

8

Procédés relatifs à la chimie verte

Loisirs
& culture

**ÉNERGIE,
MOBILITÉ,**
Numérique

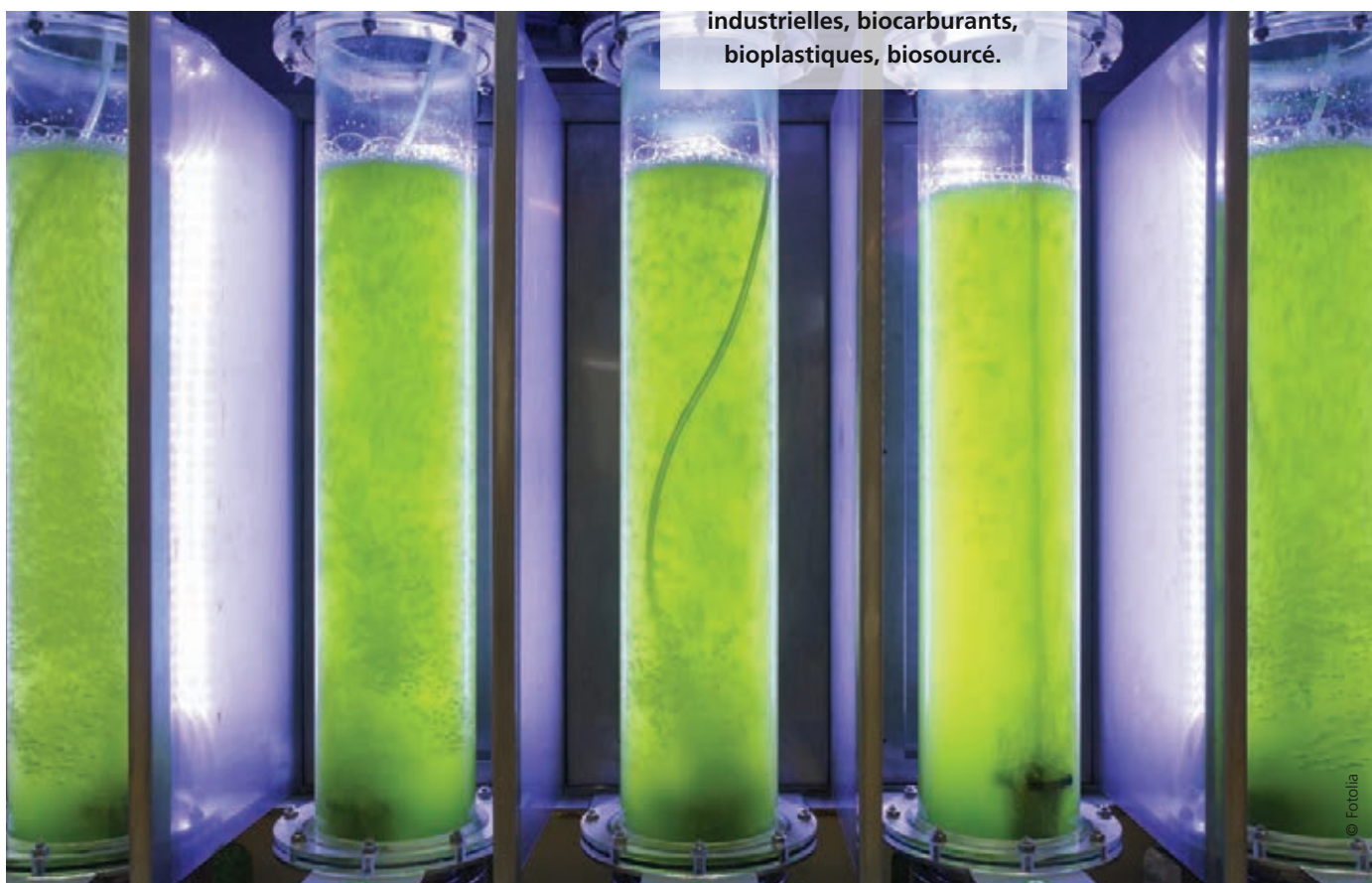
**ENVIRONNEMENT, HABITAT,
SANTÉ ET BIEN-ÊTRE,** Sécurité

ALIMENTATION

► **Correspond à
une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Chimie verte, chimie du végétal,
recyclage, procédés de fabrication
économiques, fermentation,
biocatalyse, agromatériaux,
biosolvants, biotechnologies
industrielles, biocarburants,
bioplastiques, biosourcé.



