

Facts & Figures

ENERGIE ET CARBONE POUR UNE CHIMIE VERTE

AVRIL 2015

ENEA Consulting est une société de **conseil en énergie et développement durable pour l'industrie**. ENEA intervient en conseil stratégique, en accompagnement à l'innovation et aux projets ainsi qu'en tant qu'expert et formateur sur ces sujets.

La présente publication s'inscrit dans la politique de partage des connaissances essentielles d'ENEA, dont l'objectif est de présenter les clés de compréhension des grands enjeux de la transition énergétique et du développement durable.

Elle est le fruit de l'expérience des experts d'ENEA sur la thématique de la chimie verte (notamment au travers de nos prestations d'accompagnement et de conseil d'acteurs industriels) et de recherches spécifiques en interne.



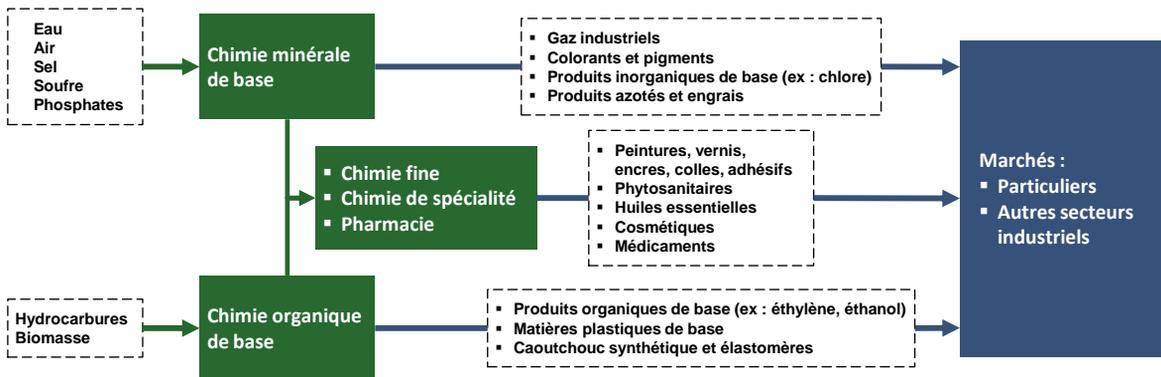
This work is licensed under the Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage à l'Identique 2.0 France License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/fr/> or send a letter to Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California, 94041, USA.

LE SECTEUR DE LA CHIMIE



La chimie : un secteur industriel vaste et diversifié

La chimie est à la base de la synthèse de la plupart des produits intermédiaires ou finaux qui assurent notre subsistance et notre confort. C'est un secteur clef de l'économie car il alimente la plupart des autres secteurs en intrants (matières plastiques, matériaux composites, gaz industriels, engrais...). De l'agriculture à la médecine en passant par les carburants, les plastiques ou les textiles synthétiques, la chimie intervient dans la plupart des chaînes de transformation de la matière.



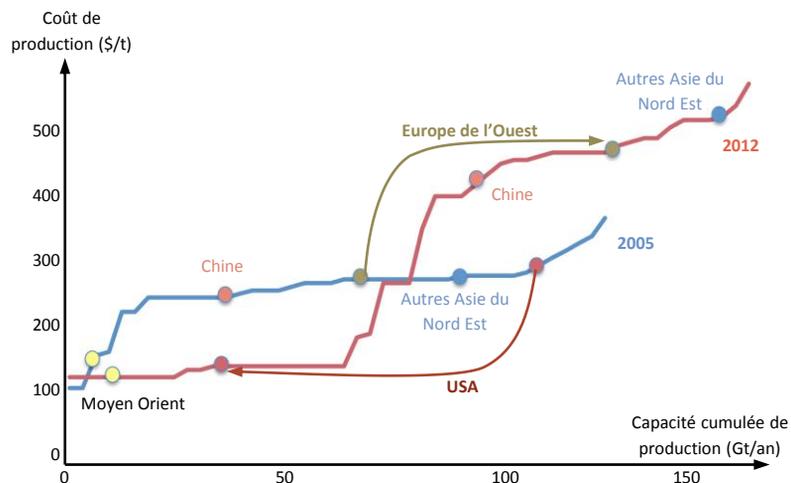
Principales branches de l'industrie chimique



La chimie aujourd'hui : compétition mondiale, création de valeur et compétitivité

Le paysage mondial de la chimie connaît de très fortes évolutions depuis plusieurs années, avec des risques croissants pour l'industrie européenne. Tirés par leurs marchés domestiques qui représentent maintenant la moitié du marché mondial, les industriels asiatiques sont en très forte croissance depuis les années 1980. Une vague d'investissements a ensuite eu lieu dans les années 2000 au Moyen Orient, tirant parti de l'accès aux ressources naturelles de la région.

Depuis 2006, l'exploitation massive des gaz de schiste aux États-Unis a donné à l'industrie chimique américaine un fort avantage compétitif. Le prix du gaz, susceptible d'impacter la compétitivité d'une large partie de la chimie (gaz feedstock et gaz fuel), a été divisé par deux. Les industriels du monde entier se positionnent sur le territoire américain pour tirer parti de cette manne : l'American Chemistry Council a annoncé en février 2014 que plus de 100 milliards de dollars d'investissements avaient été annoncés, pour un total de 148 projets (nouveaux sites, renforcements de capacités de production, modernisations...). Le graphe ci-contre illustre, avec l'exemple de l'éthylène, le retournement de compétitivité qu'a connu l'industrie en moins de 10 ans.



Répartition par coûts de la production mondiale d'éthylène, évolution entre 2005 et 2012 (d'après l'American Chemistry Council)

LE SECTEUR DE LA CHIMIE

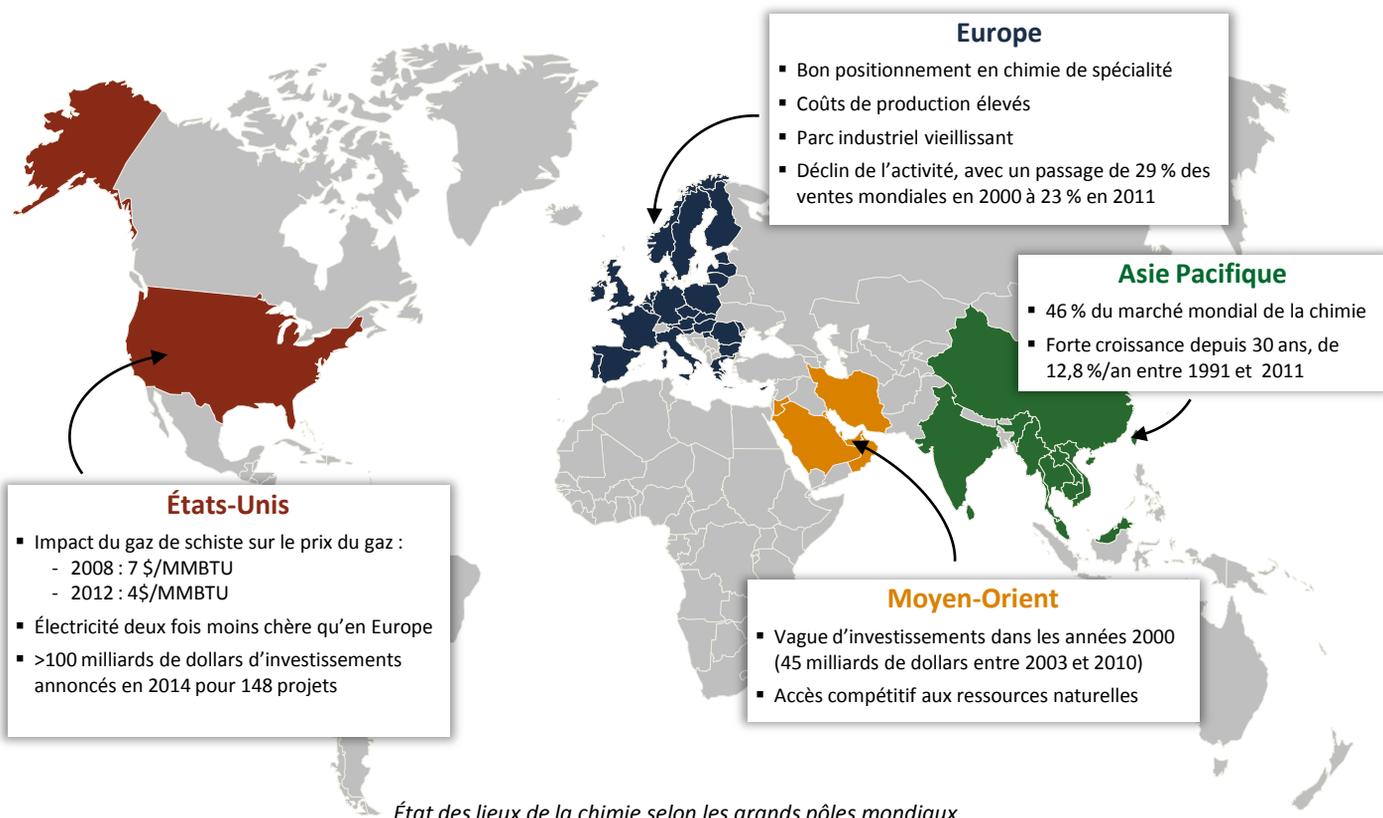
Les premiers investissements (15 Mds\$) permettront aux États-Unis d'augmenter leur capacité de production d'éthylène et de polyéthylène de 40 % dès 2017 ; puis au fur et à mesure de nouvelles capacités vont entrer en production sur le reste de la chaîne, avec des répercussions sur l'aval de la chimie puis sur d'autres secteurs industriels qui verront le prix de leurs intrants baisser. Au différentiel de prix du gaz il faut également ajouter que les industriels américains bénéficient aujourd'hui d'un accès à l'électricité deux fois moins cher qu'en Europe, et d'une main d'œuvre également plus compétitive (source IFRI sur statistiques IEA).



