

ANALYSE / MAI 2018

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

Enjeux et contraintes liés à la biomasse comme alternative aux ressources fossiles

Par Jonathan Guévorts

Rédaction:



Ce dossier d'analyse se structure en sept chapitres, pouvant se lire indépendamment les uns des autres. À travers ce dossier, le lecteur aura l'occasion de se forger une opinion sur cette question épineuse : « La chimie de demain sera-t-elle entièrement biosourcée ? »

Ce dossier se veut généraliste et pédagogique. Il vise toute personne qui s'intéresse à la valorisation de la biomasse et à la chimie biosourcée, qu'il soit étudiant, industriel, scientifique ou spécialiste.

Il s'agit d'un exercice prospectif. Son objectif principal est - tout simplement - d'ouvrir le débat et d'identifier de nouvelles pistes de réflexion.

Notons également que cette publication découle d'un travail de synthèse plus consistant, réalisé en mars 2017 dans le cadre de la convention cadre de ValBiom, BioMaSER, financée par la Wallonie.

Remerciements

La réalisation de ce présent dossier, depuis sa réflexion jusqu'à sa concrétisation, a été permise grâce au dynamisme de l'asbl ValBiom¹ et au soutien de son Conseil d'Administration.

Lors de sa rédaction, l'auteur a également pu compter sur les ressources scientifiques précieuses fournies par Fabian Scuvie, conseiller R&D chez essenscia Wallonie.

À propos de l'auteur

Jonathan Guévorts est bioingénieur, philosophe et enseignant.

Chef de projet chez ValBiom de 2013 à 2017, il a mené des recherches sur les alternatives biosourcées à la pétrochimie et sur l'évaluation de leurs impacts environnementaux. Actuellement, il enseigne les sciences.



Les nombreuses sources bibliographiques sont indiquées à même le document au moyen du préfixe "bib.".

1. L'une des missions de l'asbl ValBiom est de se positionner sur des questionnements profonds, d'intérêt collectif et d'actualité.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

Enjeux et contraintes
liés à la biomasse
comme alternative aux
ressources fossiles

1. DÉCRYPTER LES ENJEUX, POSER LES BONNES QUESTIONS

À l'heure actuelle, de nombreux pays adoptent de véritables stratégies nationales ou régionales de développement d'une économie biosourcée en raison du potentiel de ce secteur. Souvent, ces stratégies n'analysent pas de manière holistique la capacité qu'aurait la chimie biosourcée à remplacer la chimie pétrosourcée.

L'objectif de ce dossier est d'apporter une vue d'ensemble sur cette problématique. Notamment, en identifiant les contraintes (techniques, économiques et d'exploitation des ressources) liées à une transition du fossile vers la biomasse comme approvisionnement de l'industrie de la chimie.

In fine, il s'agira de répondre à une question centrale : la chimie de demain sera-t-elle 100 % biosourcée ?

Dans un contexte de dégradation de l'environnement et de raréfaction des ressources fossiles, de nombreux gouvernements ont développé une vision et une stratégie favorisant le développement de leur bioéconomie (entre autres, de leur chimie biosourcée) : les Pays-Bas en 2007, l'Europe en 2012, l'Allemagne et la Flandre en 2013, et dernièrement la France en 2017. Ces stratégies développent un plan d'action comportant quatre thématiques récurrentes : la production durable de biomasse, le développement de la R&D, le soutien de projets de bioraffinage et la stimulation des marchés.

Ces stratégies font le constat que 90% de l'approvisionnement en matières premières de

l'industrie chimique est couvert par le pétrole et le gaz. La question est dès lors de savoir comment diminuer, voire se passer, de ces ressources fossiles ?

Le discours de l'économie biosourcée prend pour acquis l'importance de l'industrie de la chimie pour l'économie. Il part du principe que l'industrie de la chimie organique² est indispensable, et que ce qu'il faut changer, c'est la source de carbone. Finalement, à quel point l'économie actuelle dépend-elle réellement des produits³ provenant de l'industrie de la chimie organique ? Cette question sera abordée dans le **deuxième chapitre**.

2. Chimie organique : chimie de l'élément carbone, que cet élément carbone soit issu de la biomasse ou de ressources fossiles. À opposer à la chimie minérale.

3. Produit chimique organique : produit qui contient l'élément carbone, que cet élément carbone soit issu de la biomasse ou de ressources fossiles. À opposer à produit chimique minéral (soude, acide sulfurique...).

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

5

1. DÉCRYPTER LES ENJEUX, POSER LES BONNES QUESTIONS

Il s'agira ensuite de cerner les enjeux actuels de la transition vers le biosourcé et de comprendre comment l'industrie chimique s'est procurée en carbone tout au long de son histoire. Pour ce faire, le **troisième chapitre** abordera les conditions techniques et économiques, caractéristiques des deux révolutions suivantes : l'émergence de la carbochimie (années 1860) et la transition vers la pétrochimie (années 1930).

Bien que la faisabilité technique et économique de production d'une multitude de molécules plateformes biosourcées soit connue, leur valeur stratégique au sein de l'économie reste mal évaluée. Dans une optique long terme de raréfaction des ressources pétrolières, est-ce qu'une substitution totale du pétrole et du gaz par la biomasse est possible ?

Cette dernière question pose de nombreux défis **bib.1** :

1. Défis techniques (partie 4/7)

Les molécules issues de la chimie biosourcée peuvent-elles fournir les mêmes fonctions à l'économie que celles issues de la pétrochimie ?

2. Défis économiques (partie 5/7)

Comment envisager une transition de la pétrochimie à la chimie biosourcée en tenant compte du prix des matières premières, des infrastructures et des marchés existants ?

3. Le défi des ressources disponibles en biomasse (partie 6/7)

Les besoins en biomasse de l'industrie de la chimie seront-ils compatibles avec la capacité de nos écosystèmes à en produire ? Sachant que cette biomasse doit également servir des besoins alimentaires, des besoins en matériaux et des besoins énergétiques (combustibles et carburants).

Ces trois défis et leurs enjeux seront détaillés dans les **chapitres 4, 5 et 6** de ce dossier.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

6

2. L'INDUSTRIE DE LA CHIMIE EST-ELLE INDISPENSABLE AU FONCTIONNEMENT DE L'ÉCONOMIE ?

Les stratégies de développement de la bioéconomie partent du principe qu'il faut remplacer la chimie pétrosourcée par la chimie biosourcée. Mais ne pourrions-nous pas tout simplement diminuer notre dépendance à l'industrie de la chimie ?

Le présent chapitre dresse un état des lieux de l'importance de cette industrie dans notre vie quotidienne, ainsi que des progrès technologiques apportés depuis la révolution industrielle.

Les produits chimiques carbonés : omniprésents dans notre quotidien

Vous êtes-vous déjà demandé à quoi ressemblerait votre journée sans les produits issus de l'industrie de la chimie ? Vous pouvez déjà oublier le réveil de votre smartphone muni d'une coque en *plastique polycarbonate/ABS*, couvrant des circuits imprimés en résine époxy **bib.2, 3**, ainsi que votre lampe de chevet, dont les câbles sont isolés par une gaine plastique en polyéthylène haute densité.

Dans votre salle de bain, plus d'évacuation d'eau par des conduites plastiques en PVC - polychlorure de vinyle. Plus de shampoing et de savon : deux produits cosmétiques contenant des détergents, parfums et colorants de synthèse. Plus de chaussettes en nylon - polyamide - ni de sous-vêtements dont l'élastique est en caoutchouc synthétique - polyisobutylène - et le tissu en coton-élasthane.

Terminé votre frigo, hermétiquement fermé par du silicone... Fini votre voiture avec ses sièges en mousse de polyuréthane, **bib.4** ses phares recouverts de plexiglas (PMMA - polyméthacrylate de méthyle). **bib.5** Sans compter le conditionnement de la plupart de nos aliments qui sont en plastique PET - polyéthylène téréphtalate - et PP - polypropylène.

Au terme d'une journée type, nous utilisons au final **pas moins de 20 polymères différents** (PE, PP, PET, PVC, PA...), des détergents, des parfums, des arômes, des pigments, des encres, des produits pour l'électronique, des solvants, des colles, tant pour satisfaire des besoins de base (manger, boire, s'habiller, se laver) que pour travailler ou se détendre.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

7

2. L'INDUSTRIE DE LA CHIMIE EST-ELLE INDISPENSABLE AU FONCTIONNEMENT DE L'ÉCONOMIE ?

Les produits⁴ chimiques organiques : omniprésents dans la majorité des secteurs économiques

Ces produits synthétiques que l'on manipule au quotidien ne sont que la partie émergée de l'iceberg. Ils s'intègrent dans une industrie de la chimie organique⁵ bien plus large qui touche virtuellement tous les secteurs de l'économie (Figure 2, p. 10). Si le secteur de la chimie ne représente à lui seul que 1% du PIB européen **bib.6**, cette contribution s'élève à 20,5% si on inclut les industries qui utilisent de grandes quantités de produits chimiques. **bib.7**

Le nombre estimé de produits chimiques organiques commercialisés est de 50.000 à 100.000 substances. **bib.7**

La partie moins visible des produits chimiques comprend :

- **Les additifs** présents dans de nombreux produits en faibles proportions : les conservateurs pour l'alimentation (E220 – sorbate de potassium), les additifs anti-détonations dans l'essence, les plastifiants, antioxydants, colorants présents dans les plastiques.

- **Les produits utilisés dans les procédés de fabrication** sans rentrer dans la composition du produit fini : les pesticides et antibiotiques (utilisés en agriculture conventionnelle) et les agents chélatants utilisés pour le blanchiment du papier.

- **Les produits à destination de l'industrie chimique.**

Il existe trois grandes catégories de produits (Figure 1, p. 9). D'une part, les **commodités** qui sont des produits standards directement issus de la chimie de base et diffusés en masse à bas prix (molécules plateformes comme l'éthylène, le benzène, l'acide acétique...). D'autre part, **les produits de chimie fine** - plus complexes - synthétisés en faibles quantités mais dont la valeur ajoutée est plus grande, à destination de l'industrie des spécialités (colorants pour cosmétiques, molécules actives des pesticides...). Enfin, les **spécialités** qui sont des produits formulés, conçus sur mesure à partir des produits de chimie fine et de commodité, pour répondre à des applications spécifiques ou des niches de marché (pesticides, détergents, produits cosmétiques, pigments...).

4. Produit chimique organique : produit qui contient l'élément carbone, que cet élément carbone soit issu de la biomasse ou de ressources fossiles. A opposer à produit chimique minéral (soude, acide sulfurique...).

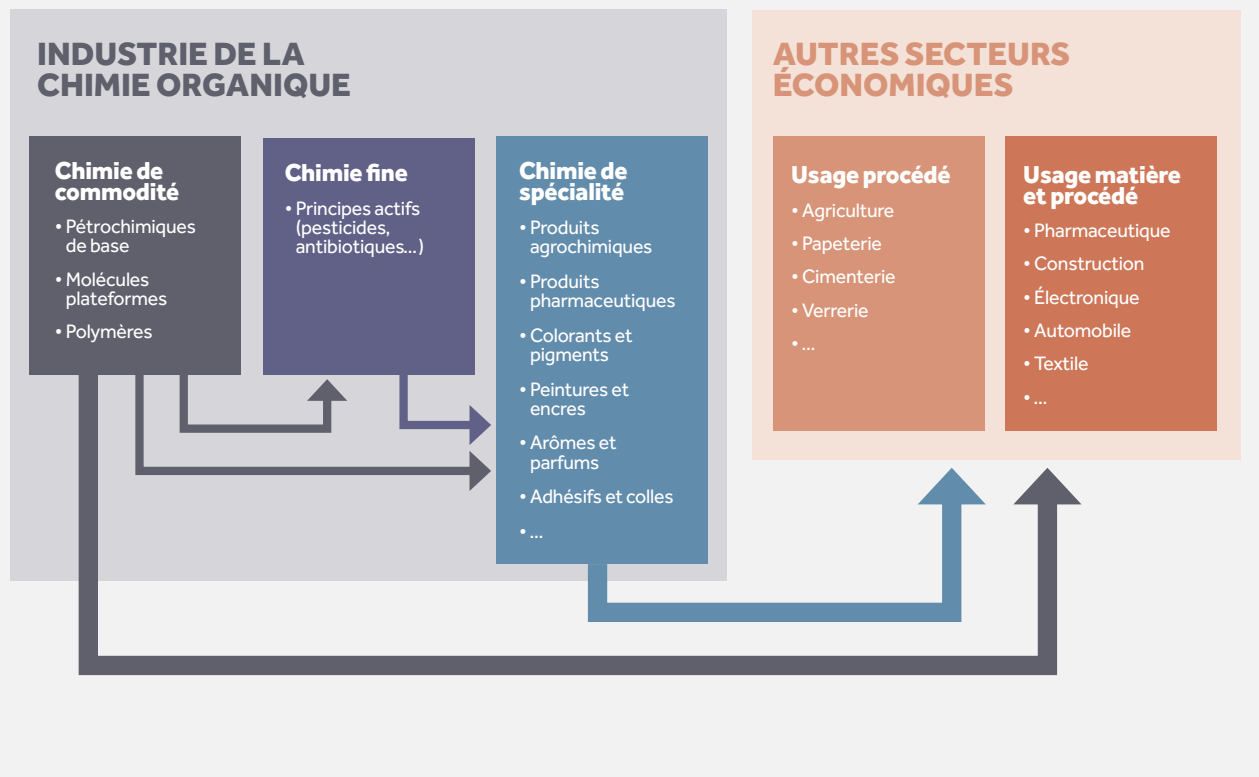
5. Chimie organique : chimie de l'élément carbone, que cet élément carbone soit issu de la biomasse ou de ressources fossiles. À opposer à la chimie minérale.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

2. L'INDUSTRIE DE LA CHIMIE EST-ELLE INDISPENSABLE AU FONCTIONNEMENT DE L'ÉCONOMIE ?

Figure 1

Contribution de l'industrie de la chimie organique aux autres secteurs de l'économie.



Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

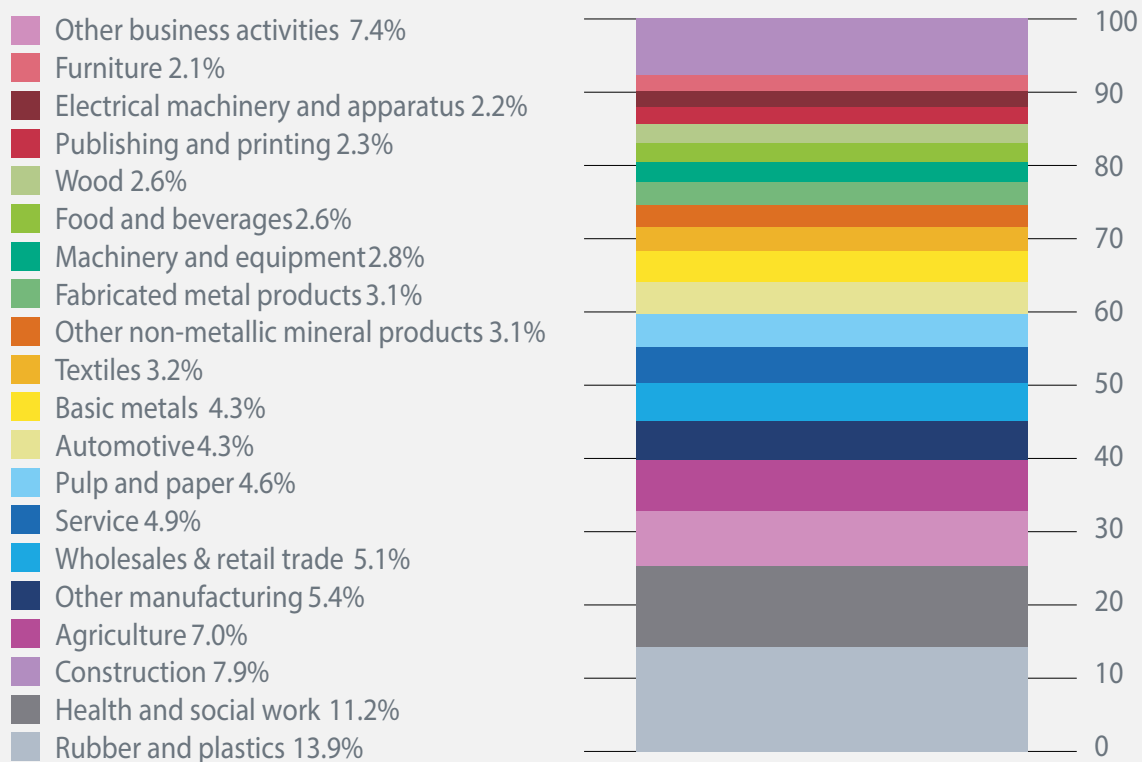
9

2. L'INDUSTRIE DE LA CHIMIE EST-ELLE INDISPENSABLE AU FONCTIONNEMENT DE L'ÉCONOMIE ?

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

Figure 2

Pourcentage des produits chimiques consommés par secteur et par catégorie, dans l'Union européenne. Excepté le secteur pharmaceutique (CEFIC, 2012). **bib.6**



10

2. L'INDUSTRIE DE LA CHIMIE EST-ELLE INDISPENSABLE AU FONCTIONNEMENT DE L'ÉCONOMIE ?

L'industrie de la chimie organique : indispensable aux progrès technologiques du 20^e siècle

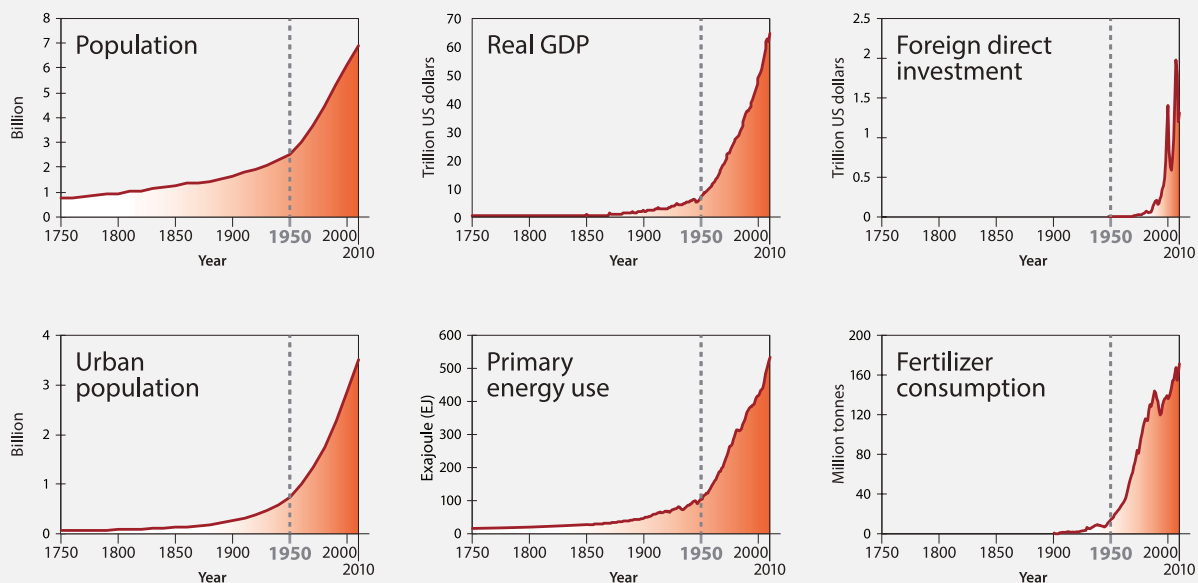
L'industrie de la chimie organique ne fait pas seulement partie intégrante de notre quotidien et de l'ensemble de l'économie, elle a contribué de manière significative à

l'évolution de la société depuis la révolution industrielle et plus particulièrement depuis 1950. La fin de la seconde guerre mondiale marque le début d'une période de transformation sans précédent. Cette période sera appelée par certains chimistes "la Grande Accélération", en référence à l'emballement de nombreux indicateurs climatiques et socio-économiques (Figure 3 et 4). **bib.8,9**

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

11

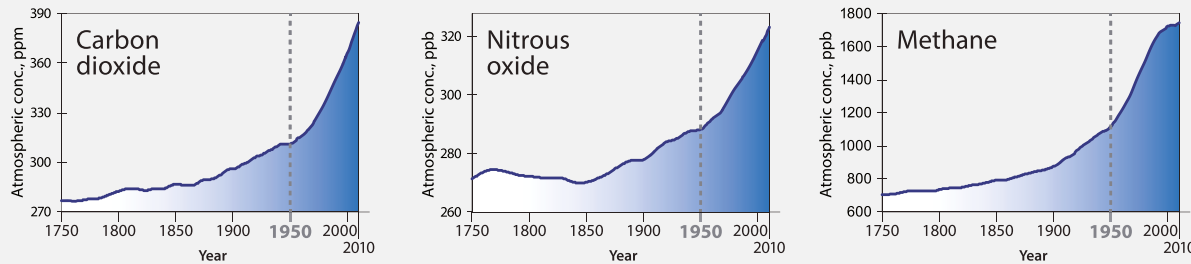
Figure 3
Évolution des indicateurs de développement socio-économiques de 1750 à 2010 (Steffen et al., 2015). **bib.8**



2. L'INDUSTRIE DE LA CHIMIE EST-ELLE INDISPENSABLE AU FONCTIONNEMENT DE L'ÉCONOMIE ?

Figure 4

Évolution des indicateurs climatiques de 1750 à 2010 (Steffen et al., 2015), **bib.8**



Il est difficile d'imaginer cette "Grande Accélération" sans les apports de la chimie organique industrielle :

- La **population** mondiale n'aurait pas augmenté aussi rapidement sans la révolution verte, avec l'arrivée des engrais et des produits phytosanitaires. On estime que deux personnes sur cinq ne seraient pas en vie sans l'apport des engrais de synthèse. **bib.10,11**
- La **structure socio-économique mondiale** aurait été moins complexe. La diversité des 50.000 à 100.000 molécules produites est telle que plus aucun pays n'est capable de produire l'ensemble des molécules nécessaire au fonctionnement de son

économie. **bib.7**

- L'**évolution technologique** aurait été privée d'électronique et d'informatique, puisque la miniaturisation des circuits intégrés a été rendue possible par les techniques de lithographie qui utilisent des résines à base de phénols.
- Le **mode de vie** aurait été moins confortable et l'espérance de vie plus faible. Les produits pharmaceutiques – les antibiotiques en particulier – ont joué un rôle crucial dans l'augmentation de l'espérance de vie. Notons que 80 % des médicaments utilisés sont synthétiques ou semi-synthétiques et dépendent de la pétrochimie. **bib.12**

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

12

2. L'INDUSTRIE DE LA CHIMIE EST-ELLE INDISPENSABLE AU FONCTIONNEMENT DE L'ÉCONOMIE ?

L'économie ne se passera pas facilement de l'industrie chimique

L'industrie de la chimie organique est devenue indispensable au fonctionnement de la société telle que nous la connaissons actuellement. C'est-à-dire, une société qui nous offre un mode de vie confortable et qui dispose d'une économie industrielle mondialement intégrée.

Cette grande accélération du progrès va malheureusement de pair avec une accélération des impacts sur l'environnement, comme le montre l'emballement des indicateurs climatiques depuis les années 50. Par conséquent, notre question initiale « Peut-on se passer de l'industrie de la chimie organique ? » devient « Peut-on se passer de certaines molécules et limiter l'impact négatif des molécules devenues indispensables à notre mode de vie ? ».

Tous les produits issus de la chimie organique ne sont pas indispensables, certains sont même nuisibles pour l'homme et l'environnement. Ils peuvent être éliminés, réduits en quantité, ou remplacés par d'autres produits. L'interdiction d'utiliser les sacs plastiques ou certains solvants industriels vont dans ce sens, tout comme la promotion de filières de recyclage pour limiter la consommation des matières premières.

Pour continuer à profiter de produits devenus indispensables au fonctionnement de notre économie, il est donc nécessaire de **développer une alternative à la pétrochimie**, et c'est dans cette optique que s'inscrit la **chimie biosourcée**. Celle-ci promeut la réduction de la consommation des ressources fossiles, des émissions de gaz à effet de serre et - dans certains cas - l'utilisation de molécules biodégradables.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

13

3. DE LA BIOMASSE AU PÉTROLE, LES SOURCES DE CARBONE DANS L'HISTOIRE DE L'INDUSTRIE CHIMIQUE

Pour cerner au mieux les enjeux actuels de notre transition vers la chimie biosourcée, il est nécessaire de comprendre comment l'industrie chimique s'est procurée en carbone tout au long de son histoire. En particulier lors de deux révolutions : la première, dans les années 1860 avec l'émergence de la carbochimie et la seconde, dans les années 1930 avec la transition vers la pétrochimie.

L'objectif de ce présent chapitre sera donc d'analyser les conditions économiques, technologiques et politiques qui ont permis l'émergence de la filière biosourcée.

La biomasse : matière première depuis l'Antiquité

Avant le 18^e siècle, de nombreux composés organiques et minéraux sont déjà produits de manière artisanale, et ce, depuis l'Antiquité. Par exemple, les pigments utilisés pour la coloration des tissus (le rouge de la garance, le bleu de l'indigotier) étaient extraits des plantes et on confectionnait déjà les cosmétiques grâce aux huiles végétales. En revanche, à l'époque, il n'y avait pas encore de maîtrise des procédés, ni de production à grande échelle.

La naissance des premières grandes industries chimiques remonte en réalité au 18^e siècle en Europe et concerne d'abord les usines de chimie minérale : fabrique de chaux, de soude et d'acide sulfurique. Durant ce même siècle, les premières usines de chimie organique⁶ vont naître autour de la distillation du bois pour la production de méthanol et d'acide acétique.

De la biomasse au charbon, la carbochimie soutenue par la demande textile

Ce n'est qu'à partir de **1860**, avec l'avènement de l'industrie des pigments synthétiques, que **l'industrie de la chimie organique** naît véritablement. Cette première transition dans les sources de carbone est le résultat d'une rencontre entre trois événements conjoncturels : 1. une nouvelle offre technologique (la synthèse chimique), 2. matérielle (les dérivés de l'industrie du charbon), et 3. une demande grandissante de l'industrie du textile **bib.**¹³ pour ces pigments synthétiques.

C'est la **révolution de la synthèse chimique**. On peut désormais synthétiser des pigments qu'on se contentait alors d'extraire de la biomasse.

6. Chimie organique : chimie de l'élément carbone, que cet élément carbone soit issu de la biomasse ou de ressources fossiles. À opposer à la chimie minérale.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

14

3. DE LA BIOMASSE AU PÉTROLE, LES SOURCES DE CARBONE DANS L'HISTOIRE DE L'INDUSTRIE CHIMIQUE

En 1856, alors que Henry Perkin tente de synthétiser de la quinine (une substance anti-malarienne) à partir d'aniline, il découvre une substance mauve. Sans le savoir, il vient de créer accidentellement le premier pigment de synthèse : la mauvéine. Il brevète le procédé et fait construire la première usine de chimie organique.

La synthèse des pigments est rendue possible grâce aux produits dérivés de la distillation du charbon en coke pour la métallurgie. Les travaux de Perkin sont issus des progrès de la chimie organique, qui s'intéresse alors aux sous-produits de la transformation du charbon en coke pour l'industrie métallurgique. **bib.¹⁴**

Les goudrons contiennent une série de molécules aromatiques (dont l'aniline) qui servent de molécules plateformes à l'industrie de la chimie organique. Cette dernière s'est d'abord développée dans les grands pays charbonniers et particulièrement en Allemagne.