Définition et périmètre

Définition et objectifs

La chimie verte (ou chimie durable) est une approche qui vise à **diminuer, voire éliminer les impacts sanitaires et environnementaux des pratiques chimiques** et qui contribue également à **réduire ceux des autres industries ou secteurs applicatifs**¹. Cette approche a été théorisée par deux chimistes américains en 1998 sous la forme de douze « principes fondateurs »².

Dans ce cadre, les procédés de la chimie verte visent à « *limiter l'empreinte environnementale de l'industrie chimique elle-même*³ ». Bien que l'industrie chimique française ait diminué de 50 % ses émissions de CO₂ depuis 1990, l'enjeu reste important, puisqu'elle représentait encore près de 25 % des consommations en énergie de l'industrie en France⁴.

Technologies et applications

Si les standards de la chimie verte amènent parfois à revoir un procédé chimique dans sa totalité, dans le cas par exemple de la fermentation⁵, de la biocatalyse⁶ ou des réactions sans solvant, l'innovation au sein de la chimie verte reste principalement **incrémentale**⁷.

Les procédés de la chimie verte couvrent aussi bien des technologies dans le domaine de la chimie des procédés⁸ (nouvelles catalyses, nouveaux schémas de synthèse, etc.), du génie des procédés⁹ (microréacteurs, réacteurs tubulaires, intensification des pro-

cedés, etc.) que de la métrologie et des méthodes (modélisation, contrôle, etc.). Parmi ces technologies, deux offrent le potentiel de progression le plus significatif : la **catalyse**, avec notamment l'optimisation des biotechnologies blanches¹⁰, et l'**intensification des procédés**¹¹.

Chimie biosourcée

Au sein du large périmètre de la chimie verte, la **chimie des produits biosourcés**¹² amène les bouleversements les plus profonds par rapport à la chimie traditionnelle, reposant essentiellement sur le pétrole. Plus précisément, cinq types de produits issus de la chimie du biosourcé se développent : les agromatériaux, les biocarburants, les produits simples biosourcés (solvants, tensioactifs, résines, etc.), les produits formulés biosourcés (peintures, cosmétiques, lubrifiants, etc.) et les matières premières « vertes » de la chimie utilisées comme intermédiaires. La fabrication de ces produits s'appuie sur des biotechnologies industrielles¹³, les plus utilisées d'entre elles étant la biocatalyse et la fermentation¹⁴.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

La **préservation de la santé et de l'environnement** apparaît comme une préoccupation de plus en plus centrale pour les consommateurs et fabricants de biens de consommation. Les chimistes sont donc tenus d'adapter leurs pratiques à ces **nouvelles exigences**, d'autant plus dans un contexte de tension sur les ressources fossiles.

L'**Union Européenne investit en outre dans des projets de chimie verte**, à travers notamment les financements octroyés par le programme-cadre de l'Union européenne pour la compétitivité et l'innovation (CIP). Ainsi par exemple en 2014, elle a

1 – La chimie verte étend ses applications dans les cinq principaux champs de la chimie (chimie minérale, chimie organique, parachimie, pharmacie, produits chimiques de consommation), et par extension dans toutes les industries qui y ont recours. En santé, elle consistera par exemple à utiliser des bactéries pour produire sans effluents certaines molécules comme l'insuline

2 – Paul T. Anastas, John C. Warner, Oxford University Press, New York, 1998 ; *Green Chemistry: Theory and Practice*.