Crédit photo : Canon in 2D

Pour les industries présentes en Europe, même si la réduction des coûts est vitale, il est également crucial d'établir de nouvelles stratégies pour sortir d'une guerre des prix qui leur serait fatale. En parallèle des fermetures de sites de production engagées depuis 2012, un recentrage vers la chimie de spécialité est observé, avec une course à l'innovation pour se différencier par la fonctionnalité.

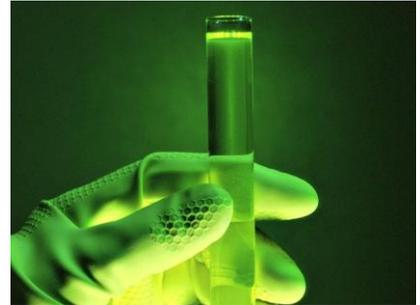
La différenciation environnementale, explicitée par les principes de la chimie verte, ouvre également de nouvelles opportunités de création de valeur. Elle constitue aujourd'hui l'une des voies explorées pour donner un nouveau souffle à l'industrie chimique européenne, leader des développements dans ce domaine.



LA CHIMIE : UN IMPACT SUR TOUTE L'INDUSTRIE

A la base d'une industrie durable : la chimie verte

Maintenir l'image des produits issus de la chimie auprès des consommateurs finaux est stratégique pour la chimie. C'est particulièrement le cas pour les plastiques, de plus en plus difficilement acceptés. Les préoccupations environnementales des consommateurs s'accroissent, ainsi que les engagements politiques de nombreux pays, y compris émergents.



Au-delà de la chimie, de nombreux secteurs industriels cherchent aujourd'hui à réduire les impacts sur la santé (toxicité) et l'environnement (réchauffement climatique, destruction des écosystèmes) de leurs activités. Or l'impact d'un produit est également dû à celui des matières premières qui le composent. Le poids de la chimie peut donc être important dans les analyses de cycle de vie (voir encadré ci-dessous), les bilans environnementaux, carbone ou l'impact sur les ressources des produits d'autres secteurs. Pour aider ses clients à optimiser leurs impacts, BASF a par exemple développé le Eco-Efficiency Label, pour les produits qui permettent à leurs clients de réaliser des économies d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre.

Répondre à ces nouvelles attentes demande un engagement complet des entreprises de la chimie, depuis les entités les plus proches des clients qui doivent affiner leur compréhension des attentes à venir (marketing, communication...) jusqu'aux départements impliqués dans la priorisation des axes de développement (Stratégie, Innovation, R&D...). Dans le cas des acteurs de la chimie qui ne sont pas confrontés directement aux utilisateurs des produits finaux, les approches B2B2C se multiplient. Elles peuvent être impulsées par les initiatives d'autres secteurs pour améliorer, avec leurs fournisseurs, l'impact global de leurs produits : luxe, alimentation, santé, cosmétique...

Focus : L'ACV, pour quantifier l'impact de la chimie sur le bilan environnemental d'autres secteurs

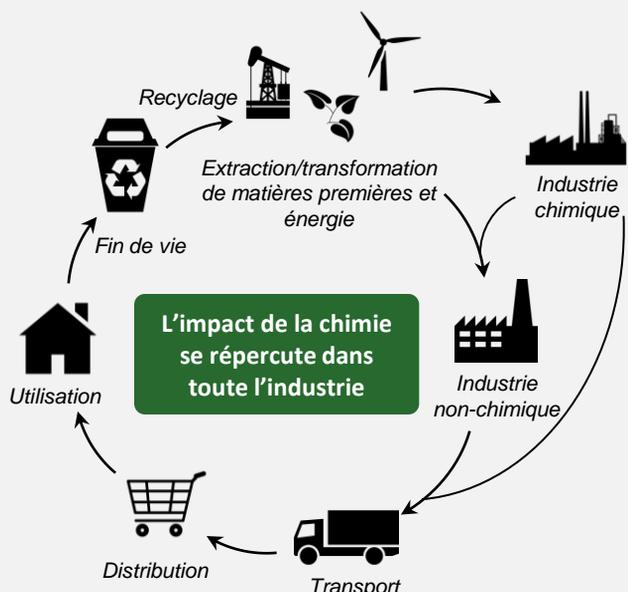
L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode de quantification des effets potentiels sur l'environnement d'un service ou d'un produit depuis l'extraction des matériaux nécessaires à son élaboration jusqu'aux filières de fin de vie.

Effectuer l'ACV d'un produit revient à dresser son profil environnemental en prenant en compte l'ensemble des intrants (matières premières, énergie, etc.) et sortants (rejets, déchets, etc.) entrant en jeu dans sa vie.

L'impact d'un produit prend ainsi en compte les impacts liés à sa fabrication et à son usage, mais aussi ceux des éléments et matériaux qui le composent, leur origine et les impacts liés à leur production.

Vouloir améliorer l'impact environnemental de ses produits, c'est aussi devoir améliorer les impacts de l'ensemble des chaînes amont, en particulier par l'implication des fournisseurs dans la démarche d'amélioration environnementale.

Pour les chimistes, c'est l'opportunité de se différencier en proposant de manière proactive des intrants durables à leurs clients.



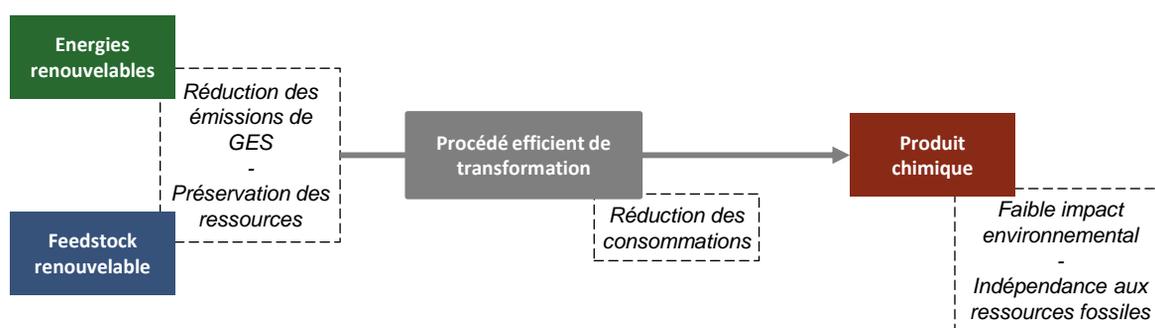
Crédits Pictogrammes : the Noun Project

LA CHIMIE VERTE



Concepts de la chimie verte

Le concept de « chimie verte », né aux États-Unis au début des années 1990, propose un nouveau paradigme pour répondre à la demande croissante de produits issus de la chimie tout en préservant les ressources de matières premières indispensables et en minimisant les impacts négatifs sur l'homme et son environnement. En 1991, l'EPA (Environment Protection Agency) définissait la chimie verte, dont les 12 principes sont énumérés ci-contre, comme « *la conception de produits et de procédés chimiques permettant de réduire ou d'éliminer l'utilisation et la synthèse de substances dangereuses pour l'homme comme pour l'environnement* ».



