



NOUVELLES VOIES DANS LE BIORAFFINAGE DU BOIS

Programme national de recherche PNR 66 **Ressource bois**

Michael Studer et Pieter Poldervaart



FONDS NATIONAL SUISSE
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Ressource bois
Programme national de recherche PNR 66

Les résultats et recommandations du PNR 66 sont publiés dans quatre rapports qui font écho à chacune des synthèses partielles.

Le comité de direction du PNR 66 a partagé le domaine de recherche en quatre plates-formes de dialogue thématiques. Celles-ci portent sur les principaux domaines de la chaîne de valeur forêt-bois et englobent respectivement entre 4 et 11 projets de recherche sur les 30 projets du PNR 66. Dans le cadre du PNR 66, près de 200 représentantes et représentants des milieux économiques, des associations et des autorités ont participé aux 17 dialogues organisés par les équipes de recherche.

Les quatre synthèses partielles rendent compte des projets de recherche et de leurs principaux résultats ainsi que du dialogue mené avec les acteurs de terrain.

- Synthèse de la plate-forme de dialogue « Avancées dans la construction en bois »
- Synthèse de la plate-forme de dialogue « Nouvelles voies dans le bioraffinage du bois »
- Synthèse de la plate-forme de dialogue « Innovations dans les matériaux à base de bois »
- Synthèse de la plate-forme de dialogue « Approvisionnement et utilisation durable du bois »

Fondé sur les quatre synthèses partielles, le résumé du programme rend compte des principaux résultats et recommandations du PNR 66 dans une forme aisément accessible.

TABLE DES MATIÈRES

5	Éditorial
6	Introduction
7	Le concept du bioraffinage
10	Utilisation de la ressource bois pour le bioraffinage
12	Plates-formes de bioraffinage du bois
37	La bioéconomie dans le contexte international
41	Situation en Suisse
46	Recommandations
48	Références
52	Le PNR66 en bref

ÉDITORIAL



Cette tendance est d'ailleurs à la hausse. Entre la construction en bois et la combustion, les lacunes sont donc énormes en termes de technologie et de valorisation.

Le PNR66 révèle ainsi le potentiel que recèlent les composantes du bois – (hémi)cellulose et lignine – et les substances d'extraction. Dans les domaines de recherche complémentaires «Nouvelles voies dans le bioraffinage du bois» et «Innovations dans les matériaux à base de bois», un constat s'impose clairement: en tant que matière première, le bois peut progressivement prendre la relève du pétrole, que ce soit sous la forme de produits chimiques «verts» de haute qualité ou de biocarburants stockables. Les perspectives sont d'ailleurs réjouissantes, les bioraffineries créant de nouvelles opportunités de valorisation pour le bois de feuillus jusqu'alors sous-exploité.

Nouveaux procédés de transformation ou de décomposition, méthodes novatrices d'extraction de la lignine et de substances chimiques, nouvelles techniques d'épuration des gaz et de combustion, voilà quelques-unes des pièces du puzzle rassemblées par les onze projets de recherche menés sur le thème de la bioraffinerie. Les découvertes réalisées permettent d'avancer vers la modélisation de plates-formes et chaînes de processus appropriées pour les bioraffineries et ainsi vers une transformation industrielle du bois.

La Suisse n'est certes pas un lieu propice à une bioraffinerie de grande envergure, dotée de diverses plates-formes et d'une vaste palette de produits finaux. Néanmoins, il est tout à fait envisageable de mettre en place des bioraffineries de moindre échelle, s'inscrivant dans un tissu économique local et fabriquant des produits spéciaux haut de gamme; cela permettrait ainsi de valoriser le bois régional dans toute la mesure du possible. De quoi la Suisse a-t-elle encore besoin? D'une installation pilote par exemple, en vue d'une application industrielle des nouveaux résultats scientifiques, et d'un centre de compétences en bioraffinerie dans l'optique de conjuguer efficacement le savoir-faire dispersé entre la recherche et l'économie.

La Suisse fait bien de mettre l'accent sur le thème de la bioraffinerie, non seulement pour des raisons d'exploitation durable du bois à l'échelle nationale, mais aussi dans l'idée de devenir un pays exportateur offrant des technologies compétitives à l'étranger. Il ne serait guère «raffiné» de se détourner d'une telle aubaine.

Je tiens à remercier chaleureusement toutes celles et ceux qui ont pris part aux travaux de recherche, aux rencontres de dialogue ainsi qu'à l'élaboration du présent rapport de synthèse.

Dr Martin Riediker

Président du comité de direction du PNR66 Ressource bois

INTRODUCTION

La raréfaction des énergies fossiles et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre suscitent un vif intérêt au sein de la classe politique et du monde économique et scientifique pour les matières premières renouvelables telles que le bois. La sortie du nucléaire et la stratégie énergétique 2050 de la Confédération ont encore renforcé l'importance que les énergies et les matières premières renouvelables revêtent en Suisse. Contrairement au pétrole, la biomasse végétale est certes renouvelable, mais elle ne constitue pas pour autant une ressource illimitée. L'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques entre dès lors en concurrence avec d'autres applications comme la production de produits industriels, d'aliments pour les humains et les animaux et l'utilisation de surfaces réservées aux loisirs, au tourisme et à la protection de la nature. Utiliser la biomasse de manière hautement efficace et réfléchie en respectant le principe de la durabilité (voir encadré) constitue donc un impératif immédiat.

L'analyse de durabilité doit mettre en avant les avantages du bioraffinage

Afin que les bioraffineries soient acceptées tant au niveau politique que sociétal, il est indispensable que la preuve de leur durabilité soit apportée. Pour ce faire, leurs qualités écologiques, économiques et sociales doivent être analysées en prenant en compte l'ensemble de la chaîne de création de valeur et la totalité de leur cycle de vie. Différents facteurs – comme, par exemple, la concurrence autour du bois en tant que biomasse, les besoins en eau, l'utilisation des sols et l'aménagement du territoire, le bilan carbone, les influences climatiques, les conséquences pour la biodiversité, l'efficacité énergétique, les besoins des utilisateurs et la viabilité financière – doivent donc être étudiés. Une telle analyse de durabilité doit démontrer clairement les avantages que les bioraffineries apportent par rapport aux systèmes conventionnels qui offrent les mêmes prestations et produits à partir d'énergies fossiles. (Voir aussi PNR 66, plate-forme de dialogue 4 : « Approvisionnement et utilisation durable du bois »)

En ce sens, la transformation de biomasse dans une bioraffinerie (Jong et Jungmeier) paraît très prometteuse. Selon l'Agence internationale de l'éner-

gie (AIE), le bioraffinage peut être défini comme « le processus de transformation durable de la biomasse en une gamme de produits biosourcés (aliments, aliments pour animaux, produits chimiques et biomatériaux) et en bioénergie (biocarburants, électricité et/ou chaleur) » (Jungmeier et al., 2015). Une bioraffinerie peut valoriser différentes formes de biomasse végétale, qu'il s'agisse de matières premières issues de l'agriculture (paille), de la sylviculture (bois) ou de l'aquaculture (algues). Elle permet également l'utilisation de déchets organiques industriels, agricoles ou privés.