3 – PIPAME, 2010 : *Mutations économiques dans le domaine de la chimie*

4 – UIC, 2013 : *Contribution des industries chimiques au débat national sur la transition énergétique*

5 – Utilisation de micro-organismes comme moyen de fabrication

6 – Production au moyen d'un catalyseur naturel (vitamine, enzyme, hormone, oligo-élément)

7 – Entretien de Pascal Juery, directeur général adjoint du groupe Rhodia, publié dans ParisTech Review en décembre 2011

8 – La chimie des procédés couvre les travaux relatifs aux modalités réactionnelles

9 – Le génie des procédés cherche à améliorer / optimiser l'efficacité énergétique et la consommation de ressources de l'industrie chimique

10 – Utilisation de bactéries pour la fabrication, transformation ou dégradation de molécules

11 – PIPAME, 2010 : *Mutations économiques dans le domaine de la chimie*

12 – Elle consiste à utiliser des molécules issues de ressources renouvelables pour mettre au point des produits aux propriétés similaires à ceux issus de ressources fossiles. Les produits biosourcés peuvent également proposer de nouvelles fonctionnalités. Leur périmètre est encadré par la norme NF EN 16575 Produits biosourcés – Vocabulaire.

13 – Elles permettent d'extraire les molécules de produits issus de source végétale ou animale en utilisant les éléments du vivant

14 – UIC, IAR, Apec, 2014 : *Chimie du végétal et biotechnologies industrielles ; quels métiers stratégiques ?*

contribué à hauteur de 15 millions d'euros au programme *Emertec 5* dont l'objectif est de prendre des participations dans des projets des domaines de l'énergie, de la chimie verte et de l'environnement.

Cinquième industrie chimique mondiale et seconde au niveau européen, la France dispose d'**atouts considérables** pour devenir un pays leader¹⁵ de la chimie verte : des structures de recherche d'excellence dans les biotechnologies, des chimistes « historiques » de réputation mondiale, des grands groupes dans l'agro-industrie leader pour la valorisation des matières premières agricoles et un vivier de PME / start-up innovantes.

Liens avec d'autres technologies clés

Les **produits** issus de la chimie verte ont une influence sur les technologies clés suivantes :

■ **Dans le domaine de l'énergie** (influence faible) : **batteries électrochimiques de nouvelle génération, solaire photovoltaïque, technologies de l'hydrogène**. Les produits de la chimie verte peuvent être utilisés pour ces différentes technologies ;

■ **Matériaux avancés et actifs** (influence faible) ; une composante clé de la chimie verte est le développement de matériaux biosourcés.

Les technologies clés suivantes ont une influence sur les **procédés** de la chimie verte :

■ **Microfluidique** (influence faible) : la microfluidique ouvre des perspectives prometteuses pour l'intensification des procédés ;

■ **Matériaux avancés et actifs** (influence faible) : ces matériaux interviennent dans le génie des procédés ;

■ **Ingénierie génomique et métabolique** (influence faible) ; en améliorant la connaissance sur les ressources de la biomasse, ces 2 sciences contribuent à renforcer l'efficacité des procédés de la chimie biosourcée ;

■ **Recyclage des métaux critiques et des terres rares/Technologies de récupération de chaleur à basse température** (influence faible) : ces deux technologies peuvent contribuer à réduire l'impact environnemental des procédés de la chimie.

15 – Les entreprises leaders du secteur sont américaines (Cargill, DuPont, MetaboliX, Genencor...) ou issues d'autres pays européens (Novozymes - Danemark, BASF - Allemagne, DSM - Pays-Bas...)

Les marchés

Pour répondre aux besoins de l'accroissement démographique sur la période 2012-2020, le Programme des Nations-Unies pour l'Environnement (PNUJ) a estimé la croissance de l'industrie chimique à 25 % en Amérique du Nord/Europe occidentale, à 35 % dans les économies européennes émergentes et à 45 % pour l'Asie et le Pacifique. Représentant 5 à 10 % de l'industrie chimique¹⁶, la chimie verte devrait connaître la **même dynamique positive**. Sur la même période, le marché des produits biosourcés pourrait même connaître plus qu'un doublement de son chiffre d'affaires, passant de 135 milliards à 340 milliards d'euros¹⁷.

