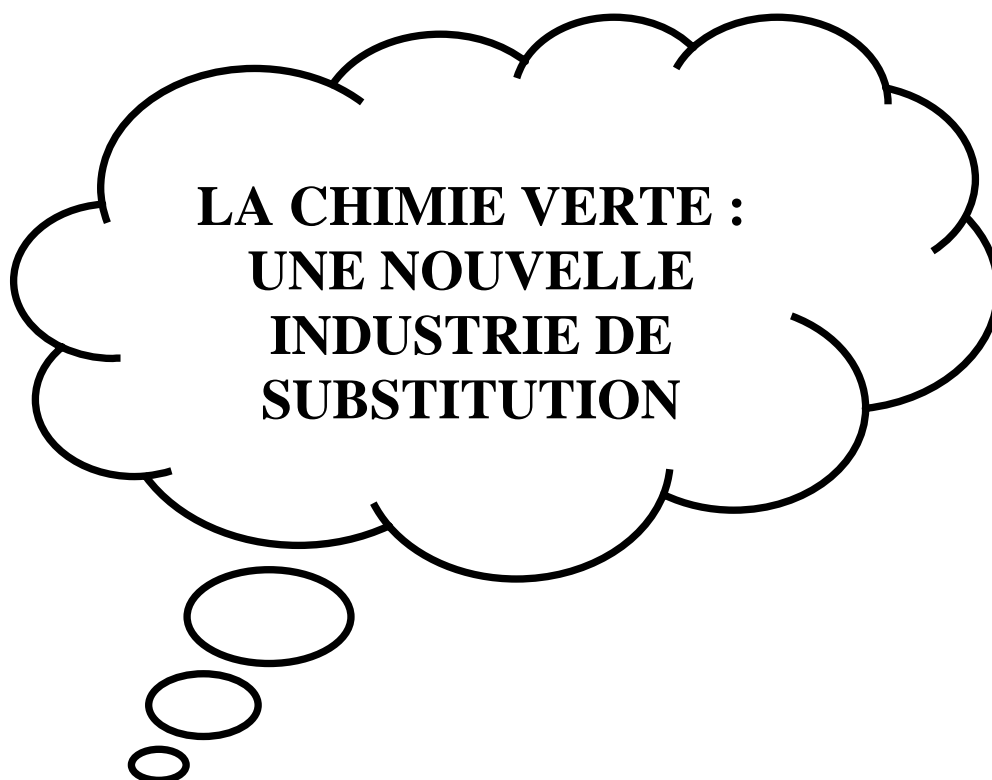


CAHIERS DU LAB.RII

- DOCUMENTS DE TRAVAIL -

N°263

Février 2013



**LA CHIMIE VERTE :
UNE NOUVELLE
INDUSTRIE DE
SUBSTITUTION**

Clément WILS

LA CHIMIE VERTE : UNE NOUVELLE INDUSTRIE DE SUBSTITUTION

GREEN CHEMISTRY: A NEW INDUSTRY OF SUBSTITUTE

CLEMENT WILS¹

Résumé : Ce rapport présente le contexte économique et social introduisant le concept de la chimie verte qui pourrait s'annoncer comme une alternative d'avenir à la pétrochimie. Il définit ce nouveau concept mis en avant au début des années 1990, tout en précisant les acteurs principaux à son émergence. Les causes de son développement seront également abordés et notamment la pression croissante des particuliers, de plus en plus soucieux de leur environnement et de leur condition de vie, envers les industriels. Enfin, nous traiterons des limites à l'émergence des innovations et des nouvelles technologies du concept mais aussi de ses perspectives difficiles afin de remplacer le paradigme pétrolier.

Abstract: This report deals with the economic and social environment introducing the concept of the green chemistry which could be considered in the future as an alternative to the petro chemistry. It defines the new concept imagined in the early 1990s, while specifying the main actors involved in its emergence. Finally, we discuss the limitations to the emergence of innovations and new technologies of green chemistry but also the prospects to replace the oil paradigm.