Eco-conception d'un produit chimique



L'énergie et le carbone pour la chimie verte

Parmi les axes de la chimie verte, les plus importantes avancées ont concerné la réduction de la toxicité et de la dangerosité des produits, tirées notamment par l'évolution des réglementations (par exemple REACH en Europe ou TSCA aux US). Des progrès incrémentaux ont également été réalisés sur les dimensions énergie et carbone, mais avec d'importants potentiels d'amélioration résiduels.

Depuis plusieurs années, inclure les dimensions énergie et carbone dans les démarches d'innovation des industriels et équipementiers de la chimie devient un enjeu stratégique, et une opportunité pour l'Europe de capitaliser sur son avance en matière de chimie verte.

Deux axes, développés dans cette publication, sont plus particulièrement scrutés par les acteurs du secteur :

- Agir sur les procédés de transformation avec une réduction du coût lié à la consommation d'énergie fossile :
 - ✓ Sobriété énergétique
 - ✓ Modification des procédés
- Agir sur les intrants par l'intégration de molécules et d'atomes renouvelables, tant pour améliorer l'impact carbone des produits finaux que pour apporter de nouvelles fonctionnalités et ouvrir de nouveaux marchés :
 - ✓ Chimie du végétal
 - ✓ Recyclage
 - ✓ CO₂ comme feedstock
 - ✓ Utilisation des micro-algues

LA CHIMIE VERTE

Les 12 principes de la chimie verte

L'ensemble des enjeux de durabilité de la chimie ont été rassemblés en 12 principes par Paul Anastas et John Warner, avec pour objectif de réduire autant que possible la toxicité et la dangerosité des produits et des procédés chimiques, ainsi que leurs impacts sur l'environnement.

- 1. Prévention des déchets :** Éviter la production de déchets est plus efficace que la gestion et/ou le traitement a posteriori. *Exemples: gaz à effets de serre, formation d'ozone troposphérique et de pluies acides.*
- 2. Économie d'atomes :** Les produits utiles des procédés chimiques devraient contenir le maximum des atomes de la matière utilisée comme réactif pour leur synthèse. *Exemple: l'ibuprofène. La synthèse originale de Boots (1960) en 6 étapes incorpore seulement 40 % des atomes intrants (en masse) dans l'ibuprofène (60 % de déchets). En 1960, BHC a développé un nouveau procédé en 3 étapes d'une efficacité de 77 % (sans compter la valorisation de l'acide acétique co-produit).*
- 3. Réduction des risques liés à la synthèse de produit chimique :** Concevoir des réactions chimiques qui consomment et produisent des substances à faible toxicité. *Exemple : réactifs alternatifs au phosgène pour la synthèse d'uréthane.*
- 4. Réduction de la dangerosité des produits :** Concevoir des substances chimiques actives avec une toxicité réduite. *Exemple: substances alternatives au bisphénol A.*
- 5. Réduction des risques liés à l'utilisation de substances auxiliaires (ex: solvants, agents de séparation) :** Les substances auxiliaires ne devraient pas être utilisées, et lorsqu'elles sont indispensables, elles devraient être inoffensives. *Exemple : utilisation de CO₂ supercritique comme solvant inoffensif.*
- 6. Efficacité énergétique :** Concevoir un système réactionnel dont les besoins en énergie sont réduits. *Exemple: Réduire les écarts de pression et température entre le milieu réactionnel et les conditions ambiantes.*
- 7. Utilisation d'intrants renouvelables :** Les intrants utilisés devraient être d'origine renouvelable plutôt qu'issus de ressources limitées. *Exemple : utilisation de biomasse dans les bioraffineries.*
- 8. Réduction des déviations du schéma de synthèse :** Un schéma réactionnel court permet de réduire les consommations de réactifs et la production de résidus. *Exemple : synthèse directe de pénicilline par voie enzymatique plutôt que par voie chimique indirecte.*
- 9. Maximisation de l'utilisation de catalyseurs (plus économiques que les réactifs stœchiométriques) :** La voie catalytique permet de réduire la consommation de substances et la production de déchets. *Exemple : réduction de la consommation de solvants et de la production de déchets organiques en chimie fine.*
- 10. Conception de produits se dégradant après leur utilisation :** La dégradation d'un produit après son usage réduit sa toxicité sur son environnement. *Exemple: utilisation de sulfonates d'alkyle linéaire pour les détergents biodégradables.*
- 11. Monitoring des réactions en temps réel :** Prévenir la formation de substances dangereuses par le contrôle en temps réel des procédés réactionnels. *Exemple: Développement de la chimie analytique pour le suivi des procédés réactionnels.*
- 12. Amélioration de la sécurité industrielle :** Minimiser les risques d'accident (incendies, fuites, explosions, accidents chimiques) par le choix des substances utilisées et de leur forme. *Exemple : l'utilisation d'ammoniaque à basse température permet de réduire sa volatilité et donc les risques liés à sa toxicité.*

AMÉLIORER LES PROCÉDÉS



La sobriété énergétique

Réduire les coûts de production est depuis de nombreuses années une condition clef de la compétitivité de la chimie européenne. Parmi les leviers d'économie possibles, les démarches d'efficacité énergétique font partie depuis longtemps de la feuille de route de la plupart des directions industrielles du secteur. L'acuité renouvelée de la concurrence internationale pousse aujourd'hui à chercher de nouvelles sources d'économie.

Investir spécifiquement pour réduire la consommation énergétique reste délicat; en revanche des améliorations considérables peuvent être atteintes en intégrant dès l'amont des critères de performance énergétique et environnementale pour toutes les décisions d'investissements dans de nouvelles capacités de production ou des opérations de modernisation. En plus des économies réalisées sur l'énergie, les réductions d'émissions de gaz à effet de serre permettent, dans certains cas à elles seules, de justifier les surcoûts d'investissements responsables.

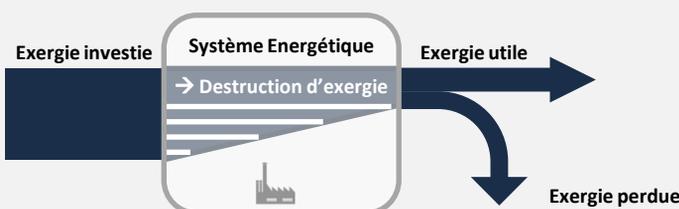


L'approche Système / Secteur pour redynamiser l'efficacité énergétique

Pour créer une nouvelle rupture alors que la majorité des secteurs ont atteint un seuil dans la course aux économies d'énergie, ENEA a mis au point une double approche système/secteur :

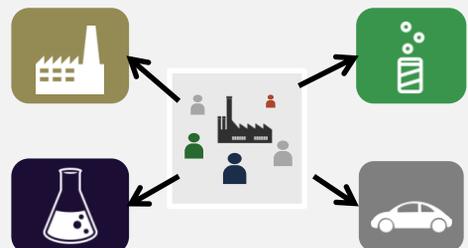
Approche systémique

Décomposition puis intégration systémique des chaînes procédés par l'étude des pertes exergétiques (voir publication ENEA sur L'exergie)



Approche trans-sectorielle

Diffusion de l'information entre les secteurs sur les technologies transverses et les utilités



AMÉLIORER LES PROCÉDÉS



Améliorer les voies de transformation : faisabilité, compétitivité, durabilité

Les procédés chimiques doivent évoluer vers plus de sobriété, mais aussi plus de flexibilité, plus de modularité et l'intensification de leur fonctionnement pour faire face à des contraintes changeantes. Les défis dans la conception des usines du futur à même de répondre à une demande de plus en plus variable (volume et types de produits), tout en tolérant une plus grande diversité d'intrants (y compris végétaux ou recyclés) sont techniques (faisabilité) mais aussi économiques (compétitivité) et environnementaux (procédé propre). L'exemple du développement des biocarburants illustre cette triple exigence :

1. La 1^{ère} génération de biocarburants est faisable techniquement mais peu viable économiquement et s'est avérée avoir un bilan environnemental controversé;
2. La 2^{ème} génération vise justement à obtenir un meilleur bilan environnemental, au prix d'un surcoût élevé;
3. La mise au point des biocarburants de 3^{ème} génération vise à optimiser l'ensemble des enjeux, avec une meilleure productivité et un impact réduit sur les ressources (y compris les ressources alimentaires).