Les biotechnologies industrielles connaissent **l'un des plus rapides développements**¹⁸. Selon le Ministère de l'Éducation et de la Recherche allemand, ces technologies pourraient passer d'un chiffre d'affaires mondial de 50 milliards d'euros en 2012 à 300 milliards d'euros en 2022.

Au niveau des produits issus de la chimie verte, les **bioplastiques** ont connu une progression plus rapide que le marché de la chimie dans son ensemble. La dynamique inverse peut être constatée pour les emballages biodégradables, les solvants aqueux ou encore le blanchiment du papier sans chlore. À moyen terme, le marché mondial devrait notamment être tiré par les **intermédiaires chimiques** et la **production de biopolymères**¹⁹. Le chiffre d'affaires de ce dernier segment pourrait passer de 2,2 milliards en 2013 à 4,3 milliards d'euros en 2018.

En France, la croissance annuelle du marché de la chimie verte pourrait s'élever à **8 % en 2016 et 2017**²⁰. Par ailleurs, l'Union des Industries Chimiques, qui regroupe 2 600 entreprises françaises de la chimie et 230 000 employés, s'est engagée à porter la proportion de matières biosourcées²¹ dans la fabrication

16 – Le Figaro, 24/05/2013 : « Le spectaculaire essor de la chimie verte »

17 – Estimations de Joël Barrault et François Jérôme, chercheurs à l'Institut de chimie de Poitiers, cités dans l'article suivant : « Le spectaculaire essor de la chimie verte », Le Figaro, 24/05/2013

18 – OCDE, 2012 : *Environment Directorate*

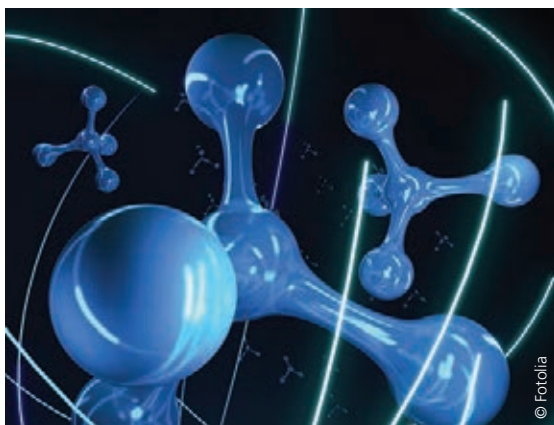
19 – Ibid

20 – Xerfi, 2015 : *La chimie verte en France - Perspectives du marché de la chimie du végétal à l'horizon 2017 et analyse du jeu concurrentiel*

21 – Ces matériaux incluent par exemple les amidons, le glucose, les huiles végétales ou la biomasse lignocellulosique.

de produits chimiques²² à 15 % en 2017 et à 20 % en 2020. La filière des produits biosourcés pourrait ainsi représenter 13 000 nouveaux emplois directs et 32 000 emplois indirects à l'horizon 2020²³.

Les défis technologiques à relever



Comme le soulignait le Commissariat Général au Développement durable en 2013²⁴, les capacités d'investissement des industriels français de la chimie demeurent incertaines, alors même que l'innovation technologique est clé pour le développement de la chimie verte.

Faire progresser les procédés catalytiques

Les **procédés catalytiques** sont au cœur de la chimie verte²⁵. Leur amélioration ouvre de nombreux chantiers, par exemple :

- L'usage de solvants « verts » comme l'eau ou le CO₂ supercritique ;
- L'optimisation des quantités de catalyseurs utilisés ;
- Le développement de la catalyse hétérogène²⁶, dans l'optique notamment de récupérer les catalyseurs métalliques ;
- L'exploration de nouvelles voies de synthèse avec l'utilisation d'enzymes (biocatalyse).

