimie et développement durable

Bernard Sillion

La notion de développement durable est née après le rapport de la Commission Brundtland des Nations unies en 1987 qui s'interrogeait sur les risques du développement en soulignant que **le développement économique pourrait conduire à une détérioration au lieu d'une amélioration de la qualité de vie**, et concluait que **le développement doit satisfaire les besoins présents sans compromettre les possibilités que doivent avoir les générations futures à satisfaire leurs propres besoins**.

Ces souhaits de la Commission Brundtland peuvent se traduire par des actions visant à :

- limiter le réchauffement climatique par un contrôle des émissions de gaz à effet de serre ;
- rechercher des substituts aux ressources fossiles épuisables à une échéance relativement brève ;
- diminuer les risques de l'activité industrielle pour la santé humaine et l'environnement, ce qui correspond à une forte demande sociétale.

Il n'est peut-être pas inutile de placer ces trois problématiques dans leur contexte et de chercher à en hiérarchiser l'importance dans une échelle de temps.

Quelle est la place de l'industrie chimique française parmi les émetteurs de gaz à effet de serre ?

En 2007, en Europe, les émissions de gaz ont été de $5\,045 \cdot 10^6$ t d'éq. CO_2 . La France en émet seulement 10,5 % et se trouve en 4^e position. L'industrie manufacturière a rejeté $107,3 \cdot 10^6$ t d'éq. CO_2 , ce qui correspond à une diminution de 26 % par rapport à 1990 [1].

En 2009, l'industrie chimique a produit $16,9 \cdot 10^6$ t de CO_2 et $20,5 \cdot 10^6$ t d'éq. CO_2 de l'ensemble des gaz à effet de serre (N_2O , CO_2 , CH_4 , HCF, SF_6) [2].

La question des ressources fossiles

Si l'on considère la question de la gestion des ressources fossiles, on assiste depuis quelques temps à une légère diminution de la production, donc de la demande mondiale. La production mondiale de pétrole est passée de $4,3 \cdot 10^9$ t en 2008 à $4,2 \cdot 10^9$ t en 2009, même si ces valeurs sont à amender en raison de la crise. Cette consommation reste cependant importante par comparaison avec les ressources prouvées (tableau I).

En France, les importations de pétrole ont diminué ; elles passent en effet de 83 Mt en 2008 à moins de 72 Mt en 2009, mais on a importé et exporté des produits raffinés (tableau II). Les transports ont consommé 48 Mtep d'hydrocarbures [4].

En comparant les chiffres de la production de pétrole et ceux des réserves disponibles, on peut facilement trouver la projection grossière de durée de vie de l'économie pétrolière,

Tableau I - Les réserves des principaux types de composés carbonés fossiles [3].

*Les hydrates de méthane ne sont pas exploités, contrairement aux gaz de schiste.

Charbon	$909 \cdot 10^9$ t
Pétrole	$162 \cdot 10^9$ t ($176 \cdot 10^9$ t source UFIP)
Gaz naturel	$180 \cdot 10^{12}$ m ³
Hydrates de méthane*	$21 \cdot 10^{15}$ m ³

Tableau II - Le pétrole en France [4].

Année 2009	Pétrole (10^6 t)	Produits raffinés (10^6 t)
Importations	72	36
Exportations		24,2
Solde importations	72	12,7

soit une quarantaine d'années (en considérant qu'il n'y aurait pas de changement des rythmes de production et de consommation). Cependant, les ressources fossiles offrent à moyen terme d'importantes possibilités avec le méthane et le charbon, ce dernier faisant l'objet de nombreux travaux, en particulier en Chine pour sa transformation en combustibles liquides.

Le questionnement sociétal spécifique à l'égard des substances chimiques

L'importance du règlement REACH

Cette réflexion a pris naissance dans la dernière partie du XX^e siècle. Dans son introduction au *Handbook of Green Chemistry and Technology* [5], James H. Clark s'interroge pour connaître les raisons de la méfiance de l'opinion publique vis-à-vis des substances chimiques malgré le fait reconnu que durant le siècle écoulé, grâce à l'amélioration des rendements des récoltes et au développement des médicaments, l'espérance de vie s'est accrue de 60 %, avec une population passant de 1,6 à 6 milliards de personnes. La réponse est à rechercher dans le fait que l'opinion a été marquée par l'importance des déchets gazeux, solides et liquides rejetés dans l'environnement et de leur impact sur la santé. Il est à cet égard intéressant de comparer l'importance des rejets en fonction de la typologie des entreprises transformant les produits chimiques organiques [6] (voir tableau III).