Le grand industriel BASF tire son nom de cette époque : Badische Anilin- & Soda-Fabrik, soit Fabrique d'aniline et de soude de Bade.

Cette offre de pigments synthétiques rencontre une forte demande car les pigments naturels issus de l'extraction de biomasse ne suffisent plus à fournir l'industrie du textile en pleine expansion. **bib.¹³**

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

15

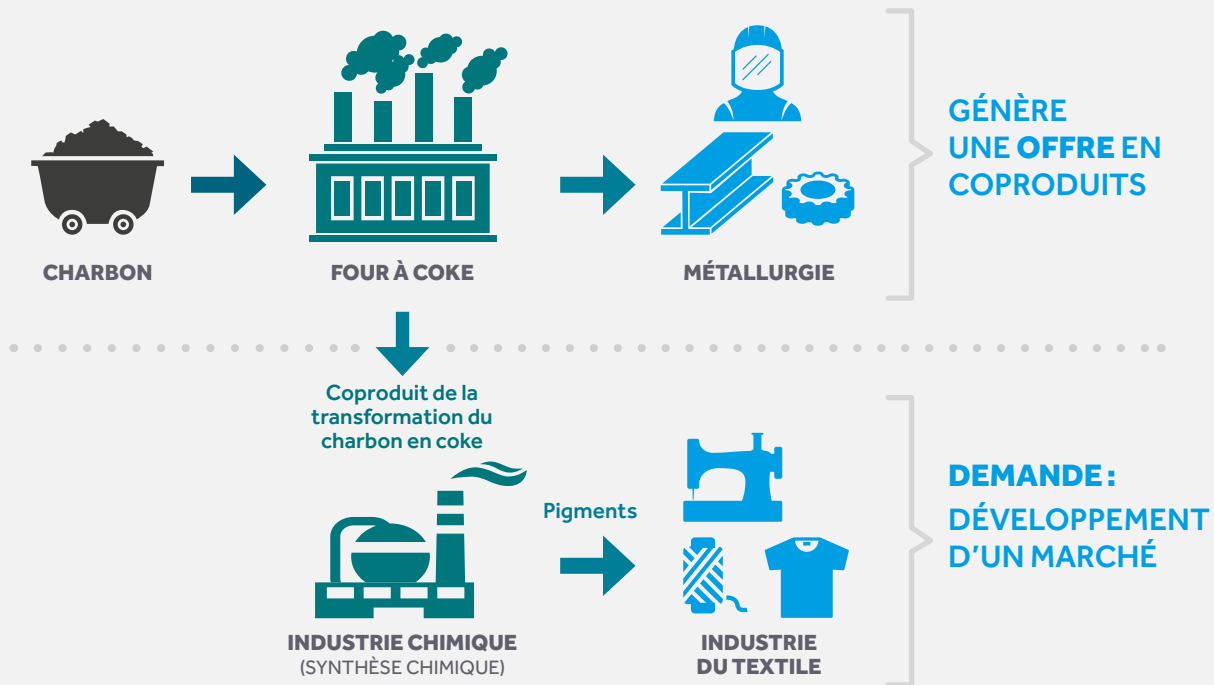
3. DE LA BIOMASSE AU PÉTROLE, LES SOURCES DE CARBONE DANS L'HISTOIRE DE L'INDUSTRIE CHIMIQUE

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

Figure 5

Émergence de la carbochimie, résultant du développement de la métallurgie et du secteur textile.

CARBOCHIMIE



3. DE LA BIOMASSE AU PÉTROLE, LES SOURCES DE CARBONE DANS L'HISTOIRE DE L'INDUSTRIE CHIMIQUE

Du charbon au pétrole : la pétrochimie poussée par l'économie de guerre et l'industrie automobile

À la veille de la guerre en 1938, les allemands dominent le marché mondial avec leur carbochimie (25 % des parts de marché), bien loin devant les États-Unis (15%). **bib.15** À peine 20 années plus tard, la tendance s'inverse : les États-Unis dominent le marché et utilisent près de 90% de pétrole comme source de carbone pour la chimie. **bib.16** Quel a donc été le moteur de la transition du charbon vers le pétrole ?

Cette seconde transition est plus complexe que celle des années 1860 car elle s'est produite de manière différée aux États-Unis puis en Europe. On retrouve les mêmes ingrédients que lors du passage à la carbochimie : une nouvelle offre technologique (le vapocraquage) et matérielle (l'industrie du pétrole associée à celle de l'automobile), couplée à une nouvelle demande (les plastiques).

Dans les **années 1930**, la technologie du vapocraquage (qui permet l'obtention des alcènes, molécules plateformes de la pétrochimie) et le reformage catalytique (qui

permet également l'obtention d'alcènes) vont pénétrer les raffineries et donner naissance à la **pétrochimie**. **bib.17,18** Le vapocraquage permet de valoriser les fractions les plus légères du pétrole brut, comme l'essence (considérée comme un déchet jusqu'au 19^e siècle). Le développement de l'offre pétrochimique est donc indissociable du développement de l'automobile qui a débuté aux États-Unis dans les années 1920. **bib.19**

Sur le plan technique, le pétrole est une meilleure source de carbone.

- Le pétrole, liquide, est plus facile à extraire, à transporter et à distribuer. Son pouvoir calorifique est le double de celui du charbon (42 MJ/kg contre 21 MJ/kg). **bib.14**
- Si une majorité de composés avait déjà été découverts à partir de la carbochimie, le propylène ne peut être obtenu directement qu'à partir du pétrole. **bib.20**
- Le charbon a une faible teneur en hydrogène (CH_{0.8} – CH_{1.8}), ainsi qu'une teneur en cendre variable et non négligeable.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

17

3. DE LA BIOMASSE AU PÉTROLE, LES SOURCES DE CARBONE DANS L'HISTOIRE DE L'INDUSTRIE CHIMIQUE

Mais ces raisons techniques ne sont pas une raison suffisante pour inciter les industriels européens à suivre le pas de la pétrochimie américaine :

1. L'Europe a moins accès à de grandes réserves de pétrole dans son sous-sol, et le marché mondial n'est pas sécurisé.
2. De grandes sommes d'argent ont été investies dans les infrastructures liées à l'industrie du charbon.

Entre 1950 et 1970, on assiste à un abrupt changement en Europe : la proportion de charbon utilisée pour la production des produits chimiques organiques diminue de 95 à 10%. **bib.14**

La seconde guerre mondiale change la donne en Europe et aux États-Unis en levant les deux grands freins évoqués plus haut :

- La naissance d'un marché mondial de pétrole est permise par la fin du conflit. C'est la garantie de l'offre des États-Unis qui va décider les industries européennes à abandonner progressivement le charbon pour le pétrole. **bib.16,21**
- **Les investissements colossaux de l'état dans la recherche et le développement** lors du conflit ont accéléré l'offre et la demande pour les polymères et matières plastiques. **bib.22-27**

*À titre d'exemple, le caoutchouc synthétique est l'une des innovations de la seconde guerre mondiale : la pénurie de caoutchouc naturel pousse le gouvernement américain à développer un caoutchouc synthétique à partir du pétrole : la production passe de 4.000 tonnes en 1942 à 700.000 tonnes en 1945. **bib.20** De nombreuses matières plastiques ont également été développées en temps de guerre **bib.18,28** : le polyéthylène pour l'isolation des câbles électriques, le PVC pour des films de protection pour le matériel militaire, la fibre nylon (initialement développée pour les bas collants) utilisée pour la fabrication des parachutes.*

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

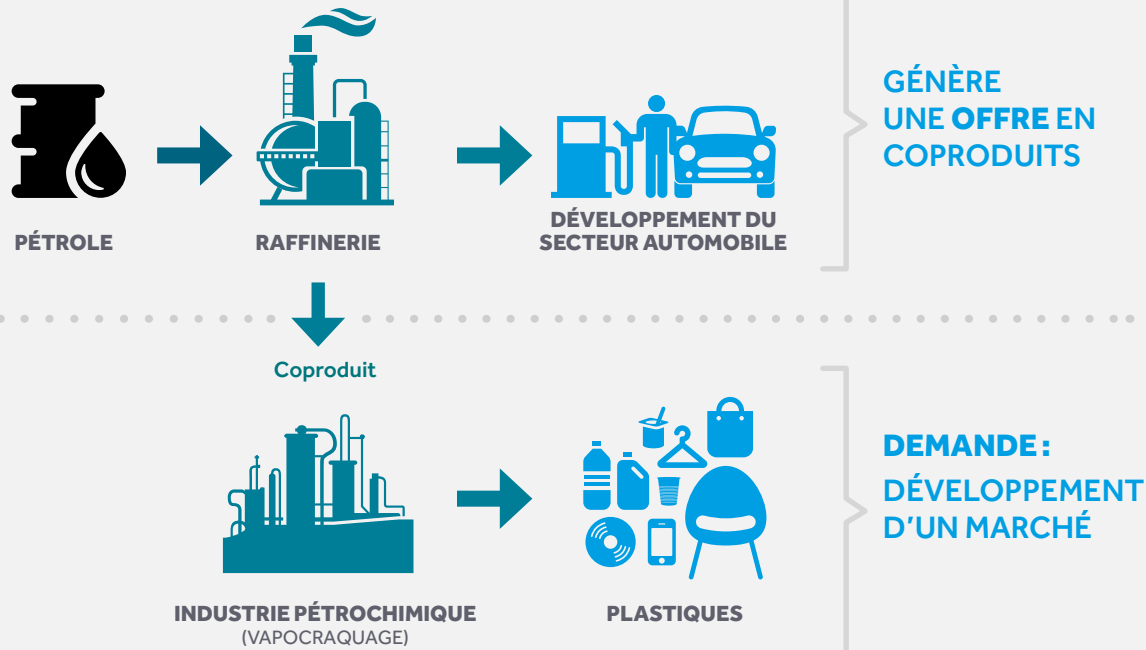
18

3. DE LA BIOMASSE AU PÉTROLE, LES SOURCES DE CARBONE DANS L'HISTOIRE DE L'INDUSTRIE CHIMIQUE

Figure 6

Émergence de la pétrochimie, résultant du développement du secteur automobile et d'une nouvelle demande du marché des plastiques.

PÉTROCHIMIE



Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

19

3. DE LA BIOMASSE AU PÉTROLE, LES SOURCES DE CARBONE DANS L'HISTOIRE DE L'INDUSTRIE CHIMIQUE

Conclusion : du pétrole à la biomasse ?

Lors des deux grandes transitions de source de carbone, il y a eu **une nouvelle offre technologique associée à une offre matérielle** : les technologies de synthèse associées aux sous-produits de la métallurgie lors de la première transition dans les années 1860, et les technologies de vapocraquage associées aux besoins d'essence pour l'industrie automobile. La **demande** a été **soutenue par l'industrie du textile** lors de la première transition vers la carbochimie, **et par les matières plastiques** dans la transition vers la pétrochimie.

Bien que le pétrole soit plus performant techniquement, la transition vers la pétrochimie a été rendue possible – particulièrement en Europe – par une **intervention massive des états durant la seconde guerre mondiale**, ce qui a gonflé l'offre et la demande et facilité les investissements dans les nouvelles infrastructures.

La transition vers la pétrochimie n'a ni éliminé les produits issus de la carbochimie,

ni remplacé totalement la carbochimie. La plupart des polymères et autres produits de synthèse que nous rencontrons au quotidien ont été découverts avec la carbochimie, et certains composés sont toujours synthétisés majoritairement à partir du charbon (notamment certains pigments issus d'aromatiques polycycliques).

Cette histoire des sources de carbone de l'industrie de la chimie nous éclaire sur la situation actuelle. **La transition vers le biosourcé** peut compter sur une nouvelle offre technologique (le bioraffinage). Mais elle **ne bénéficie pas encore d'une offre de matière importante, ni d'une demande particulièrement grande pour ses produits.**

Tout comme le passage à la pétrochimie a nécessité des investissements de la part des états (aussi bien les Etats-Unis que les pays européens), il devra en être de même pour la chimie biosourcée, comme l'a bien compris la Commission européenne avec les financements des appels à projets BBI (Bio-based Industries).

