



Matières premières renouvelables au lieu de matières premières fossiles – une opportunité pour la Suisse

Quelles sont les sources adaptées aux matières premières renouvelables? Comment fabriquer des matériaux d'utilité et de valeur à partir de celles-ci? En quoi consistent les bioraffineries? Où existe-t-il une forte valeur ajoutée? Quelles sont les opportunités pour la Suisse?

SATW

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften
Académie suisse des sciences techniques
Accademia svizzera delle scienze tecniche
Swiss Academy of Engineering Sciences

Sommaire

2	1 Introduction
3	Avant-propos
4	2 Situation actuelle et défis stratégiques
6	3 Matières premières
6	3.1 Biomasse
10	3.2 Dioxyde de carbone CO ₂
12	3.3 Biogaz
13	4 Transformation des matières premières
13	4.1 Procédés chimiques
15	4.2 Procédés microbiens et cellules de mammifères
18	4.3 Plantes et cultures de cellules végétales
19	4.4 Cultures d'algues
20	5 Bioraffineries
22	6 Constatations
24	Recommandations

1 Introduction

Dans le cadre d'un projet de la SATW, un groupe de travail composé de Richard Braun, Kaspar Eigenmann, Daniel Gygax, Serge Kocher, Ulla Létinois, Adrian Rüegsegger et Christian Suter, a étudié les possibilités d'utiliser les matériaux renouvelables comme matières premières dans les produits actuels fabriqués en grande partie au moyen de sources fossiles. En revanche, l'exploitation des matières premières renouvelables pour la production d'énergie ne fait pas l'objet de ce projet.

L'étude a pour objectif d'identifier des sources de matériaux renouvelables et de démontrer les possibilités de fabriquer des matériaux d'utilité et de valeur à partir de biomatériaux. Cela implique notamment d'identifier des procédés techniques prometteurs pour la fabrication et la transformation, ainsi que de prendre en considération les questions de sécurité d'approvisionnement et de durabilité.

Il convient en outre d'évaluer les perspectives d'évolution pour la Suisse: quels sont nos points forts et nos points faibles? Où existent-ils des possibilités de subventions pour la recherche et le développement? Partant de là, il s'agit alors de tirer les conséquences qui en découlent pour la politique suisse en Recherche & Développement.



Avant-propos

L'énergie et les matières premières constituent l'apport technique de l'industrie. L'utilisation de l'énergie fait depuis longtemps l'objet d'intenses discussions bien que, pour l'heure, l'énergie soit plutôt excédentaire qu'insuffisante. Les matières premières sont plutôt négligées dans les débats publics, les métaux rares étant régulièrement dans le collimateur de la presse. En revanche, les matières renouvelables (autrement dit organiques) sont rarement mentionnées (excepté dans le cadre du débat sur l'énergie). Cela s'explique peut-être dans la disponibilité bon marché des combustibles d'origine fossile.

Le présent rapport traite de ces matières premières et décrit l'état de la technique dans le cadre de leur utilisation pour la fabrication de matériaux d'utilité et de valeur ainsi que de substances actives. Pour la bonne compréhension du lecteur, une distinction est faite entre les processus déjà disponibles et ceux encore à l'état de concept. L'importance requise est également accordée à la combinaison nécessaire et prometteuse de la biotechnologie et de la chimie. L'état des lieux se termine par les bioraffineries, lesquelles n'ont pas encore dépassé le stade de la conception en Suisse. Le document se conclut par une liste succincte de constatations et quatre recommandations auxquelles nous ne pouvons que souhaiter le meilleur accueil auprès de l'industrie, du monde politique et du grand public afin que cette «opportunité pour la Suisse» soit véritablement saisie.



Ulrich W. Suter, Président de la SATW

Il est intéressant notamment de savoir dans quelle mesure les biomatériaux sont utilisés aujourd'hui dans les entreprises, si les matières à base biologique jouent un rôle dans les objectifs et les stratégies de l'entreprise, et de quelle manière les objectifs sont poursuivis en termes d'innovation. Parallèlement, le groupe de travail a recherché les hautes écoles suisses exerçant des activités de recherche et de développement susceptibles de contribuer à la réalisation de ces objectifs.

Cette brochure propose une synthèse des résultats obtenus. Après une analyse de la situation actuelle et des défis stratégiques dans le chapitre 2, les possibilités ainsi que les avantages et inconvénients des différentes matières premières biologiques renouvelables sont présentés dans le chapitre 3. Le chapitre 4, quant à lui, aborde les différentes techniques de transformation. Le chapitre 5 est consacré au remplacement des raffineries de pétrole conventionnelles par des bioraffineries.

Enfin, le chapitre 6 tire des enseignements pour la promotion des procédés techniques et la définition des priorités en termes de recherche et de développement, et formule des recommandations quant à la politique de recherche suisse.



2 Situation actuelle et défis stratégiques¹

Depuis près de 70 ans, nous sommes tributaires d'une chimie à base de pétrole. A l'heure actuelle, près de 90 pour cent de tous les produits chimiques organiques courants sont fabriqués à partir du pétrole. A titre d'exemple, chaque année, 115 millions de tonnes d'éthylène, 70 millions de tonnes de propylène et 70 millions de tonnes de composés aromatiques sont produits à partir du pétrole et constituent des produits chimiques de base. Les produits de la pétrochimie sont omniprésents. La fabrication de produits chimiques organiques courants à base de pétrole constitue un processus de création de valeur important, qui présente toutefois de nombreux défis.

Le premier défi réside dans la disponibilité limitée du pétrole. Les gisements suffiraient encore longtemps si le pétrole était exclusivement destiné à la pétrochimie. La réalité démontre toutefois que la majeure partie est utilisée comme carburant et combustible. Ainsi les réserves pour la pétrochimie sont diminuées. De plus, le prix du pétrole représente un défi. Celui-ci résulte d'une combinaison des coûts d'exploitation, de transport et de stockage, de la hausse des prix des entreprises exploitantes et des pays producteurs, ainsi que des structures commerciales mondiales et parfois spéculatives.

Le deuxième défi réside dans le fait que la fabrication de produits chimiques à base de pétrole engendre des coûts sociaux externes très élevés, qui ne se reflètent pas totalement dans le prix: la pollution de l'environnement par la production de pétrole, les risques écologiques élevés liés au transport du pétrole brut dans les pipelines ou par voie maritime, l'énorme dépense d'énergie liée à la transformation primaire pétrochimique, les risques d'accidents dans les usines chimiques industrielles, l'élimination des déchets de production et des sous-produits indésirables, la pollution de l'environnement par les produits de décomposition après usage et surtout l'entrée nuisible au climat du dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres polluants dans la biosphère.

Le troisième défi est de nature fondamentale et thermodynamique. Il est impossible de transformer intégralement l'énergie thermique en d'autres formes d'énergie. Un résidu est toujours rejeté dans l'environnement sous forme de chaleur inutilisée. Dès que nous utilisons des matières premières, l'environnement est inévitablement «réchauffé».

La nature permet de réduire la dépendance vis-à-vis du pétrole

Existe-t-il une issue à notre dépendance vis-à-vis du pétrole? Depuis des millions d'années, la nature pratique une chimie douce dans le monde entier sur la base de processus de recyclage. La photosynthèse est à la base de ces processus de synthèse naturels. Les substances simples, comme le CO₂ et l'eau, servent de base à la création d'une large palette de produits finaux complexes, structurés et précieux.

Depuis les années 80, une grande partie du bioéthanol est produite à partir de canne à sucre au Brésil et de maïs aux Etats-Unis. Depuis les années 90, le biodiesel est utilisé comme mélange de carburant par transestérification à partir d'huiles végétales. L'utilisation de matières premières renouvelables à des fins autres que la production d'énergie reste toutefois marginale. Cela est dû avant tout au fait qu'aujourd'hui, les matières premières fossiles sont beaucoup plus intéressantes que la biomasse sur le plan économique. En Allemagne, l'industrie chimique utilise environ 87 pour cent de matières premières fossiles et 13 pour cent de matières premières renouvelables. Dans toute l'Europe, l'industrie chimique utilise environ 8 pour cent de matières premières renouvelables. S'affranchir de la dépendance des matières premières fossiles fait partie du programme de durabilité de l'industrie. En raison des conditions-cadres difficiles, l'accent est toutefois mis sur d'autres aspects de la durabilité, par exemple la réduction de la consommation d'énergie.

	Matières premières fossiles	Matières premières renouvelables
Exemples	pétrole, gaz naturel, charbon	bois
Disponibilité	limitée (non renouvelable)	quasi illimitée (renouvelable)
Cycle	cycle interrompu (usage unique)	cycle fermé (usage multiple)
Problématique des déchets	<ul style="list-style-type: none"> • sous-produits indésirables • déchets de production • déchets dangereux • produits de décomposition polluants • émissions de CO₂ 	forte réduction des déchets
Coûts de remplacement	valeur arbitraire (remplacement impossible)	valeur réelle
Production	mondiale, monopolisée, internationale, suprarégionale	régionale, localisée, décentralisée, autarcique, autonome, diversifiée
Traitement	chimique, physique	physique, enzymatique, chimique
Risques	<ul style="list-style-type: none"> • transport global (pipelines, pétroliers) • accidents dans des installations industrielles 	<ul style="list-style-type: none"> • surexploitation des sols • concurrence avec la production de denrées alimentaires
Infrastructure	établie	à peine établie

Tableau 1: Comparaison des matières premières fossiles et renouvelables

Propriétés des matières premières fossiles et renouvelables

En dehors des matières premières fossiles et de la biomasse, seuls le CO₂ et le carbonate peuvent être utilisés comme source de carbone pour la chimie. Pour des raisons thermodynamiques, l'utilisation de CO₂ et de carbonate requiert toutefois une charge d'énergie élevée. En revanche, le CO₂ fixé par les plantes et transformé en biomasse constitue une source de carbone intéressante et durable qui équivaut quasiment à un recyclage du CO₂.