© Laboratoire de Recherche sur l'Industrie et l'Innovation
Université du Littoral Côte d'Opale, février 2013

¹ Master « Electronique et Instrumentation », ULCO

LA CHIMIE VERTE : UNE NOUVELLE INDUSTRIE DE SUBSTITUTION

GREEN CHEMISTRY: A NEW INDUSTRY OF SUBSTITUTE

CLEMENT WILS

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	4
1. LA CHIMIE VERTE CONTRE LA PETROCHIMIE.....	4
1.1 La chimie verte : un ensemble de technologies et de produits de substitution	4
1.2 Naissance, développement et diffusion des technologies.....	6
2. ESSOR DE LA CHIMIE VERTE ET OBSTACLES A SA GENERALISATION....	8
2.1 Les causes du développement des industries de substitution : l'essor de la chimie verte.....	8
2.2 Des perspectives difficiles d'émergence d'une nouvelle ère industrielle	9
CONCLUSION.....	11
BIBLIOGRAPHIE	11

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie chimique s'est considérablement développée au cours du vingtième siècle, et plus particulièrement depuis que nous utilisons le pétrole mais également depuis la seconde guerre mondiale. La chimie fait intégralement partie de notre quotidien, dans les produits que nous employons et que nous utilisons. Chaque produit est constitué au minimum d'une étape de fabrication ayant un lien avec l'industrie de la chimie que ce soit dans les cosmétiques, dans la pharmacie, les matériaux de constructions ou les produits ménagers. Cependant, l'image de la chimie se détériore de jours en jours. Ce phénomène est principalement dû aux dégradations et aux catastrophes liées à l'industrie chimique et pétrochimique dont les conséquences humaines et écologiques sont lourdes. Bien que la fréquence de ces événements reste très faible, l'industrie chimique a déversé et déverse, encore et toujours, des substances et des molécules à forte toxicité pour l'environnement et pour l'Homme.

De plus, sous la double pression de la décroissance pétrolière annoncée d'ici une cinquantaine d'année et de l'impératif de réduction aux gaz à effet de serre, le monde scientifique et industriel se regroupe autour de la recherche, du développement et de la production de ressources issues de l'agriculture. Ce nouveau concept, lié au développement durable, est la chimie verte. Elle propose une alternative crédible à la pétrochimie. Elle propose l'élaboration et la conception de produits issus de la biomasse des végétaux pour la fabrication de produits innovants comme des nouveaux matériaux, des nouveaux carburants et des nouvelles molécules compétitives. Elle se porte donc, en garant d'un développement respectueux de l'environnement, et au sens plus large de la planète et de l'Homme.

Nous allons traiter, dans une première partie, du contexte d'émergence de la chimie verte en y apportant la définition de celle-ci et les produits issus de la chimie verte. Nous aborderons son développement et sa diffusion depuis sa création. Puis, dans une seconde partie, nous verrons l'essor de la chimie verte et les obstacles à sa généralisation en définissant les causes du développement des industries de substitution au pétrole puis les perspectives qui risquent d'être relativement difficile à l'émergence de cette nouvelle ère industrielle.

1. LA CHIMIE VERTE CONTRE LA PETROCHIMIE

1.1 La chimie verte : un ensemble de technologies et de produits de substitution

Qu'est-ce que la chimie verte ?

Au début des années 1990, Paul ANASTAS, chef du département de la chimie industrielle à L'Agence de Protection de l'Environnement Américaine (EPA), met en avant le concept de Chimie verte qui s'insère dans une démarche de développement durable pour l'environnement. Grâce à la collaboration entre le gouvernement Américain et l'industrie, la chimie verte a obtenu son statut actuel en tant que discipline scientifique. C'est alors que Paul ANASTAS définit la Chimie verte comme la conception, le développement et la mise en œuvre de produits et de procédés chimiques permettant de réduire ou d'éliminer l'utilisation et la synthèse de substances dangereuses et néfastes. Il est important de comprendre que ces substances dangereuses peuvent l'être de plusieurs manières différentes. En effet, le danger peut être physique comme les substances inflammables ou explosives ; ils peuvent être dans un autre cas toxicologiques c'est-à-dire cancérigène ou mutagène ou reprogène. Pour finir, ils peuvent être dangereux de façon globale. Par cela, nous entendons que ces substances sont

dangereuses pour le maintien de notre écosystème, elles sont liées à une destruction de la couche d'ozone, un changement climatique, une augmentation de l'effet de serre par exemple.

De plus, la chimie verte se base sur 12 principes élémentaires également définis par Paul ANASTAS :