22 – Celle-ci s'élevait à 14 % en 2014

23 – ADEME, 2012 : *Emplois actuels et futurs pour la filière chimie du végétal*

24 – CGDD, 2013 : *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*

25 – L'utilisation de catalyseurs figure parmi les 12 principes de la chimie verte

26 – Utilisation de métaux catalyseurs pouvant être extraits aisément du milieu réactionnel

Répondre aux enjeux techniques posés par la chimie biosourcée

La chimie biosourcée en particulier génère des enjeux sur le plan technologique²⁷. Les procédés chimiques classiques sont encore en **phase d'adaptation** pour réaliser des produits à base de nouvelles matières renouvelables (production du butadiène à partir de bioéthanol, biocarburants à base de déchets, etc.). En particulier, le traitement des atomes d'oxygène présents dans les molécules extraites de ces bioressources représente un véritable enjeu.

Le besoin d'adaptation est également sensible au niveau de **l'outillage de la chimie**. Par exemple, les outils de compoundage²⁸ sont rarement adaptés aux produits intermédiaires d'origine végétale, les produits biosourcés étant souvent peu connus des plasturgistes et transformateurs.

Surmonter ces enjeux apparaît essentiel pour améliorer la qualité des produits biosourcés et leur valeur ajoutée par rapport aux produits existants, dont dépend leur développement. À titre d'exemple, dans le champ des agromatériaux, la performance des bioplastiques est souvent perçue comme plus faible (au niveau de la longévité, la résistance, l'élasticité par exemple) que celle des plastiques issus de la pétrochimie, même s'il est possible de s'affranchir de ces difficultés, réelles ou perçues, grâce à l'apport de fonctionnalités supplémentaires ou plus pointues (biodégradabilité, meilleure résistance, amélioration de la recyclabilité, etc.).

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Synonyme d'économies d'échelle, la mise en œuvre de procédés de chimie verte à une échelle industrielle est essentielle pour garantir la compétitivité de l'industrie française face aux procédés chimiques conventionnels et à la concurrence internationale. Elle nécessite en particulier de relever deux défis à l'horizon 2020 : la montée en compétences et la structuration de la filière.

Renforcer les expertises au sein des entreprises

La **montée en compétences de l'industrie chimique** représente un premier enjeu. Pour la chimie biosourcée,

27 – ADEME, 2011 : *Feuille de route R&D de la filière Chimie du végétal*

28 – Mélange par fusion de matières plastiques et d'additifs

pas moins de 32 métiers ont été identifiés comme stratégiques à l'horizon 2018-2020 au sein d'une étude publiée par l'Apec en 2014²⁹. Les équipes de R&D doivent se doter de compétences spécialisées dans l'analyse du cycle de vie d'un produit et au croisement de la biologie et de la chimie³⁰.

Par ailleurs, le **management de l'innovation** occupera un rôle de plus en plus central au sein des entreprises de la chimie verte, en particulier pour passer le cap de l'industrialisation, souvent compliqué. Malgré une offre innovante, de nombreuses PME et start-up doivent céder leur licence faute de n'avoir pu mobiliser des compétences en valorisation de l'innovation pour déployer leur produit à une échelle industrielle (levée de fonds, sécurisation par un brevet, etc.)³¹.

Un manque de fluidité au sein de la filière

Le développement des procédés de la chimie verte est également complexifié par **l'absence d'une chaîne de valeur structurée** en France :

■ L'approche d'économie circulaire inhérente à la chimie verte appelle des **coopérations renforcées entre les chimistes et les acteurs de la collecte des déchets**. Ces derniers deviennent essentiels pour récupérer les produits en fin de vie qui seront exploités en tant que matière première dans le cadre de procédés chimiques. Toutefois, un enjeu de rentabilité subsiste à ce niveau³². Si les filières de recyclage se mettent progressivement en place, elles restent encore complexes et peu optimisées. En conséquence, la valorisation chimique des déchets souffre encore d'un déficit de compétitivité vis-à-vis d'autres matières premières ;

■ Pour la chimie biosourcée, les **circuits d'approvisionnement en biomasse** sont peu structurés pour la mobilisation de ressources émergentes, en particulier la biomasse lignocellulosique (exploitation forestière, coproduits exploitation du bois, etc.)³³. Améliorer la

structuration de la filière apparaît également comme un levier fort pour diminuer le coût des produits biosourcés, généralement peu compétitifs par rapport aux produits issus de ressources fossiles.