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

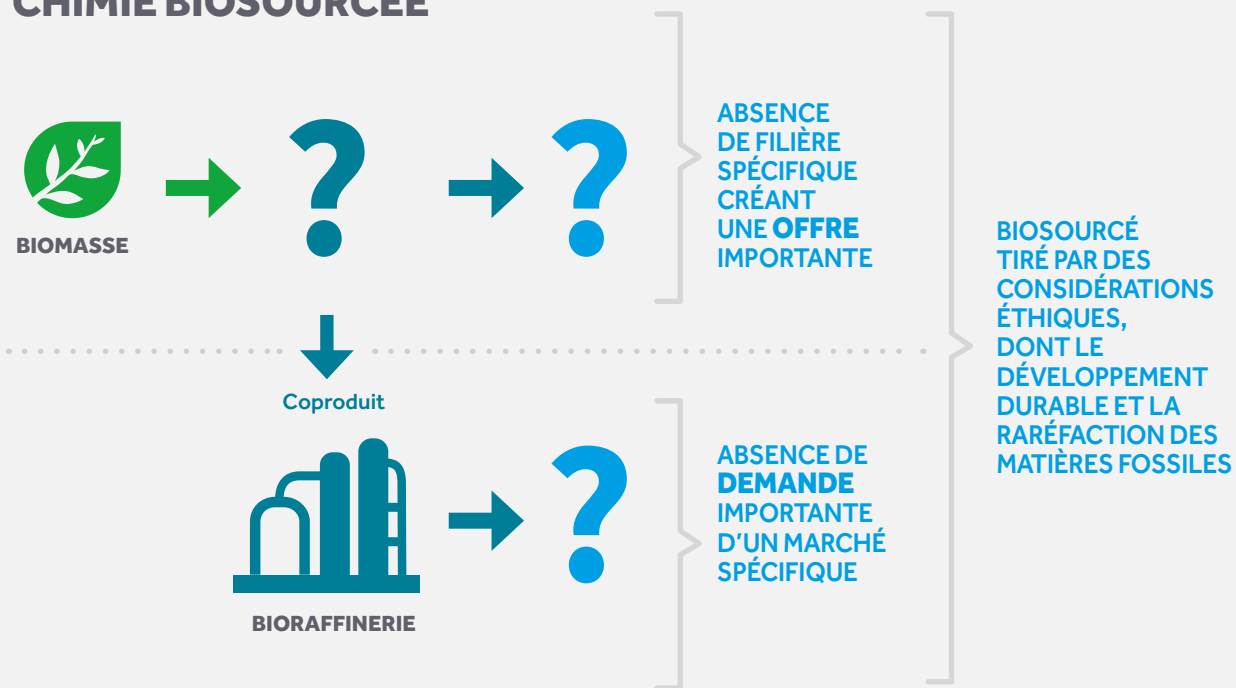
20

3. DE LA BIOMASSE AU PÉTROLE, LES SOURCES DE CARBONE DANS L'HISTOIRE DE L'INDUSTRIE CHIMIQUE

Figure 7

Émergence complexe du biosourcé, due à l'absence de filière créatrice d'une offre importante et due à l'absence de demande d'un marché spécifique.

CHIMIE BIOSOURCÉE



Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

21

3. DE LA BIOMASSE AU PÉTROLE, LES SOURCES DE CARBONE DANS L'HISTOIRE DE L'INDUSTRIE CHIMIQUE

Tableau 1

Évolution des sources de carbone de la chimie organique industrielle. Tableau récapitulatif.

La chimie d'hier à aujourd'hui a été marquée par deux révolutions : la première dans les années 1860 avec l'émergence de la carbochimie, la seconde dans les années 1930 avec la transition vers la pétrochimie.

	Avant 1860	1860-1940	1930-2000
Sources de carbone <small>bib.7</small>	Chimie du bois	Carbochimie	Pétrochimie
Biomasse	100%	30%	5%
Charbon	0	60%	5%
Pétrole et gaz	0	10%	90%
Technologies dominantes	Extraction pyrolyse	Synthèse de composés simples	Polymérisation - synthèse de composés complexes
Principales molécules plateformes		Aniline, acétylène	Éthylène, méthane, propylène, benzène...
Principaux produits commercialisés	Acide acétique, méthanol	Pigments, produits pharmaceutiques	Polymères
Tonnage	Dizaines de milliers de tonnes	Millions de tonnes	Centaines de millions de tonnes
Offre (technologique, matière)		<ul style="list-style-type: none"> • Synthèse chimique • Industrie métallurgique 	<ul style="list-style-type: none"> • Vapocraquage • Industrie automobile
Demande		<ul style="list-style-type: none"> • Industrie textile 	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie plastique • Commerce international

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

22

4. LES DÉFIS TECHNIQUES

Les molécules utilisées actuellement sont issues des procédés propres à la carbochimie et à la pétrochimie, comme détaillé dans le précédent chapitre. Un retour à la biomasse comme source principale de carbone pose un important défi technique : celui de l'importante teneur en oxygène présente dans les molécules biosourcées.

Ce chapitre a pour but d'expliquer cette contrainte technique et d'exposer les deux choix auxquels doit faire face l'industrie chimique : s'adapter aux spécificités de la biomasse (voie innovante) ou continuer dans la logique de la pétrochimie.

Le choix de l'industrie : la voie de la substitution ou celle de l'innovation ?

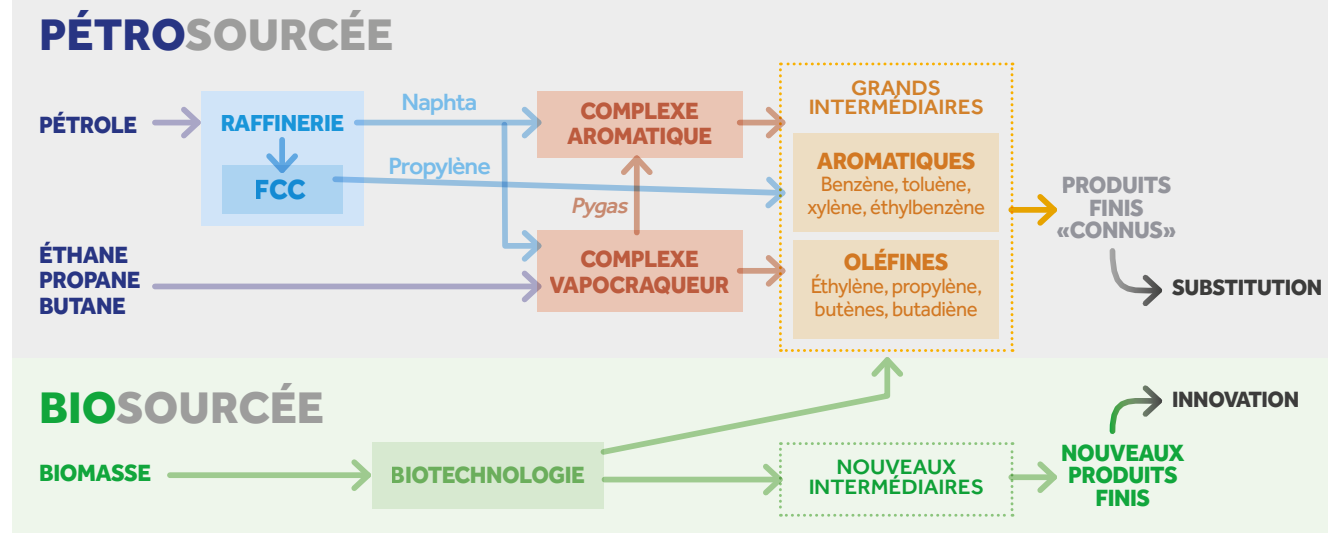
La majorité des molécules synthétisées actuellement sont synthétisées à partir de moins de dix molécules dites « plateformes », qui sont les grands intermédiaires de la chimie organique⁷ (Figure 8).^{bib.29} La chimie fine et la chimie de spécialité se basent sur ces molécules simples fournies par la chimie de commodité⁸ pour produire des molécules plus complexes. Est-il dès lors possible d'obtenir des molécules semblables à partir de la biomasse ?

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

23

Figure 8

Le défi de l'intégration de la chimie biosourcée dans la pétrochimie (IFP énergies nouvelles, 2014).^{bib.30}



7. Chimie organique : chimie de l'élément carbone, que cet élément carbone soit issu de la biomasse ou de ressources fossiles. À opposer à la chimie minérale.

8. La chimie organique distingue trois catégories de produits : les commodités, les produits de chimie fine (plus complexes) et les spécialités (produits conçus sur mesure pour répondre à des applications spécifiques ou des niches de marché). Voir chapitre 2.

4. LES DÉFIS TECHNIQUES

La transition vers une source de carbone biomasse peut s'effectuer selon deux voies (**Figure 8, p.23**) : par la substitution de la source de carbone pour synthétiser les mêmes molécules ou par l'innovation et la création de nouvelles molécules ayant des fonctions similaires, voire meilleures que leur contrepartie pétrochimique. Cette transition peut s'effectuer autant - en amont - dans la chimie de commodité (molécules plateformes) que - en aval - dans la chimie fine et de spécialité (molécules complexes).

L'importante teneur en oxygène des molécules biosourcées

Les molécules qui vont servir de base à la pétrochimie sont obtenues à partir de la distillation du pétrole (le naphta) ou du gaz naturel. Les molécules de base pour la chimie biosourcée sont - quant à elles - issues de la biomasse : sucres (issus de la cellulose, du saccharose, du glucose ou de l'amidon), lignine, acides gras, protéines et autres composés.

La composition des molécules biosourcées diffère essentiellement par une teneur en oxygène plus élevée. Or, plus la teneur en oxygène d'un composant est faible, plus son énergie chimique est élevée, et vice versa. En raison de sa faible teneur en oxygène, l'énergie chimique⁹ du pétrole brut est relativement élevée.

La **Figure 9, p.25** illustre les différents chemins réactionnels pour produire des molécules chimiques et les dépenses d'énergie chimique liées.

Si nous comparons la dépense d'énergie chimique liée à la production d'une molécule plateforme (par exemple, l'éthylène) par la chimie biosourcée ou la pétrochimie, le constat est le suivant :

- La voie pétrochimique se fait avec une teneur d'oxygène constante et nulle (chemin P).

bib.31-35

- L'obtention de molécules plateformes à partir de biomasse impose un changement de logique relativement coûteux en énergie. L'oxygène doit en effet être enlevée (chemin S1).
- Ainsi, l'utilisation d'amidon pour produire de l'éthylène demande plus d'énergie que la production de cette molécule à partir de pétrole (comparaison chemin S1 et chemin P).

La **substitution** directe d'intermédiaires pétrochimiques secondaires (chemin S2) permet de conserver le même niveau d'oxydation de l'intermédiaire au produit, ce qui minimise les dépenses énergétiques. Ainsi, l'obtention de 1,2 éthane-diol (éthylène glycol) à partir d'amidon est pertinente du point de vue énergétique.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

24

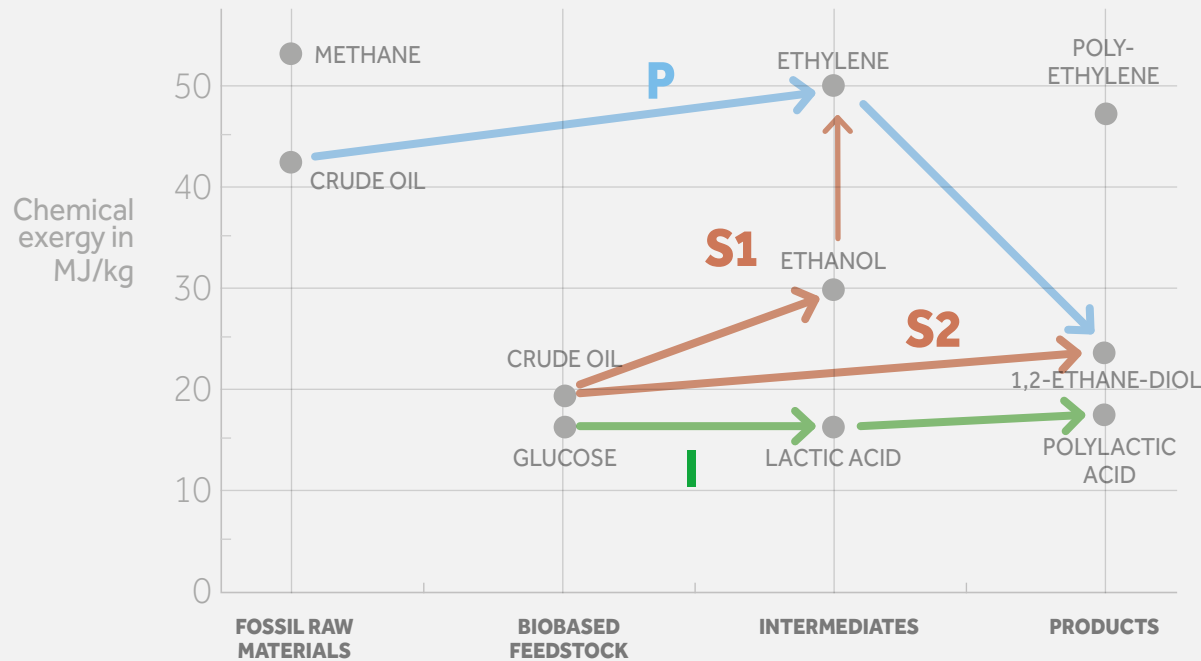
9. On entend par "énergie chimique", l'énergie associée à la liaison des atomes dans les molécules.

4. LES DÉFIS TECHNIQUES

Figure 9

Différents chemins réactionnels possibles entre les matières premières et les produits.
Adapté de Frenzel, Hillerbrand et Pfennig, 2014.

P Chemin de la pétrochimie **S1** Chemin indirect de la substitution via les molécules plateformes
S2 Chemin direct de la substitution **I** Chemin de l'innovation



Dans le cas de **l'innovation** de nouvelles molécules (chemin I), comme la production d'acide polylactique (PLA), le niveau d'oxydation est constant et donc le bilan énergétique est optimal.

Le maintien de l'oxygène permet d'augmenter les rendements de polymère obtenu. Pour 1 kg de glucose, il est possible de faire 670 g d'acide polylactique (PLA) mais seulement 290 g de polyéthylène (PE). **bib.32**

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

25

4. LES DÉFIS TECHNIQUES

La voie de la substitution pose le problème des aromatiques

Les molécules plateformes pétrochimiques sont divisées en deux grandes catégories : les **oléfines** (Tableau 2, p. 27) et les **aromatiques** (Tableau 3, p. 28). Ces molécules plateformes ne sont pas utilisées directement par les utilisateurs finaux mais servent à la synthèse des grands intermédiaires chimiques. Ces intermédiaires seront eux-mêmes soit utilisés tels quels soit utilisés comme réactifs pour obtenir des molécules plus complexes pour la chimie fine.