1. La prévention de la pollution à la source en évitant la production de résidus.
2. L'économie d'atomes et d'étapes qui permet de réaliser, à moindre coût, l'incorporation de fonctionnalités dans les produits recherchés tout en limitant les problèmes de séparation et de purification.
3. La conception de synthèses moins dangereuses grâce à l'utilisation de conditions douces et la préparation de produits peu ou pas toxiques pour l'homme et l'environnement.
4. La conception de produits chimiques moins toxiques avec la mise au point de molécules plus sélectives et non toxiques impliquant des progrès dans les domaines de la formulation et de la vectorisation des principes actifs et des études toxicologiques à l'échelle cellulaire et au niveau de l'organisme.
5. La recherche d'alternatives aux solvants polluants et aux auxiliaires de synthèse.
6. La limitation des dépenses énergétiques avec la mise au point de nouveaux matériaux pour le stockage de l'énergie et la recherche de nouvelles sources d'énergie à faible teneur en carbone.
7. L'utilisation de ressources renouvelables à la place des produits fossiles. Les analyses économiques montrent que les produits issus de la biomasse représentent 5 % des ventes globales de produits chimiques et pourraient atteindre 10 à 20 % en 2010. Plus de 75% de l'industrie chimique globale aurait alors pour origine des ressources renouvelables.
8. La réduction du nombre de dérivés en minimisant l'utilisation de groupes protecteurs ou auxiliaires.
9. L'utilisation des procédés catalytiques de préférence aux procédés stœchiométriques avec la recherche de nouveaux réactifs plus efficaces et minimisant les risques en terme de manipulation et de toxicité. La modélisation des mécanismes par les méthodes de la chimie théorique doit permettre d'identifier les systèmes les plus efficaces à mettre en œuvre (incluant de nouveaux catalyseurs chimiques, enzymatiques et/ou microbiologiques).
10. La conception des produits en vue de leur dégradation finale dans des conditions naturelles ou forcées de manière à minimiser l'incidence sur l'environnement.
11. La mise au point des méthodologies d'analyses en temps réel pour prévenir la pollution, en contrôlant le suivi des réactions chimiques. Le maintien de la qualité de l'environnement implique une capacité à détecter et si possible à quantifier, la présence d'agents chimiques et biologiques réputés toxiques à l'état de traces (échantillonnage, traitement et séparation, détection, quantification).
12. Le développement d'une chimie fondamentalement plus sûre pour prévenir les accidents, explosions, incendies et émissions de composés dangereux.

Contrairement à l'écologie qui s'intéresse plus au polluant déjà présent dans la nature, la chimie verte a donc, pour but, de réduire et de limiter la pollution à sa source d'une manière originale et innovante.

Les produits issus de la chimie verte et leurs acteurs

Les produits de la chimie verte sont, dans la majorité, issus du végétal ou biomasse. Pour ce faire, la chimie verte utilise un craquage de la matière végétale connu depuis 1819, l'hydrolyse acide. Une autre méthode consiste à utiliser un catalyseur enzymatique afin d'accélérer ou de sélectionner une réaction chimique dans le cas de réactions concurrentes en

favorisant la production d'un produit plutôt qu'un autre. Les premiers produits à découler de la Chimie verte ont été en priorité conçus afin de se substituer à la pétrochimie.

- Les biocarburants comme l'éthanol ou le bio-diesel ; il est une alternative au carburant pour moteur diesel classique : gazole ou pétro-diesel. Il est obtenu à partir d'huile végétal, principalement le colza en France, transformée par un procédé chimique appelé transestérification. Les plus gros producteurs mondiaux sont l'Allemagne, les Etats-Unis et la France par le groupe Diester Industrie,
- les biolubrifiants sont des substances grasses qui permettent de réduire les frottements entre deux surfaces, ils peuvent servir comme huile de moteur par exemple. Certains de ces biolubrifiants sont développés par le groupe pétrochimique TOTAL qui propose ainsi une alternative fiable en réponse aux préoccupations croissantes à l'égard de l'environnement et du développement durable,
- les agro-tensioactifs composés indispensables à l'hygiène et à la cosmétique présentent différentes propriétés : mouillantes, solubilisantes, émulsifiantes ou détergentes. Plusieurs de ces tensioactifs sont développés par le pôle IAR (Industries et Agro-Ressources),
- les agro-solvants sont des liquides qui ont la propriété de dissoudre ou de diluer d'autres substances sans modification chimique d'aucun des composés. Les solvants permettent de transporter, d'appliquer, de nettoyer ou de séparer des produits. A titre indicatif, les solvants représentent 29% des COV (carbone volatil) émis dans l'atmosphère. Quelques-uns de ces produits sont également proposés par le Pôle IAR.
- Enfin, les agro-matériaux qui désignent tous types de matériaux à base de ressources biosourcés et/ou biodégradables. Ils peuvent être issus du chanvre ou du maïs afin d'aboutir à des panneaux d'isolation par exemple.

La chimie verte regroupe donc les molécules chimiques d'origine renouvelable trouvant leurs applications dans les domaines de la chimie classique, de la chimie fine et de la chimie spécialisée Mais elle est également présente dans le domaine des matériaux et de l'énergie. La chimie durable peut donc, théoriquement, substituer la source fossile par une source renouvelable. Bien que la chimie verte commence à s'inscrire dans la vie du quotidien des consommateurs et des industriels, elle a mis du temps à se diffuser dans les esprits de chacun.