L'enjeu consiste également à renforcer les liens entre les **maillons de la recherche et ceux du développement industriel**. La plupart des procédés de la chimie verte développés en France sont ensuite industrialisés dans des usines implantées à l'étranger.

■ Les enjeux réglementaires

Une réglementation aux effets contraires

En France, la réglementation a un **impact contrasté** sur le développement des procédés de la chimie verte. La réglementation française applicable aux plateformes chimiques³⁴ en constitue une bonne illustration. Fixant des standards environnementaux et sanitaires plus stricts que dans d'autres pays européens comme l'Allemagne³⁵, elle a pour effet de tirer les pratiques de l'industrie vers le haut. Toutefois, elle est également considérée comme un frein majeur³⁶ pour sa compétitivité. L'Union des Industries Chimiques a estimé entre 1,3 et 3,9 milliards d'euros le surcoût qu'elle représentera pour les industriels d'ici 2020 par rapport à des pays faiblement réglementés³⁷.

En réponse à cette situation, plusieurs mesures sont avancées par les industriels français pour l'assouplir : gestion de la sécurité au niveau des plateformes chimiques, plafonnement des taxes relatives à la réglementation sismique selon le niveau de valeur ajoutée des entreprises, etc.³⁸ La **circulaire du**

bien structuré autour de plateformes huile, sucre et amidon. La structuration de circuits d'approvisionnement apparaît un enjeu d'autant plus crucial qu'elle permet de faire face à la volatilité des prix des matières premières. La mobilisation de ressources agricoles à des fins chimiques est toutefois sujette à débat. Elle pourrait en effet générer des tensions sur d'autres usages, comme l'alimentation qui consomme actuellement plus de 60 % des ressources agricoles

34 – La réglementation inclut par exemple la réalisation d'études sismiques, des obligations d'audits de performance énergétique et des Plans de prévention des risques technologiques (PPRT)

35 – Les standards de ces pays sont indexés également sur la réglementation européenne, réputée déjà comme l'une des plus contraignantes au monde. Le règlement REACH en particulier, entré en vigueur en 2007, oblige les industriels à déclarer les substances chimiques qu'ils fabriquent et utilisent, de manière à écarter du marché celles jugées dangereuses pour la santé et l'environnement. L'objectif est de recenser plus de 30 000 substances d'ici 2018

36 – PIPAME / DGE / UIC, 2014 : *Benchmark européen sur les plateformes chimiques, quels sont les leviers pour améliorer la compétitivité des plateformes françaises ?*

37 – Ibid

38 – Ibid

29 – UIC, IAR, Apec, 2014 : *Chimie du végétal et biotechnologies industrielles : quels métiers stratégiques ?*

30 – Actu-environnement, 25/03/2015 : « Chimie du végétal ; des métiers stratégiques en mutation »

31 – Xerfi, 2015 : *La chimie verte en France - Perspectives du marché de la chimie du végétal à l'horizon 2017 et analyse du jeu concurrentiel*

32 – CGDD, 2013 : *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*

33 – L'approvisionnement des industries françaises agroalimentaires est toutefois

25 juin 2013 relative au traitement des plateformes économiques dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT)

va dans ce sens, puisqu'elle permet d'adapter les règles d'élaboration des PPRT au cas par cas pour une vingtaine de plateformes sur le territoire, sous supervision des préfets. Elle préconise par ailleurs la mise en place de systèmes de gouvernance collective entre les entreprises présentes sur les plateformes, avec pour objectif une meilleure coordination et mutualisation des moyens sur les questions de sécurité.

Le fonctionnement de la propriété industrielle, frein à l'innovation

Le **système actuel de propriété industrielle (PI)** représente un autre verrou important. En plus d'un déficit de connaissance des chercheurs et industriels, il est actuellement possible de breveter des procédés dès la conception du projet, ce qui empêche toute nouvelle initiative jusqu'à l'obtention hypothétique de résultats finaux. Au sein de la feuille de route pour la R&D de la chimie biosourcée publiée en 2011, l'ADEME appelait à faire évoluer la réglementation pour ne pouvoir breveter les procédés qu'à la réalisation du projet.