Le programme national de recherche PNR66 est consacré à la « Ressource bois ». Ce document de synthèse s'intéresse par conséquent uniquement à cette biomasse spécifique. Il sera tout d'abord procédé à une présentation du concept du bioraffinage et des caractéristiques de la ressource bois dans ce contexte. Les principaux processus de bioraffinage basés sur différentes plates-formes – produits intermédiaires essentiels – seront ensuite examinés, et la manière dont les projets développés dans le cadre de la plate-forme de dialogue 2 du PNR66 peuvent contribuer à leur développement sera également explicitée. Les chapitres « La bioéconomie dans le contexte international » (page 37) et « Situation en Suisse » (page 41) seront consacrés à l'état actuel de la mise en œuvre industrielle et aux conditions-cadres en vigueur ainsi qu'à l'encouragement de la recherche proposé à l'échelle nationale et internationale. Pour conclure, des recommandations seront formulées sur le développement futur du bioraffinage en Suisse.

LE CONCEPT DU BIORAFFINAGE

Une bioraffinerie transforme des matières premières renouvelables en différents produits et types d'énergie. Du fait de la diversité des matières premières, produits et énergies impliqués, le bioraffinage peut prendre des formes très variées. La classification des installations correspondantes s'effectue en fonction des produits intermédiaires manufacturés qui sont appelés plates-formes.

Le bioraffinage (voir définition au chapitre « Introduction ») ne constitue pas un concept novateur qui n'aurait été que récemment développé. Certaines usines du secteur industriel de l'amidon, de la pâte et du papier sont en exploitation depuis des décennies et pourraient à juste titre être considérées comme des bioraffineries. Au XIX^e et au XX^e siècle, le bois suisse était ainsi déjà transformé en pâte et en sucre. Grâce au procédé Scholler, 35 000 tonnes de glucose par an étaient ainsi fabriquées à partir du bois jusque dans les années 1960 à Ems (Kamm et al., 2000). Fondée en 1881 dans le canton de Soleure, la société Cellulose Attisholz AG (Sieber, 1956) transformait en 2008 400 000 tonnes de bois par an, soit près de 15% des volumes totaux de bois récoltés en Suisse et près d'un tiers de ceux produits par l'industrie forestière (Industrie du bois Suisse, 2008). En 2008, l'usine a néanmoins dû être fermée par sa propriétaire d'alors, la société norvégienne Borregaard AG, dont la direction a indiqué que « la situation économique de l'entreprise s'était fortement dégradée au cours des derniers mois en raison de la hausse marquée des prix des matières premières et de l'énergie et de l'effondrement des prix et des ventes accusés sur les principaux marchés asiatiques » (Holderegger, 2009). Il est intéressant de constater qu'Attisholz AG produisait certes principalement de la pâte à papier, mais qu'elle utilisait également la liqueur noire pour produire de l'éthanol, des levures, des lignosulfonates et de l'hydrogène.

Classement des bioraffineries

Le terme bioraffinage s'applique donc à de nombreux concepts destinés à transformer différents

types de biomasses en un large éventail de produits. Comme cela est le cas dans une raffinerie pétrolière classique, la matière première utilisée dans une bioraffinerie est tout d'abord fractionnée en différents composants dont la production exige une ou plusieurs étapes (raffinage primaire). Qualifiés de « molécules plates-formes », les produits intermédiaires sont ensuite convertis en un nombre encore plus important de dérivés lors du raffinage secondaire. Cet enchaînement de procédés génère des coproduits qui, à leur tour, peuvent être utilisés à différentes fins.

Jusqu'à une époque récente, il n'existait pas de système unifié permettant de dénommer les différents concepts de bioraffinage. Les bases d'un système de classification pour les bioraffineries ont été développées pour la première fois dans le cadre de la tâche 42 de l'AIE (Cherubini et al., 2009). Ce système polyhiérarchique place la plate-forme d'une bioraffinerie au centre de la classification. Les produits, les matières premières et les procédés impliqués sont ensuite ventilés de manière correspondante. Le nom respectif de la bioraffinerie est attribué selon le principe « nombre de plates-formes (nom des plates-formes) – produits finis – matière première ». Une bioraffinerie au sein de laquelle du bois est transformé en méthane via du gaz de synthèse sera par suite désignée comme « une bioraffinerie à plate-forme (gaz synthétique) produisant du méthane à partir du bois ».

Dans les bioraffineries transformant le bois, les plus importantes plates-formes sont **la lignocellulose** (cellulose, hémicellulose, lignine), **le gaz synthétique**, **l'huile de pyrolyse**, **la pâte ainsi**

que la chaleur et l'électricité. À l'exception de la pâte – qui est rattachée à la plate-forme de dialogue 3 dans le cadre du PNR66 «Innovations dans les matériaux à base de bois» – toutes ces plates-formes sont décrites à partir de la page 12 de la présente synthèse.

Les produits issus du bioraffinage peuvent être très variés. La gamme s'étend des aliments et des aliments pour animaux à la production d'énergie (chaleur, électricité) en passant par les produits chimiques, les biomatériaux et les biocarburants (ill. 1).

Les procédés de transformation utilisés avant et après l'obtention des produits plates-formes peuvent être classés en quatre catégories et peuvent bien sûr être combinés au sein de la bioraffinerie.

Procédés physico-mécaniques

Ces procédés permettent de modifier les propriétés – taille des morceaux, teneur en eau ou densité – de la matière première. À l'inverse, la structure chimique du bois reste inchangée. Le déchetage, le séchage ou le pressage constituent des exemples de ces procédés.

Procédés biochimiques

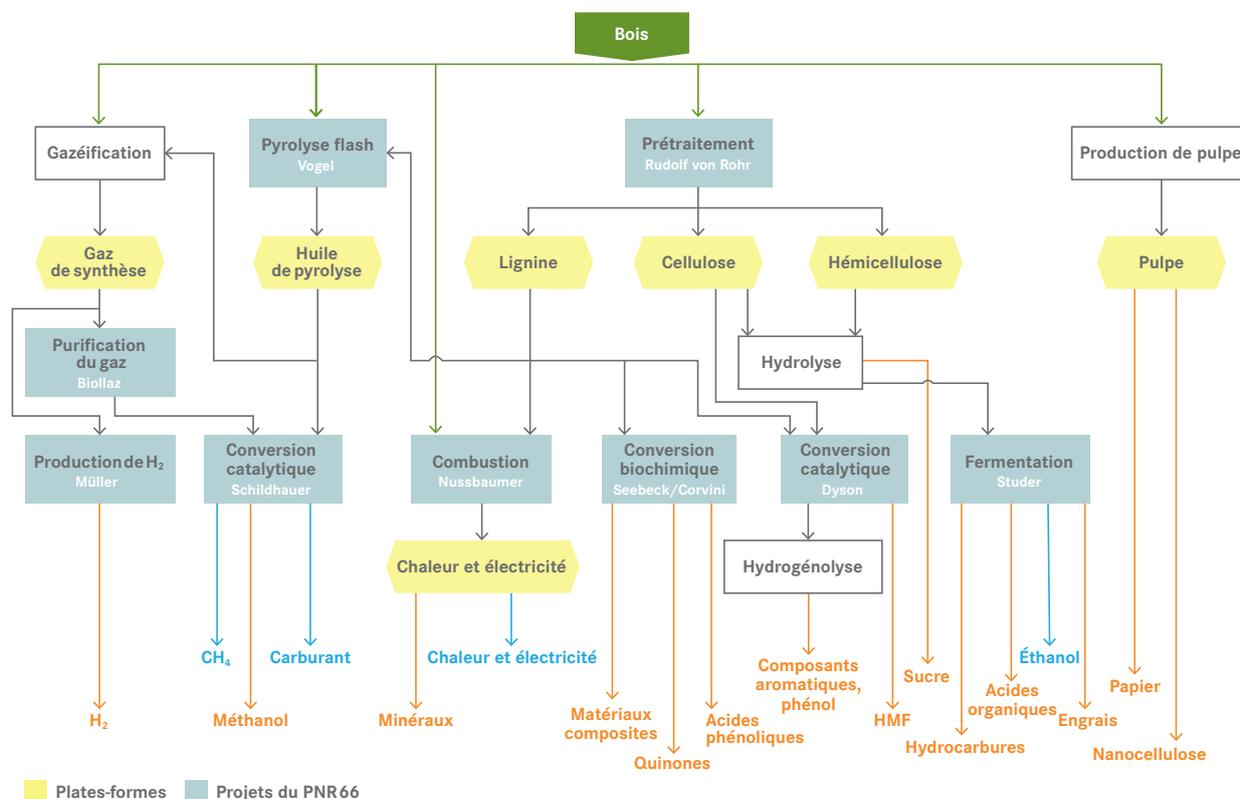
Ce sont des procédés qui modifient les propriétés chimiques du bois au moyen de micro-organismes ou d'enzymes. Ces procédés se déroulent dans des conditions douces, pratiquement à température ambiante et en milieu aqueux.