1.2 Naissance, développement et diffusion des technologies

L'histoire de la chimie verte

Ainsi que nous l'avons vu précédemment le concept de la chimie verte est né au début des années 1990 à l'initiative de Paul ANASTAS. L'évolution du concept a mené à la collaboration de John WARNER pour la création des 12 principes de la chimie verte qui servent encore aujourd'hui de fondement à la recherche et au développement de produits innovants. Le concept est sorti de l'anonymat en Europe en 1993 par le biais de la parution d'un livre intitulé « Chimie pour un monde propre » publié par la Commission Européenne de la Chimie. Il a fallu attendre 1995 pour que cet intérêt pour la chimie durable touche les Etats-Unis. En effet, le président Bill CLINTON a mis en place la première récompense à reconnaître les technologies chimiques qui incorporent les principes d'une chimie durable au sein de la conception de leurs produits : le Presidential Green Chemistry Challenge Awards. Cette récompense a permis la mise en lumière de ces possibilités de substitution à la chimie classique, créant un intérêt économique et politique pour les industriels et pour le grand public. S'en est suivi, en 1997, la création de l'Institut pour la Chimie Verte (Green Chemistry Institute – GCI) consacré à la promotion et à l'avancement de la chimie verte.

En 1998, Paul ANASTAS et John WARNER ont concrétisé leurs recherches en établissant la définition précise et les principes fondamentaux de la chimie dans un livre nommé « Chimie verte : théorie et pratique ». Ce livre sert dorénavant de base à toute recherche portant sur la chimie verte. Trois ans plus tard (2001) le GCI rejoignit l'American Chemical Society (ACS) dans l'effort de résoudre les problèmes mondiaux liés à la chimie et à l'environnement. Ce n'est qu'en 2006 que l'Union internationale de la chimie pure et appliquée a formé un sous-comité sur la chimie verte et lancé une conférence internationale biennale, soit 16 ans après la première mise en avant de ce concept par Paul ANASTAS. Cette dernière reconnaissance affirme le statut de la chimie verte, à travers le monde, comme chimie palliative. Cela a conduit, en 2007, à l'intérêt des industriels par la création de la première société dédiée au développement de technologies pour la chimie verte par John WARNER et, en 2008, à la création de la première et unique, à ce jour, Association Chimie Du Végétal (ACDV), en Europe dont le siège social est basé en France. Elle était constituée de 5 entreprises fondatrices : Roquette, Rhodia, le pôle IAR, UIC et Usipia. Aujourd'hui, l'ACDV est composée de 45 représentants d'entreprises dont IMCD (alimentaire pour le pharmaceutique), Michelin (pneumatique) et le groupe pétrochimique TOTAL.

Ainsi nous avons observé que de sa conception à sa diffusion, la chimie verte a été portée par Paul ANASTAS et John WARNER. Afin de récompenser cela, Barack OBAMA (Président actuel des États-Unis) a nommé Paul ANASTAS à la tête de l'EPA. Cette nomination a été décisive à l'adoption, la promotion et à la reconnaissance de la chimie verte par le monde politique, et de ce fait par le grand public. Aujourd'hui, de nombreux pays adoptent des programmes prônant ce concept à travers des centres et des initiatives éducatives, tel que l'Allemagne (avant-gardiste dans l'économie et le développement durable), l'Australie et l'Italie.

La chimie verte en France, qu'en est-il ?

Même si l'industrie chimique française est seconde sur le marché européen. Elle est peu investie dans le domaine de la chimie verte, contrairement à son homologue Allemand. D'après la société ALCIMED, société de conseil et d'aide à la décision en marketing stratégique, plusieurs éléments sont à prendre en compte afin d'expliquer ce retard. Tout d'abord, la stratégie française en matière de chimie verte a été mise en place à partir de la récente publication de l'étude réalisée par la PIPAME, alors que les Etats-Unis ont établi leur carnet de route depuis les années 2000. Une autre raison est que la France ne dispose pas assez de PME spécialisées dans les procédés innovants liés à la chimie verte. Pour finir, l'industrie française a tardé à développer sa collaboration avec les biotechnologies.

Cependant, la France ne manque pas d'atouts puisque des projets pilotes ambitieux commencent à émerger, comme le développement de bioraffineries par BioHub Roquette et Axel One par exemple. Il existe également de nombreuses réflexions entre l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et les groupes industriels français mais aussi plusieurs pôles de compétitivité comme Axelera, IAR, Plastipolis, et des équipes de recherches au sein de l'INRA, du CEA et de l'IFP par exemple. La chimie française doit donc subir une transformation et s'appuyer sur le développement des bioraffineries américaines, afin de répondre aux objectifs d'indépendance au pétrole, la chimie verte s'offre donc comme une opportunité à son remplacement.