Une appréciation d'ensemble reste toutefois nécessaire (par exemple au moyen d'un Life Cycle Assessment, LCA). Ainsi, il peut s'avérer plus efficace d'utiliser des matières premières renouvelables comme sources d'énergie afin de préserver les réserves fossiles pour qu'elles soient disponibles le plus longtemps possible pour la fabrication des produits chimiques. Il est cependant essentiel à long

terme d'utiliser également les matières premières renouvelables pour l'industrie chimique. Dans tous les cas, le remplacement des matières premières fossiles par des matières premières renouvelables est judicieux dans l'optique de processus de recyclage.

En raison du prix actuellement bas du pétrole, seuls les produits à haute valeur ajoutée constituent aujourd'hui des objectifs économiquement intéressants pour les matières premières renouvelables. Celles-ci ne peuvent s'imposer sur le marché qu'à la condition de présenter des avantages économiques ou techniques par rapport aux matières premières fossiles. Jusqu'à il y a quelques années, en raison des facteurs économiques, la recherche et le développement accordaient peu d'attention aux matières premières renouvelables. Au cours des dernières années, la situation a surtout évolué en dehors de la Suisse. En particulier l'idée des bioraffineries a donné un nouvel élan.

¹ Behrens M et al., Catalysis for the conversion of biomass and its derivatives, Max Planck Research Library for the History and Development of Knowledge, éditions epubli (2013) ISBN 978-3-8442-4282-9: 1-457

Union pétrolière, FAQ (2012) http://www.erdoel-vereinigung.ch/Libraries/Zahlen_und_Fakten/Jahresgrafiken_2012_d_12.pdf

Fischer H, Stoff-Wechsel: Auf dem Weg zu einer solaren Chemie für das 21. Jahrhundert, éditions Kunstmann (2012) ISBN 978-3-88897-808-1: 137-171

Fraunhofer ISI, Potenzialanalyse der industriellen weißen Biotechnologie (2007): 40
http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/t/de/publikationen/potenzialanalyse_weisse_bt.pdf

Knizia K, Kreativität, Energie und Entropie: Gedanken gegen den Zeitgeist, éditions Econ (1992) ISBN 3-430-15496-0: 90-100



3 Matières premières

3.1 Biomasse

Avant l'apparition de la chimie à base de pétrole il y a un siècle environ, presque tous les matériaux de base étaient issus de la biomasse végétale et animale. Cette proportion a tout d'abord connu une diminution constante avant de se stabiliser à environ dix pour cent¹. Cela démontre que certaines matières premières biogènes restent concurrentielles sur le plan économique malgré le prix peu élevé du pétrole. A l'heure actuelle, les matières premières issues de la biomasse sont utilisées à raison d'environ 50 millions de tonnes par an pour la fabrication de substances chimiques².

L'exploitation de nouvelles sources et le recours à de meilleurs procédés pour valoriser ces matières premières (voir chapitre 4) ont permis d'augmenter cette quantité de manière significative. L'utilisation de la biomasse en remplacement des produits pétroliers doit toutefois être décidée au cas par cas, idéalement au moyen d'une évaluation du cycle de vie (Life Cycle Assessment, LCA). Une ressource renouvelable n'est pas toujours optimale dans le bilan global du point de vue de la durabilité et il existe une concurrence d'utilisation entre les ressources biogènes. Il est possible par exemple d'utiliser le bois comme matière combustible – ce qui permet de préserver les ressources fossiles – ou comme matériau de construction.

Les principales matières premières biogènes peuvent être réparties en trois groupes d'après leurs propriétés chimiques: sucre et amidon, bois et résidus végétaux, huiles et graisses.

Sucre et amidon

Ce que l'on désigne au quotidien comme du sucre est en fait du saccharose, un disaccharide de glucose et de fructose. Lors de la photosynthèse, les plantes pro-

duisent du glucose qui sert de composant pour le saccharose, l'amidon et la cellulose. L'amidon est une macromolécule composée de nombreuses molécules de glucose associées. Le sucre et l'amidon sont des matières premières essentielles pour l'industrie agro-alimentaire. Au cours des dernières années, une attention croissante a été portée à la fermentation des parties de plantes contenant du glucose ou de l'amidon en vue d'obtenir de l'éthanol.

Depuis quelques temps, l'amidon est utilisé comme adjuvant dans le secteur du textile et du papier. Il convient également comme polylactate pour fabriquer des matières plastiques biodégradables³. Les films de paillage en polylactate permettent par exemple de protéger les jeunes plants contre les mauvaises herbes. Les films sont biodégradables et les résidus peuvent être incorporés à la terre. Au total, la production des matières premières pour les bioplastiques occupe une superficie de 300'000 hectares, soit environ deux pour mille de la totalité des terres arables mondiales.

Bois et résidus végétaux

Une grande partie de la matière sèche végétale se trouve dans les parois cellulaires des plantes. Celles-ci se composent pour la moitié environ de cellulose, une macromolécule de sous-unités de glucose (voir figure 1). Les autres composants principaux des parois cellulaires sont l'hémicellulose, un mélange de macromolécules de différents composants du sucre, ainsi que la lignine, une macromolécule réticulée tridimensionnelle et amorphe de composants phénoliques. Les parois cellulaires des parties de plantes ligneuses contiennent jusqu'à 30 pour cent de lignine. Comme la biomasse sur terre se compose principalement de plantes, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine comptent parmi les principales ressources biologiques.

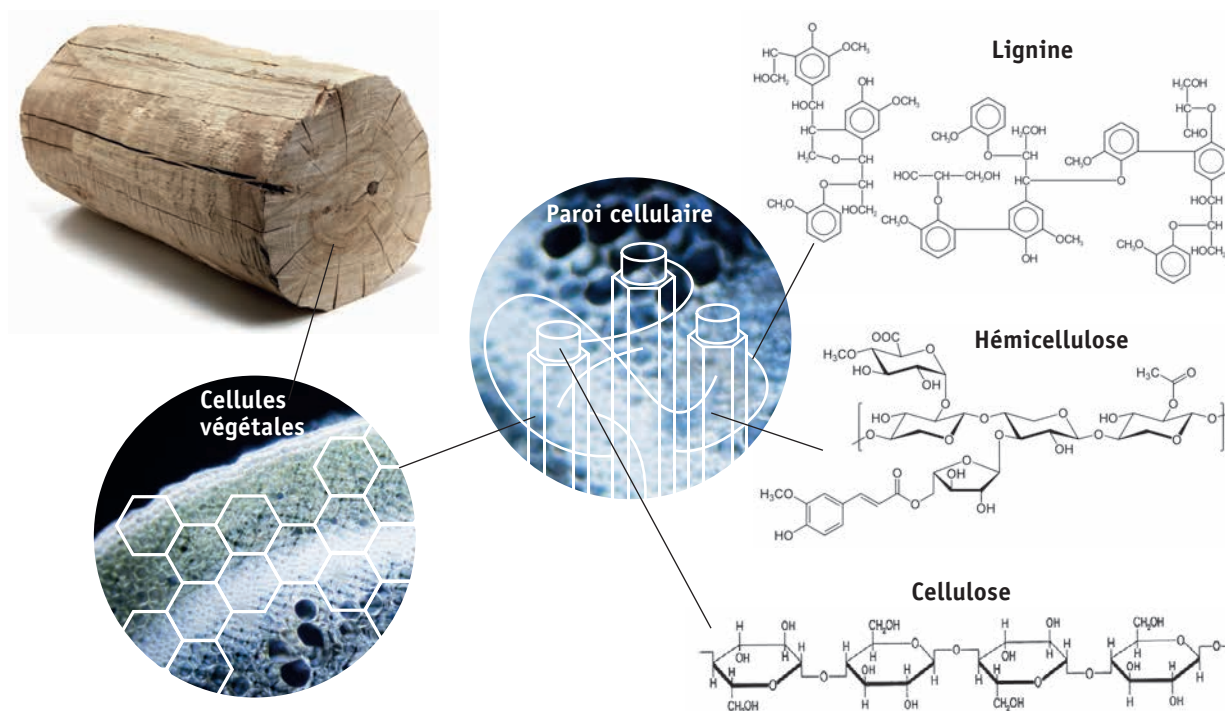


Figure 1: Structure moléculaire du bois⁴

Depuis longtemps déjà, le bois n'est pas seulement utilisé comme matière combustible et matériau de construction, mais sert également à la fabrication du papier – chaque année près de 280 millions de tonnes à travers le monde¹. Cela requiert de la cellulose et génère des quantités considérables de lignine et d'hémicellulose sous forme de sous-produits. A l'heure actuelle, seule une petite partie de la lignine et de l'hémicellulose est utilisée pour la synthèse chimique. Généralement, la combustion sert à produire la chaleur industrielle pour la fabrication du papier. Néanmoins, près de 150'000 tonnes de furfural sont

produites chaque année à partir d'hémicellulose¹. Il s'agit d'une substance de type huile qui peut servir à la fabrication de fibres chimiques et de résines synthétiques ou – en passant par l'étape intermédiaire du furane – de solvants. A partir de l'hémicellulose, il est également possible de produire des polyalcools qui serviront de matières premières pour les plastiques, ainsi que des amines qui serviront de matières premières pour les colorants. La lignine peut aussi servir de base à la fabrication de nombreux produits chimiques comme le benzène et le phénol (voir tableau 2).