Des études ont montré que le coût de traitement des déchets pouvait atteindre 40 % du coût de production, ce

Tableau III - Ce que rejettent les entreprises transformant les produits chimiques organiques [6].

Industrie	Tonnage	Kg de sous-produit par kg
Raffinage	10 ⁶ -10 ⁸	0,1
Chimie lourde	10 ⁴ -10 ⁶	< 1-1,5
Chimie fine	10 ² -10 ⁴	5-50
Pharmacie	10-10 ³	25-10

qui peut expliquer une certaine réticence dans le passé de la part des industries les moins performantes à mettre en place un contrôle efficace des effluents.

Les demandes sociétales portant sur la santé et l'environnement ont été prises en compte par une nouvelle réglementation européenne (REACH, règlement EC 793/93) qui s'applique aux produits préparés sur le territoire européen, mais aussi aux produits importés, ce qui entraîne donc un effet sur la production mondiale. Le règlement REACH implique un enregistrement auprès de l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) – créée pour veiller à l'application de ce règlement – de toutes les substances produites suivant un échancier qui dépend du tonnage des produits et du risque réel ou potentiel pour la santé et l'environnement, comme le montre la *figure 1*. On voit sur ce graphique (2007 étant l'année de mise en place du règlement) que les substances produites à plus de i) 1 000 t/an, ii) 100 t/an si elles présentent le risque d'être persistantes, bio-accumulables ou toxiques, et iii) 1 t/an si elles sont cancérigènes, mutagènes ou reprotoxiques (CMR) doivent être enregistrées avant 2011 et qu'après cette première phase d'enregistrement qui s'est achevée le 30 novembre 2010, l'ECHA a reçu 24 675 dossiers concernant ces substances.

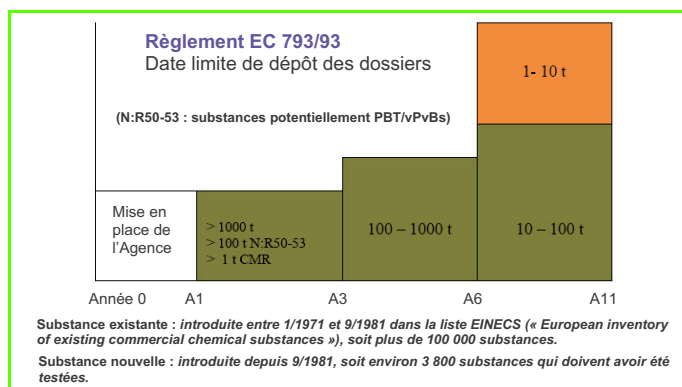


Figure 1 - Cahier d'enregistrement des substances chimiques.

PBT/vPvBs : substance persistante, bioaccumulable, toxique/très persistante, très bioaccumulable.

Si l'on doit, dans une perspective de développement durable, hiérarchiser l'importance des trois causes – émissions de gaz à effets de serre, raréfaction des ressources fossiles et demande sociétale –, ce sont sans doute les besoins imposés par les réglementations nées de la demande sociétale qu'il faudra satisfaire à brève échéance. C'est d'ailleurs ce qui pose les problèmes les plus importants dans toute la chaîne de valeurs, depuis l'industrie productrice des matières premières (les substances selon REACH), jusqu'aux utilisateurs finaux des produits transformés (les articles selon REACH).

Selon le règlement REACH, on ne peut mettre librement sur le marché aucune des substances figurant sur l'annexe XIV du règlement, c'est-à-dire les produits :

- cancérigènes catégorie 1 (effet démontré) ou 2 (grand risque),
- mutagènes catégorie 1 ou 2,
- toxiques pour la reproduction catégorie 1 ou 2, substances persistantes bio-accumulables ou toxiques (annexe XIII),
- perturbateurs endocriniens.

Les autorisations de mise sur le marché ne seront accordées pour ces produits que si les risques sont maîtrisés ou si les avantages socio-économiques l'emportent sur le risque et que des solutions de remplacement sont étudiées ; ces autorisations seront temporaires. Le dossier de demande doit indiquer en particulier le rapport sur la sécurité chimique, l'analyse des solutions de remplacement et l'analyse socio-économique.

Les utilisateurs de substances dangereuses sont tenus d'informer l'Agence européenne des produits chimiques.