Procédés chimiques et catalytiques

Pour ce type de transformation, on fait appel à des procédés chimiques comme l'oxydation, l'hydrogénation, l'hydrolyse ou la polymérisation, qui se déroulent à des températures modérées.

Procédés thermochimiques

Les matières premières sont transformées à des températures élevées (plusieurs centaines de °C). Ces procédés peuvent s'effectuer en atmosphère normale ou à des pressions élevées et avec ou sans catalyseur. Exemples: la gazéification, la pyrolyse ou la combustion.



III. 1 Aperçu des molécules plates-formes, des produits et des procédés en lien avec le bioraffinage du bois (adapté à partir de Cherubini et al., 2009). Les processus représentés sont principalement ceux qui ont été étudiés dans le cadre du PNR 66. Les noms des directeurs de projets sont indiqués en vert.

La conception des bioraffineries

Comme illustré dans le paragraphe précédent, il existe un nombre important de configurations possibles pour une bioraffinerie. Il s'agit par conséquent de déterminer selon quels principes les bioraffineries doivent être conçues. Il convient en premier lieu de distinguer deux catégories de bioraffineries : celles centrées sur les produits biosourcés et celles axées sur la bioénergie. Dans une bioraffinerie axée sur la bioénergie, le bois est avant tout converti en une autre forme d'énergie souvent plus facilement stockable ou distribuable. Les résidus du procédé ne sont valorisés que dans un second temps et vendus, par exemple, comme aliments pour animaux. En dehors de la chaleur et de l'électricité, le bioéthanol, le biodiesel, les biocarburants synthétiques et le méthane comptent parmi les vecteurs énergétiques très prometteurs produits par les bioraffineries. À l'inverse, dans les bioraffineries centrées sur les produits biosourcés, seuls les résidus du procédé sont transformés en carburant, en électricité ou en chaleur. Ces bioraffineries ont avant tout pour objectif de produire des produits à haute valeur ajoutée : des aliments et des additifs alimentaires, des aliments pour animaux, des engrais, des produits chimiques ou des biomatériaux comme la pâte ou le bioplastique. À moyen terme, les exploitants de bioraffineries centrées sur les produits biosourcés devraient pouvoir produire eux-mêmes l'énergie nécessaire à ces procédés en récupérant la chaleur ou en exploitant les flux de déchets. Les usines de pâte ou d'éthanol font aujourd'hui figure d'exemple à ce titre dans la mesure où elles procèdent respectivement à la combustion de la liqueur noire et de la lignine et utilisent l'énergie ainsi générée sous forme de chaleur et d'électricité pour les propres besoins des procédés ou même la revendent en partie à des tiers.

Indépendamment des deux voies décrites plus haut, deux concepts de mise en œuvre peuvent être différenciés. Si une « installation de valorisation de la biomasse » est transformée en raffinerie afin d'élargir la gamme de produits, il s'agit d'une approche **ascendante (bottom-up)**. Dans les pays scandinaves, on distingue par exemple les usines de pâte dans lesquelles les résidus ou les matériaux sont uniquement utilisés pour générer de l'énergie de celles où ils sont également valorisés en tant que produits biosourcés et créent une valeur ajoutée supplémentaire. Cette évolution est motivée par des facteurs écologiques et économiques, en particulier lorsque la politique apporte

son soutien financier aux mesures adoptées en faveur de la protection du climat (Hermann, 2016).

À l'inverse, lorsque l'on revisite intégralement la conception d'une installation – qui est en mesure d'utiliser différentes fractions de la biomasse et de les transformer presque sans résidus en un grand nombre de produits et de formes d'énergie –, on parle alors d'approche **descendante (top-down)** (Ministère allemand de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Protection des Consommateurs, 2012). De manière typique, cette approche se sous-divise en différentes phases qui reflètent la complexité de l'installation (Kamm et al., 2000). L'industrie vise dans un premier temps à ne produire par le biais du bioraffinage qu'un ou que quelques-uns des produits jusqu'alors basés sur le pétrole. Si des résidus de procédé en résultent, ceux-ci sont éliminés en essayant d'avoir un impact le plus faible possible en termes de coûts, c'est-à-dire qu'ils sont généralement brûlés. Habituellement, les matières premières se limitent à un seul biomatériau. Une bioraffinerie de ce type, dite de première génération, est relativement facile à planifier en termes d'output. Les procédés manquent néanmoins de flexibilité : si la matière première employée connaît une pénurie ou un brusque renchérissement, il est en règle générale impossible de basculer rapidement sur une autre matière première. Le système est tout aussi rigide lorsqu'il s'agit de produire à court terme un autre produit avec la même ligne de production. Le broyage à sec de céréales pour la production d'éthanol constitue un exemple bien connu de cette problématique.

Les installations de « deuxième génération » génèrent une large palette de produits cibles qui peut être adaptée en fonction de la demande ou du prix du marché. Des entreprises comme Iogen (cellulose, éthanol) ou Natureworks LLC (acide polylactique issu de sucres) exploitent des bioraffineries de deuxième génération.

Les bioraffineries de « troisième génération » ont pour l'instant uniquement été conçues dans le cadre d'initiatives de recherche et se situent encore aux premiers stades de développement. De telles installations sont hautement intégrées en termes de flux de matériaux et de chaleur. Elles combinent différents procédés biochimiques, catalytiques et thermochimiques afin de mettre divers produits à disposition et permettent une exploitation optimale des matières premières tout en minimisant les flux de déchets.

UTILISATION DE LA RESSOURCE BOIS POUR LE BIORAFFINAGE

En Suisse, le bois constitue la seule matière première renouvelable qui soit disponible en quantités suffisantes pour le bioraffinage. Le bois se compose principalement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. La mise à disposition et le raffinage du bois représentent des défis majeurs.