Analyse AFOM

ATOUTS

Une industrie chimique puissante au niveau mondial et européen

Un tissu industriel important, y compris dans les secteurs « connexes » de la chimie comme l'agroalimentaire

Des structures et partenariats de R&D de qualité

Des ressources naturelles importantes pour le développement des produits biosourcés

FAIBLESSES

Des procédés développés en France mais généralement transposés à une échelle industrielle au sein d'usines d'autres pays

Des déficits de compétences pour la valorisation de l'innovation (levée de fonds, dépôt de brevet, industrialisation, etc.), en particulier pour les PME et les start-up

Une filière des produits biosourcés peu structurée, notamment sur le plan de l'approvisionnement

OPPORTUNITÉS

Des préoccupations croissantes en matière de développement durable des usagers comme des fabricants de biens de consommation

Des standards réglementaires au niveau français et européen toujours plus exigeants

MENACES

Une concurrence forte des pays leaders de la chimie verte (États-Unis, Allemagne, etc.)

Pour la chimie biosourcée, des conflits potentiels pour la mobilisation des ressources agricoles avec les usages alimentaire et énergétique

Un cours du pétrole bas

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics :

- Soutenir le changement d'échelle des PME et des start-up de la chimie verte, tant sur le plan du financement, de la montée en compétences que de l'industrialisation ;
- Engager une réflexion sur la propriété industrielle ;
- Sensibiliser le grand public à la chimie verte. L'industrie chimique souffre d'un déficit d'image, comme le révélait un sondage réalisé en 2010 par l'Union des Industries Chimiques³⁹.

Aux entreprises :

- Renforcer les partenariats PME-Grands groupes-Instituts de recherche pour contribuer à la structuration des filières de la chimie verte ;
- Mettre en place collectivement des circuits garantissant un approvisionnement stable pour la chimie biosourcée.

Aux académiques :

- Consolider les recherches dans le domaine du biosourcé avec l'objectif d'améliorer le rapport qualité-prix des produits par rapport aux produits conventionnels.

Acteurs clés

En France, la chimie verte implique une **grande diversité d'acteurs**. Elle se situe à l'interface entre les industries chimiques, les agro-industries pour la chimie biosourcée, les sociétés de biotechnologies et les acteurs de l'environnement, qui regroupent aussi bien des groupes de dimension internationale que des PME et start-up innovantes :

- Grands groupes de l'industrie chimique et pharmaceutique : Arkema, Solvay, Novacap, Sanofi, Pierre Fabre, Silab, Axens, Novasep, Adionics, etc. ;
- Grands groupes de l'agro-industrie : Roquette, Sofi-proteol, Limagrain, Adisseo, Tereos, etc. ;
- PME / start-up principalement issues des biotechnologies : Fermentalg, Deinove, Metabolic Explorer, LibraGen, Global Bioénergies, Carbios, Polymar, Id-Bio, etc.

La France dispose par ailleurs d'un écosystème de la recherche particulièrement dynamique. L'innovation est aussi bien portée par les équipes des entreprises citées ci-dessus que par des unités mobilisées au sein du CNRS, de l'INRA, du CEA, de l'IFP, des universités et de certains Centres techniques industriels (ITERG

et le CVG notamment). Un vivier de structures fait le lien entre la recherche et le développement, comme les pôles de compétitivité Axelera, IAR et Plastipolis et les Instituts pour la Transition Énergétique P.I.V.E.R.T, IDEEL et IFMAS.

La structuration d'une filière de la chimie verte est soutenue par les pouvoirs publics. La chimie verte est ainsi au cœur de la solution « Nouvelles ressources : matériaux biosourcés et recyclés », l'une des neuf Solutions Industrielles. Elle fait l'objet de deux objectifs : un doublement d'ici 2020 du volume de matières premières d'origine végétale dans l'industrie chimique et la création de 5 000 emplois directs.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	

39 – UIC, novembre 2010 : *Industries chimiques et produits chimiques ; état de l'opinion, attitudes et comportements*, enquête réalisée auprès d'un échantillon de 2 519 personnes