On voit que la substitution des substances à risques sera une priorité pour une politique de développement durable en chimie.

La « chimie verte »

La conceptualisation de la démarche vers ce que l'on appelle aux États-Unis la chimie verte a été faite par le groupe de Paul Anastase sous la forme de douze recommandations [7] :

- 1- Éviter les rejets plutôt que d'avoir à les traiter.
- 2- Utiliser le maximum des atomes mis en jeu dans la réaction.
- 3- N'utiliser et ne produire que des produits non toxiques pour l'homme et l'environnement.
- 4- Le produit recherché doit être efficace avec la toxicité la plus réduite.
- 5- Limiter les auxiliaires de synthèse (solvant, agents de séparation).
- 6- Limiter les dépenses énergétiques pour réaliser les réactions (température et pression ambiantes).
- 7- Rechercher les matières premières renouvelables.
- 8- Éviter les schémas de synthèse avec protection-déprotection.
- 9- Rechercher les réactions catalytiques, éviter le « catalyseur » stœchiométrique.
- 10- Les produits de synthèse doivent être conçus pour ne pas persister dans l'environnement et ne pas donner de produit de dégradation instable.
- 11- Rechercher les techniques d'analyses et de contrôle en ligne pour limiter les effets de mauvais fonctionnement du procédé.
- 12- Rechercher des produits et procédés minimisant les risques d'accidents.

Les résultats attendus de cet ensemble de recommandations sont représentés sur la *figure 2*. Si l'on rapproche les indications du *tableau III* sur les rejets des douze recommandations, on voit que les industries les plus concernées sont celles de la chimie fine et de la pharmacie pour l'ensemble des recommandations ; mais aucune industrie n'échappe à la question des rejets car si en termes de pourcentage la grosse industrie présente un bon score, en termes de rapport poids rejetés/poids produits, les quantités rejetées sont néanmoins importantes.

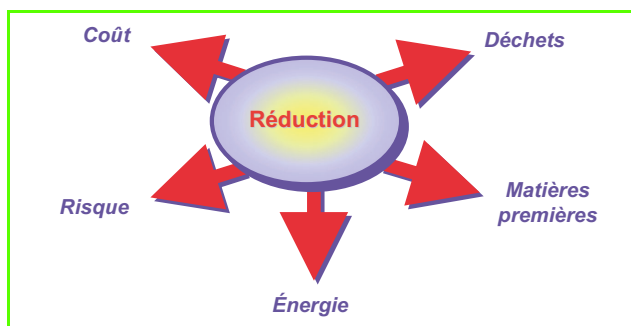


Figure 2 - Les résultats attendus du développement de la chimie verte.

L'utilisation des ressources renouvelables : un point intéressant à discuter

Chaque année, la nature offre une production de 172.10^9 tonnes de matière lignocellulosique contenant 45 % de carbone. L'utilisation de cette ressource – à l'exclusion de ce qui provient de terres cultivables nécessaires pour les ressources vivrières – semble intéressante pour diminuer la contribution à l'effet de serre, sous réserve que collecte et transformation ne soient pas trop gourmandes en énergie ; de plus, les fonctionnalités que peuvent offrir les matériaux bio-sourcés ont un grand intérêt pour la chimie fine et la pharmacie.

Qu'en est-il de la chimie des grands intermédiaires que l'on va utiliser pour la production des polymères de commodité (polyoléfines, PVC...) et des polymères de spécialité (polyesters, polyamides...)? La production mondiale de polymères en 2009 était de 230.10^6 t, dont 69.10^6 t étaient produites en France [8].

L'industrie chimique organique des grands intermédiaires a toujours été fournie en matières premières par l'industrie de l'énergie, et plus précisément par l'industrie des combustibles et carburants. Cela a donné tout d'abord la carbochimie qui a cédé la place à la pétrochimie. Actuellement, la chimie n'est qu'un petit utilisateur des hydrocarbures et utilise moins de 10 % – énergie de transformation comprise – de la consommation pétrolière annuelle. En 2009, la consommation n'a été que de 11,6 Mtep pour les usages non énergétiques [4].