Ce constat est particulièrement vrai pour la biochimie, dont les coûts doivent être diminués pour entrer en compétition avec les voies traditionnelles sur les marchés les plus importants. Parmi les pistes de recherche on peut citer :

- La valorisation de la lignine (30 % de la masse de biomasse et 40 % de sa valeur énergétique) au-delà de la production d'énergie par combustion, en particulier par le développement de procédés multi-produits. La structure moléculaire est compatible avec une conversion en fibres de carbone, adhésifs, résines, aromatiques et autres produits chimiques dont la valeur ajoutée cumulée est cruciale pour la rentabilité des bioraffineries.
- Le développement d'enzymes plus efficaces, plus robustes et permettant la valorisation d'un spectre plus large de molécules présentes dans la biomasse.
- La structuration de la filière pour réduire les coûts de transport induits par l'approvisionnement en intrants.

Plus généralement dans le secteur de la chimie, des projets de développement d'usines modulaires et flexibles, comme CoPIRIDE ou F³ Factory, financés au niveau européens, cherchent à répondre à ces exigences.



Focus : le biogaz pour la chimie verte

Par analogie avec les matières fossiles en chimie traditionnelle, la biomasse représente pour la chimie verte une source d'énergie et une ressource moléculaire pour la synthèse des produits. Les producteurs de biogaz, en alimentant les réseaux en gaz vert, approvisionneraient aussi bien l'ensemble des consommateurs pour leurs besoins énergétiques que les chimistes pour leurs besoins en feedstock avec un intrant d'origine renouvelable.

Le biogaz se développe rapidement en Europe, non seulement en Allemagne où l'on compte déjà plus de 7 000 unités de méthanisation mais également en France : le Ministère de l'Ecologie (MEDDE) a lancé en juin 2014 d'un appel à projets pour le développement de 1 500 méthaniseurs d'ici 3 ans.

La chimie sur base biogaz pourrait ainsi devenir une alternative durable à la chimie sur base gaz, favorisée par l'exploitation des gaz de schiste. Le principal obstacle à son développement est lié à la faible réactivité de la molécule de méthane, là où les gaz de schiste offrent l'opportunité d'utiliser de l'éthane et d'autres frac-

tions gaz à plus longue chaîne carbonée. Des procédés sont en cours de développement pour y remédier, par exemple en favorisant l'activation du méthane pour produire de l'éthylène (exemple de la start-up californienne Siluria) ou en bloquant la réaction de méthanisation pour obtenir un mélange de chaînes carbonées.



Installation de production et injection réseau de biogaz à Falkenberg en service depuis 2009 (ENEA Consulting)

LA CHIMIE DU VÉGÉTAL



Les biofeedstocks, une opportunité de différenciation par la fonctionnalité

Les bénéfices environnementaux de la chimie du végétal viennent en premier lieu du remplacement des feedstocks à forte empreinte environnementale, en particulier fossiles, par des intrants renouvelables. En plus de produits aussi courants que le bioéthanol, il existe aujourd'hui de nombreux produits biosourcés, et dont les usages sont tout à fait communs. On peut citer par exemple l'utilisation d'algues pour la cosmétique, la transformation d'amidon et d'huiles pour la formulation de détergents, la synthèse de bioplastiques pour le packaging, l'automobile, le sport, etc.

En 2010, 8 % des matières premières en France étaient végétales (ADEME, 2011), soit 50 Mt hors biocarburants (IEA). L'industrie chimique française s'est engagée à porter la part de matières premières renouvelables à 15 % en 2017.

Les coûts des biofeedstocks rendent délicate à court terme la simple substitution des produits issus de la chimie traditionnelle à iso-fonctionnalité, même si un premium peut parfois récompenser la plus-value environnementale pour certains marchés sensibles (agro-alimentaire, infantile, etc). Les caractéristiques de certains matériaux ou molécules issus de la chimie du végétal peuvent en revanche présenter des propriétés différenciantes, offrant ainsi des opportunités de développement de nouveaux produits.

Parmi les biopolymères connaissant la plus forte croissance actuellement on peut citer le PLA (acide polylactique), polymère thermoplastique biodégradable sur lequel des entreprises comme TOTAL développent des activités. Le PLA est issu de la polymérisation de sucres et de lipides et offre des propriétés de biodégradabilité et biocompatibilité recherchées dans les secteurs du packaging et de la santé : sa dégradation en acide lactique lui permet d'être utilisé aussi bien pour des applications médicales intra-corporelles (implants temporaires) que pour des applications agricoles (films agricoles, sacs de compost...). Le PHA (polyhydroxyalkanoate) est un autre biopolymère également en cours de développement, notamment pour proposer une alternative thermorésistante au PLA.



Focus : la chimie du végétal, une existence réelle aujourd'hui. L'exemple de l'acide succinique

L'acide succinique est une molécule plateforme utilisée dans la synthèse d'une large variété de produits chimiques, en particulier des détergents et des plastiques biodégradables. Il est également utilisé comme additif de contrôle d'acidité dans certains aliments et médicaments, ainsi que dans le vin où il est déjà naturellement présent. Sa synthèse est historiquement basée sur l'utilisation de pétrole et de gaz naturel.