L'obtention de la majorité des molécules plateformes oléfiniques à partir de biomasse

est possible et déjà réalisée par de nombreux industriels. Le bioéthylène est synthétisé par déshydratation de l'éthanol par *Braskem*. Le propylène peut être obtenu par des réactions successives de l'éthylène (dimérisation et métathèse) **bib.36** ou par condensation du méthanol issu des gaz de synthèse. **bib.37**

L'isobutène peut être produit par fermentation de glucose et le butadiène par déshydratation de l'éthanol. **bib.38**

De nombreux grands intermédiaires (méthanol, éthylène glycol, acide acrylique) peuvent être synthétisés par voie directe à partir du glucose alors que l'obtention des molécules

plateformes oléfiniques se fait toujours par voie indirecte, il faut toujours au minimum deux réactions successives.

L'obtention des aromatiques à partir de biomasse est - en revanche - plus complexe.

Le benzène, qui est une des molécules plateformes les plus importantes avec l'éthylène et le propylène, n'est actuellement pas synthétisé à partir de biomasse. Cette synthèse serait possible en partant de la lignine, qui contient des noyaux aromatiques. **bib.39,40** En raison de son hétérogénéité de composition et du manque d'une structure primaire définie, la valorisation de la lignine représente un grand défi. **bib.39** Cette valorisation ne fait l'objet d'une attention soutenue que depuis quelques années dans des études grande échelle et des projets européens tels que *Vanguard Initiative Bioeconomy Pilot* et *BioBased Initiative*.

Le **xylène** est actuellement la seule molécule aromatique synthétisée à partir de biomasse. Il y a quelques années, la société *Coca-Cola* a co-financé un procédé visant la création d'une "plant bottle" contenant du PET 100% biosourcé. Ce procédé, mis au point par *Virent* en 2015 et baptisé *BioForm*, forme des sucres (maïs et canne) par catalyse chimique pour obtenir du p-xylène. Ce dernier est ensuite transformé en acide téréphtalique, un réactif de la synthèse du PET. **bib.41**

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

26

4. LES DÉFIS TECHNIQUES

Tableau 2
Oléfines pétrochimiques, leurs intermédiaires et leurs alternatives biosourcées.

Sources de carbone fossile	Molécules plateformes (quantité) ^{bib.44}	Principaux intermédiaires pétrochimiques ^{bib.45}	Exemples de sources alternatives de carbone biomasse ^{bib.41,46}	Exemples de produits finis	Exemples d'acteurs
Gaz, pétrole	Méthane (96 Mt/an) <chem>CH4</chem>	← Méthanol	Mélange (biométhanisation)	Intermédiaire chimique, combustible	
		Formaldéhyde	Cellulose (gazéification)	Plexiglas (phare de voiture)	
		Acide acétique	n/a	Bakélite (manche de poêle)	
Pétrole, gaz	Éthylène (151 Mt/an) <chem>C=C</chem>	← Ethanol	Ethanol (synthèse chimique)	Intermédiaire chimique	
		Chlorure de vinyle	Glucose (fermentation)	Polyéthylène (sac plastiques, gaines...)	Braskem
		Oxyde d'éthylène	n/a	Intermédiaire chimique, solvant	Abengoa
		Ethylène glycol	n/a	PVC (canalisation)	
		Acétate de vinyle	Glucose ou xylitol	Intermédiaire chimique	India Glycols
Pétrole, gaz	Propylène (102 Mt/an) <chem>C=CC</chem>	← Ethylène	Ethylène (synthèse - abandonné)	Polypropylène (pot en plastique...)	Braskem
		Acrylonitrile	n/a	Fibres acryliques (textile)	
		Oxyde de propylène	n/a	Polyuréthanes (siège voiture)	
		Propylène glycol	Glycerol ou sorbitol	Intermédiaire chimique	ADM
		Acide acrylique	Glycérol ou glucose	Polyacrylate (couches pour bébé)	BASF
		Epichlorhydrine	Glycérol	Résine époxy	Solvay
Pétrole	N-Butylènes <chem>CCC=C</chem>	Isopropanol	n/a	Solvant	
		Maleic anhydride	n/a	MBTE et EBTE (additif carburant) ^{bib.47}	
Pétrole	Butadiène (16 Mt/an) <chem>C=CC=C</chem>	Butanediol	Ethanol (fermentation)	Polyester (fibre textile)	
		← Ethanol	Ethanol (synthèse chimique)	Polyuréthanes (siège voiture)	
		Acide adipique	← Ethanol	Styrène-butadiène (pneumatique) ^{bib.49}	n/a
Pétrole	Isobutène (15 Mt/an) <chem>CC(C)=C</chem>	Isoprene	Acide muconique ^{bib.48}	Résine ABS (coque smartphone)	
		Glucose	Glucose	Nylon 6-6 (fibre textile)	
		← Glucose	Glucose (fermentation) ^{bib.50}	Fibre élastique	Danisco
Pétrole	Isobutène (15 Mt/an) <chem>CC(C)=C</chem>	Ter-butanol	n/a	MBTE (additif carburant)	Global Bioenergies +
		← Ter-butanol	n/a	Polyisobutylène (gants caoutchouc)	Cristal Union

n/a (non applicable) : signifie qu'il n'y a pas de réponse actuellement.




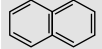
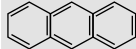
Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

27

4. LES DÉFIS TECHNIQUES

Tableau 3

Aromatiques et polyaromatiques pétrochimiques et carbochimiques, leurs intermédiaires et leurs alternatives biosourcées.

Sources de carbone fossile	Molécules plateformes (quantité) <i>bib.44</i>	Principaux intermédiaires pétrochimiques <i>bib.45</i>	Exemples de sources alternatives de carbone biomasse <i>bib.41,46</i>	Exemples de produits finis	Exemples d'acteurs
Pétrole, charbon	Benzène (47 Mt/an) 	← Cumène (+propylène)	Lignine (non mature) n/a	Intermédiaire, solvant Intermédiaire chimique	Green Biologics
		→ Acétone	Glucose (fermentation)	Solvant	
		Phenol	Lignine (non mature)	Résines phénoliques	
		Bisphénol A	n/a	Résine époxy (électronique)	
		Ethylbenzène	n/a	Intermédiaire chimique	
		Styrène	n/a	Polystyrène (frigolite)	
		Cyclohexane	n/a	Intermédiaire chimique	
		Acide adipique	Acide muconique <i>bib.48</i>	Nylon (fibre textile)	
		Nitrobenzène	n/a	Intermédiaire chimique	
		Aniline	n/a	Intermédiaire pharmaceutique	
Pétrole	Toluène (15 Mt/an) 	→ Benzène	Lignine (non mature)	Solvant pour peinture Intermédiaire, solvant	Braskem Abengoa
		Dinitrotoluène	n/a	TNT (explosif)	
		Toluène diisocyanate	n/a	Polyuréthane (siège voiture)	
Pétrole	Xylènes (19 Mt/an) 	← Sucres (catalyse chimique)			Virent <i>bib.41</i>
		→ Acide téréphtalique	n/a	PET (bouteille plastique)	
		Anhydride phtalique	n/a	Plastifiant	
Charbon	Naphtalène 	→ Anhydride phtalique	n/a	Plastifiant, insecticide	
		Anthracène 	Anthraquinone	n/a	Pigments

n/a (non applicable) : signifie qu'il n'y a pas de réponse actuellement.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

28

4. LES DÉFIS TECHNIQUES

À la fin du XXe siècle, l'industrie pharmaceutique s'intéressait principalement aux composés synthétiques. Mais depuis quelques années, le secteur se concentre de plus en plus vers les molécules actives à partir de biomasse. En effet, le monde végétal, fongique, microbien ou animal, recèle de centaines de milliers de molécules qui peuvent présenter des propriétés pharmacologiques particulièrement utiles dans l'identification de nouvelles molécules médicamenteuses. **bib.42,43**

La voie de l'innovation, plus logique mais plus complexe

La voie de l'innovation conduit les industriels à développer des molécules qui apportent de nouvelles fonctions sans avoir d'homologues pétrochimiques. Le secteur des plastiques et des résines comprend les exemples les plus parlants :

- Le polyhydroxyalcanoate (**PHA**) et l'acide polylactique (**PLA**) sont deux polymères qui innovent par leur capacité à être biodégradés en conditions adéquates. Le PHA est produit directement par fermentation bactérienne de sucres ou de lipides. Le PLA est - quant à lui - synthétisé à partir d'acide lactique. Ce dernier est produit par fermentation à partir de sucre de canne ou de maïs. Notons que *NatureWorks* est le plus grand producteur de PLA au monde et que l'industriel wallon *Galactic* fait partie des principaux producteurs d'acide lactique.

- Le polyéthylène furanoate (**PEF**) a été développé par *Avantium* dans le but de remplacer le PET actuellement utilisé par les bouteilles plastiques, étant donné les difficultés de la voie de la substitution pour obtenir le p-xylène biosourcé.
- La **lignine** est utilisée comme analogue du phénol dans la résine phénol-formaldéhyde, employée notamment dans la production du contreplaqué. **bib.39**

Comme vu dans la **Figure 9**, le choix de l'innovation est le plus logique d'un point de vue énergétique : la chimie adapte ses procédés en fonction des molécules qu'elle utilise. En revanche, l'innovation complexifie les choix pour les industriels. Chaque nouvelle molécule nécessite - notamment - de nombreuses années de développement (comportement en plasturgie, recyclage) et de mise en conformité aux normes, afin de faire parvenir ces nouvelles matières à la multitude d'industries qui les utilisent (**Chapitre 2**).

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

29

4. LES DÉFIS TECHNIQUES

Les voies de l'innovation et de la substitution coexisteront

Deux voies sont ouvertes pour la transition vers une chimie biosourcée : la voie de la substitution qui conserve la logique des molécules pétrosourcées ou la voie de l'innovation qui fabrique de nouvelles molécules.

- **La voie de la substitution** permet l'obtention de nombreuses oléfines à partir de glucose mais cela nécessite plus d'énergie et une perte des atomes d'oxygène.

- **La voie de l'innovation** est plus en adéquation avec la composition de la biomasse et amène à développer des molécules avec de nouvelles propriétés, mais elle est également plus complexe car elle fait table rase d'une partie du passé industriel.

Actuellement, la chimie ne peut pas substituer l'ensemble des molécules plateformes de la pétrochimie. Si la plupart des oléfines peuvent être substituées, seul le xylène est substitué pour les aromatiques. La valorisation de la lignine est donc d'une importance stratégique à moyen-long terme.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

30

5. LES DÉFIS ÉCONOMIQUES ET INDUSTRIELS

Outre les défis techniques évoqués dans notre précédent chapitre, le passage d'une chimie du pétrole à une chimie biosourcée doit également faire face aux contraintes économiques imposées par la pétrochimie. À savoir : la rentabilisation des infrastructures, le prix du pétrole et l'intégration dans des marchés complexes.

Dans un contexte de bas prix du pétrole, la chimie biosourcée reste cantonnée à des marchés de petite taille. Dès lors, qu'advient-il lorsque les prix remonteront ?

Pour la chimie de commodité, le prix du pétrole donne le ton

La chimie de commodité doit jouer avec trois grandes contraintes : la rentabilisation des infrastructures, le prix du pétrole et l'intégration dans des marchés complexes.

La rentabilisation des infrastructures impose une grande inertie aux industries chimiques : l'intensité capitaliste de l'industrie chimique est quatre fois plus élevée que dans les autres secteurs de l'industrie. **bib.51** La pétrochimie a créé un réseau très intégré et dépendant des raffineries de pétroles portuaires (**Figure 10**). **bib.52,53,54**

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

31

Figure 10
Réseau de pipelines entre les usines pétrochimiques de Belgique, des Pays-Bas et d'Allemagne. (essencia, 2013). **bib.53**



5. LES DÉFIS ÉCONOMIQUES ET INDUSTRIELS

L'intégration dans des marchés complexes

bib.52 (Chapitre 2) rend difficile la création de produits innovants. En effet, la chimie de commodité fabrique des produits simples, en grande quantité, et vendus à des industries diversifiées. Toute nouvelle matière doit résoudre de nouvelles problématiques pour l'ensemble de cet aval industriel. À savoir : cette nouvelle matière sera-t-elle facilement mise en forme ? Peut-elle être recyclée ? Est-elle conforme aux normes ?