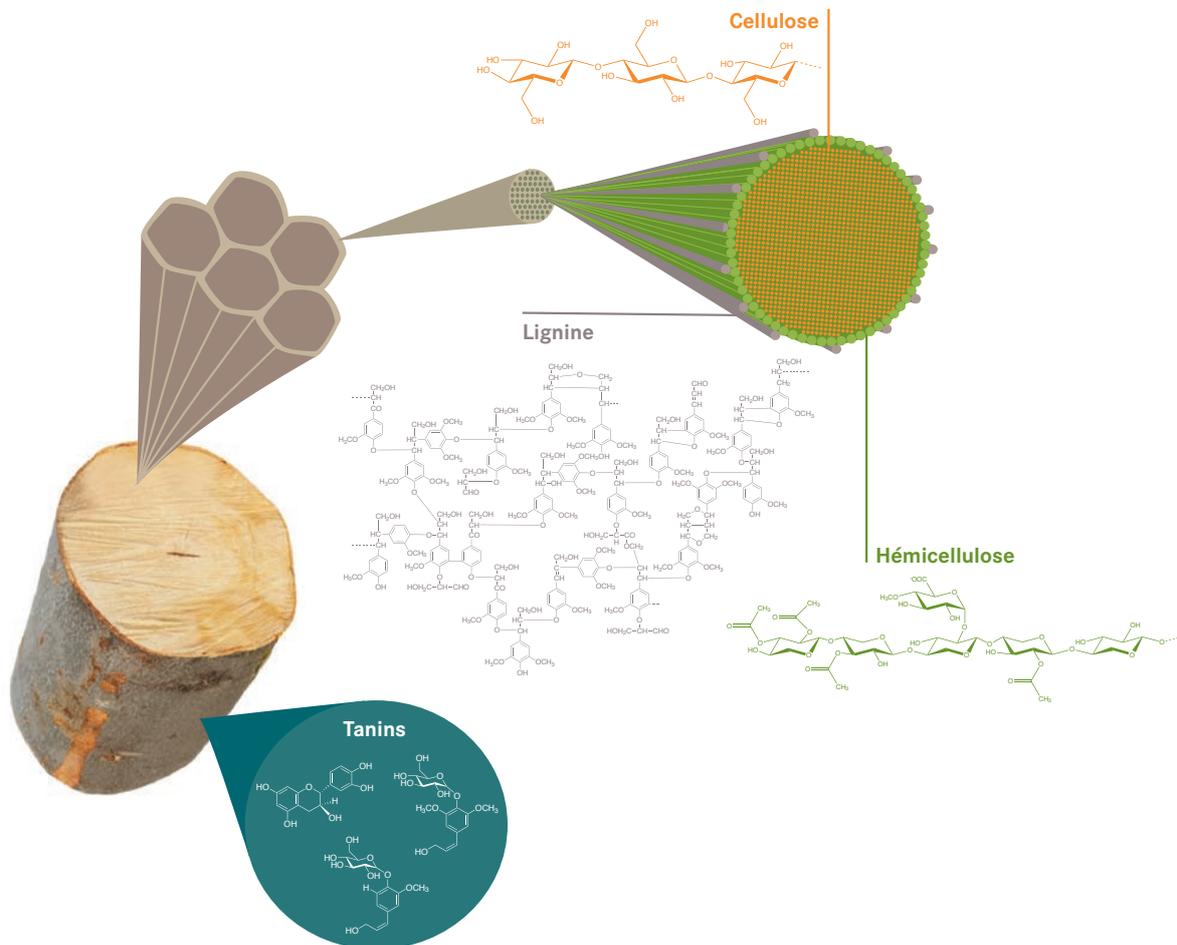
En tant que matière première, le bois peut contribuer de manière notable à assurer à la Suisse une indépendance à long terme vis-à-vis des énergies fossiles. De par son potentiel en tant que produit forestier à usage énergétique durable de 50,2 PJ/a, le bois représente la plus importante source de biomasse de la Suisse (bois des forêts: 26,1 PJ/a, bois hors forêt: 4,8 PJ/a, résidus industriels: 7,6 PJ/a récupération: 11,7 PJ/a). À l'heure actuelle, 36,4 PJ sont néanmoins d'ores et déjà valorisés de cette façon (bois des forêts: 17,1 PJ/a, hors forêt: 2,3 PJ/a, résidus industriels: 7,8 PJ/a, récupération: 9,2 PJ/a). **Les produits forestiers à usage énergétique durable pouvant être exploités en supplément ne représentent donc que 13,8 PJ/a.** Ce potentiel est approximativement aussi élevé que celui offert par la biomasse non issue du bois (Thees et al., 2017).

Contrairement au pétrole qui est un mélange d'hydrocarbures, la biomasse bois est un mélange complexe de composés organiques et inorganiques qui appartiennent à de nombreuses classes de substances et qui contiennent également des hétéroatomes comme l'azote ou le soufre. Les principaux composants des parois cellulaires du bois sont des hydrates de carbone: la cellulose (50% poids/poids), l'hémicellulose (20%) et la lignine (30%) (voir ill. 2). Le bois contient ainsi une proportion relativement élevée d'oxygène d'environ 40% massique, qui correspond approximativement à la formule stœchiométrique d'un hydrate de carbone $C(H_2O)$.

Des composés organiques, qui peuvent être extraits à l'aide d'eau chaude ou de solvants, sont présents dans le bois en plus petites quantités, de l'ordre de 3 à 5% massique en dehors des parois cellulaires. Les alcools de sucre ou les acides sacchariques, de même que les phénols simples et les flavonoïdes comme les tanins constituent des exemples de ces composants non structurels. Les tanins peuvent être employés comme colle à bois, mais sont également utilisés comme antioxydants dans les compléments alimentaires (Yazaki, 2015) (cf. la synthèse thématique de la plate-forme de dialogue 3 «Innovations dans les matériaux à base de bois»).

Par rapport à une biomasse à périodicité annuelle comme la paille, les composés anorganiques appelés cendres ne représentent qu'une part relativement faible, généralement inférieure à 1% massique, dans le bois. Cela est particulièrement avantageux dans la mesure où la législation actuelle exige que les cendres soient éliminées, opération qui a obligatoirement un coût.

Une comparaison directe avec le pétrole révèle que la mise à disposition et le raffinage du bois – mais aussi d'autres biomasses lignocellulosiques comme l'herbe ou la paille – posent encore d'importants défis. La récolte et la collecte du bois sont relativement exigeantes dans la mesure où celui-ci est réparti sur des territoires étendus. Par rapport aux raffineries pétrolières d'aujourd'hui, la logistique li-



III. 2 Structure chimique de la biomasse bois. Les parois cellulaires du bois sont composées de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. La cellulose est un polymère composé de glucose dans lequel les sucres en C6 sont liés par le biais de liaisons glycosidiques dans la configuration beta (1-4). En fonction des essences, l'hémicellulose est composée des sucres en C5 xylose et arabinose et des sucres en C6 mannose, galactose et glucose. La lignine est un polymère amorphe hautement réticulé composé de trois unités phénoliques. La proportion de ces trois unités varie à nouveau en fonction de l'essence. Les chaînes de cellulose linéaires s'associent pour former des microfibrilles de trois à quatre millimètres de diamètre dont la cohésion est assurée par une forte liaison hydrogène. L'hémicellulose est réunie par des liaisons hydrogènes à la face extérieure de ces microfibrilles et liée par ailleurs de manière covalente à la lignine. Plusieurs microfibrilles forment des macrofibrilles qui donnent aux parois cellulaires leur stabilité extrêmement élevée (Rubin, 2008).

mite par conséquent à des dimensions relativement modestes les bioraffineries transformant le bois qui sont de l'ordre de 100 000 t/an (bioraffinerie à deux plate-formes [pâte, chaleur et électricité] produisant du papier, de la nanocellulose, de la chaleur et de l'électricité à partir du bois, Bukóza, Slovaquie) à 340 000 t/an (bioraffinerie à deux plates-formes [lignocellulose, chaleur et électricité] produisant de l'éthanol et de l'électricité à partir de paille de maïs, DuPont Danisco, États-Unis). Les effets d'échelle positifs, c'est-à-dire la réduction des coûts de production permise par les grosses installations, ne peuvent donc que partiellement être mis à profit.