Lignine comme ressource pour				
Produits par gaz de synthèse	Hydrocarbures	Phénols	Produits oxydés	Macromolécules
<ul style="list-style-type: none"> Méthanol Ether de diméthyle Ethanol 	<ul style="list-style-type: none"> Benzène Toluène Xylène 	<ul style="list-style-type: none"> Phénol Phénols substitués Catéchol 	<ul style="list-style-type: none"> Acides carboxyliques Aldéhydes Vanilline 	Additifs polymères, p. ex. pour les plastiques, adhésifs ou liants

Tableau 2: La lignine comme ressource potentielle pour de nombreux produits chimiques (selon², abrégé)



Le bois et les résidus végétaux, comme la paille, les tiges de maïs et autres résidus de récolte ou déchets végétaux, sont disponibles en grande quantité et ne trouvent aucune application dans la production des denrées alimentaires. C'est pourquoi il serait particulièrement judicieux de les utiliser comme matières premières dans les procédés de production chimiques. Il serait nécessaire toutefois de laisser une certaine partie des résidus végétaux sur les champs en vue de conserver la qualité du sol (humus).

Le procédé le plus efficace consiste à utiliser la biomasse en limitant au maximum les changements apportés à sa structure. La nanocellulose représente un champ d'application intéressant, car elle permet par exemple d'utiliser les fibres de cellulose spécialement traitées comme ressources pour la fabrication ou le renforcement des matières plastiques⁶. Ce n'est que lorsque les produits finis souhaités ne peuvent être fabriqués directement à partir de ces ressources biologiques que leur mise à disposition est opportune pour les procédés pétrochimiques établis. De nouvelles interfaces sont alors requises (voir chapitre 5). Un premier pas prometteur a été réalisé en ce sens en laboratoire: la transformation directe de cellulose en amidon au moyen d'une cascade biotechnologique de quatre réactions enzymatiques⁵.

Lorsque le bois est utilisé comme ressource, le défi consiste non seulement à transformer les biomolécules «volumineuses» de cellulose, d'hémicellulose et de lignine, mais également à fournir une matière première homogène. Les proportions de cellulose, d'hémicellulose et de lignine sont très différentes d'une plante à l'autre et varient également au sein d'une même variété, en raison par exemple des conditions environnementales variables. Par conséquent, les processus respectifs doivent être très robustes.

Huiles et graisses

Les huiles et les graisses se composent de glycérine (un alcool trihydrique) et d'acides gras. Elles sont principalement à base végétale, par exemple de palmier à huile, de colza, de maïs ou de soja – leur volume est actuellement d'environ 140 millions de tonnes par an. Environ 80 pour cent servent à la fabrication des denrées alimentaires, le reste au fourrage, aux biocarburants et comme matières premières pour l'industrie chimique².

À l'heure actuelle, environ 1,4 million de tonnes de glycérine sont dérivées de la fabrication du biodiesel, ce qui permet de répondre à près de trois quart de la demande annuelle². Cette source de glycérine, qui continuera d'augmenter dans un proche avenir, accroît l'intérêt de développer des techniques qui permettraient de l'utiliser comme matière première dans les processus de fermentation ou comme produit chimique de plateforme pour d'autres synthèses.

Les matières premières biogènes en Suisse

En Suisse, il ne serait guère judicieux d'exploiter plus largement les surfaces agricoles en vue d'obtenir de la biomasse pour l'utilisation matérielle, car cela se ferait au détriment de la production de denrées alimentaires et d'aliments fourragers. Avec l'occupation des sols actuelle, l'agriculture suisse couvre à peine deux tiers des besoins alimentaires nationaux sur le plan calorique. De plus, les coûts de production sont élevés. Comme l'a déjà démontré une vaste étude⁷ sur l'utilisation énergétique de la biomasse en Suisse, le bilan écologique des ressources biogènes n'est pas toujours favorable. En prenant pour exemple la culture du colza comme plante énergétique, il a été calculé que l'huile de colza était moins performante que le pétrole lors d'une évaluation globale de la durabilité. Cela s'explique notamment par les coûts relativement élevés qui sont nécessaires à la fertilisation, à la protection des cultures et au traitement mécanique des champs. Le sucre fabriqué en Suisse à partir de betteraves – environ 300'000 tonnes en 2014⁸ – est utilisé presque exclusivement pour la production de denrées alimentaires. Par

ailleurs, près de 56'000 tonnes de mélasse ont été dérivées de la fabrication de sucre⁸ en 2014. Celle-ci peut servir de source d'hydrates de carbone pour les applications biotechnologiques ainsi que la fabrication d'aliments de fourrage.

En Suisse, c'est avant tout le bois qui est considéré comme une ressource biologique. Son utilisation industrielle jouit d'une longue tradition. Un exemple bien connu est la fabrication de papier. En Suisse, celle-ci est de plus en plus menacée par la concurrence étrangère, ce qui démontre les difficultés pour un pays de fabriquer des produits de masse avec des coûts de production élevés. Dans le contexte d'une hausse progressive des prix du pétrole, le bois pourrait s'avérer toutefois une ressource intéressante pour les futures bioraffineries. Il est également disponible en grande quantité: en 2013, 4,8 millions de mètres cube de bois ont été abattus dans les forêts suisses⁹. Afin d'utiliser le bois ou ses composants comme ressources pour des bioraffineries, des procédés plus efficaces sont toutefois nécessaires pour traiter les composants en grande quantité. Dans le programme national de recherche NFP 66 «Ressource bois», l'exploitation chimique du bois constitue un aspect fondamental¹⁰. Le programme de recherche, qui

s'étend de 2012 à 2017, dispose pour cela d'un module ayant pour thème «Le bois en tant que matière première des substances chimiques utiles». Six projets de recherche traitent en particulier du développement de procédés biotechnologiques capables d'utiliser la lignine comme ressource. De plus, la SATW a organisé un Transferkolleg sur le thème «Advanced Wood Technologies» en 2014¹¹.

Les organismes sur mesure de la biologie synthétique pourraient permettre la transformation directe de bois en matières valorisables. Ce processus de transformation pourrait également être local – par exemple directement dans une scierie – sans avoir besoin d'une installation de pyrolyse à l'échelle industrielle.

Pour le site de production suisse, des procédés techniques novateurs, durables et efficaces sont requis. Ceux-ci pourraient servir à produire de plus en plus de produits, tels que des principes actifs pharmaceutiques, sur la base de ressources biologiques ou de produits chimiques de plateforme correspondants. Un exemple récent concerne la fabrication de 5-hydroxyméthylfurfural (5-HMF), un produit chimique relativement cher aux multiples possibilités d'application (voir encadré 1).

¹ GDCh, DECHEMA, DGMK, VCI, Rohstoffbasis im Wandel, prise de position (2010)

² IEA Bioenergy, Bio-based Chemicals. Value Added Products from Biorefineries, Task 42 Biorefinery (2012)

³ Wikipedia, mot-clé «polylactate» (28.5.2013)

⁴ www.ipe.ethz.ch/laboratories/ltr/education/Studienarbeiten, lien «Starke Verflechtung der Komponenten» dans la section «Green Chemistry» (27.1.2015)

⁵ Chun Y et al., Enzymatic transformation of nonfood biomass to starch, PNAS online (2013): avril 2015

⁶ Hohlfeld S und Honsel G, Starker Pudding: Schon lange schwärmen Wissenschaftler von Nanocellulose als neuem Wunderwerkstoff, Technology Review (2013) juin 2013: 10–11

⁷ Zah R et al., Future Perspectives of 2nd Generation Biofuels, vdf Hochschulverlag, Zurich (2010)

⁸ Usines sucrières d'Aarberg et de Frauenfeld, statistiques (11.2.2015)

⁹ Office fédéral de la statistique (2014): Statistique forestière suisse 2013

¹⁰ Fonds national suisse, programme national de recherche NFP 66 «Ressource bois», www.nfp66.ch (9.7.2013)

¹¹ www.satw.ch/projekte/transferkolleg/2014 (27.1.2015)

Le produit chimique de plateforme 5-hydroxyméthylfurfural (5-HMF)

Les produits chimiques de plateforme sont des substances chimiques qui permettent de fabriquer de nombreux produits différents et sont disponibles en grande quantité. Parmi ceux-ci figure notamment le 5-hydroxyméthylfurfural (5-HMF). Le 5-HMF est un composé organique qui se forme lors de la décomposition thermique des hydrates de carbone. Lorsque l'on chauffe du sucre dans une casserole, le 5-HMF est identifiable par une odeur de caramel. Cette substance chimique peut être obtenue à partir de biomasse végétale et servir de matière première dans l'industrie chimique pour différents matériaux novateurs, avant tout pour des polymères présentant des caractéristiques spécifiques. Selon une estimation du Département américain de l'énergie, le 5-HMF figure parmi les dix premiers produits chimiques de plateforme. La fabrication du 5-HMF à l'échelle industrielle représente toutefois un défi de taille. L'Institut pour la technologie de Karlsruhe (KIT) et la société suisse AVA Biochem BSL AG ont toutefois réussi une percée importante sur le plan scientifique et technique: au début de l'année 2014, l'installation «Biochem-1» exploitée par AVA Biochem à Muttentz, près de Bâle, est entrée en service pour produire du 5-HMF à l'échelle industrielle. Les chercheurs du KIT ont conçu le procédé correspondant.