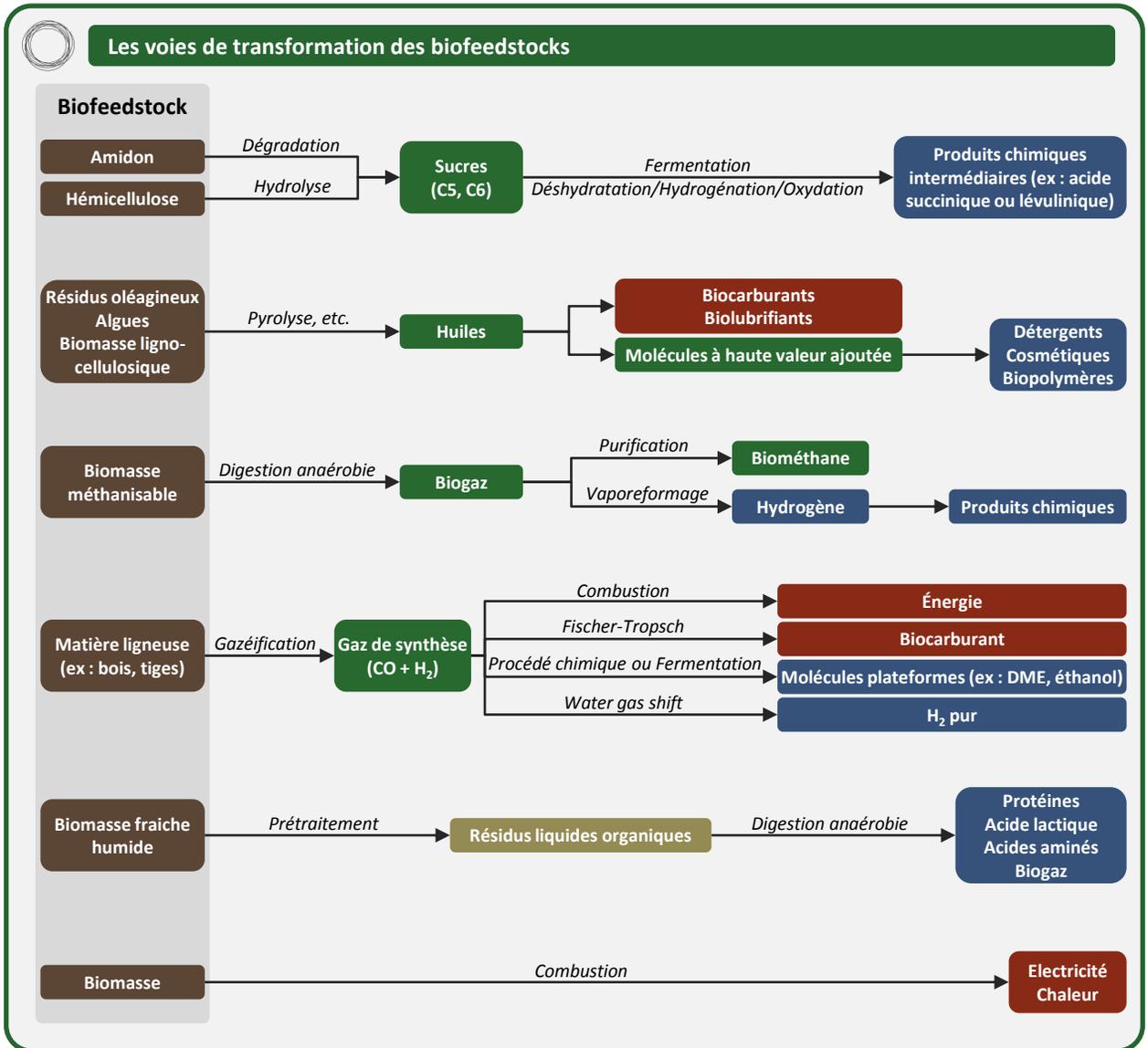
L'acide succinique a été identifié par le Department of Energy (USA) parmi les 10 molécules plateformes les plus prometteuses produites à partir de carbohydrates.

L'entreprise Roquette, en partenariat avec DSM, a mis au point un bioprocédé de synthèse d'acide succinique par fermentation de glucose issu d'amidon en présence de CO₂ et de levure. En 2013, la joint venture Reverdia issue de ce partenariat a mis en service en Italie la plus grande usine au monde d'acide succinique biosourcé (10 000 tpa) de manière à répondre à la forte croissance du marché attendue entre 2010 et 2020 (ADEME, 2011).



Crédit photo : Uncalno Tekno

LA CHIMIE DU VÉGÉTAL



LA CHIMIE DU VÉGÉTAL



Les bioraffineries

Le concept de bioraffinerie reprend la philosophie du raffinage des produits pétroliers : extraire d'un produit brut toutes les molécules valorisables et minimiser les résidus. A partir d'une source biomasse il est en effet théoriquement possible de produire simultanément des produits chimiques à haute valeur ajoutée (HVA), des carburants et de l'énergie, chaleur ou électricité.

La 1^{ère} génération de bioraffineries est fondée sur l'utilisation de la biomasse sucrière (canne à sucre), amidonnière (maïs), ou oléagineuse (huile végétale). Elle représente aujourd'hui près de 95 % du parc des bioraffineries et environ 1400 installations, mais avec un bilan environnemental aujourd'hui critiqué du fait de la concurrence de l'usage des sols, par exemple avec l'alimentation.

La 2^{ème} génération permet l'usage des résidus lignocellulosiques de la biomasse (molécules polymères fibreuses du bois et des tiges de végétaux) pour y remédier. Les voies de conversion mises en jeu (gazéification, réactions enzymatiques, etc.) sont toutefois plus complexes à mettre en œuvre, et cette filière est encore en développement.

Le parc actuel de bioraffineries est principalement destiné à la production de molécules plateformes pouvant mener aux mêmes produits chimiques et carburants qu'avec les filières pétrosourcées. Cette approche présente l'intérêt de fabriquer des produits chimiques biosourcés identiques aux produits pétrosourcés et pouvant ainsi les substituer.

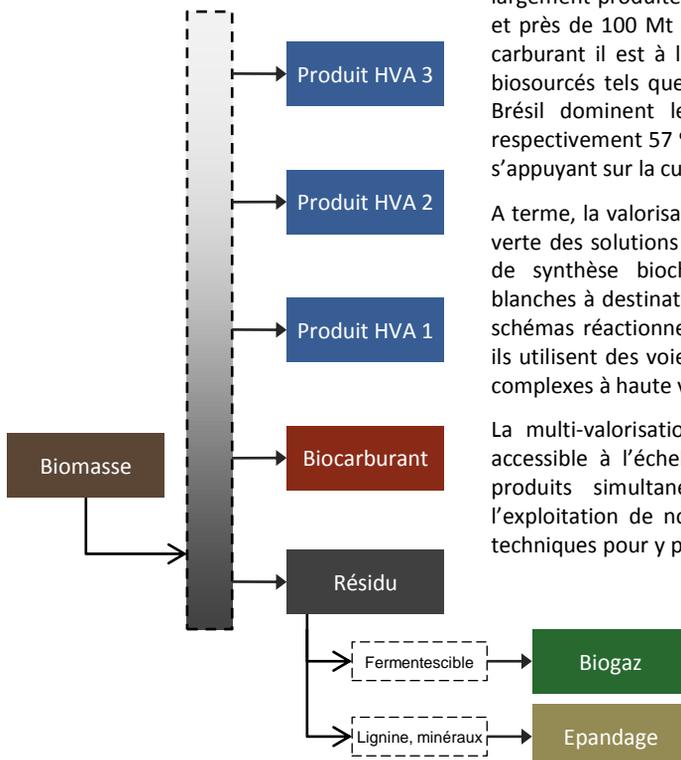


Bioraffinerie de Pomacle-Bazancourt (source : Pôle IAR)

Le bioéthanol, molécule plateforme pour le secteur de la chimie ou molécule finale pour la synthèse de carburant est la molécule la plus largement produite par les bioraffineries (867 kt en 2012 en France, et près de 100 Mt dans le monde). Outre une très forte utilisation carburant il est à la base de la synthèse de nombreux polymères biosourcés tels que le PVC et le polyéthylène. Les États-Unis et le Brésil dominent le marché de production de bioéthanol avec respectivement 57 % et 27 % de la production mondiale en 2013, en s'appuyant sur la culture du maïs et de la canne à sucre.

A terme, la valorisation optimisée des intrants doit offrir à la chimie verte des solutions compétitives avec la chimie classique. Les voies de synthèse biochimiques, et notamment les biotechnologies blanches à destination de l'industrie, peuvent mettre en œuvre des schémas réactionnels compétitifs avec les voies pétrosourcées, car ils utilisent des voies plus directes pour la production de molécules complexes à haute valeur ajoutée.

La multi-valorisation de la biomasse n'est toutefois pas encore accessible à l'échelle industrielle. La capacité d'extraire plusieurs produits simultanément est la clef de la rentabilité pour l'exploitation de nombreuses sources de biomasse, mais les défis techniques pour y parvenir restent nombreux.