Le prix du pétrole est la contrainte la plus volatile qui impose des choix sur le court terme. Actuellement, son bas prix est le principal frein de la chimie biosourcée qui peine à produire des molécules plateformes biosourcées à un prix compétitif. Notons que la demande pour un polymère biosourcé diminue fortement lorsque

le prix est supérieur à 10% par rapport aux homologues pétrochimiques. **bib.54**

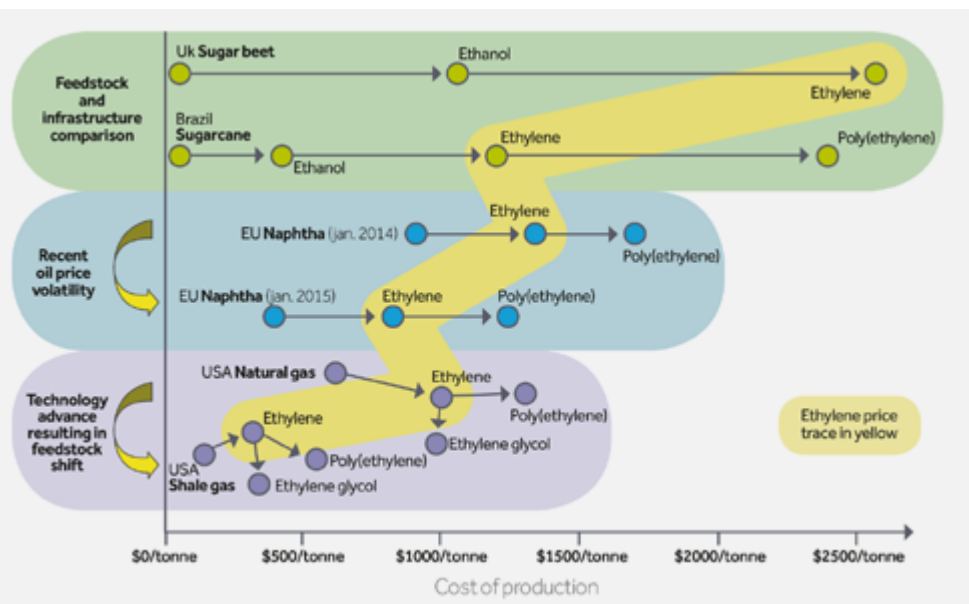
L'histoire récente a montré que les fluctuations des prix du pétrole donnent le ton. Lorsque les prix sont hauts, comme dans les années 1980, la production de bioéthylène était de 150 kilotonnes par an au Brésil. Avec la chute des prix des années 1990, les productions sont arrêtées et ne reprennent qu'en 2010 avec *Braskem*¹⁰. **bib.30** Le bioéthylène était alors compétitif avec l'éthylène produit en Europe à partir de pétrole (naphta) (**Figure 11**). Lorsque les prix du pétrole sont bas, comme depuis l'été 2014, les projets d'investissement sont gelés : *Braskem* a d'ailleurs reporté jusqu'à nouvel ordre son projet d'usine de propylène biosourcé. **bib.55**

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

32

Figure 11

Diagramme du prix de l'éthylène en fonction de la région et de la matière première. (Clark et al., 2013). **bib.38**



10. Braskem, est un pétrochimiste brésilien, leader sud-américain des résines thermoplastiques.

5. LES DÉFIS ÉCONOMIQUES ET INDUSTRIELS

Les leviers à activer pour la production de produits biosourcés

Dans un contexte de bas prix du pétrole, les industriels peuvent toujours utiliser certains leviers pour faire le choix du biosourcé :

1. **La compétitivité.** Certains produits biosourcés sont plus compétitifs que leurs homologues pétrosourcés. C'est le cas du bioéthylène produit par *Braskem* avec le sucre de canne brésilien, de l'épicérol développé par *Solvay* qui utilise le glycérol à la place du propylène **bib.56** et du 1,4 butanediol développé par *BASF* à partir de sucre cellulosique. **bib.57** Dans les deux premiers cas, le gain se fait sans passer par les molécules plateformes propylène ou butylène.
2. **Le critère de durabilité.** C'est le levier qui permet aux industriels d'investir dans des produits biosourcés malgré une plus faible compétitivité par rapports à leurs homologues pétrochimiques. C'est par exemple la voie du PET 100% biosourcé développé par *Virent* pour *Coca-Cola*. D'autres industriels suivent cette voie pour développer du PET biosourcé, comme *Nestlé* et *Danone*. **bib.58,59**

3. La diversification des risques financiers.

Les prix pétroliers sont de plus en plus volatiles. Pour gérer cette incertitude, la stratégie suivie peut être celle de la diversification des investissements. **bib.54** Dans ce cas, la voie de la substitution peut être envisagée, même avec une moindre compétitivité. Ceci, afin de diversifier le portfolio de produits et diminuer les risques. **bib.60** Bien que les prix de la biomasse soient également volatiles, ils ne sont pas directement corrélés aux prix du pétrole. **bib.61**

4. La recherche de nouvelles fonctionnalités.

La voie de l'innovation est moins confrontée au problème de prix, puisqu'elle propose des molécules sans équivalent pétrochimique. **bib.62** C'est le positionnement actuel des acteurs tels que *l'Association de la Chimie du Végéta*/**bib.63** ou le *Biobased Industries Consortium* dans l'appel à projet *BBI 2017*. **bib.64** Le développement du polyéthylène furanoate (PEF) par *Avantium* dans le but de remplacer le PET (actuellement utilisé par les emballages) est un des meilleurs exemples de la voie de l'innovation. **bib.63**

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

33

5. LES DÉFIS ÉCONOMIQUES ET INDUSTRIELS

La chimie fine, plus compétitive pour le biosourcé

En comparaison à la chimie de commodité, la chimie fine et la chimie de spécialité sont moins dépendantes du prix du pétrole. Les coûts d'infrastructures sont proportionnellement moins importants, les molécules sont plus complexes et les marchés sont plus petits et ciblés.

La capacité de production d'une usine de chimie fine est de l'ordre de 20.000 à 40.000 tonnes par an. Pour la production de spécialités de grande valeur, on fera appel à des usines plus petites. Ces petites et moyennes usines peuvent en effet satisfaire localement la demande en biomasse. **bib.65**

La voie de la substitution est donc nettement plus compétitive dans la chimie fine que dans la chimie de commodité.

Dans le secteur pharmaceutique, certaines molécules (comme la pénicilline) ont toujours été produites par voie biologique. La synthèse de ces molécules par voie chimique reste possible mais le nombre conséquent d'étapes de synthèse est un facteur limitant. **bib.66** La technologie microfluidique¹¹ pourrait lever cette barrière pour la synthèse de produits naturels. Elle présente en effet des perspectives

intéressantes pour diminuer les coûts de production tout en augmentant les rendements. Les secteurs concernés sont les matériaux, les médicaments, les biotechnologies industrielles et les produits agrochimiques. **bib.67**

Dans le secteur des parfums et arômes, la biologie synthétique permet également d'obtenir des molécules de saveur et de parfum à moindre coût et en plus grandes quantités, ce qui n'était pas possible en utilisant une synthèse chimique ou une extraction à partir de plantes. **bib.68**

Conclusions

Tant que les prix du pétrole resteront bas et volatiles, et à moins d'un changement drastique de législation, la chimie biosourcée restera cantonnée à un marché de taille réduite. C'est-à-dire, un marché destiné à des produits dont le critère durable est mis en avant ou à des produits innovants tel le PEF et à une partie du marché de la chimie fine.

Sur le long terme et avec des prix du pétrole plus élevés, la voie de la substitution des produits pétrosourcés par des produits biosourcés sera favorisée par rapport à la voie de l'innovation. En effet, la rentabilisation des infrastructures impose une certaine inertie à la chimie de commodité et l'intégration dans les marchés complexes rend difficile la création de nouveaux marchés.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

34

11. Il s'agit d'une technologie innovante pour la chimie industrielle car les réactions se déroulent dans des petits canaux et non pas dans des réacteurs de plusieurs mètres cubes. Ceci permet de mieux contrôler les paramètres et le rendement de ces réactions.

6. LE DÉFI DES RESSOURCES DISPONIBLES EN BIOMASSE

La disponibilité en biomasse pour l'industrie de la chimie est une question complexe qui nécessite de poser des hypothèses sur l'offre en biomasse, sur l'allocation entre les différentes utilisations, et sur la demande de l'industrie de la chimie en particulier.

Le présent chapitre se base quasi exclusivement sur les données présentes dans une étude de référence du *nova Institute*. Celle-ci a tenté de démontrer la possibilité d'une chimie à 95 % biosourcée. Mais à quelles conditions ?

Y aura-t-il assez de biomasse pour alimenter l'industrie chimique ?

En 2010, la pétrochimie consommait près de 590 millions de tonnes de matières premières, dont 68 % de pétrole, 21 % de gaz, 10 % de biomasse. **bib.69** Ce qui représente respectivement 9 % de la production annuelle mondiale de pétrole (4,3 milliards de tonnes), 6 % de la production annuelle mondiale de gaz naturel (2,2 milliards de tonnes) et 0,5 % de la production annuelle mondiale de biomasse (11,4 milliards de tonnes de matière sèche). **bib.70**

Sur le long terme, peut-on espérer que la contribution de la biomasse à l'approvisionnement de l'industrie de la chimie s'approche des 100 %, tout en restant compatible avec les autres besoins en biomasse (alimentation humaine, animale, et énergie) ?

Cette question complexe nécessite de poser des hypothèses sur l'offre en biomasse, sur l'allocation entre les différentes utilisations, et sur la demande de l'industrie de la chimie en particulier.

Une étude de grande ampleur menée par des chercheurs du *nova Institute* a abordé cette question en 2015. **bib.69** L'objectif de l'étude : estimer la situation entre l'offre de biomasse et sa consommation par l'industrie de la chimie à l'horizon 2050.

Trois scénarios pour l'offre en biomasse

L'offre en biomasse a été estimée selon trois scénarios (**Tableau 4**), allant du plus pessimiste (Low scenario, 12,4 Gt/an) au plus optimiste (High scenario, 25,2 Gt/an) :

1. Dans le **scénario Low**, la surface agricole diminue légèrement, et l'augmentation des rendements agricoles est moins grande que projetée.
2. Dans le **scénario Business As Usual (BAU)**, les tendances actuelles d'augmentation de surface et de rendement sont conservées.
3. Dans le **scénario High**, la surface agricole augmente de près de 50 % et l'augmentation des rendements agricoles est meilleure que prévue, ce qui double la quantité de biomasse agricole en comparaison à 2011.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

35

6. LE DÉFI DES RESSOURCES DISPONIBLES EN BIOMASSE

Tableau 4

Paramètres des scénarios de l'offre en biomasse. Adapté de Carus et al., 2015

Les données présentes dans ce tableau proviennent directement du document source et n'ont pas fait l'objet d'une étude plus poussée.

	Unités	2011	2050 Low	2050 BAU	2050 High
Total	Gt_{MS}/an	11,4	12,4	18,2	25,2
Récoltes agricoles	Gt_{MS}/an	4,2	5,1	6,2	7,8
<i>Surface cultivée</i>	<i>Millions ha</i>	<i>1.341</i>	<i>1.320</i>	<i>1.619</i>	<i>1.929</i>
<i>Rendements céréales</i>	<i>t_{MS}/ha</i>	<i>3,2</i>	<i>3,5</i>	<i>3,8</i>	<i>3,9</i>
Résidus agricoles	Gt_{MS}/an	1,4	1,5	3,3	5,1
<i>Fraction récoltée</i>		<i>25 %</i>	<i>25 %</i>	<i>40 %</i>	<i>50 %</i>
Biomasse herbacée	Gt_{MS}/an	3,7	3,7	3,2	2,9
Bois	Gt_{MS}/an	2,1	2,1	5,5	9,4
<i>Surface de forêts plantées</i>	<i>Millions ha</i>	<i>290</i>	<i>290</i>	<i>490</i>	<i>680</i>
<i>Rendement</i>	<i>m³/ha/an</i>	<i>8,5</i>	<i>8,5</i>	<i>14</i>	<i>20</i>

Tous les chiffres sont exprimés en « tonne de matière sèche (MS) ».

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

36

6. LE DÉFI DES RESSOURCES DISPONIBLES EN BIOMASSE

Scénario de la demande en biomasse

Pour la demande, les chercheurs basent leurs hypothèses sur une augmentation de la population à 9,5 milliards d'habitants et une estimation de 3,5 % de croissance de l'industrie de la chimie. Ce dernier chiffre est mentionné dans diverses études de marché. **bib.71**

La quantité de matières premières nécessaire à l'industrie de la chimie serait ainsi multipliée par quatre en 2050 pour atteindre 2,3 Gt/an (Figure 12).

Cinq scénarios de la demande ont été envisagés par les chercheurs (Figure 14, p. 39). Comme illustré dans la figure 13, ces scénarios font varier la contribution de la biomasse dans l'approvisionnement de l'industrie chimique de 20% pour le scénario **BAU** (Figure 12 : partie droite) à 95% dans le scénario **High**.

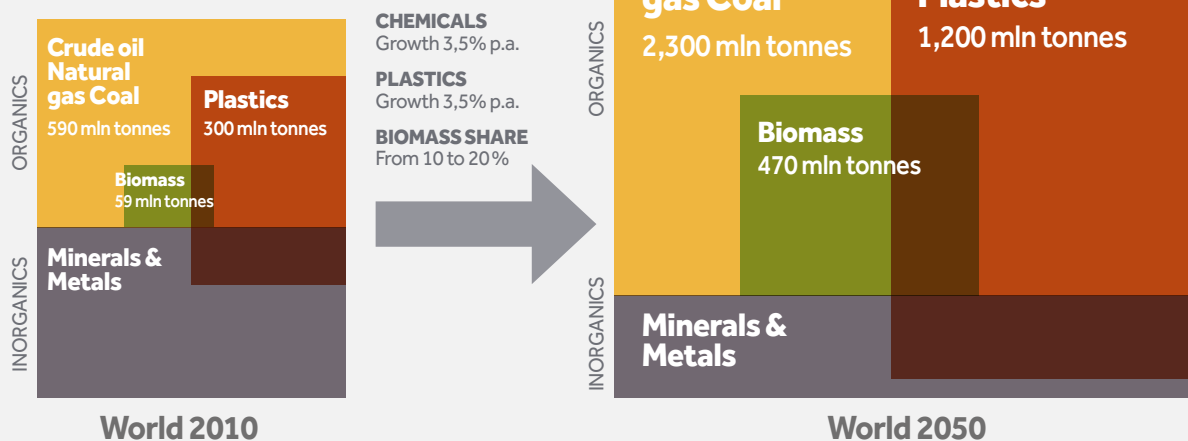
Le scénario **high growth – low pressure** fait - quant à lui - intervenir la technologie de capture du CO₂ à son maximum pour diminuer la quantité de biomasse nécessaire.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

37

Figure 12

Évolution de la demande annuelle en matière première de l'industrie de la chimie entre 2010 et 2050 (« scénario Business As Usual » avec une contribution de 20% de biomasse aux matières premières de la chimie organique (nova Institute, 2015)).