Source: Institut de technologie de Karlsruhe (KIT), Produits chimiques à base renouvelable, communiqué de presse n° 12 (2014): 3.2.2014

d'un cycle complet: l'électricité issue d'une source photovoltaïque, hydraulique ou éolienne est utilisée par électrolyse pour produire de l'hydrogène. Avec le CO₂ issu de l'air rejeté par la fermentation ou les centrales thermiques, cet hydrogène est converti en méthane, lequel peut être utilisé ensuite pour d'autres synthèses chimiques ou stocké dans le réseau de gaz existant pendant des semaines voire des mois. En cas de besoins plus élevés – par exemple en hiver – le méthane est injecté dans des centrales thermiques combinées pour produire de l'électricité. Au final, le méthane est produit à partir d'un excédent d'électricité renouvelable et de biomasse.

Le procédé est expérimenté en Allemagne jusqu'à une puissance de raccordement électrique de 6 MW et une production de méthane de 4'000 m³ par jour. A partir de 2017, des installations modulaires sont disponibles avec une puissance de raccordement maximale de 20 MW⁴.

En Suisse, le programme «Centrale électrique 2020» de l'Office fédéral de l'énergie prévoit de réduire les émissions des futures centrales à gaz par séparation et stockage du

CO₂⁵. Cela permettra de transformer et d'utiliser le dioxyde de carbone concentré. Des discussions à ce sujet sont déjà en cours. Une collaboration au projet allemand ainsi qu'une adaptation à la situation suisse sont recommandées.

De nouvelles solutions catalytiques d'activation du méthane et de transformation directe en méthanol sont actuellement à l'étude. A cet effet, les chercheurs de l'ETH utilisent de la zéolite de cuivre comme catalyseur⁶. La transformation directe de CO₂ en méthanol fait aussi l'objet d'un suivi assidu, par exemple en réduisant le CO₂ au moyen d'organo-catalyseurs⁸ ou les nanobâtes d'oxyde de cuivre⁷ par induction de lumière solaire⁸.

Il est possible également de transformer directement le méthane en éthane et en éthylène. Jusqu'à présent, les rendements sont faibles; il existe un besoin évident de mener des recherches en la matière⁹. L'éthylène est un composant extrêmement important et polyvalent de la grande industrie chimique. Avec une production annuelle de 115 millions de tonnes, il s'agit du produit chimique le plus important en termes de volume.

¹ Aperçu sur <http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffdioxid>

² KIT Karlsruhe Institute of Technology, <http://www.katalyseundmaterialien.de/english/59.php>

³ Grimm N et al., Power to Gas. Eine innovative Systemlösung auf dem Weg zur Marktreife, Deutsche Energie-Agentur GmbH (2013), www.dena.de/publikationen/energiesysteme/fachbroschuere-power-to-gas-eine-innovative-systemloesung-auf-dem-weg-zur-marktreife.html

⁴ ZSW, Fraunhofer, SolarFuel GmbH, brochure «Erneuerbares Methan aus Ökostrom»

http://www.google.ch/search?client=safari&rls=en&q=erneuerbares+methan+aus+ökostrom&ie=UTF-8&oe=UTF-8&gfe_rd=cr&ei=R9XIVYnUGInL0wWwxrTQDQ B

⁵ Office fédéral de l'énergie (BFE), concept pour le programme de recherche «Centrale électrique 2020» (2005), octobre. Ainsi que: <http://www.bfe.admin.ch/forschungskraftwerk/02352/index.html?lang=fr>

⁶ Alayon EMC, Nachtegaal M, Ranocchiari M, van Bokhoven JA, Catalytic Conversion of Methane to Methanol Using Cu-Zeolites, *Chimia* (2012) 66: 668–674

⁷ Riduan SN, Zhang Y, Ying JY, Conversion of Carbon Dioxide into Methanol with Silanes over N-Heterocyclic Carbene Catalysts, *Angew Chem Intl Ed Engl* (2009) 48(18): 3322–3325

⁸ Ghadimkhani G, de Tacconi NR, Chanmanee W, Janaky C and Rajeshwar K, Efficient solar photoelectrosynthesis of methanol from carbon dioxide using hybrid CuO–Cu₂O semiconductor nanorod arrays, *Chem Commun* (2013) 49: 1297–1299

⁹ Lunsford JH, *Catalysis Today* (1990) 6(3): 235–259

Fixation du CO₂ par photosynthèse

Lors de la photosynthèse, les plantes, les algues ou les bactéries photosynthétiques utilisent l'énergie de la lumière du soleil pour convertir le dioxyde de carbone en composés chimiques comme le glucose. Aucun autre processus sur terre ne contribue autant à la formation de biomasse que la photosynthèse des plantes. Du point de vue chimique, la photosynthèse sépare l'hydrogène de l'eau en libérant de l'oxygène. L'hydrogène est converti en CO₂ et celui-ci est fixé sous forme d'un composé de carbone complexe.

Pour ce qui est des plantes, les approches d'optimisation de la photosynthèse doivent toujours considérer le système biologique dans son ensemble et sont complexes en raison de l'interaction nécessaire de la photochimie, du métabolisme dans les feuilles et de la croissance des plantes. La photosynthèse dans les bactéries convient mieux à l'optimisation, car les systèmes bactériens sont plus faciles à contrôler et le rendement de la transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique est plus élevé. Par exemple, la bactérie sulfurique verte *Chlorobaculum tepidum* transforme environ 10 pour cent de l'énergie lumineuse disponible en énergie chimique, contre 5 pour cent dans le cas des plantes. L'investissement technique pour l'utilisation de la photosynthèse bactérienne est toutefois élevé. La production d'hydrogène au moyen de bactéries offre une option intéressante.

Sources:

Evans JR, Improving photosynthesis, *Plant Physiology* (2013) 162: 1780–1793

Reich PB et al., From tropics to tundra: global convergence in plant functioning, *PNAS* (1997) 94(25): 13730–13734

Skillman JB et al., Photosynthetic productivity: can plants do better? in *Thermodynamics – Systems in equilibrium and non-equilibrium*, Moreno-Piraján JC, InTech (2011) chapter 3: 35–68

3.3 Biogaz

Le biogaz est un gaz combustible produit par fermentation à partir de la biomasse. Les déchets agricoles, les déchets de jardinage, les résidus de bois et les déchets ménagers sont utilisés comme matières premières. Généralement, le gaz est produit de façon décentralisée dans des installations de biogaz régionales. Il peut être utilisé comme carburant, pour produire de l'électricité, comme complément au gaz naturel ou comme matière première pour la synthèse chimique.

Les déchets passent par plusieurs étapes de fermentation dans l'installation de biogaz jusqu'à la formation anaérobie de méthane. En fonction de la matière première utilisée, le gaz combustible obtenu contient 50 à 75 pour cent de méthane, 19 à 38 pour cent de CO₂ et 6 pour cent

de vapeur d'eau. Les déchets de l'industrie agroalimentaire de transformation permettent d'obtenir le matériau le plus pur. Le gaz issu des déchets agricoles peut contenir au maximum 10 g/m³ d'hydrogène sulfuré toxique. Le biogaz issu des déchets ménagers présente souvent des traces de composés organiques chlorés¹.

Pour le chauffage et la production d'électricité, le séchage et la désulfuration sont nécessaires. Pour l'utilisation comme biocarburant, le CO₂, la vapeur d'eau, le sulfure d'hydrogène et, le cas échéant, les composés organochlorés doivent être éliminés. La purification a fait l'objet d'essais à l'échelle industrielle en Suède.

L'organisation «Biomasse Suisse»² encourage l'utilisation de la biomasse et des produits associés.

¹ The Biogas. http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html

² Biomasse Suisse, <http://www.biomasseschweiz.ch/index.php/de/>



4 Transformation des matières premières

4.1 Procédés chimiques

On peut s'attendre à moyen terme à ce que la collaboration avec l'industrie de production de denrées alimentaires et d'aliments fourragers permette d'utiliser les biomatériaux comme matières premières en dérivant des sous-produits rentables pour la conversion chimique¹. Les bioraffineries axées sur les carburants fournissent également des sous-produits intéressants.

La durabilité est essentielle pour formuler des investissements porteurs d'avenir. Il faut prendre en considération l'extraction des matières premières, l'élimination des déchets ou le recyclage, ainsi que le caractère limité de certains éléments. Il n'est intéressant ni pour l'industrie ni pour l'environnement d'avoir un processus chimique qui fonctionne certes dans l'eau, mais dont le catalyseur est un métal rare et précieux, tel que le rhodium ou le ruthénium, dont l'extraction consomme beaucoup d'énergie et qui ne peut être récupéré à 100 pour cent.