Dans ce cadre, 4 tendances technologiques de R&D ont été identifiées comme prioritaires à moyen terme (5ans) dont 3 reposent sur les 12 principes de la chimie verte. Ces recherches technologiques concernent :

- les procédés catalytiques qui s'intéressent au marché des polymères et des produits chimiques actionné par le pôle de compétitivité Axelara.
- Les biotechnologies industrielles qui s'appliquent aux procédés et à la production des produits chimiques en utilisant des enzymes et des micro-organismes au sein des industries chimiques, agro-alimentaires et textiles par exemple.
- La chimie analytique est également concernée pour s'assurer de la qualité des matières utilisées visant le marché des industries chimiques porté par le CNRS et les universités.
- Pour finir, il s'agit de développer, en parallèle, les nanotechnologies naturelles ou artificielles (nanomatériaux) rassemblant des acteurs publics et privés.

2. ESSOR DE LA CHIMIE VERTE ET OBSTACLES A SA GENERALISATION

2.1 Les causes du développement des industries de substitution : l'essor de la chimie verte

Une pénurie prévisible

Des plastiques aux tensio-actifs en passant par le cosmétique, les technologies liées à la chimie verte et les bioraffineries représentent donc une alternative intéressante à la pétrochimie, subissant dans un premier temps, l'augmentation pérenne de la montée du prix de l'or noir dû aux spéculations et à la raréfaction. En effet, des estimations, sans cesse renouvelées, démontrent une pénurie relative à 40 ans pour le pétrole mais également celle des autres ressources énergétiques comme le gaz qui pourrait s'épuiser d'ici 70 ans et du charbon d'ici 150 ans. Une alternative à ses ressources, que l'on utilise depuis près d'un siècle, doit donc être, dès aujourd'hui, pensée et développé pour répondre à ces besoins énergétiques dont nous sommes dépendants. A titre d'exemple, le prix du pétrole était six fois moins cher que le prix du blé dans les années 50 alors qu'en 2011, il est trois fois plus cher. Mais, il ne s'agit pas du seul argument au développement de la chimie durable.

Un coût environnemental de la pétrochimie relativement important

Les accidents liés à la pétrochimie sont peu communs mais restent encrés dans les mémoires, du fait de leur envergure. La pétrochimie est, en effet, la plus grande activité polluante atmosphérique en termes d'émission de gaz à effet de serre mais pas seulement. Les destructions d'usines utilisant des matières issues de la pétrochimie sont rares mais présentes comme la destruction de l'usine AZF à Toulouse en septembre 2001 suite à l'explosion d'un stock de nitrate d'ammonium entraînant la mort de 31 personnes et faisant plus de 2500 blessés. La pétrochimie engendre également une pollution des sols de plus en plus croissante. Pour récupérer le pétrole du sous-sol, des fosses toxiques sont créées pour entreposer les déchets liés son retrait. Du mercure, du plomb et de l'arsenic sont également utilisé afin de l'extraire dans certains cas, substances hautement toxiques pour l'Homme et pour son environnement. De plus, une pollution des eaux est constatée, à la fois, par les dégazages des pétroliers réalisés en pleine mer malgré l'interdiction et la sanction de un million d'euros et de 10 ans de prison. Mais les nombreux naufrages et marées noires restent tout de même très présents et impliquent une énorme mobilisation afin de nettoyer les dégâts matériels, de la faune et de la flore comme pour les marées noires du pétrolier Erika en 1999, au large de la Bretagne et le Prestige en 2002 par exemple. L'impact économique, écologique, écotoxique et sanitaire représente un véritable traumatisme pour les régions touchées. La fuite de pétrole sur la plateforme pétrolière du groupe BP, en 2010, est estimée à 40 milliard de dollars. On observe également une augmentation de la déforestation afin de trouver et de rallier les puits de pétrole. Pour finir, les maladies liées à la pétrochimie son en augmentation comme les

cancers, les attaques cardiaques, troubles nerveux, leucémies, problèmes respiratoires. Cette facture environnementale et sociale a engendré une prise de conscience grandissante.

Une prise de conscience grandissante

Nous commençons à voir, aujourd'hui, une prise de conscience générale de la nécessité d'évoluer vers un développement durable. Cela se traduit par la pression constante de l'opinion publique envers les entreprises polluantes. Les consommateurs et plus précisément le citoyen commence à s'apercevoir de la dangerosité liée au pétrole comme l'augmentation des maladies, les cancers et l'augmentation du nombre de cas d'Alzheimer qui peuvent être liés à l'utilisation abusive de l'or noir. La population a donc des attentes en termes de santé, mais elle prend également conscience d'un désir d'être plus respectueux envers l'environnement et s'engage pour une meilleure qualité de vie. Elle comprend également que le monde qui l'entoure change et qu'elle en est le principal responsable. De plus en plus de personnes pensent dorénavant à long terme et veulent accorder les mêmes chances qu'elles à leur progéniture, ce qui représente le fondement d'une économie et d'un développement durable et d'avenir.