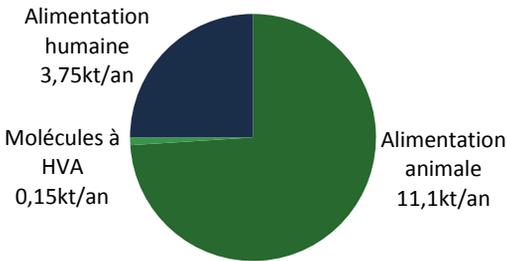
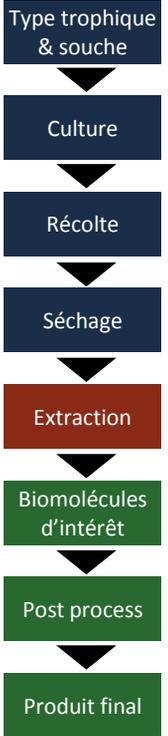
Principe de multi-valorisation au sein d'une bioraffinerie

LA CHIMIE DU VÉGÉTAL



Les micro-algues

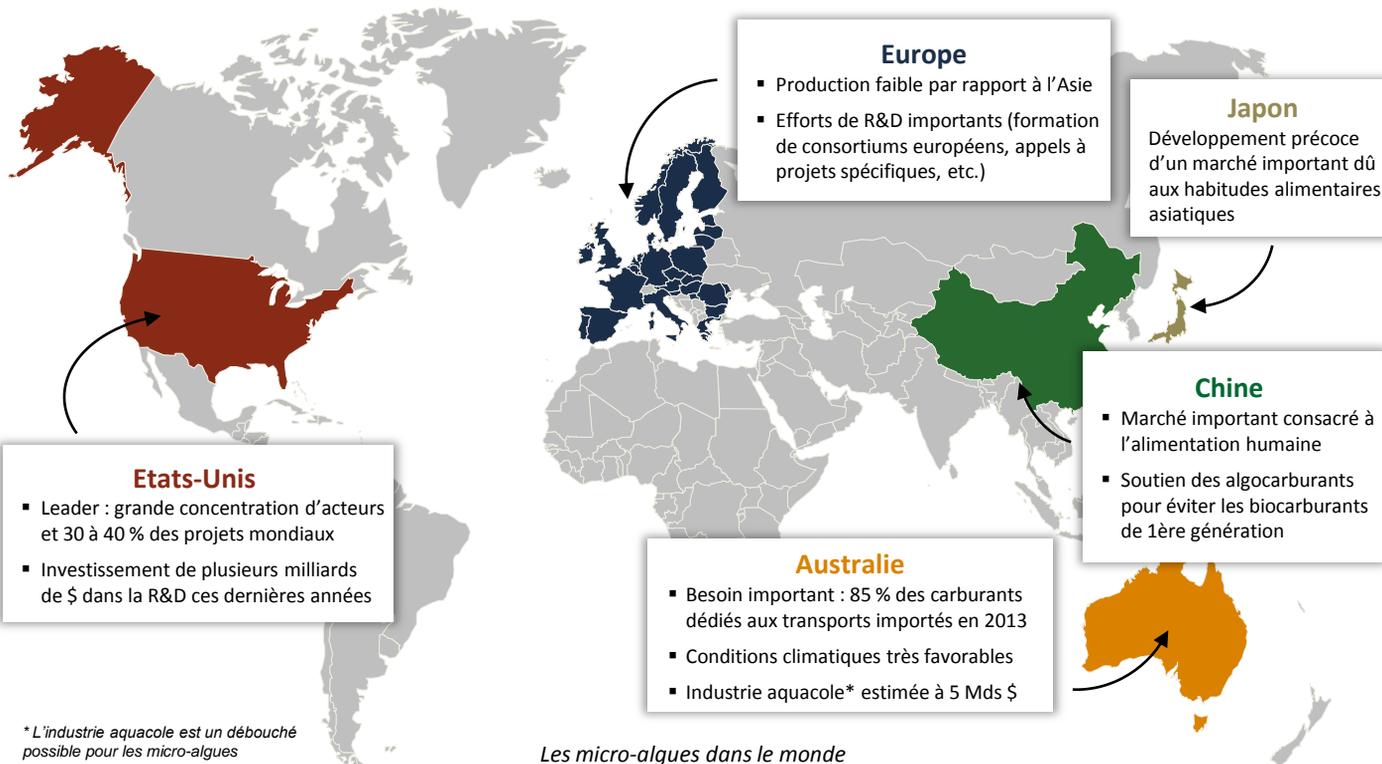
Les micro-algues, grâce à leur capacité à produire des molécules complexes par des mécanismes biologiques, offrent des opportunités croissantes pour la production de molécules valorisables par la chimie. Leur culture est une des principales voie de valorisation du CO₂, qu'elles utilisent pour se développer, avec à la clef une amélioration du bilan environnemental des molécules produites par rapport aux procédés classiques. D'importants efforts de R&D sont réalisés aujourd'hui pour développer la production de nouvelles molécules, avec déjà une existence industrielle réelle dans les domaines de l'alimentation humaine et animale (15 kt/an).



Marchés des micro-algues dans le monde
(Volume total : 15 kt/an - 2010)

Après les premiers développements dans les années 70, de nouveaux efforts sont faits depuis les années 2000 pour produire des biocarburants à partir de micro-algues. Les micro-algues représentent en effet un gisement de biomasse doté d'une productivité surfacique supérieure aux plantes terrestres. Les coûts de production très élevés et des impacts en eau importants restent cependant des inconvénients majeurs pour leur développement industriel. De nombreux acteurs ont choisi de réorienter leurs efforts vers la production de produits à plus haute valeur ajoutée (HVA), ou une co-valorisation HVA et biocarburants, pour une meilleure rentabilité.

La superposition des complexités de l'agronomie (pour la culture) et de la chimie (pour l'extraction des molécules) rendent les développements d'autant plus difficiles (voir ci-contre). Des travaux conjoints entre les acteurs de ces deux mondes sont aujourd'hui réalisés, les acteurs de la chimie ne souhaitant pas forcément intégrer les compétences amont de culture, récolte et pré-traitement de la biomasse.



* L'industrie aquacole est un débouché possible pour les micro-algues (alimentation animale)

Les micro-algues dans le monde

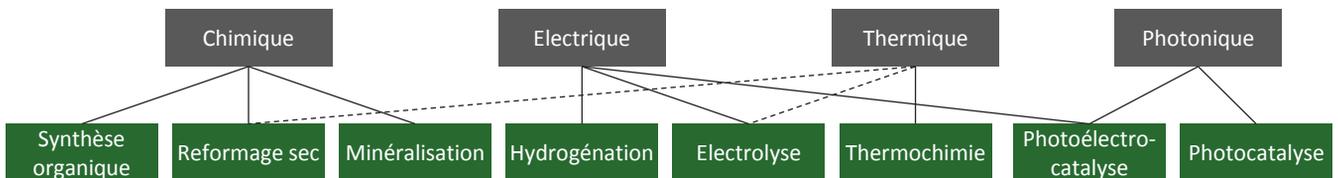
LE CO₂ COMME FEEDSTOCK POUR LA CHIMIE



L'utilisation du CO₂, alternative au stockage géologique

La réduction des émissions de CO₂ à l'atmosphère est l'un des éléments clefs dans la lutte contre le réchauffement climatique. Le captage de CO₂ sur procédé industriel s'est développé dans cette optique, tiré par la promesse d'un prix attractif de la tonne de CO₂ sur les marchés (EU-ETS en Europe). Seul le stockage géologique présente des échelles de stockage compatibles avec les volumes de CO₂ anthropogéniques, mais la promesse d'une disponibilité croissante de ce gaz a soulevé de nouvelles réflexions sur les opportunités de valorisation. Avec les contraintes liées à l'acceptation sociétale des projets de CCS (Carbon Capture and Storage) et un affaiblissement de la volonté politique sur le carbone suivi en 2012 par l'effondrement du marché du carbone EU-ETS, un recentrage s'est opéré du CCS vers le CCU (Carbon Capture and Use).

Parmi les voies d'utilisation du CO₂ actuellement en développement, la valorisation chimique et l'exploitation des algues suscitent beaucoup d'intérêt. Pour l'industrie chimique, utiliser le CO₂ comme intrant pour la production de molécules carbonées ou de polymères pourrait permettre d'améliorer l'impact carbone des produits, de réduire la dépendance aux ressources fossiles, voire de développer de nouveaux produits pour de nouveaux usages.



Différents procédés de valorisation chimique du CO₂ et les sources d'énergie utilisées



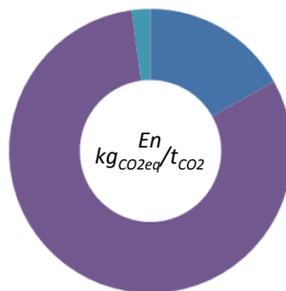
La valorisation chimique du CO₂, un atout environnemental ?