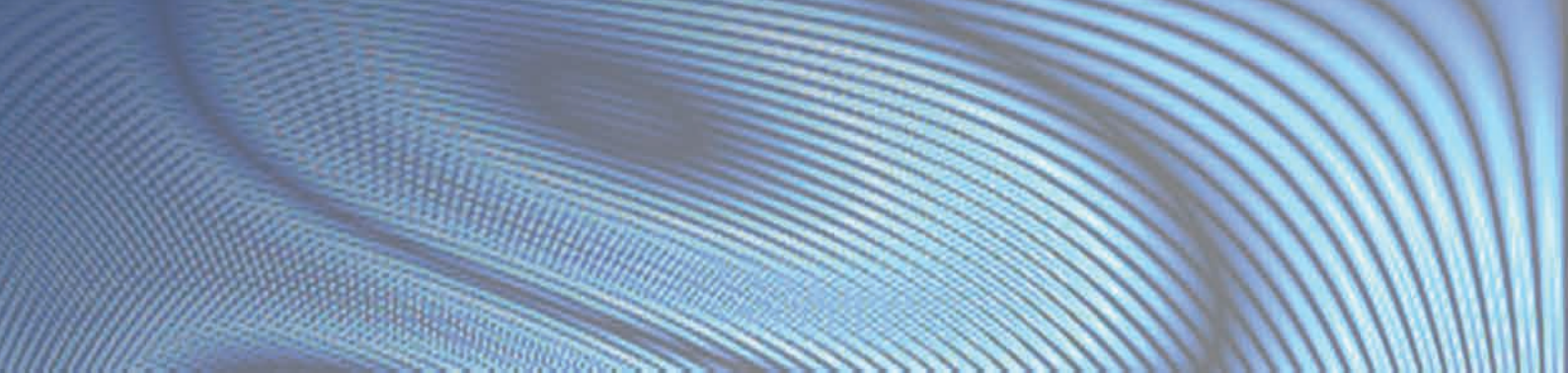
L'objectif à long terme est d'aboutir à un traitement intégré des déchets végétaux qui fournit de l'énergie, du biogaz, des carburants et des produits chimiques. Nous avons besoin pour cela d'une nouvelle chimie qui s'appuie sur la biomasse et n'emprunte pas la voie pétrochimique – c.-à-d. le gaz de synthèse, les modules C1 à C3 –, mais tente de modifier le moins possible la structure des composants de la biomasse. Comme l'approvisionnement en matières premières peut être très variable, il est indispensable d'avoir une technique des procédés extrêmement flexible et capable de garantir une efficacité énergétique élevée ainsi qu'une utilisation très efficace des ressources. Cela vaut également pour la microbiologie technique dans laquelle l'isolation et le nettoyage des produits imposent des exigences très élevées. C'est pourquoi les sciences des bioprocédés sont encouragées dans les institutions publiques et l'industrie.

L'eau comme solvant

En règle générale, les réactions chimiques sont réalisées au moyen de solvants. Le plus souvent, le substrat est dissout dans une quantité cinq à dix fois supérieure d'un solvant, tel que l'hexane, l'acétone, l'isopropanol ou des composés halogénés (p. ex. chlorés). Les systèmes fermés veillent à ce que les solvants les plus volatils ne se perdent pas par évaporation et ne polluent pas directement l'environnement. Dans la grande industrie chimique, les solvants organiques sont recyclés moyennant une dépense d'énergie considérable; dans les plus petites productions, ils sont collectés et brûlés. Pour obtenir des procédés respectueux de l'environnement, la situation des solvants doit être optimisée. Il n'est pas simple toutefois de les remplacer par d'autres solvants; il existe un besoin évident de mener des recherches en la matière.

L'eau constitue un solvant pour tous les êtres vivants. Souvent, elle convient même à des réactions de synthèse chimique. Un aperçu global de 2006 démontre qu'une réalisation dans l'eau est avantageuse pour la plupart des procédés de synthèse de base, comme la condensation d'aldol, la synthèse d'oléfine de Wittig et les réactions de Diels-Alder². Pour toutes les réactions catalysées par enzyme, l'eau reste le solvant idéal. De plus, il est souvent possible d'adapter les processus catalysés par métal afin d'utiliser l'eau comme solvant. Pour les futures applications impliquant des biomatériaux, l'eau devrait toujours être envisagée, en particulier au regard des solutions de synthèse mixtes (enzymatiques et chimiques).

La synthèse dans l'eau pose toutefois de nouveaux défis, notamment en raison de la charge énorme de travail requise pour épurer l'eau. Les eaux de traitement doivent être éliminées au moyen d'une installation d'épuration des eaux usées et les exigences relatives aux métaux



sont très élevées. Il existe un besoin évident de mener des recherches en la matière, parallèlement à la recherche sur les processus.

Le développement technique de la synthèse dans l'eau est essentiel. Mais il est tout aussi important de développer d'autres concepts comme les synthèses sans solvants. De nouvelles techniques, comme le «Solid Handling» et le «Milling», sont nécessaires pour relever les défis au niveau chimique et technique de l'appareil.

Nouveaux catalyseurs

La catalyse continue de jouer un rôle-clé en réduisant les déchets, en particulier dans les processus de liaison carbone-carbone: l'objectif est désormais de concevoir de nouveaux procédés permettant d'activer la liaison carbone-hydrogène afin de ne pas devoir utiliser des composants problématiques comme les halogènes.

Les nouveaux systèmes catalytiques qui, au lieu de métaux précieux, utilisent des éléments facilement disponibles comme le fer et le nickel, sont essentiels. La catalyse hétérogène est une technique importante car elle facilite la séparation des catalyseurs et du mélange réactionnel et, par conséquent, le recyclage des solvants et de la matière première non consommée.

Une prise de position actuelle du gouvernement néerlandais mentionne le rôle-clé de la catalyse dans l'effort visant à accroître l'utilisation des matières premières biologiques pour la chimie³.

Combiner la biotechnologie et la chimie

La combinaison de la biotechnologie et de la chimie jouera certainement un rôle-clé dans l'exploitation efficace des biomatériaux dans le sens où elle permet de combiner deux étapes de processus, à savoir un processus biotechnique et un processus chimique, dans un procédé monotope, autrement dit sans séparation du catalyseur et du solvant et sans purification intermédiaire. L'immobilisation des enzymes et la catalyse hétérogène ont également un rôle-clé à jouer. De plus, l'utilisation de l'eau comme solvant offre la possibilité d'utiliser une multitude d'enzymes⁴.

Les nouveaux concepts d'installations, tels que le Flow Chemistry, les microréacteurs et les installations modulaires, joueront aussi un rôle essentiel dans la réalisation technique de la chimie des biomatériaux.

Une approche globale présuppose une collaboration étroite et multidisciplinaire. Les facteurs de réussite relèvent davantage de la communication que de la technique ou des sciences. Les projets multidisciplinaires, comme le programme national de recherche sur le bois⁵, peuvent jouer un rôle de pionnier.

¹ Rohstoffbasis im Wandel. Prise de position DECHEMA. Francfort, janvier 2010

² Chao-Jun Li and Liang Chen, Organic Chemistry in Water, Chem. Soc. Rev., 2006, 35, 68–82

³ Catalysis – Key to a Sustainable Future. The Dutch Ministry of Economic Affairs. The Hague, January 2015

⁴ Harald Gröger und Werner Hummel, Current Opinion in Chemical Biology 2014, 19:171–179

⁵ PNR Ressource bois. <http://www.nfp66.ch/E/Pages/home.aspx>



4.2 Procédés microbiens et cellules de mammifères

Les procédés microbiens – souvent appelés «fermentation» – servent depuis des millénaires à fabriquer des denrées alimentaires comme le vin, la bière, le vinaigre, la choucroute ou le yogourt. La fermentation permet de stabiliser et de conserver des aliments frais ou périssables. Des composants riches en énergie, tels que le sucre, sont consommés et partiellement transformés en agents stabilisateurs comme l'éthanol (vin, bière), l'acide acétique (vinaigre) et l'acide lactique (choucroute, yogourt).

Au cours du siècle dernier, nous avons appris à fabriquer par fermentation un large éventail de produits pour l'alimentation humaine et animale, ainsi que pour des applications techniques, à partir de produits naturels ou de substances pures isolées telles que l'amidon, le saccharose et le glucose.

Dans la fermentation, les **substances du métabolisme primaire** occupent une place particulière car tous les éléments nécessaires à leur production sont déjà disponibles dans l'organisme. Certains organismes sont également axés sur la surproduction d'une substance déterminée. En outre, la mutation et la sélection classiques permettent de développer des souches améliorées pour la production technique à partir de souches sauvages. Enfin, les procédés issus du génie génétique permettent de suivre des stratégies ciblées visant à produire une souche surproductrice stable. L'objectif – la production microbienne de produits chimiques de plateforme indépendamment du pétrole en vue d'obtenir les produits souhaités – peut donc être atteint grâce à une optimisation ciblée du métabolisme microbien de base existant.

Les petites molécules organiques, telles que les antibiotiques et certaines vitamines, sont souvent produites de manière semi-synthétique; une part du squelette carboné est obtenue à partir de la nature ou de la fermentation, puis traitée au moyen de la chimie ou d'enzymes.

Métabolites primaires

Grâce à l'industrialisation progressive de la microbiologie et de la biotechnologie, des groupes de produits importants sont devenus accessibles¹, en particulier les biosynthèses programmées dans les gènes pour les métabolites primaires: les acides aminés, les nucléotides, les vitamines, les acides organiques et les alcools.

Les procédés microbiens permettent de fabriquer des produits commerciaux à grande échelle (jusqu'à plusieurs millions de tonnes annuelles). Les **acides aminés pour les denrées alimentaires et les aliments pour animaux**, comme les acides glutamiques (1,6 million de tonnes par an) ou le L-Lysine (850'000 tonnes par an), constituent un exemple significatif. La valeur marchande de ces deux acides aminés s'élève à 1,5 milliard d'USD.

Les **vitamines** sont également des métabolites primaires intéressants. Ces éléments nutritifs essentiels sont utilisés dans l'alimentation humaine et animale. Le marché grandit et devrait atteindre près de 3,2 milliards d'USD en 2017². Les vitamines sont produites par synthèse chimique, fermentation ou extraction. Les vitamines A, D, B1, B3 (niacine), B5 (acide panthoténique), B6, B7 (biotine), B9 (acide folique), E et K sont obtenues par synthèse chimique. Les vitamines B2 et B12 sont produites par fermentation. Des étapes fermentatives et chimiques sont utilisées dans la production de la vitamine C.