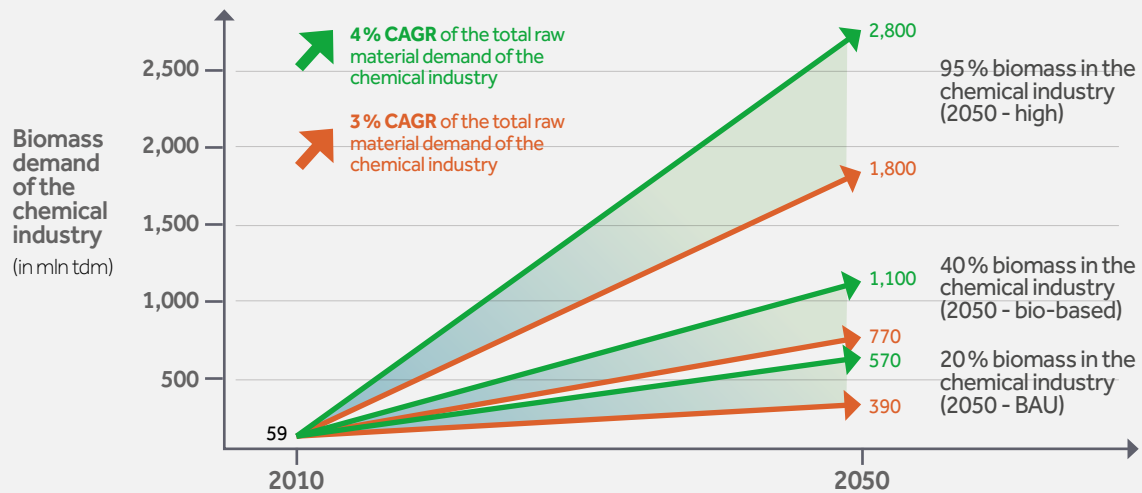


6. LE DÉFI DES RESSOURCES DISPONIBLES EN BIOMASSE

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

Figure 13

Scénarios de la demande mondiale annuelle en biomasse dans l'industrie chimique entre 2010 et 2050 (nova Institute, 2015).



38

6. LE DÉFI DES RESSOURCES DISPONIBLES EN BIOMASSE

Une chimie 100% biosourcée : possible dans les scénarios optimistes

La comparaison entre les différents scénarios d'offre et de demande est visible dans la

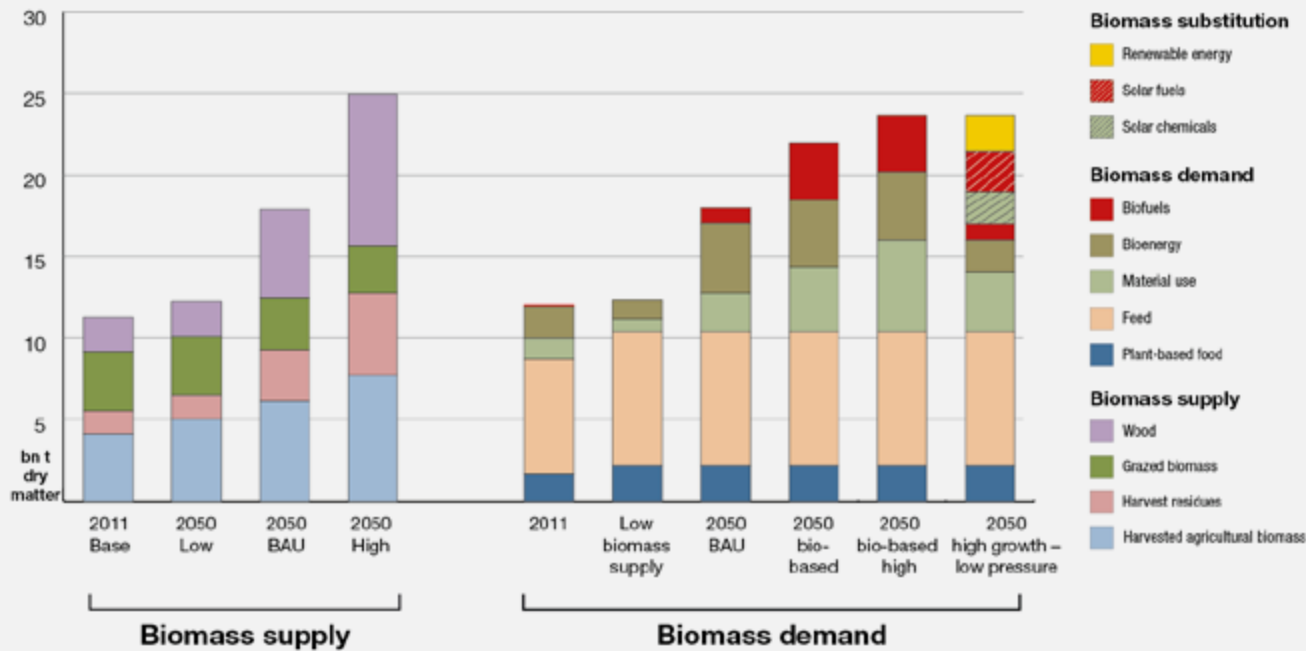
Figure 14. Lorsque l'offre en biomasse est insuffisante pour couvrir la demande, les chercheurs appliquent une hiérarchisation selon la loi des 4F : priorité pour servir l'alimentation humaine, puis l'alimentation animale, ensuite vient les matériaux, et enfin les bioénergies et les biocarburants.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

39

Figure 14

Comparaison entre les différents scénarios d'offre et de demande mondiale en biomasse (nova Institute, 2015).



6. LE DÉFI DES RESSOURCES DISPONIBLES EN BIOMASSE

Dans le cas des scénarios pessimistes et réalistes des quantités de biomasse disponibles, une contribution de maximum 20% de biomasse dans les matières premières de l'industrie chimique peut être atteinte.

- Dans le cas du **scénario pessimiste** (Low biomass supply), l'offre en biomasse est insuffisante pour couvrir tous les besoins. En priorisant l'alimentation humaine et animale, il ne reste que 2 Gt de biomasse pour les matériaux et les bioénergies. La contribution de la biomasse à l'approvisionnement de l'industrie chimique sera inférieure à celle de la situation de 2011 (moins de 10%).
- Dans le **scénario réaliste** (BAU), la contribution de la biomasse à l'approvisionnement de l'industrie chimique peut s'élever maximum à 20%.

Une industrie chimique biosourcée à 95% d'ici 2050 représente un approvisionnement en biomasse de 2,3 Gt/an, ce qui équivaut à la quantité de sucres présente dans la production agricole mondiale actuelle, toutes cultures confondues. Cette industrie chimique biosourcée est possible dans deux scénarios :

- Dans le **scénario optimiste** de l'offre en biomasse (High), qui prévoit un doublement de la production totale de biomasse d'ici 2050. Cela permettrait de couvrir la demande totale en biomasse pour l'ensemble des besoins (alimentation humaine et animale, chimie, énergie).

- Dans le scénario High / Low avec un développement poussé de la technologie de *capture et d'utilisation du CO₂*. Cela permettrait de générer l'ensemble des besoins de la chimie et des biocarburants (4,5 Gt/an) sans puiser dans la réserve de biomasse. Dans ce cas, une production mondiale de biomasse équivalente à la production actuelle pourrait suffire.

Conclusions

Une industrie chimique totalement biosourcée et compatible avec la disponibilité en biomasse est possible dans les conditions les plus optimistes. Cela demanderait une quantité non négligeable de ressource en biomasse : 2,3 Gt/an de matière sèche, soit la quantité de sucres présente dans la production agricole mondiale actuelle. Cette quantité de matière sèche peut être obtenue dans un scénario optimiste qui prévoit soit une production de biomasse doublée, soit l'utilisation massive des technologies de *capture de CO₂*.

Une chimie 100% biosourcée pourrait également être possible selon un second scénario (non envisagé par le *nova Institute*) : celui d'une industrie de la chimie avec une croissance faible, voire nulle et une diminution de la quantité de biomasse allouée à l'alimentation animale. Ce scénario limiterait la demande en biomasse de l'industrie chimique tout en augmentant l'offre de biomasse disponible pour ses besoins.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

40

7. CONCLUSIONS

De nombreux pays s'engagent actuellement dans des stratégies en faveur du développement d'une économie biosourcée dans une optique de développement durable. Souvent, ces stratégies manquent d'objectifs quantitatifs et d'un état des lieux des dépendances à la pétrochimie. D'où l'intérêt de réaliser un dossier d'analyse¹² sur le propos.

Au terme de la lecture, que pouvons-nous conclure ? Une transition vers une chimie 100% biosourcée est-elle envisageable ?

L'indispensable pétrochimie

La pétrochimie est devenue indispensable au fonctionnement de l'économie, et les défis de la chimie biosourcée pour se défaire de cette dépendance au pétrole sont importants. Les produits issus de la chimie organique¹³ sont inhérents au bon fonctionnement de la société telle que nous la connaissons actuellement, nous offrant un mode de vie plus confortable. De même, la chimie organique est

également nécessaire à de nombreux secteurs non chimiques (informatique, sidérurgie, agriculture...) (**Chapitre 2**).

Pour comprendre la possibilité d'émergence de la chimie biosourcée, il est apparu essentiel de remonter le temps et d'étudier l'histoire de l'industrie chimique. Une transition d'envergure dans l'utilisation des matières premières ne s'est vue que deux fois : lors du passage à la carbochimie dans les années 1860 et lors du passage à la pétrochimie dans les années 1930. Chacune de ces transitions a été accompagnée d'une offre en matière première (liée à la métallurgie dans la première, puis à l'industrie automobile lors de la seconde) et d'une demande pour les produits chimiques (par l'industrie du textile puis par le développement des plastiques). Sans les investissements massifs des pays européens durant la seconde guerre mondiale pour de nouvelles infrastructures, la pétrochimie ne se serait pas développée à un tel rythme (**Chapitre 3**).

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

41

12. Rappelons que ce dossier constitue un exercice prospectif dont l'objectif principal est d'ouvrir le débat et d'identifier de nouvelles pistes de réflexion.

13. Chimie organique : chimie de l'élément carbone, que cet élément carbone soit issu de la biomasse ou de ressources fossiles. A opposer à la chimie minérale.

7. CONCLUSIONS

La pétrochimie domine l'industrie chimique actuelle. Le pétrole et le gaz représentant 90 % de son approvisionnement en matière première. Cette dépendance est fortement ancrée. L'inertie du secteur de la chimie, frein à la transition, est due à plusieurs facteurs :

1. Les investissements conséquents dans les infrastructures actuelles de la pétrochimie.
2. La demande pour des molécules plateformes, développées selon la logique de la pétrochimie, qui sont nécessaires à la synthèse de la majorité des molécules utilisées actuellement par les industriels.
3. L'intégration de ces molécules dans chacun des secteurs de l'économie, rendant les marchés complexes.

Les défis à relever avant une transition totale vers la chimie biosourcée

La troisième transition, celle qui verrait le passage de la pétrochimie à la chimie biosourcée, devra relever chacun des défis suivants :

- **Défis techniques (Chapitre 4).** Les molécules plateformes biosourcées devront s'imposer dans la chimie de commodité, soit par la substitution des molécules plateformes pétrochimiques existantes, soit par l'innovation de nouvelles molécules qui remplissent les mêmes fonctions. Etant donné les contraintes liées aux investissements du secteur de la pétrochimie, la voie de la substitution risque d'être favorisée (comme ce fut le cas lors de la transition de la carbochimie à la pétrochimie).
- **Défis économiques (Chapitre 5).** Sur le court terme, les bas prix du pétrole rendent difficilement compétitive la voie de la substitution. Les industriels jouent sur les leviers de la durabilité ou de l'innovation pour développer leurs produits biosourcés. La compétitivité reste le premier moyen d'action de la chimie de commodité pour la commercialisation de produits. Ceux-ci ne pourront se développer que lorsque les prix du pétrole seront suffisamment élevés. La chimie fine pourrait se développer plus rapidement étant donné sa dépendance moindre aux prix du pétrole et les plus petites quantités de matières premières nécessaires.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

42

7. CONCLUSIONS

- **Défi financier (Chapitre 3).** Les investissements des états (aussi bien les États-Unis que les pays européens) ont joué un rôle crucial dans le développement de la pétrochimie, tant pour développer des technologies que pour ouvrir de nouveaux marchés. Il devra en être de même avec le développement de la chimie biosourcée.
- **Défi de l'exploitation des ressources en biomasse (Chapitre 6).** Dans l'hypothèse d'une croissance continue, il faudra fournir à la chimie 2,3 Gt/an de biomasse (soit la quantité de sucre contenue dans la production mondiale cumulée de toutes les céréales). Cette demande ne pourra être satisfaite que dans un scénario optimiste pour la disponibilité de biomasse (un doublement d'ici 2050) ou un scénario nécessitant l'utilisation massive de technologie de *capture de CO₂*. Une autre voie passerait par une stagnation de la demande du secteur de la chimie et une moindre utilisation de la biomasse pour l'alimentation animale.

Au vu de ces défis, la transition vers une chimie biosourcée ne se fera pas uniquement grâce aux industriels et au « laisser-faire » du marché. Cette transition devra impliquer toutes les

dimensions de l'économie, aussi bien l'amont agricole et forestier que l'aval commercial qui devra s'adapter à de nouveaux produits innovants. Cette transition devra également impliquer les gouvernements (soutien aux initiatives innovantes), dans la recherche industrielle, et dans l'établissement de normes et de lois. Enfin, cette transition devra impliquer les consommateurs dans le choix de leurs produits. Seule une mobilisation de tous les acteurs de l'économie et de la société transformera le projet d'une chimie entièrement biosourcée en réalité.

La **chimie biosourcée** substituera en partie le pétrole comme source de carbone pour des molécules devenues incontournables pour l'industrie chimique, tel que l'éthylène. Elle amènera également des molécules plateformes innovantes telles que l'acide lactique (pour le PLA) et certaines molécules pour la chimie fine. Les ressources de biomasse disponibles pour la chimie biosourcée seront suffisantes (en regard des autres besoins), à condition que les besoins de l'industrie chimique soient limités et qu'ils intègrent la logique de la réutilisation et du recyclage.