Procéder à des prétraitements décentralisés afin de transformer ensuite les molécules plates-formes obtenues en produits finaux lors d'un bioraffinage secondaire centralisé pourrait permettre de remédier à ce problème (Kim et Dale, 2015, 2016).

PLATES-FORMES DE BIORAFFINAGE DU BOIS

Les diverses contributions du PNR66 au sein de la plate-forme 2 «Nouvelles voies dans le bioraffinage du bois» concernent les différentes étapes d'une bioraffinerie à base de bois. Elles contribuent toutes à optimiser certains procédés et à accroître les chances de concrétiser une bioraffinerie.

La lignocellulose, le gaz synthétique, l'huile pyrolytique, la chaleur et l'électricité comptent parmi les produits plates-formes les plus importants d'une éventuelle bioraffinerie à base de bois et sont décrits plus en détail dans ce chapitre. L'illustration 1 fournit un aperçu des divers produits qui peuvent être fabriqués à partir de ces plates-formes. Ce chapitre présente par ailleurs plus en détail les domaines auxquels étaient consacrés les projets encouragés dans le cadre de la plate-forme de dialogue 2 «Nouvelles voies dans le bioraffinage du bois» du PNR66.

Plate-forme lignocellulosique

Dans une bioraffinerie à plate-forme lignocellulosique, le raffinage primaire du bois génère les produits intermédiaires que sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine grâce à un procédé de fractionnement. La plate-forme lignocellulosique est donc en réalité constituée de trois plates-formes différentes. En fonction du procédé utilisé, ces composants se présentent sous forme séparée ou forment un mélange indissociable. Au cours du raffinage secondaire, ils sont ensuite transformés en produits finis par le biais de différents procédés incluant parfois plusieurs étapes. Les sucres solubles simples comme le glucose (un sucre C6) et le xylose (un sucre C5) sont des produits intermédiaires essentiels qui sont parfois décrits comme des plates-formes indépendantes dans la littérature spécialisée. Ces deux étapes peuvent être réalisées au moyen de méthodes biochimiques, chimiques et thermochimiques, si bien qu'il existe un nombre important de concepts de bioraffinage applicables à la plate-forme lignocellulosique. Un

aperçu des procédés de raffinage primaire utilisés pour le prétraitement et le fractionnement de la lignocellulose est présenté ci-dessous. Certains procédés types utilisés pour le raffinage secondaire sont ensuite détaillés.

Prétraitement et fractionnement de la lignocellulose

Durant le raffinage primaire, la matière première bois est fractionnée afin d'accroître sa réactivité dans les procédés ultérieurs. À cette fin, il peut par exemple être recouru à une saccharification enzymatique. Selon le procédé retenu, les trois principaux composants (hémicellulose, cellulose et lignine) sont ensuite fractionnés en trois flux de matière séparés. De nombreux procédés ont été développés pour ce faire et le tableau 1 regroupe les méthodes les plus couramment utilisées.

De manière typique, le prétraitement s'effectue en milieu aqueux à des températures comprises entre 140 et 230°C et à des pressions pouvant atteindre 30 bars, un acide ou une base pouvant être ajouté en option. Les pH bas favorisent la solubilisation de l'hémicellulose, qui peut ainsi être séparée de la fraction lignocellulosique résiduelle. À l'inverse, un pH élevé augmente la solubilité de la lignine et de la cellulose et permet de procéder séparément à leur transformation ultérieure (Brethauer et Studer, 2015). L'ajout de solvants ou d'autres produits chimiques est également possible. L'effet d'un ajout de 2-naphtol a ainsi été étudié dans le cadre du projet *Rudolf von Rohr* du PNR66 (voir encadré «L'utilisation de pièges à radicaux dans le prétraitement de l'épicéa»).

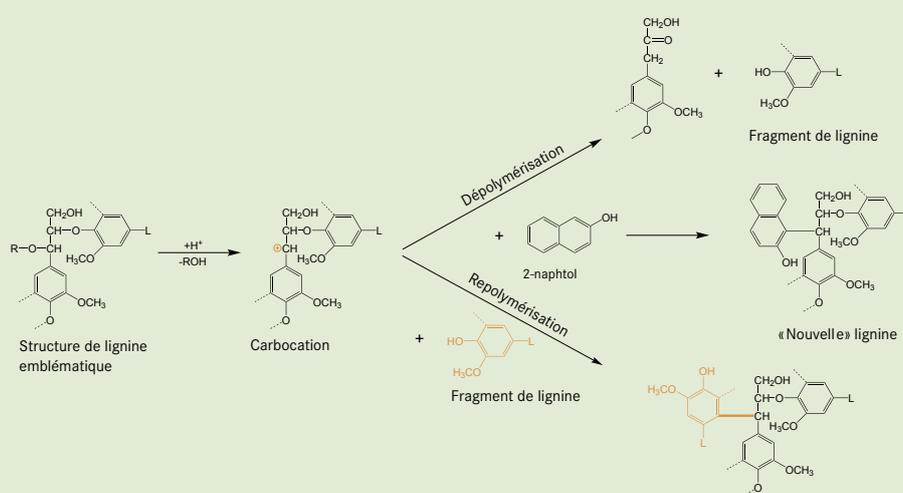
Tab. 1 Avantages et désavantages des méthodes de prétraitement de la lignocellulose les plus couramment utilisées (adapté à partir de Alvira et al., 2010).

Méthode de prétraitement	Mécanisme et avantages	Inconvénients	Contribution dans le cadre du PNR 66
Biologique	Décomposition sélective de la lignine; procédé peu gourmand en énergie	Dégradation aussi de l'hémicellulose et de la cellulose; procédé très lent	Projet Studer, HESB
Explosion par phase vapeur	Réduit la taille des molécules; l'hémicellulose est liquéfiée; bon marché, car n'exige pas de produits chimiques	Induit des modifications structurales de la lignine; formation d'inhibiteurs; décomposition partielle de l'hémicellulose	Projet Studer, HESB Projet Rudolf von Rohr, EPFZ
Explosion à l'ammoniac (AFEX)	Augmente la surface spécifique; réarrangement de la lignine; pratiquement aucune production d'inhibiteurs	Coûts élevés de l'ammoniac; inefficace pour la biomasse à haute teneur en lignine comme le bois	Non applicable
Solvants organiques (Organosolv)	Fractionnement en trois flux de matériaux; production de lignine pure	Coûts élevés; recyclage du solvant	Non applicable
Acides concentrés	Production directe de glucose; déroulement du procédé à température ambiante	Coûts élevés; recyclage de l'acide; corrosion du réacteur; formation d'inhibiteurs	Non applicable
Acides dilués	Solubilisation de l'hémicellulose; température plus basse qu'avec les procédés utilisant uniquement de l'eau	Formation d'inhibiteurs; faibles concentrations en sucres	Non applicable
Liquides ioniques	Formation pratiquement nulle d'inhibiteurs; hydrolysabilité enzymatique rapide et élevée (fracturation en sucres simples)	Coûts élevés et recyclage des liquides ioniques	Projet Dyson, EPFL