Dans le domaine des métabolites primaires de la classe des **nucléotides**, deux substances, à savoir l'acide guanylique et l'acide inosinique, se sont imposées en tant qu'exhausteurs de goût. Elles ont chacune une valeur marchande de 350 millions d'USD. Toutes deux sont déjà fabriquées de façon microbienne.

Les **acides organiques** comptent parmi les produits techniques les plus importants dans les métabolites primaires: l'acide citrique, l'acide acétique, l'acide lactique, l'acide gluconique et l'acide itaconique sont fermentés à partir de mélasse ou de glucose et sont utilisés dans l'industrie alimentaire, l'industrie pharmaceutique et le domaine technique. L'acide malique, l'acide tartrique, l'acide pyruvique et l'acide succinique sont produits selon un procédé chimique. Ces acides organiques sont donc des candidats intéressants pour les processus de fermentation.

Les **alcools** constituent les métabolites primaires par excellence pour le remplacement du pétrole. L'ajout d'éthanol aux carburants est obligatoire aux Etats-Unis. Sa fabrication requiert des quantités considérables de céréales. L'utilisation comme carburant est subventionnée en partie par l'Etat afin que le prix soit concurrentiel face aux combustibles fossiles. A l'heure actuelle, de grands efforts sont entrepris en vue de fabriquer des substituts à l'essence à partir de matières premières non utilisables comme aliments, tels que la paille, les tiges et les rafles de maïs, ainsi que la bagasse (résidus fibreux de la production de sucre). La production par fermentation d'éthanol et d'alcools supérieurs donne lieu à d'autres métabolites primaires intéressants qui peuvent servir à de nouvelles applications. Malgré la sélectivité élevée (95%), les tonnages des sous-produits devraient être considérables pour l'éthanol. Par exemple, lors de la fabrication d'éthanol par fermentation, une coproduction d'acide lactique peut offrir un avantage économique. Le butanol, quant à lui, présente

un potentiel intéressant comme substitut à l'essence et au kérosène, car sa teneur énergétique est plus élevée d'un tiers à celle de l'éthanol et il est parfaitement compatible avec les moteurs à combustion. Une production à grande échelle peut également générer des compléments de fermentation intéressants.

Les polysaccharides représentent une autre catégorie de métabolites primaires à haut potentiel commercial. Avec une production de 30'000 tonnes par an, le xanthane, qui est utilisé comme agent épaississant dans l'industrie alimentaire et cosmétique, atteint aujourd'hui une valeur marchande de plus de 400 millions d'USD.

Production microbienne de protéines thérapeutiques

L'importance des produits biologiques parmi les produits pharmaceutiques a considérablement augmenté et engendré une croissance élevée ainsi qu'une excellente rentabilité pour les entreprises leaders. Alors qu'au début, les animaux étaient essentiels pour la fabrication de certaines protéines, celle-ci s'effectue à présent par fermentation et culture cellulaire. Deux des sociétés leaders mondiales, Roche et Novartis, ont leur siège en Suisse où elles exploitent également leurs sites de production, ainsi que dans les pays voisins. Les produits transformés - les médicaments - génèrent des chiffres d'affaires annuels mesurables en milliards de francs suisses.

En raison des faibles quantités de substances requises, ces produits ne constituent pas un facteur central dans la problématique des ressources, mais il s'agit de produits de fermentation. En tant que tels, ils sont fabriqués à partir de matières renouvelables et ce principe peut probablement s'appliquer à la fabrication d'autres produits. Le choix du site est encore plus important, car il atteste d'une grande confiance dans l'environnement. La connaissance, la technique et la pratique en font partie et celles-ci se trouvent dans les universités et les entreprises.

Nouveaux procédés microbiens

Il existe de nombreuses annonces de recherche concernant de nouveaux produits, polymères, protéines et procédés alternatifs: Scheper et Wagemann³ envisagent une utilisation accrue de l'ingénierie métabolique et de la biologie synthétique pour fabriquer des substances précieuses. Sameera offre un aperçu des nouveaux procédés biotechnologiques permettant de fabriquer des enzymes, des polysaccharides et des acides organiques⁴. Erickson, Nelson et Winters présentent de nouveaux procédés biotechnologiques et biocatalytiques, ainsi

qu'une liste des matières qui devraient être prochainement disponibles à l'échelle industrielle (isoprène, isobutanol, acide succinique, 1,4-butandiol, acide acétique)⁵. Jang et al. décrivent la fabrication par fermentation de butanol à partir de biomasse avec des souches de clostridium transformées⁶. Thakker et al. ont fait un rapport sur la fabrication par fermentation d'acide succinique à partir de biomasse avec des souches d'E.-coli transformées⁷. L'intérêt porte désormais sur l'isobutène produit dans les bactéries, qui peut servir à de multiples synthèses.

¹ Demain AL, The Business of Biotechnology, Industrial Biotechnology (2007) 3(3): 269–283

² Global Industry Analysts (GIA), Global Vitamins Market (2011) November 22

³ Scheper T, Wagemann K, Bio-Technologien ebnen den Weg zur Bioökonomie (2012). http://www.dechema.de/biotech_publikationen/_/transkript_spezial.pdf

⁴ Sameera V, Novel Techniques in the Production of Industrially Imperative Products, J Microbial Biochem Technology (2011) R 1:003

⁵ Erickson B, Nelson JE and Winters P, Perspective on Opportunities in Industrial Biotechnology in Renewable Chemicals, Biotechnol J (2012) 7: 176–185

⁶ Jang YS et al, Biotechnology J (2012) 7: 186–198

⁷ Thakker C et al, Biotechnology J (2012) 7: 213–224



4.3 Plantes et cultures de cellules végétales

Cela fait déjà plusieurs siècles que les plantes sont utilisées comme denrées alimentaires et aliments pour animaux, mais également comme sources de produits chimiques et de remèdes les plus divers. Depuis peu, des principes actifs pharmaceutiques sont produits à l'aide de plantes qui sont cultivées au moyen de procédés biologiques moléculaires ou conventionnels. Les quantités sont toutefois faibles, une haute valeur ajoutée est possible.

La phytogénétique, qu'elle soit réalisée au moyen de procédés moléculaires ou traditionnels, peut être mise à contribution pour rendre certaines plantes mieux adaptées à la synthèse de certaines matières. Elle pourrait par exemple augmenter le rapport entre la cellulose et la lignine dans les peupliers. Un décalage avantageux pour l'industrie du papier, car la cellulose représente le produit cible tandis que la lignine est considéré comme un déchet¹.

Les fibres, comme le coton, le sisal ou le lin, sont obtenues à partir de plantes agricoles et peuvent remplacer les fibres synthétiques comme le nylon. Cependant, lors de la culture de ces plantes, il convient toujours de se demander quel est le degré de durabilité de la culture et si la concurrence avec la production de denrées alimentaires n'est pas trop importante.

Aujourd'hui, la majeure partie du coton produit à l'échelle mondiale est obtenue à partir de cotonniers transgéniques, qui présentent une large résistance aux insectes nuisibles. Le coton conventionnel requiert des traitements insecticides fréquents. La culture du coton transgénique réduit la charge de travail des paysans et permet de diminuer l'utilisation d'insecticides et la consommation de carburant dans les champs, permettant ainsi d'économiser les ressources fossiles. Le succès a été évalué en Inde par des agro-économistes de l'université de Göttingen. Cette étude

a démontré que les bénéfices de ces plantes pour les agriculteurs sont en moyenne plus de 60 pour cent supérieurs.

Les sucres de synthèse, comme l'aspartame, peuvent être remplacés par les glycosides de la plante *Stevia rebaudiana*. Les extraits de stévia sont autorisés comme édulcorants pour les boissons dans de nombreux pays. Certains composants de la stévia peuvent être produits de façon microbienne dans des bioréacteurs. Les édulcorants (sans le sucre) ont une valeur marchande d'environ 4 milliards d'USD.

L'arôme de vanilline est un produit végétal à haute valeur ajoutée. La vanilline naturelle contient plusieurs composants et est obtenue par extraction à partir de l'orchidée *Vanilla planifolia*. La majeure partie de la vanilline fabriquée pour les denrées alimentaires est produite selon un ancien procédé chimique de synthèse à partir de dérivés du pétrole et de lignine. Le chiffre d'affaires global des deux types de vanilline s'élève à environ 600 millions d'USD. La fabrication biosynthétique de la vanilline dans des bioréacteurs avec des cultures de cellules végétales est un succès, mais le produit est encore trop cher pour être rentable.

Cela fait longtemps que divers principes actifs et produits pharmaceutiques sont isolés à partir des plantes et enrichis chimiquement. Depuis peu, des plantes transgéniques servent également à la production des principes actifs: aux Etats-Unis, le premier médicament issu de cultures de cellules végétales transgéniques a été autorisé pour l'application clinique au début de l'année 2012. Il s'agit d'une enzyme destinée à traiter la maladie métabolique rare de Morbus Gaucher. Les cultures de cellules végétales ne contiennent et ne transmettent aucun virus humain, ce qui constitue un avantage de taille par rapport aux cultures de cellules animales ou humaines. D'autres principes actifs sont actuellement en phase d'essai clinique: l'insuline produite à partir d'un Carthame des teinturiers transgénique et une lipase spécifique produite à partir de maïs transgénique².