Des directives européennes pour l'environnement

La directive européenne REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of CHemicals) vise à l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et la restriction des molécules issues de l'industrie chimique. Elle devrait conduire à interdire et réglementer sévèrement les produits chimiques existants. Cette directive est entrée en vigueur en juin 2008. De plus, le recensement de ces molécules doit alors permettre une utilisation et une gestion beaucoup plus sûre, contrôlée et encadrée. Elle cible principalement les substances cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques et de hautes toxicités. Elle implique également les industriels dans cette démarche puisqu'ils devront eux même certifier et prouver l'innocuité de leurs produits. La directive européenne REACH ouvre donc une voie économique aux alternatives des molécules provenant de la chimie verte.

2.2 Des perspectives difficiles d'émergence d'une nouvelle ère industrielle

Des procédés technologiques à réinventer

Depuis un siècle, lors de la découverte du pétrole, notre économie s'est totalement orientée vers celui-ci en oubliant tous les procédés techniques et technologiques liés à une économie non pétrolière. Nous avons favorisé les solutions simples qu'offrait cette matière. Les causes du développement de la chimie verte font face, désormais, à une évidence majeure. Pour que la chimie verte se développe et substitue la pétrochimie, il est nécessaire de repenser, d'inventer et de réinventer les technologies de « l'avant pétrole ». L'Homme était capable de concevoir du papier, en effet, la Bible de Gutenberg a été conçu avec de la fibre de chanvre. L'utilisation et la réutilisation de ces procédés est donc vital et primordial à la chimie verte. De nos jours, il est plus facile de faire usage de routines que nous avons inventé il y a moins d'un siècle que d'utiliser des techniques qu'il faille rechercher pour l'évolution d'un nouvel paradigme qui est néfaste au paradigme du pétrole. Des techniques comme l'hydrolyse acide ont été conçues en 1819 par Henri BRACONNOT. Cette technique connue et étudiée depuis longtemps représente une technique fondamentale pour le fractionnement de la biomasse. Il est donc nécessaire de revoir nos façons de travailler et de penser depuis une cinquantaine d'années pour aboutir à une chimie 100% verte.

Un manque de ressources et un conflit alimentaire

Une des autres difficultés qui s'annonce avec l'émergence de la chimie verte est la problématique des ressources agricoles consommées pour l'alimentation de l'Homme et celles utilisées par les industriels pour leurs produits. De nos jours, nous employons 62% de nos ressources pour l'alimentation, 33% à titre énergétique et seulement 5% sont englouties par nos usines. Le problème de l'espace et de l'utilisation agricole est donc une réalité. D'après l'étude menée par le cabinet de conseil auprès des directions générale Mc KINSEY, la chimie pourrait se servir jusqu'à de 50% nos ressources agricoles en 2030. La reconversion d'une chimie sans pétrole vers une chimie de l'agro-ressource pose également d'autre problème. Pour exemple, un hectare de culture de betteraves, produit en moyenne 2 tonnes équivalent pétrole par an. Ainsi, il faudrait consacrer plus d'un tiers de la surface agricole mondiale à cette filière pour subvenir à nos besoins actuels. Il se peut que l'emploi de ces ressources engendre une montée des prix des céréales et des ressources terrestres et ainsi de l'alimentation en générale. Néanmoins, l'Homme est capable, de nos jours, de fabriquer une alimentation a plus forte énergie nutritive.

De plus, les industriels de la bioraffineries ont connaissances de ces problèmes. C'est pourquoi, ils développent un modèle basé sur doublement de la production agricole d'ici 2050. Ce modèle terrestre consiste à s'approvisionner dans les champs et les forêts avoisinant les bioraffineries. En opposition à un modèle portuaire où l'usine avoisinera un grand port, il faudrait donc acheminer les ressources jusqu'à elle. Ils considèrent, également, que leur impact sur les prix restera minime. Cependant, il est fort probable que ces « solutions » engendrent un appauvrissement des terres mais, également, un modèle peu viable à long terme au niveau du renouvellement des biens. Il est envisageable que ce modèle ne soit applicable qu'à quelques pays. En effet, des pays comme les pays du Maghreb sont pauvres en ressources naturelles en dehors de l'énergie solaire. Des difficultés importantes doivent donc être prise compte rapidement pour assurer la pérennité de la chimie verte.