L'empreinte carbone du CO₂ valorisé dans un procédé est rarement nulle : utiliser du CO₂ émet du CO₂. Les étapes de captage et de transport en amont de son utilisation sont elles-mêmes émettrices de CO₂. De plus, le CO₂ est une molécule particulièrement stable, son niveau d'énergie et sa réactivité sont très faibles. La transformation du CO₂ en un produit utile nécessite de l'énergie qui n'est pas systématiquement issue de sources renouvelables et contribue à l'empreinte carbone du procédé. Lors de la synthèse de méthanol par hydrogénation par exemple, si le bilan CO₂ reste positif, seuls 530 kg/t de CO₂ valorisé serait réellement évité (étude ADEME, modélisation par ENEA, scénario nominal).

Au-delà de ce bilan intrinsèque, la mesure environnementale complète du développement d'une filière CO₂ est donnée par la différence avec le bilan CO₂ du produit issu des voies conventionnelles. La production conventionnelle de méthanol émet en moyenne 650kg_{CO2}/t : l'impact global positif de la filière CO₂ est donc de 1 180 kgCO₂/t.

Empreinte CO₂ du procédé 470

Captage CO ₂	80
Transport CO ₂	~0
Eau entrante	0
Production H ₂	380
Conditionnement H ₂	10
Hydrogénation directe du CO ₂	0



L'empreinte carbone du réactif substitué par le CO₂ peut contribuer fortement à l'impact final du procédé. La synthèse organique de polycarbonates de polyols à partir de CO₂ permet par exemple de réduire la consommation d'époxyde, réactif du procédé à forte empreinte carbone.

Un raisonnement global de type « analyse de cycle de vie » est donc primordial pour percevoir l'impact réel sur le changement climatique de l'utilisation de CO₂ en chimie.

Empreinte CO₂ de l'hydrogénation du CO₂

(source : étude ADEME, scénario nominal, modélisation par ENEA)

LE CO₂ COMME FEEDSTOCK POUR LA CHIMIE



La chimie, un débouché privilégié de la valorisation du CO₂

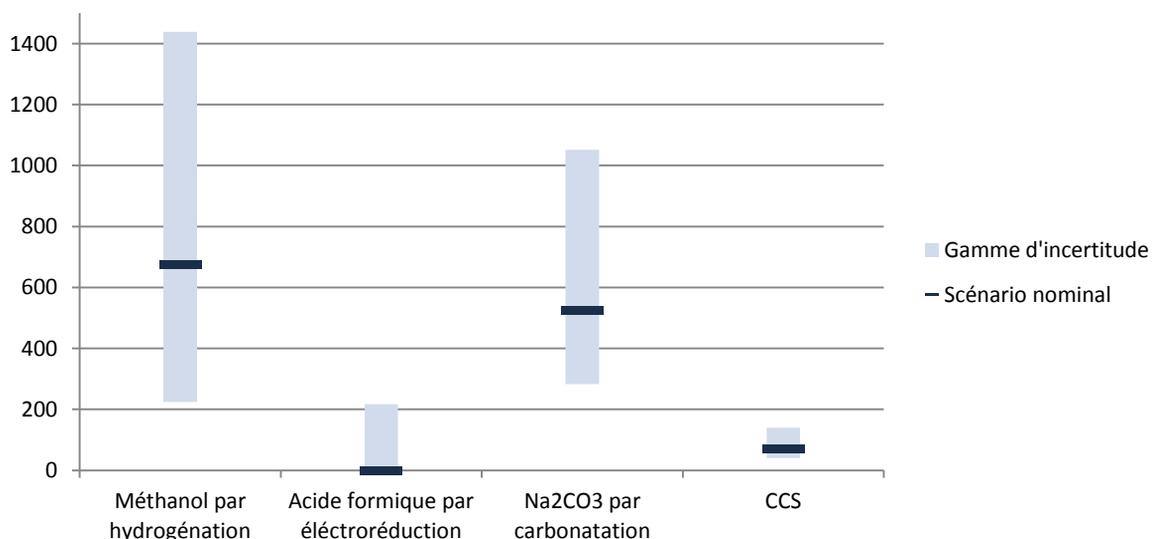
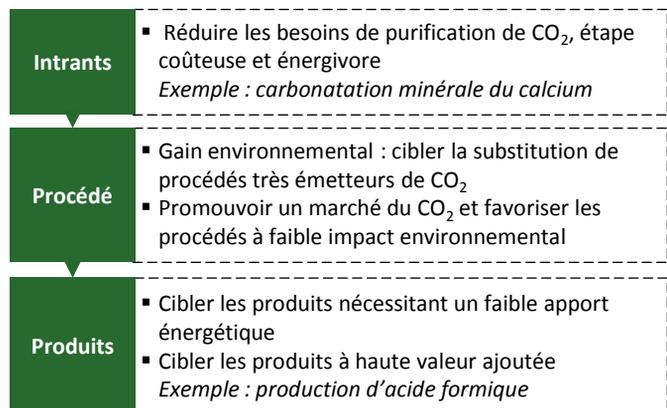
Le marché de l'énergie et des carburants pourrait représenter un débouché de masse pour la valorisation du CO₂ (de l'ordre de la GtCO₂/an). Cependant, la faible valeur ajoutée du produit final et son coût de production à partir du CO₂ élevé (en termes d'énergie notamment) ne permettent pas d'atteindre la viabilité économique avec les technologies disponibles actuellement.

Il semble pertinent de privilégier les routes de valorisation du CO₂ délivrant des produits à faible « niveau énergétique » et à prix de marché élevé, tout en ayant conscience que ces choix se font généralement au détriment de l'impact CO₂, vu la taille plus limitée des marchés concernés ; c'est toutefois une contribution non négligeable que la chimie peut apporter aux efforts globaux de l'industrie.

Une modélisation réalisée par ENEA pour le compte de l'ADEME montre que les conditions techniques et économiques ne sont encore que rarement suffisantes pour valoriser chimiquement le CO₂. Équilibrer coûts de production à partir du CO₂ et prix marché demanderait une valorisation du CO₂ évité difficilement envisageable à moyen terme (voir figure ci-dessous).

La production d'acide formique à partir de CO₂ issu d'épuration du biogaz se détache toutefois comme une option potentiellement rentable dès aujourd'hui.

Améliorer la viabilité économique de la chimie du CO₂



Valeur de CO₂ requise pour équilibrer sur la filière coût de production et prix marché pour 3 procédés de CCU et comparaison avec le CCS, en €/t_{CO₂} (source: étude ADEME, modélisation par ENEA)

LE RECYCLAGE



L'enjeu de la recyclabilité

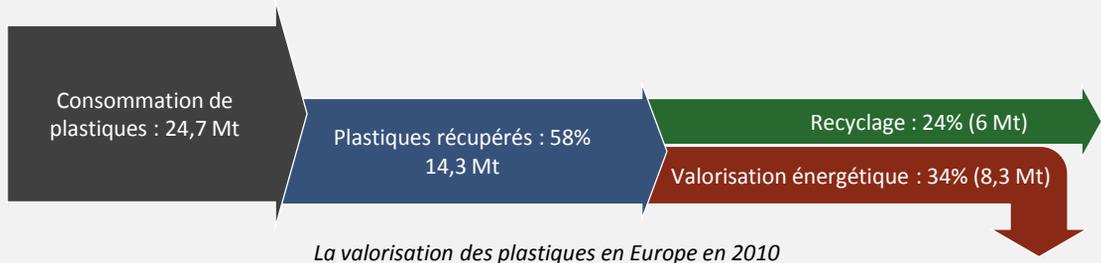
La capacité à garder un haut niveau de qualité au cours des cycles de recyclages successifs fait partie des fonctionnalités de plus en plus recherchées dans le développement de nouveaux matériaux : il s'agit de concevoir dès l'origine un matériau conçu pour être recyclé à iso-fonctionnalité, ce qui n'était pas le cas jusqu'à présent.

L'ensemble de la chaîne de production doit être pris en compte pour optimiser la valeur et les coûts du recyclage : les enjeux d'identification, de tri et de pureté des déchets plastiques en entrée des procédés de recyclage jouent un rôle prépondérant dans la pureté des produits en sortie.