¹ SATW, Les plantes cultivées: source de matières premières renouvelables, brochure de la SATW (2010)

² Hoffmann-Sommergruber K und Dorsch-Häsler K, Medical issues related to genetically modified plants of relevance to Switzerland, Hochschulverlag ETHZ, NFP59 (2012): 9



4.4 Cultures d'algues

Les algues sont largement répandues dans la nature, mais peu utilisées sur le plan technique. A l'instar des plantes terrestres, elles fixent le CO_2 de l'atmosphère. Les cultures d'algues sont donc intéressantes pour ramener le carbone de l'atmosphère dans les cycles de vie naturels. De grandes sommes sont investies dans la recherche et le développement de microalgues pour produire des sources d'énergie et des produits chimiques. Certains types d'algues produisent de grandes quantités d'huiles et de graisses à partir du CO_2 .

Types de cultures d'algues

Des milliers d'espèces de microalgues sont connues, mais seul un petit nombre d'entre elles font l'objet d'une étude approfondie, comme la chlorella, la chlamydomonas ou la spirulina. En laboratoire, ces algues se cultivent dans des solutions nutritives et sur des substrats nutritifs, généralement avec un éclairage intense. Dans des conditions de croissance idéales, environ la moitié de la masse sèche se compose de diverses huiles et graisses. La plupart des cultures d'algues réalisées à grande échelle n'ont pas lieu dans des photobioréacteurs fermés, mais dans des «bassins» ouverts, car l'entretien est moins exigeant. Comme les fermenteurs, les bioréacteurs fermés sont des installations complexes et coûteuses avec une régulation de l'éclairage, de la température, de la fumigation, de la composition liquide, de la croissance cellulaire, etc. tandis que les bassins sont des fossés simplement recouverts d'un film avec une suspension algale à 20-40 centimètres de profondeur et des agitateurs.

L'algue verte chlorella devrait atteindre un volume annuel estimé de pétrole de 100'000 litres par hectare de surface de bassin, alors que les plantes oléagineuses dans les champs devraient fournir entre 1000 et 3000 litres par hectare par an¹.

Les microalgues en Suisse

Le service Technologie des bioprocessus de la Haute école zurichoise en sciences appliquées (ZHAW) cherche à fournir une large gamme de produits et de procédés utilisant des microalgues. Ces dernières sont envisagées comme des systèmes de production pour de nombreux produits de qualité, par exemple des acides gras non saturés, des pigments, des vitamines ou des polysaccharides.

Dans de nombreuses algues, la formation de pétrole requiert une concentration élevée de CO_2 . Celui-ci pourrait provenir d'usines d'incinération d'ordures ménagères, de centrales à gaz, de fabriques de ciment ou autre.

Facteurs économiques

Les coûts de production de pétrole à partir de la biomasse des algues sont plus élevés que ceux du pétrole obtenu à partir des plantes². Pour le moment, les algues ne peuvent donc être envisagées que pour fabriquer des substances coûteuses pour lesquelles la production à l'aide d'algues peut offrir une solution meilleure marché. Chaque année, plus de 10'000 tonnes de produits séchés à base d'algues sont négociées: denrées et additifs alimentaires, aliments de fourrage ou pour l'aquaculture, produits cosmétiques. Dans ces domaines, les quantités sont faibles et les prix élevés. Dans certains pays, certaines algues – par exemple, la chlorella et la spirulina – sont autorisées comme denrées alimentaires³.

La biologie synthétique permettrait d'optimiser les algues. Le groupe de travail du chercheur américain Craig Venter considère la biologie synthétique comme le principal outil de travail d'avenir pour le développement de la génétique des algues⁴. Son projet d'étude sur la production de pétrole à partir d'algues est subventionné à hauteur de plusieurs centaines de millions d'USD par la société Exxon.

¹ <http://openwetware.org/images/f/fe/CuelloIBE08b.pdf>

² Rathledge C, Are algal oils realistic options for biofuels? European Journal of Lipid Science and Technology (2011): 113: 135–136

³ Bächtle C, Mikroalgen können mehr als Sprit produzieren, Chemie Extra (2013) 4: 14–15

⁴ Craig Venter, conférence chez Novartis à Bâle du 29.1.2013



Usine de polylactates de l'entreprise «NatureWorks» à Blair, Nebraska, USA (photo mise à disposition par NatureWorks LLC)

5 Bioraffineries

Les raffineries sont de vastes installations techniques qui séparent une matière première en différents composants avant de les transformer. Ainsi, les raffineries de pétrole séparent le pétrole en différentes fractions qui sont ensuite transformées en essence, en diesel, en mazout et en de nombreux composés organiques. De là sont issus le plastique, les substances détergentes, les peintures, les vernis, les médicaments, etc.

Les bioraffineries utilisent différentes matières biologiques organiques comme matières premières. Toutes les ressources végétales contenant du carbone peuvent servir de matières de base, par exemple sous forme de sucre, d'amidon, de cellulose, d'huiles et de graisses. Les matières premières de première génération comprennent avant tout les parties des plantes comestibles ou utilisables comme fourrage, par exemple les grains de maïs. Les matières de seconde génération incluent également les parties des plantes contenant du cellulose, comme les déchets de bois, l'herbe, les sous-produits agricoles et les restes alimentaires. Les procédés de valorisation des matières premières biogènes de seconde génération doivent toutefois être optimisés pour pouvoir être utilisés à l'échelle industrielle.

Installations de démonstration de bioraffineries

Des installations de démonstration relativement simples de bioraffineries sont en cours de développement dans plusieurs endroits du monde. Des installations de fermentation, comme les brasseries ou les fromageries, peuvent être considérées comme des bioraffineries spécialisées. Dans toutes les bioraffineries tournées vers l'avenir, le bois et les sous-produits agricoles, qui ne sont pas destinés à l'alimentation, sont au centre de l'intérêt. En fonction des activités agricoles et sylvicoles régionales, d'autres produits peuvent être utilisés comme matières de base. Les biomatériaux complexes sont scindés en composants et transformés en composés à petites molécules.

En Europe centrale, le hêtre et le peuplier présentent un intérêt majeur en tant que fournisseurs de copeaux de bois. Les hêtres sont largement répandus et les peupliers ont une croissance rapide. En outre, leur biologie est bien connue, par exemple dans le domaine de la biologie moléculaire végétale, de la culture et de la génétique. A partir des composants du bois et d'autres biomatériaux ainsi que des déchets alimentaires, il est possible de produire un large éventail de matériaux contenant du carbone avec des finalités très différentes. Pour la plupart des installations, on peut s'attendre à ce qu'elles synthétisent principalement des énergies, par exemple des carburants comme l'éthanol et le diesel. Il est encore rare toutefois que les bioraffineries actuelles pour les biocarburants soient économiquement rentables.

Ce texte n'aborde pas en détail les sources d'énergie, mais traite exclusivement de l'utilisation matérielle des matières renouvelables dérivées. La dégradation enzymatique du bois génère différents sucres ainsi que d'autres petites molécules organiques qui peuvent servir de matières premières (produits chimique de plateforme) à

Matières premières renouvelables

- Déchets de bois
- Herbe
- Sous-produits agricoles
- Restes alimentaires

Bioraffineries

Energie, produits chimiques

Matières premières fossiles

- Pétrole

Raffineries de pétrole

Energie, produits chimiques

Figure 3: Comparaison des futures bioraffineries et des raffineries de pétrole existantes: elles fournissent toutes deux de l'énergie et des produits chimiques, mais à partir de matières premières différentes.

diverses synthèses de matériaux. Outre la dégradation enzymatique, d'autres types de dégradation sont également possibles, notamment les dégradations qui aboutissent aux composés C1, à savoir des molécules avec un seul atome de carbone. La pyrolyse, la torréfaction de la biomasse et d'autres procédés connus de la carbochimie, comme le BtL (Biomass to Liquid), permettent de produire du méthanol et du méthane qui peuvent servir, comme le gaz de synthèse et le biogaz, de matières premières pour les synthèses matérielles.

De nombreuses installations en construction

En 2012, l'organisation américaine BIO (Biotechnology Industry Organization) a fait état d'environ 20 installations de production en cours de construction aux Etats-Unis, lesquelles, pour la plupart, ne produiront toutefois que des sources d'énergie, en particulier de l'éthanol¹. D'autres installations sont axées sur les matières plastiques et les produits chimiques de plateforme. Selon le Département de l'énergie des Etats-Unis, les bioraffineries pourraient fabriquer les produits chimiques suivants: acide succinique, acide fumarique, acide malique, acide lévulinique, 2,5-furane dicarboxylique et sorbitol². Cela fait déjà plusieurs années que la société américaine NatureWorks produit la matière synthétique appelée polylactate à partir de produits agricoles, notamment du maïs (voir encadré 3). Ce polymère permet de fabriquer

des objets d'usage courant biologiquement dégradables comme des cuillères, des gobelets, etc.

En France, à Pomacle-Bazancourt (près de Reims), un complexe agro-industriel a vu le jour, dans lequel les sources d'énergie et les produits chimiques sont issus de produits agricoles³. Le gouvernement français et la Commission européenne ont investi plusieurs centaines de millions d'euros dans ce projet. Chaque année, 2 millions de tonnes de betteraves sucrières et 1 million de tonnes de céréales sont traitées.