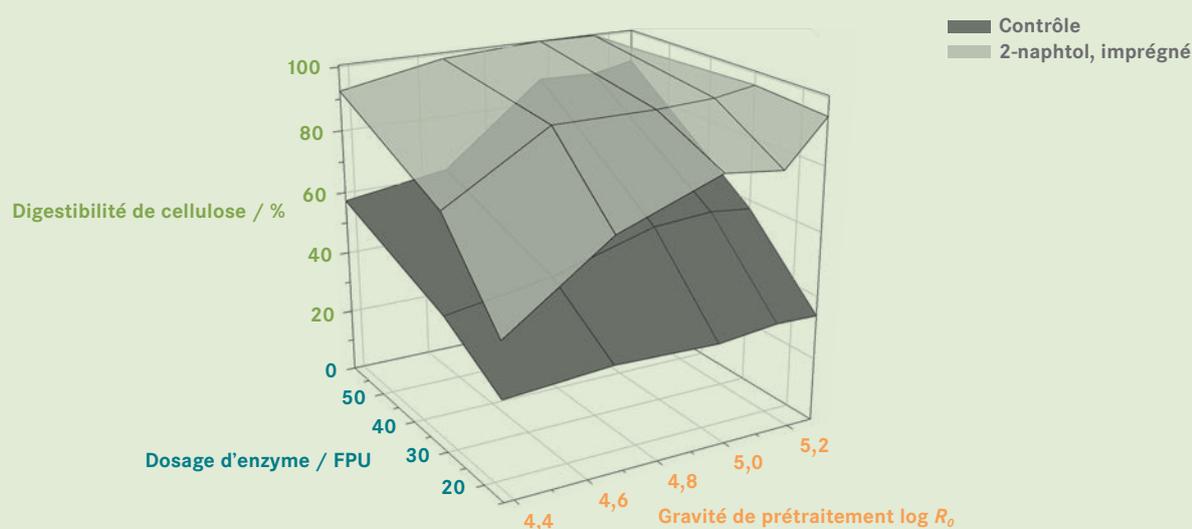
L'utilisation de pièges à radicaux dans le prétraitement de l'épicéa – résultats du projet *Rudolf von Rohr* (EPF Zurich) du PNR 66

L'épicéa – un résineux – se distingue par une récalcitrance plus élevée que le bois de feuillus. Par récalcitrance, on entend la résistance d'une biomasse lignocellulosique à la saccharification enzymatique. Il est connu que le prétraitement à la vapeur du bois de résineux ne permet pas d'atteindre un rendement en sucre de plus de 30%. Il convenait donc d'étudier si cette matière première pouvait être décomposée plus efficacement lorsque du 2-naphtol était ajouté lors du prétraitement (Pielhop et

Larrazábal et al., 2016). Ce produit chimique agit comme un « piège ionique » et empêche la repolymérisation des fragments de lignine à des températures élevées (ill. 3). Ce type de lignine condensée affecte en effet particulièrement l'hydrolyse enzymatique dans la mesure où il fixe les enzymes cellulolytiques et inhibe ainsi leur fonctionnement (Pielhop et al., 2015). Le projet a effectivement permis de démontrer que l'apport de 2-naphtol durant le prétraitement permet d'augmenter de plus de 60% le rendement observé lors de l'hydrolyse enzymatique et d'obtenir ainsi une transformation presque stœchiométrique (ill. 4).



III. 3 La repolymérisation des fragments de lignine qui influence négativement l'hydrolyse ultérieure de la cellulose en glucose peut être inhibée par l'ajout de 2-naphtol – *Rudolf von Rohr, EPFZ.*



III. 4 L'ajout de 2-naphtol à l'épicéa pendant le prétraitement à la vapeur augmente l'hydrolyse enzymatique ultérieure de la cellulose en glucose de plus de 60% et permet d'obtenir un rendement presque stœchiométrique – *Rudolf von Rohr, EPFZ.*

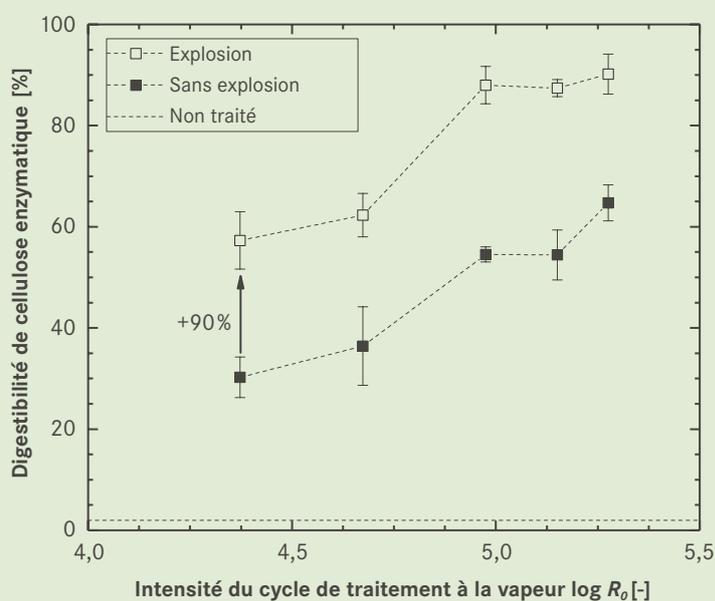
Dans les bioraffineries commerciales, l'une des méthodes de prétraitement les plus utilisées – qui a également été étudiée dans le cadre de deux projets du PNR66 (voir encadrés « Influence d'une diminution explosive de la pression lors du prétraitement à la vapeur de l'épicéa » et « Optimisation des conditions de réaction du prétraitement à la vapeur du bois de hêtre ») – est l'explosion dite à la vapeur. Bien connue dans l'industrie de la pâte et du papier, cette méthode présente par ailleurs l'avantage de ne pas exiger l'emploi de produits

chimiques onéreux. L'explosion à la vapeur permet également un concassage plus efficace des copeaux de bois, si bien qu'il est inutile de recourir préalablement à d'autres étapes de broyage. Le déchiage des particules de bois influence positivement le rendement de l'hydrolyse enzymatique comme l'a démontré le projet *Rudolf von Rohr/Studer* du PNR66 (voir encadré « Influence d'une diminution explosive de la pression lors du prétraitement à la vapeur de l'épicéa »).