Pour finir, certaines agro-ressources peuvent également poser des problèmes en termes d'écologie. Nous pouvons prendre comme exemple le cas du maïs. Cette plante nécessite une grande quantité d'eau et d'engrais afin de croître. La chimie verte demande une plus forte exploitation de nos ressources agricoles mais cela se confronte à un autre problème grave qu'est l'utilisation de l'eau, eau potable qui se raréfie également de plus en plus.

Un bilan énergétique peu avantageux

Bien que la combustion des biocarburants dégage moins de gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone principalement (CO₂), comparé au pétrole dû à la compensation réalisée par l'absorption du CO₂ lors de la croissance de la plante entre 24% et 91% selon celle employé, la production de biocarburant implique l'utilisation d'engrais, probablement de pesticides chimiques, de matériels agricoles et de l'énergie qui ne s'inscrivent pas dans le cadre de la chimie verte. Il se peut que les innovations issues de la chimie verte résolvent ce point. Néanmoins, aujourd'hui, toutes les étapes de productions des biocarburants émettent des gaz à effet de serre et consomment énormément d'énergie. Le rendement énergétique entre la production et la consommation est donc relativement médiocre selon le type de biocarburant utilisé. Ainsi, la combustion de la canne à sucre, par exemple, 5.82 fois plus d'énergie que n'en consomme sa production. Cela est clairement moins satisfaisant pour le diester de colza qui est de 2.23, de 1.35 pour le bioéthanol de blé, de 1.25 pour le bioéthanol de betterave et moins de 1 pour le bioéthanol de maïs, ce qui signifie qu'il faut plus d'énergie pour le produire que ce qu'il délivre lors de sa consommation. Les étapes de productions n'entrant pas dans le cadre du concept de la chimie verte, les biocarburants ne représentent donc pas

une solution convenable à la substitution du pétrole même si les choses risquent de changer avec l'apparition de nouvelles innovations vertes. De plus, pour changer totalement de paradigme, il faudrait, dans le cas de la France, utiliser 66% des surfaces agricoles en colza pour remplacer totalement le pétrole.

Des difficultés politiques envisageables

Le concept de chimie verte risque d'être confronté à des difficultés politiques. En effet, les pays développés comme les États-Unis ou l'Europe sont conscients de l'enjeu économique, social, et environnemental. En opposition, les pays pétroliers comme ceux du Tiers monde ou des pays arabes ont une politique et une économie basée sur le pétrole. Il se peut que ces pays freinent le développement et la connaissance de la chimie verte. Il est nécessaire que le concept traverse toutes les frontières afin de répondre aux problèmes mondiaux dû au pétrole. Dans un autre cas, la chimie verte peut représenter une solution économique de rattrapages au développement pour ces pays.

CONCLUSION

La chimie verte s'impose donc comme une nouvelle approche radicalement nouvelle aux problèmes de l'activité chimique et pétrochimique industrielle. Encadrées par des législations et des règlements, les industriels cherchent à réduire et à minimiser l'impact et l'exposition aux dangers des substances chimiques en les contrôlant à tous les stades de leurs procédés. La chimie verte propose, par son concept innovant défini par Paul ANASTAS, d'aborder et d'éliminer les problèmes de la chimie à la source en imaginant des processus de fabrication sans dangers. Comme nous l'avons vu, il existe, néanmoins des barrières et des difficultés à son développement global. Une rentabilité des produits issus de la chimie verte s'impose. En effet, le paradigme vert ne pourra déloger celui du pétrole que si son retour sur investissement se présente comme suffisamment important à court terme pour attirer les dirigeants industriels, les investisseurs et les réinvestisseurs. Il est fort probable que les investisseurs du pétrole voient un avenir dans le concept de la chimie durable.

Pour cela, il faudrait que le coût de développement des nouveaux produits et nouvelles molécules, mais également la mise en place de ce nouveau paradigme compensent les coûts de transition vers celui-ci et englobent, par la même occasion, le coût de démantèlement du paradigme pétrolier.

Le principal défi de la chimie verte est donc, aujourd'hui, de développer des procédés qui présentent un avantage économiques vis-à-vis des procédés traditionnels pour être adoptés par l'industrie. Ces produits doivent également posséder un avantage certain pour le citoyen et le consommateur en faisant entrer ce concept dans les mœurs de chacun à travers le monde.