Si l'on admet que le combustible liquide sera encore longtemps le vecteur d'énergie utilisé pour le transport, on peut penser que la chimie des grands intermédiaires restera encore longtemps dérivée de la production de carburants et combustibles en utilisant les procédés de vapocraquage pour l'éthylène, le propylène et le butadiène, et de reformage catalytique pour les aromatiques. C'est pratiquement sûr, tant que durera l'utilisation des matières fossiles : pétrole, puis charbon transformé en hydrocarbures liquides et méthane transformé en gaz de synthèse. Mais les matières lignocellulosiques, qui offrent une importante source de carbone et d'hydrogène, pourraient être utilisées dans une bioraffinerie pour produire par reformage du gaz de synthèse intermédiaire pour les carburants et les grands intermédiaires [3, 9].

Vers l'éco-innovation

Le développement de nouveaux produits dans le cadre du développement durable implique certes le contrôle des propriétés d'usage, mais aussi pour chaque étape de la chaîne :

- le choix des matières premières (fossiles et/ou renouvelables) ;

- le choix des réactions (économies d'atomes, milieu réactionnel, catalyseurs, biocatalyseurs...);
- le choix du procédé (intensification, biotechnologies) ;
- la maîtrise de la fin de vie du produit, du matériau ou de l'objet.

En outre, une connaissance aussi parfaite que possible de l'impact sur la santé humaine et sur l'environnement implique une démarche systémique [10] en développant les systèmes prédictifs pour les propriétés physiques, QSPR*, et les propriétés toxicologiques, QSAR*, mais aussi de nouveaux outils analytiques rapides, fiables et simples, ainsi que de nouveaux tests pour la toxicologie et l'écotoxicologie permettant à terme d'éviter au maximum les essais sur animaux, comme le recommande le règlement européen.

Cette démarche confortera l'analyse du cycle de vie prenant en compte à tous les niveaux les consommations d'énergie, de consommables et les rejets (figure 3). C'est par cette démarche intégrée aboutissant à l'éco-innovation – qui se pratique déjà ! – que la chimie se développera et retrouvera... peut-être les faveurs de l'opinion !

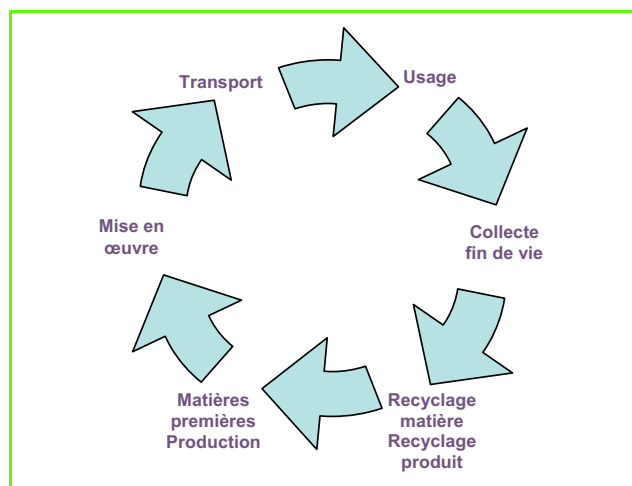


Figure 3 - Le cercle vertueux de l'éco-innovation.

Note et références

- * QSPR : « qualitative structures properties relationships » ; QSAR : « qualitative structures activities relationships ».
- [1] www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr
 - [2] *Rapport annuel sur le développement durable*, UIC, 2009 (www.uic.fr).
 - [3] Olah G.A., Goeppert A., Surya Prakash G.K., *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy*, Wiley-VCH, 2006, Chap. 3.
 - [4] www.statistiques.equipement.gouv.fr
 - [5] *Handbook of Green Chemistry and Technology*, J. Clark, D. Macquarrie (eds), Blackwell, 2002, p. 1.
 - [6] Sheldon R.A., *Chemtech*, mars 1994, p. 38.
 - [7] Anastas P.T., Warner J.C., *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, 1998, p. 30.
 - [8] www.plasticseurop.com
 - [9] Gallezot P., *GreenChem*, 2007, 9, p. 295.
 - [10] « Comment les chercheurs peuvent-ils répondre aux enjeux de REACH ? », Expertise collective CNRS/APESA/INERIS (www.agence-nationale-recherche.fr/documents/uploaded/2009/rapport_reach2009.pdf).



Bernard Sillion* a été directeur de recherche à l'IFP, puis directeur du Laboratoire des matériaux organiques du CNRS à Solaize, président du Groupe Français des Polymères et de la division de Chimie industrielle, vice-président de la SCF et rédacteur en chef de *L'Actualité Chimique*.

* Courriel : b.sillion@sca.snr.fr