Influence d'une diminution explosive de la pression lors du prétraitement à la vapeur de l'épicéa – résultats des projets *Rudolf von Rohr* (EPF Zurich) et *Studer* (HESB) du PNR66

Les premières bioraffineries commerciales privilégient le prétraitement à la vapeur. Le matériau de base est chauffé au moyen de vapeur et mis sous pression. Après un laps de temps défini, la pression est brusquement abaissée au niveau de la pression ambiante. Jusqu'à récemment, les effets exercés par la détente explosive n'avaient néanmoins pas été clairement identifiés et la pertinence de ce procédé restait à prouver. Un projet réalisé dans le

cadre du PNR66 a permis de vérifier l'adéquation de cette méthode. Dans le cas du bois d'épicéa, le rendement en sucre de l'hydrolyse enzymatique a été pratiquement doublé par rapport à un prétraitement sans explosion par phase vapeur (ill. 5). Ce résultat s'explique par la réduction plus efficace de la taille des particules de bois induite par la détente explosive, réduction qui s'avère être en corrélation directe avec la différence de pression provoquée (Pielhop et Amgarten et al., 2016).



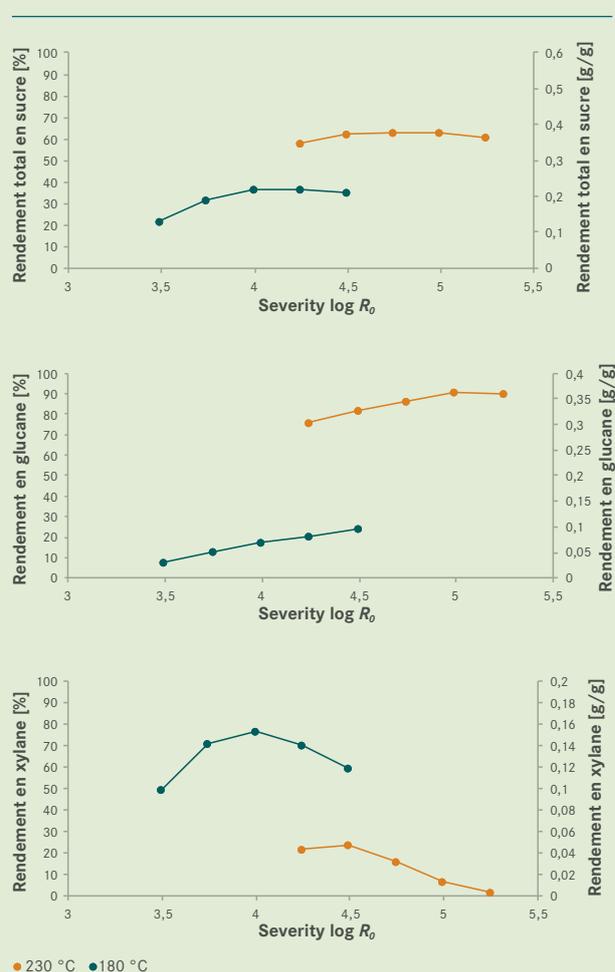
III. 5 La détente explosive suivant le prétraitement à la vapeur double le rendement en sucre de l'hydrolyse enzymatique par rapport à un prétraitement sans explosion à la vapeur – *Rudolf von Rohr*, EPFZ, et *Studer*, HESB.

Le rendement de l'hydrolyse enzymatique qui s'effectue après le prétraitement du bois dépend dans une large mesure de la durée et de la température du traitement appliqué au matériau de base. Ces deux facteurs sont réunis en un facteur d'impact (Severity Factor) qui indique l'intensité avec laquelle la biomasse a été prétraitée (Overend et al., 1987). De manière générale, le traitement du bois à la vapeur exige des températures et un facteur d'impact plus élevés que celui de la biomasse composée de plantes annuelles, car le bois contient beaucoup plus de lignine. La transformation du bois demande par conséquent une consommation

d'énergie plus importante et des réacteurs plus résistants à la pression et donc plus onéreux. De plus, l'hémicellulose se dégrade lorsqu'elle est soumise à des prétraitements trop brutaux et cette dégradation entraîne une formation accrue de substances indésirables qui exercent des effets défavorables sur les procédés de transformation biochimique consécutifs. L'optimisation du prétraitement à la vapeur pour la saccharification enzymatique consécutive a été étudiée dans le cadre du projet Studer du PNR66 (voir encadré « Optimisation des conditions de réaction du prétraitement à la vapeur du bois de hêtre »).

Optimisation des conditions de réaction du prétraitement à la vapeur du bois de hêtre – résultats du projet Studer (HESB) du PNR66

Disponible en grandes quantités en Suisse, le bois de hêtre n'est à l'heure actuelle que peu utilisé dans la construction. Il constitue par conséquent un matériau de base intéressant pour une bioraffinerie. Il n'existe néanmoins pratiquement aucune littérature sur le prétraitement et la saccharification enzymatique subséquente de cette essence. La première partie du projet était par conséquent consacrée à l'optimisation des conditions du prétraitement à la vapeur (Balan et al., 2017b, 2017a). Il s'est avéré qu'une température de prétraitement de 230 °C et une durée de séjour de 15 min (soit un facteur d'impact $\log R_0$ de 5,0) sont nécessaires à une saccharification enzymatique optimale de la cellulose pour obtenir un rendement de 90%. Dans ces conditions néanmoins, l'hémicellulose est presque entièrement dégradée (rendement <10%), si bien qu'avec un prétraitement en une seule étape, le rendement total en sucre de 60% demeure relativement faible (ill. 6). Il a donc été prévu d'étudier ultérieurement un prétraitement en deux étapes qui permettrait dans un premier temps de solubiliser et de séparer l'hémicellulose (rendement de 80%) dans des conditions modérées (180 °C, 44 min) et de n'exposer ensuite que les substances solides résiduelles à des températures élevées.

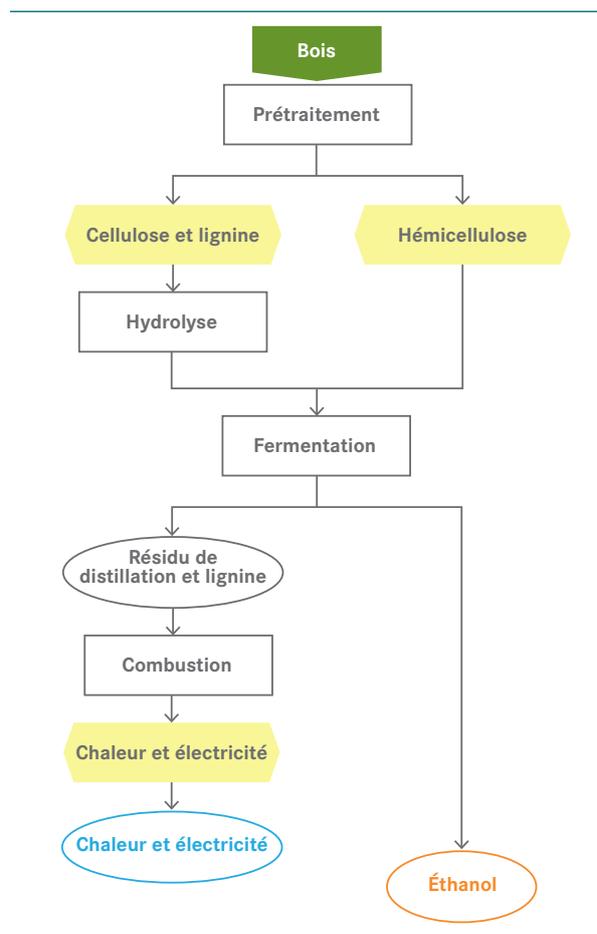


III. 6 La température de prétraitement optimale pour l'hémicellulose du bois de hêtre s'élève à 180 °C pour une durée de séjour de 44 min, tandis que la saccharification optimale de la cellulose exige une température de prétraitement de 230 °C pendant 15 min. Un prétraitement en deux étapes doit donc être ultérieurement étudié afin de maximiser le rendement total en sucre – Studer, HESB.