BIBLIOGRAPHIE

Sites internet

- La chimie verte, <http://lesmetiersdelachimie.com/fr/article/page/la-chimie-verte>, visité le 05 janvier 2013
- Antonotti Sylvain, Cours de chimie verte, <http://www.unice.fr/lcmba/antionotti/cours%20chimie%20verte%202012.pdf>, visité le 05 janvier 2013

- OCDE l'Observateur, La http://www.observateurocde.org/news/fullstory.php/aid/3021/La_chimie_verte.html, visité le 06 janvier 2013
- Delurzache Céline, A la conquête de la chimie verte, <http://www.linternaute.com/science/environnement/dossiers/06/0604-chimie-verte/1.shtml>, visité le 06 janvier 2013
- Collet Sylvain, La chimie verte et alternative prépare l'avenir, http://www.pedagogie.ac-nantes.fr/41969974/0/fiche_ressourcepedagogique/&RH=1213690269247, visité le 06 janvier 2013,
- Terre mag, La chimie verte, <http://www.terremag.com/evenements/festival-science-frontieres-2008/la-chimie-verte/>, visité le 06 janvier 2013
- Gronier Daniel, DGChem, Chimie verte et développement durable, http://cleantuesdayparis.fr/media/files/04_DGChem_Biomimetisme_Senlis.pdf, visité le 06 janvier 2013
- Ladepeche, La chimie verte se pose ne alternative crédible au tout pétrole, <http://www.ladepeche.fr/article/2012/10/07/1458893-la-chimie-verte-se-pose-en-alternative-credibile-au-tout-petrole.html>, visité le 06 janvier 2013,
- Levy Nicolas, Energie renouvelable : les ressources végétales renouvellent la chimie, <http://culturesciences.chimie.ens.fr/node/1206#d0e112>, visité le 06 janvier 2013
- La marne, Agro-ressources & chimie verte, <http://www.investir-et-vivre-en-champagne.com/video-agro-ressources-et-chimie-verte>, visité le 06 janvier 2013
- INRA, CNRS, Chimie verte du Carbone renouvelable, http://www.cnrs.fr/inee/communication/actus/docs/colonna_2_Iddri.pdf, visité le 06 janvier 2013
- Une alternative au pétrole, l'éthanol, <http://tpeethanol.free.fr/mecanisme.html>, visité le 08 janvier 2013
- Pascal Laurent, Julie Roiz, Jean-Luc Wertz, Aurore Richel et Michel Paquot, Le bioraffinage, une alternative prometteuse à la pétrochimie, <http://popups.ulg.ac.be/Base/document.php?id=8007>, visité le 08 janvier 2013
- Deguillement Denis, Marché et enjeux d'aujourd'hui et de demain pour les agro ressources, <http://www.enfa.fr/physique-chimie/wp-content/uploads/2010/03/march%C3%A9-et-enjeux.pdf>, visité le 08 janvier 2013
- Reinert Magali, Novotic, de la chimie verte à la chimie doublement verte, http://www.novethic.fr/novethic/rse_responsabilite_sociale_des_entreprises.pratiques_comme_rciales,produits,de_chimie_verte_chimie_doublement_verte,138491.jsp, visité le 08 janvier 2013
- Total, Biolubrifiants, la protection de l'environnement, <http://www.total.fr/lubrifiants/developpement-durable/les-biolubrifiants.html>, visité le 08 janvier 2013
- Wikipédia, Biodiesel, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Biodiesel>, visité le 08 janvier 2013
- ACS, 12 principes of Green Chemistry, http://portal.acs.org/portal/acs/corg/content?nfpb=true&pageLabel=PP_TRANSITIONMAIN&node_id=830&use_sec=false&sec_url_var=region1&uuid=35c0e713-94f2-4faf-af61-3c7fd22d2b93/fr, visité le 08 janvier 2013
- ACS, Green Chemistry at a glance, http://portal.acs.org/portal/acs/corg/content?nfpb=true&pageLabel=PP_TRANSITIONMAIN&node_id=830&use_sec=false&sec_url_var=region1&uuid=35c0e713-94f2-4faf-af61-3c7fd22d2b93/fr, visité le 08 janvier 2013

- Votre beauté, Favry Charlène, Quel avenir pour la chimie verte, <http://www.votrebeaute.fr/archive/2012/09/18/pur-bio-de-l-avenir-de-la-chimie-verte.html>, visité le 08 janvier 2013
- L'echo republicain, <http://www.lechorepublicain.fr/france-monde/loisirs/art-vivre/pratique-conso/2012/10/07/la-chimie-verte-se-pose-en-alternative-credible-au-tout-petrole-1288685.html>, visité le 08 janvier 2013
- CFE CGC, Généralité sur la chimie verte et durable, <http://cfecgcchimie.free.fr/index.php/chimie-verte-et-durable/225-la-chimie-verte-ou-durable>, visité le 08 janvier 2013

Ouvrages

- Paul COLONNA, 2010, La chimie verte, Paris, Lavoisier