Focus : les voies de valorisation et de recyclage des matières plastiques

Le recyclage est également une voie possible pour réduire l'impact environnemental des produits issus de la chimie, en particulier les matières plastiques, biosourcées ou pétrosourcées. Environ un quart seulement des plastiques sont recyclés aujourd'hui en Europe.



Le recyclage mécanique est aujourd'hui le mode de recyclage le plus utilisé. Une dégradation des propriétés est inévitable, en particulier dans le traitement des thermofusibles, mais le coût abordable des procédés concernés a permis le développement de solutions économiques de valorisation matière. On peut citer les exemples du polyéthylène terephthalate (PET) qui compose les bouteilles en plastique, transformé en fibres synthétiques (utilisées pour les vestes polaires notamment), ou du polyéthylène (PE) qui peut être recyclé pour des applications dégradées (les sacs poubelles notamment).

Le recyclage chimique, qui consiste à dépolymériser les plastiques pour reformer les monomères, permettrait de produire des plastiques recyclés avec des propriétés équivalentes à celles des matériaux vierges, mais nécessite des procédés souvent plus complexes et coûteux.

Ces deux modes de recyclage nécessitent un tri des déchets, étape particulièrement coûteuse et énergivore. Des systèmes de tri à la source permettraient de réduire en amont les coûts associés, et lever ainsi l'un des principaux freins économiques au recyclage.

Lorsque le recyclage n'est pas possible (car trop complexe ou coûteux), la voie la plus couramment utilisée aujourd'hui est la valorisation énergétique (combustion). Des alternatives susceptibles de mieux valoriser ces matériaux se développent, telle la production d'huile de synthèse (syncrude) sur base plastique, tirée par des start-ups comme Cynar (UK), Envion (USA) ou JBI (USA). Ces procédés de craquage thermique permettent de faire face à la complexification croissante des plastiques (mélanges, composites...) en nécessitant moins de tri en amont.

ETAT DES LIEUX AUJOURD'HUI



Ce qu'il faut retenir

La chimie européenne est en pleine mutation, du fait du renforcement extrêmement rapide de la concurrence américaine et asiatique sur les produits de commodité. L'exploitation des gaz de schiste offre en particulier aux entreprises présentes sur le sol américain des coûts de l'énergie particulièrement faibles, ce qui renforce d'autant leur compétitivité dans un secteur très énergivore.

La chimie verte, et plus particulièrement la prise en compte des enjeux énergie et carbone, offre plusieurs opportunités de compétitivité et de différenciation. Des efforts significatifs sont encore nécessaires pour développer techniquement les solutions correspondantes, ainsi que pour nouer les liens nécessaires avec les partenaires et les clients de ces nouvelles solutions pour les rendre économiquement viables. Ces efforts sont aujourd'hui motivés par une situation globale qui pousse les acteurs européens à chercher des solutions de rupture.

Réduire les coûts

Le premier levier est la réduction de la consommation énergétique. La plupart des industriels de la chimie ont déjà mis en place des mesures d'efficacité énergétique, mais il est possible de trouver de nouveaux gisements via :

- La reconception de procédés, voire de sites industriels complets, via des analyses systémique et exergétiques;
- Le transfert de technologies depuis les secteurs énergivores les plus avancés en termes d'efficacité énergétique, en particulier pour les utilités et les technologies transverses.

Améliorer l'empreinte environnementale

La plus-value environnementale est l'une des pistes explorées pour différencier les produits et se maintenir sur les marchés sensibles, où les surcoûts peuvent être répercutés sur les prix finaux. La réduction de la consommation énergétique induit *de facto* une amélioration du bilan carbone du secteur de la chimie. Toutefois les hydrocarbures, principalement d'origine fossile, sont aussi l'une des principales sources de matière première : le biosourcing des intrants offre de nouvelles opportunités pour améliorer encore l'impact environnemental des produits issus de la chimie, et ainsi proposer aux clients finaux des solutions en accord avec leurs attentes de plus en plus marquées dans ce domaine. L'exploitation de micro-algues et la valorisation du CO₂ comptent parmi les voies de développement explorées aujourd'hui.

Accroître la création de valeur par la fonctionnalité

Le biosourcing présente encore de forts enjeux économiques, en particulier face aux intrants traditionnels. La concurrence frontale avec les produits d'origine classique est donc rarement possible aujourd'hui. Cependant les propriétés particulières des molécules biosourcées permettent de développer des produits aux fonctionnalités nouvelles, difficiles voire impossibles à réaliser économiquement par les voies traditionnelles : ce sont ces premiers marchés qui ouvrent aujourd'hui la voie à la chimie du végétal.

Au-delà de la chimie, un enjeu pour l'ensemble de l'industrie

Les produits issus de la chimie sont des intrants incontournables pour de nombreux secteurs industriels, et sont donc partie intégrante des impacts environnementaux des produits finaux. Pour ces secteurs industriels, l'évolution de leur empreinte carbone passe donc en partie par celle de leurs fournisseurs du secteur de la chimie : leur volonté d'amélioration, portée par les attentes des consommateurs finaux et les contraintes réglementaires, est un facteur clef pour inciter l'industrie chimique à évoluer dans ce sens. De plus, comme pour de nombreuses innovations dans les secteurs des matériaux, les partenariats entre les chimistes et les potentiels utilisateurs de leurs produits seront sans doute déterminants.

POUR EN SAVOIR PLUS :

ENEA Consulting : étude ADEME sur la [valorisation chimique du CO₂](#)

ENEA Consulting : étude ADEME du [potentiel en ressources algales pour l'énergie et la chimie en France à horizon 2030](#)

Anastas, P. T.; Warner, J. C. Green Chemistry: Theory and Practice, Oxford University Press: New York, 1998, p.30. By permission of Oxford University Press

Suschem France : Feuille de route, avec la DGCIS et l'UIC

IEA : Biobased chemicals, value added products from biorefineries

IFRI : Impact du développement du gaz de schiste aux Etats-Unis sur la pétrochimie européenne, 2013

Auteurs : Louis-Marie Jacquelin, Jacques de Bucy, Alexis Caujolle

Nous sommes :

- ▶ Une **société de conseil indépendante**, créée en 2007, forte d'une **équipe de 25** consultants, experts, entrepreneurs et chefs de projets, intervenant partout dans le monde
- ▶ Spécialisée sur la **transition énergétique et le développement durable** de la stratégie à la mise en œuvre

NOTRE OFFRE :



- ▶ Prospective énergétique, environnementale et sociale
- ▶ Conseil stratégique / investissements sur les nouvelles filières de l'énergie
- ▶ Veille : Innovation, Marchés, Energie
- ▶ Soutien à la structuration de programmes de R&D / Innovation
- ▶ Etudes technico-économiques, études de marchés
- ▶ Marketing technologique, construction d'offres, Green Portfolio
- ▶ Projets Energie : AMO, recherche de partenaires et de financements
- ▶ Cartographie/ scouting : technologies, start-ups
- ▶ Gestion de parties prenantes et acceptation sociétale
- ▶ Expertise et formation

NOS EXPERTISES :



- ▶ Oil & Gas, marchés électricité
- ▶ Efficacité énergétique
- ▶ Valorisation de déchets
- ▶ Stockage d'énergies, H₂
- ▶ Bioénergies, biogaz, algues



- ▶ Captage, stockage, valorisation du CO₂
- ▶ Usine du futur / usine sobre
- ▶ Ecologie industrielle
- ▶ Performance environnementale
- ▶ Acceptabilité sociale

ILS NOUS FONT CONFIANCE :

<p>Producteurs, distributeurs</p> 	<p>Consommateurs</p> 	<p>Equipementiers, Ingénieries</p> 
<p>Investisseurs</p> 		<p>Institutionnels, recherche</p> 

ENEAA Access, programme dédié à l'accès à l'énergie dans le Monde



- ▶ Programme pro-bono au profit d'ONG et d'entrepreneurs sociaux : 2000+ jours, 50+ missions, 20+ pays – 10% du temps des équipes
- ▶ Conseil spécialisé pour le compte d'acteurs privés, de bailleurs internationaux, de gouvernements et de sociétés nationales