Quoiqu'il en soit, les autres sources de carbone resteront incontournables à l'avenir. La voie de l'innovation pourra

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

43

7. CONCLUSIONS

difficilement remplacer toutes les molécules produites actuellement. Au moment de la transition du charbon vers le pétrole et le gaz, c'est la voie de la substitution qui l'a emporté. Et aujourd'hui, les molécules développées avec la carbochimie sont toujours utilisées.

Premièrement, l'usage du **pétrole** continuera d'être pertinent pour la synthèse de molécules clés encore difficilement synthétisables à partir de biomasse comme les aromatiques. D'où l'importance de préserver les ressources de pétrole restantes comme matière première pour la chimie, et non comme carburant. De même, il convient de valoriser au maximum ce pétrole déjà extrait dans une optique d'économie circulaire (réutilisation, recyclage).

Deuxièmement, un retour sur le devant de la scène de la **carbochimie** est envisageable. La Chine est d'ailleurs en train d'étudier cette possibilité.

Troisièmement, le procédé de **capture et d'utilisation du CO₂** - qui fait notamment l'objet du projet européen Smart CO₂ Transformation (SCOT) coordonné par le pôle de compétitivité *GreenWin* et l'association européenne CO₂ Value - constitue une piste sérieusement explorée par un nombre croissant d'acteurs tels que le *nova Institute*. Ce concept a donc lui aussi un beau potentiel de développement.

À l'horizon 2050, la chimie ne sera pas entièrement biosourcée. Elle sera alimentée par des sources multiples de carbone. La biomasse occupera une place de plus en plus importante, en parallèle à d'autres ressources complémentaires.

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

44

BIBLIOGRAPHIE

1. Vers une chimie biosourcée. Available at: <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Tous-les-Zooms/Vers-une-chimie-biosourcee>. (Accessed: 28th February 2017)
2. Nokia. Nokia Lumia 820 Eco Profile. (2012)
3. 100 millions de téléphones portables usagés : l'urgence d'une stratégie. Available at: <http://www.senat.fr/rap/r15-850/r15-8501.html>. (Accessed: 3rd January 2017)
4. Polyurethanes dans Applications automobile. Available at: <http://www.polyurethanes.org/fr/ou-le-trouve-t-on/automobile>. (Accessed: 27th February 2017)
5. PlasticsEurope - 02/07/14 - Les matières plastiques accompagnent la révolution automobile - PlasticsEurope. Available at: <http://www.plasticseurope.fr/centre-dinformatons/salle-de-presse/communiqués-de-presse-2014/020714---les-matieres-plastiques-accompagnent-la-revolution-automobile.aspx>. (Accessed: 3rd January 2017)
6. CEFIC. The European chemical industry in worldwide perspective Facts and Figures 2012. (2012)
7. Szmant, H. H. Organic Building Blocks of the Chemical Industry. (John Wiley & Sons, 1989)
8. Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O. & Ludwig, C. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review* 2, 81–98 (2015)
9. Costanza, R., Graumlich, L. & Steffen, W. L. Sustainability Or Collapse?: An Integrated History and Future of People on Earth. (MIT Press, 2007)
10. Gruber, N. & Galloway, J. N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature* 451, 293–296 (2008)
11. Smil, V. Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production. (MIT Press, 2004)
12. Newman, D. J., Cragg, G. M. & Snader, K. M. Natural products as sources of new drugs over the period 1981–2002. *J. Nat. Prod.* 66, 1022–1037 (2003)
13. Walsh, V. Invention and innovation in the chemical industry: Demand-pull or discovery-push? *Research Policy* 13, 211–234 (1984)
14. CARBOCHIMIE ET PÉTROCHIMIE - Carbochimie. Encyclopédie universelle (2012)
15. Stokes, R. G. La reconstruction de l'industrie chimique européenne. *Histoire, économie et société* 17, 39–47 (1998)
16. Arora, A. & Gambardella, A. The dynamics of industry structure: The chemical industry in the U.S., Western Europe, and Japan in the 1980s. 407–440 (2000). doi:10.1007/978-94-015-9377-9_14
17. Rabkin, Y. M. La chimie et le pétrole : les débuts d'une liaison. *Revue d'histoire des sciences* 30, 303–336 (1977)
18. Spitz, P. H. & Petersen, B. Petrochemicals: From dyestuffs to hydrocarbons and NPRA. *Chemical Week, suppl. NPRA: A Century of Achievement and Excellence* 64–73 (2002)

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

45

BIBLIOGRAPHIE

19. Adler, K. Oil refining changes transportation, history, and ways of life. *Chemical Week, suppl. NPRA: A Century of Achievement and Excellence* 32–47 (2002)
20. Caron, F. Les deux révolutions industrielles du XXe siècle. (A. Michel, 1997)
21. Thomas, D. & Jarry, B. Les alternatives végétales aux ressources fossiles Concept et enjeu territorial. (2011)
22. Brooks, H. The relationship between science and technology. *Research Policy* 23, 477–486 (1994)
23. Miller, C. R. Learning from History World War II and the Culture of High Technology. *Journal of Business and Technical Communication* 12, 288–315 (1998)
24. Medeiros, C. A. de. The post-war American technological development as a military enterprise. *Contrib Pol Economy* 22, 41–62 (2003)
25. Waterson, M. The economics of industrial innovation. *International Review of Law and Economics* 3, 210–211 (1983)
26. Smit, W. A. Science, Technology, and the Military A2 - Smelser, Neil J. in *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (ed. Baltes, P. B.) 13698–13704 (Pergamon, 2001)
27. Michel, J.-M. Histoire industrielle des polymères. *L'actualité chimique* 7–15 (2006)
28. Roberts, M. Plastics from petroleum shape modern life. *Chemical Week, suppl. NPRA: A Century of Achievement and Excellence* 118–119 (2002)
29. Perrin, R. & Scharff, J.-P. *Chimie industrielle*. (Dunod, 2006)
30. IFP énergies nouvelles. *Pétrochimie et chimie biosourcée*. (2014)
31. Frenzel, P., Hillerbrand, R. & Pfennig, A. Increase in energy and land use by a bio-based chemical industry. *Chemical Engineering Research and Design* 92, 2006–2015 (2014)
32. Iffland, K. et al. Definition, Calculation and Comparison of the 'Biomass Utilization Efficiency (BUE)' of Various Bio-based Chemicals, Polymers and Fuels. nova paper# 8 on bio-based economy. (Hürth, 2015)
33. Frenzel, P., Hillerbrand, R. & Pfennig, A. Exergetical Evaluation of Biobased Synthesis Pathways. *Polymers* 6, 327–345 (2014)
34. Frenzel, P., Fayyaz, S., Hillerbrand, R. & Pfennig, A. Biomass as Feedstock in the Chemical Industry - An Examination from an Exergetic Point of View. *Chemical Engineering & Technology* 36, 233–240 (2013)
35. Gallo, J. M. R. et al. Catalytic Transformations of Ethanol for Biorefineries. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 25, 2229–2243 (2014)
36. Bio-Based Polypropylene; Multiple Synthetic Routes Under Investigation. *Polymer Innovation Blog* (2013)
37. Does Bio-Polypropylene Make Economic Sense? - Bio-based News - The portal for bio-based economy and industrial biotechnology. *Bio-based News* (2012). Available at: <http://news.bio-based.eu/does-bio-polypropylene-make-economic-sense/>. (Accessed: 23rd March 2017)

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

46

BIBLIOGRAPHIE

38. Clark, J. H., Farmer, T. J., Hunt, A. J. & Sherwood, J. Opportunities for Bio-Based Solvents Created as Petrochemical and Fuel Products Transition towards Renewable Resources. *International Journal of Molecular Sciences* 16, 17101–17159 (2015)
39. Wertz, J.-L., Gerin, P. & Richel, A. Molécules issues de la valorisation de la lignine. 36 (*ValBiom*, 2015)
40. Haveren, J. van, Scott, E. L. & Sanders, J. Bulk chemicals from biomass. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 2, 41–57 (2008)
41. Guzman, D. de. Coca-Cola produces 100% bio-based PET bottle. *Green Chemicals Blog* (2015)
42. Williamson, M. A. US biobased products market potential and projections through 2025. (Nova Science Publishers, 2010)
43. Atanasov, A. G. et al. Discovery and resupply of pharmacologically active plant-derived natural products: A review. *Biotechnol Adv* 33, 1582–1614 (2015)
44. GPCA. GCC PETROCHEMICALS & CHEMICALS INDUSTRY Facts & Figures 2012. (2012)
45. Wittcoff, H., Reuben, B. G. & Wittcoff, H. *Industrial organic chemicals*. (Wiley, 1996)
46. Vennestrøm, P. N. R., Osmundsen, C. M., Christensen, C. H. & Taarning, E. Beyond Petrochemicals: The Renewable Chemicals Industry. *Angew. Chem. Int. Ed.* 50, 10502–10509 (2011)
47. Butylenes - Chemical Economics Handbook (CEH) | IHS Markit. Available at: <https://www.ihs.com/products/butylenes-chemical-economics-handbook.html>. (Accessed: 20th December 2016)
48. Global Muconic Acid Market - Transparency Market Research. Available at: <http://www.transparencymarketresearch.com/pressrelease/global-muconic-acid-market.htm>. (Accessed: 23rd March 2017)
49. Butadiene - Chemical Economics Handbook (CEH) | IHS Markit. Available at: <https://www.ihs.com/products/butadiene-chemical-economics-handbook.html>. (Accessed: 20th December 2016)
50. van Leeuwen, B. N. M., van der Wulp, A. M., Duijnste, I., van Maris, A. J. A. & Straathof, A. J. J. Fermentative production of isobutene. *Appl Microbiol Biotechnol* 93, 1377–1387 (2012)
51. Bunel, J. La chimie organique, confrontée à la flambée du prix du pétrole. Le 4 pages [SESSI] (2006)
52. Cagnet, P. *Notions de chimie industrielle - cours*. (2016)
53. *essenscia*. Belgium, a world champion for chemicals and plastics. (2013)
54. de Paepe, P., McLinn, J. & Porter, M. Responding to Oil Price Volatility in the Chemical Industry. (2015)
55. Braskem freezes green plastics plans and focuses elsewhere. (2013). Available at: <http://www.bnamericas.com/news/petrochemicals/braskem-freezes-green-plastics-plans-focuses-elsewhere>. (Accessed: 26th March 2017)

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

47

BIBLIOGRAPHIE

56. On, D. Epichlorhydrine biosourcée : Solvay certifié pour son Epicerol. Formule Verte
57. Large, S. O., Editor at. Chemical Makers Roll Out More Bio-Based Feedstocks. Chemical Processing Available at: <http://www.chemicalprocessing.com/articles/2016/chemical-makers-roll-out-more-bio-based-feedstocks/>. (Accessed: 13th December 2016)
58. Nouvelle, L. Danone et Nestlé s'allient pour biosourcer leurs bouteilles d'eau. usinenouvelle.com/ (2017)
59. Danone and Nestlé Waters pursue 100% bio-based plastic bottle rollout. [edie.net](http://www.edie.net/news/8/Danone-and-Nestle-Waters-pursue-100-bio-based-plastic-bottle-rollout/) Available at: <http://www.edie.net/news/8/Danone-and-Nestle-Waters-pursue-100-bio-based-plastic-bottle-rollout/>. (Accessed: 13th March 2017)
60. Hong, S., Musso, C. & Simons, T. J. Oil-price shocks and the chemical industry: Preparing for a volatile environment | McKinsey & Company. Available at: <http://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/oil-price-shocks-and-the-chemical-industry-preparing-for-a-volatile-environment>. (Accessed: 8th November 2016)
61. Monnet, F. Some challenges and achievements of green chemistry. (2016)
62. Friedman, D. C. Industrialization of Biology: A Roadmap to Accelerate the Advanced Manufacturing of Chemicals. (National Academies Press, 2015)
63. Journaliste, A. F. / . Les chimistes européens explorent les alternatives au pétrole. [lesechos.fr](http://www.lesechos.fr/idees-debats/sciences-prospective/0211390516745-le-virage-vert-des-chimistes-europeens-2036491.php#Xtor=AD-6000) (2016). Available at: <http://www.lesechos.fr/idees-debats/sciences-prospective/0211390516745-le-virage-vert-des-chimistes-europeens-2036491.php#Xtor=AD-6000>. (Accessed: 21st October 2016)
64. Calls for proposals 2017 | Bio-Based Industries - Public-Private Partnership. Available at: <https://www.bbi-europe.eu/participate/calls-proposals-2017>. (Accessed: 21st March 2017)
65. Hoeven, D. van der. Biobased economy strategy: through specialty chemicals and materials. Bio Based Press (2016)
66. Newhouse, T., Baran, P. S. & Hoffmann, R. W. The economies of synthesis. *Chem. Soc. Rev.* 38, 3010–3021 (2009)
67. Pastre, J. C., Browne, D. L. & Ley, S. V. Flow chemistry syntheses of natural products. *Chem. Soc. Rev.* 42, 8849–8869 (2013)
68. Gupta, C. A Biotechnological Approach to Microbial Based Perfumes and Flavours. *Journal of Microbiology & Experimentation* 2, (2015)
69. Piotrowski, S., Carus, M. & Essel, R. Global bioeconomy in the conflict between biomass supply and demand. *Industrial Biotechnology* 11, 308–315 (2015)
70. IEA Sankey Diagram. Available at: <http://www.iea.org/Sankey/>. (Accessed: 24th March 2017)
71. BIO-TIC. Overcoming hurdles for innovation in industrial biotechnology. Market Roadmap. (2015)

Quelles sources de carbone pour la chimie de demain ?

48

**ValBiom stimule et facilite
la concrétisation d'initiatives durables**
intégrant la production de biomasse
et sa transformation en énergies et matériaux.

Plus d'informations ?

www.labiomasseenwallonie.be

www.valbiom.be

**JE REFAIS
LE TOUR DU
DOCUMENT**