Le «Roadmap Bioraffineries», qui a été publié par le gouvernement fédéral en 2012, donne un vaste aperçu de la situation en Allemagne⁴. L'installation la plus grande et la plus importante se situe à Leuna (Saxe-Anhalt). Il s'agit du Centre Fraunhofer pour les processus chimio-biotechnologiques (CBP). Le CBP est considéré comme un catalyseur vers une bio-économie en Allemagne. Au total, sept bioraffineries ont vu le jour en différents endroits, lesquelles traitent 2,7 millions de tonnes de biomasse par an⁵.

En Autriche (Utzenaich), une installation expérimentale est basée sur l'ensilage vert et produit environ 100 kilogrammes d'acide lactique et un peu plus de 100 kilogrammes de protéines brutes par heure. En Suisse, le thème des bioraffineries suscite encore peu d'attention.

¹ www.bio.org/articles/visible-progress-biorefinery-commercialization

² Leopoldina, Bioenergy, chances and limits (2012): 51

³ <http://bourse.lefigaro.fr/devises-matieres-premieres/actu-conseils/la-france-veut-devenir-championne-de-la-bioraffinerie-293854>

⁴ BMELV Deutschland, Roadmap Bioraffineries (2012)

⁵ Chemie Extra (2012) 1-2

Le polylactate est le bioplastique le plus utilisé au monde

- 2 millions de tonnes de polylactate sont produites par an.
- Le plus grand producteur de polylactate est la société américaine «NatureWorks». Cette dernière produit 150'000 tonnes de polylactate par an, utilise avant tout des grains de maïs comme matières premières et fait partie des groupes internationaux Cargill (denrées alimentaires et fourrages, Etats-Unis) et PTT Global Chemical (pétrochimie, Thaïlande).
- En collaboration avec Sulzer (Suisse), la société PURAC (Pays-Bas) prévoit de construire une installation d'une capacité de 75'000 tonnes de polylactate par an.



6 Constatations

Le prix actuel du pétrole ne rend pas urgent le remplacement des matières premières fossiles par des matières premières renouvelables, mais ce remplacement finira par devenir une nécessité en raison du caractère limité des ressources. Le délai dans lequel cela se produira dépend avant tout du développement de la consommation énergétique mondiale, car les matières premières fossiles sont utilisées essentiellement comme sources d'énergie. Le fait de se pencher dès maintenant sur la question des matières premières renouvelables, ainsi que d'entamer et d'intensifier la recherche et le développement, offre donc une grande opportunité pour le site de production suisse. Grâce aux hautes écoles, à l'infrastructure déjà existante et aux industries implantées, la situation de départ est bonne malgré un contexte économique difficile.

Les produits intéressants pour l'industrie suisse sont ceux qui permettent d'augmenter la valeur ajoutée ou dont la fabrication au moyen d'autres procédés est complexe. Les nouveaux produits aux caractéristiques uniques ou le remplacement des produits à base fossile, dont la fabrication présente un potentiel d'optimisation élevé, sont également attrayants. De plus, les procédés peuvent être facilement appliqués à d'autres sites. C'est pourquoi nous devons nous concentrer non seulement sur les matières premières suisses, mais également sur le site de recherche suisse.

Matières premières

Pour la Suisse, le bois et les résidus végétaux constituent la ressource biologique la mieux adaptée. Les bioraffineries doivent donc être axées sur ces ressources. De nouvelles interfaces sont toutefois nécessaires pour que les matières premières biogènes ou les produits intermédiaires qui en sont dérivés puissent être intégrés dans des processus techniques établis à grande échelle.

Idéalement, la biomasse est utilisée en l'état ou, si possible, transformée directement dans les produits souhaités. L'utilisation du bois comme matériau de construction en est un exemple. Pour l'utilisation chimique, il est préférable de ne pas vouloir imiter à tout prix la pétrochimie avec des ressources biologiques. Les processus qui mènent le plus rapidement au produit souhaité sont à privilégier. Toutefois, cette approche n'est pas réalisable ni judicieuse dans toutes les applications. Le passage par les produits chimiques de plateforme doit également être envisagé.

Procédés

Les nouveaux procédés techniques doivent permettre de traiter les ressources biogènes le plus efficacement possible du point de vue matériel et énergétique. Cela requiert des techniques adaptées (technique de fermentation, génie génétique, biologie synthétique, catalyse homogène et hétérogène). Nous devons développer ces techniques en Suisse et établir la production dans des pays à prix avantageux (éventuellement par octroi de licences) ou fabriquer des produits de haute qualité en Suisse ou raffiner des biomatériaux importés en Suisse.

Les bioraffineries industrielles multifonctionnelles ne sont encore opérationnelles nulle part dans le monde, mais sont planifiées et pilotées dans différents pays. En Suisse, les concepts n'en sont encore qu'au stade du développement. Divers produits chimiques de plateforme sont envisagés comme outputs des bioraffineries pour servir ensuite à des synthèses complémentaires. Au lieu des produits chimiques de masse, il serait préférable de fabriquer des produits à haute valeur ajoutée.



Les principales opportunités pour les bioproduits en Suisse sont les suivantes:

- Les sous-produits issus des bioraffineries ou de la production de bioénergie, qui peuvent être valorisés
- Les produits à forte valeur ajoutée, par exemple les produits biologiques ou les précurseurs pour l'industrie pharmaceutique et cosmétique
- Les produits phytosanitaires, les lubrifiants ou les polymères biodégradables.

Défis

La rentabilité des procédés pétrochimiques de longue date établis à grande échelle est difficile à égaler. Le prix actuel des matières premières fossiles permet encore un faible niveau de prix des produits à base fossile.

Souvent, les processus chimiques ou biochimiques, qui reposent sur des matières premières renouvelables, requièrent plus d'énergie que les processus conventionnels. C'est pourquoi un Life Cycle Assessment (LCA) doit toujours être effectué avant l'introduction des nouveaux procédés en vue d'évaluer les nuisances environnementales.

Les craintes des consommateurs concernant par exemple une mauvaise qualité éventuelle des produits fabriqués à partir de sous-produits agricoles, ou dues au fait que les produits issus de plantes génétiquement modifiées sont considérés comme artificiels et donc risqués, doivent être prises au sérieux.

Bilan

En Suisse, trois matières premières biogènes sont générées, à savoir la biomasse, les déchets et le dioxyde de carbone, lesquelles peuvent servir de base à la fabrication de produits. La question est de savoir quelles conditions remplir ou créer pour que les matières premières biogènes, dans l'optique d'une économie de recyclage, puissent être intégrées dans les chaînes de valorisation d'une économie de plus en plus marquée par les branches high-tech et medium high-tech et fabricant des produits à haute valeur ajoutée.

Les nouvelles connaissances et pratiques issues des domaines de recherche suivants permettent de jeter des ponts:

- La fabrication de produits chimiques de plateforme polyvalents à partir de matières premières renouvelables
- Les bioraffineries qui utilisent des matières premières biogènes dans des processus biotechnologiques peuvent intégrer des substances biogènes dans des processus techniques établis à grande échelle (chimiques) («Nouvelles interfaces», Drop-in)
- L'optimisation des réactions et processus de fermentation; les réactions et processus biotechnologiques qui remplacent les différentes étapes des processus chimiques conventionnels (par exemple pour les substances aromatiques et odoriférantes, et les produits chimiques agricoles)
- Des bioproduits facilement biodégradables, comme les matériaux d'emballage
- Le développement de processus robustes pour le traitement des ressources biogènes (par exemple le bois), qui permettent de les exploiter malgré une qualité variable et une composition non homogène; la recherche et le développement de procédés de traitement et d'isolation des matières biogènes
- La recherche génétique et physiologique sur les plantes en vue d'évaluer la diversité génétique et d'identifier les caractéristiques importantes pour la culture («Pre-breeding»); l'intégration d'informations phénotypiques, physiologiques et génétiques sur la culture des variétés végétales convenant comme bioressources.

Recommandations

1. Les bioraffineries constituent les outils par excellence d'une exploitation efficace des biomatériaux renouvelables. **Il est donc souhaitable pour la Suisse de se pencher sur la question des bioraffineries et d'intensifier la recherche et l'industrie dans ce domaine.** Dans les autres pays européens, la recherche et le développement dans le domaine des bioraffineries sont déjà à un stade avancé. **La collaboration internationale dans ce domaine doit être encouragée.**
2. Afin de rendre l'utilisation de la biomasse plus attrayante pour la chimie, **le développement d'une chimie basée sur l'eau utilisée comme solvant doit être amorcé.** La réalisation de réactions chimiques dans des milieux aqueux doit être considérée comme une extension des options de synthèse existantes. Cette chimie offre une série d'avantages en termes de coûts, de sécurité et d'environnement, ce qui permet de faciliter l'intégration de la chimie et de la biotechnologie (réactions chimico-enzymatiques).
3. Le dioxyde de carbone est perçu presque exclusivement comme un polluant ou un déchet. Dans une économie fondée sur le recyclage, il joue toutefois le rôle d'une matière première. L'assimilation la plus performante du dioxyde de carbone est celle réalisée par photosynthèse dans les plantes, les algues et les microorganismes. L'élaboration de connaissances et de pratiques concernant **l'amélioration de l'efficacité de cette assimilation biologique du dioxyde de carbone, mais également l'instauration de nouveaux procédés pour la liaison du dioxyde de carbone, doit être encouragée.**
4. Pour la Suisse, la vente d'un savoir-faire scientifique et technique (brevets, licences) présente une réelle opportunité. C'est pourquoi la recherche est hautement recommandée. Il convient non seulement de se concentrer sur les produits et les processus qui sont intéressants en Suisse en raison des matières premières et des coûts, mais également de **développer une propriété intellectuelle de manière générale.**