Saccharification enzymatique de l'hémicellulose et de la cellulose et fermentation subséquente

Déjà utilisé pour la production industrielle d'éthanol lignocellulosique (voir ill. 3), le procédé de primoraffinage a déjà fait l'objet de nombreuses études et se compose de deux étapes. La biomasse est d'abord fractionnée par le biais d'un processus physico-chimique (voir ci-dessus), et les sucres fermentescibles sont ensuite extraits grâce à une hydrolyse enzymatique. Les enzymes utilisées sont appelées cellulases, un mélange d'enzymes qui contient en particulier des endoglucanases et des exoglucanases ainsi que des beta-glucosidases. Les cellulases sont fabriquées industriellement par des entreprises comme Novozymes et Dupont par fermentation des souches de champignons *Trichoderma* et *Aspergillus*. Par rapport aux enzymes destinées à la saccharification de l'amidon, les cellulases sont encore très onéreuses même si leur coût de production a régulièrement baissé au cours des dernières années (McMillan et al., 2011). Lors de la production de bioéthanol lignocellulosique, l'utilisation d'enzymes représente à elle seule près de 0,27 dollar par litre de carburant, soit environ un tiers des coûts de production totaux (Wyman et Dale, 2015). Ces coûts élevés s'expliquent aussi par la structure chimique du bois qui est très résistant à la digestion enzymatique (récalcitrance). Une importante quantité d'enzymes est donc nécessaire à la saccharification du bois prétraité.

Les sucres issus de l'hydrolyse enzymatique sont ensuite transformés par des micro-organismes afin d'obtenir les produits désirés. La palette de produits pouvant être obtenus par fermentation est très large et s'étend des produits de masse comme l'éthanol aux acides aminés ou aux antibiotiques en passant par des produits chimiques comme l'acide lactique. En termes de volume, le principal produit issu de la fermentation de la lignocellulose est l'éthanol – un biocarburant qui peut être mélangé à l'essence ordinaire lorsqu'il est déshydraté. Le procédé de fabrication des biocarburants dits de 1^{re} génération recourt néanmoins souvent à des sucres tirés du maïs, de céréales, de betteraves ou de cannes à sucre, qui sont techniquement beaucoup plus faciles à obtenir qu'à partir du bois.



III. 7 La bioraffinerie lignocellulosique illustrée par la production de cellulose/éthanol.

Les défis posés par la fermentation de 2^e génération qui utilise les sucres de la lignocellulose sont multiples :

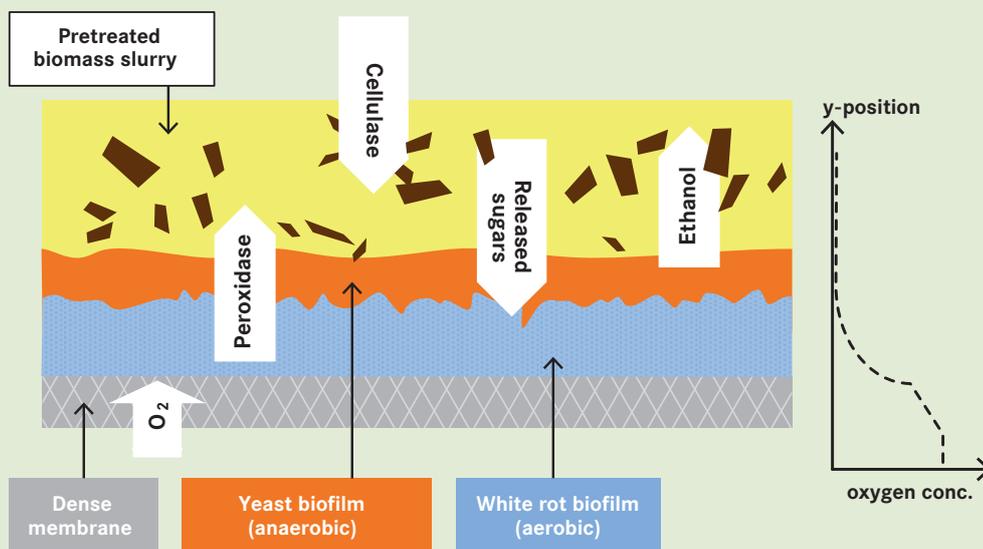
- Lors du prétraitement de la biomasse, des substances comme le furfural ou les phénols, qui sont toxiques pour les micro-organismes utilisés, sont libérées.
- Au lieu du seul glucose, plusieurs types de sucres doivent être fermentés. Les sucres C5, comme le xylose en particulier, ne sont pas exploitables par de nombreux micro-organismes comme les levures boulangères.
- S'élevant à approximativement 100 g/l, la concentration en sucres de la solution issue de l'hydrolyse enzymatique est nettement plus faible que celle du jus de canne à sucre par exemple (200 g/l).

La production d'éthanol en tant que biocarburant de la 2^e génération a été étudiée dans le cadre du projet Studer du PNR 66 (voir encadré « Délignification microbienne et fermentation simultanée du bois de hêtre prétraité en éthanol »).

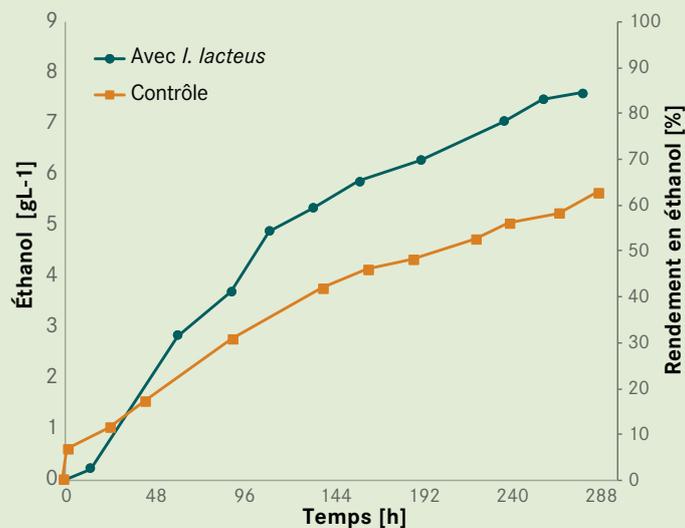
Délicnification microbienne et fermentation simultanée du bois de hêtre prétraité en éthanol – résultats du projet *Studer* (HESB) du PNR 66

Le bois de hêtre présente une teneur en lignine relativement élevée et doit par conséquent être soumis à un prétraitement intensif afin d'être saccharifié avec des enzymes et de pouvoir ensuite être transformé en éthanol par fermentation. Il a été étudié si l'utilisation d'un champignon, qui a la capacité de décomposer la lignine, pouvait améliorer le rendement en éthanol. Lorsque le bois est

traité avec de tels micro-organismes lors d'une étape séparée, la décomposition de la lignine s'accompagne toujours d'une décomposition de la cellulose et de l'hémicellulose. Afin de remédier à ce problème, le prétraitement avec le champignon *Irpex lacteus*, l'hydrolyse enzymatique et la fermentation ont été effectuées simultanément dans un réacteur spécialement conçu à cette fin (ill. 8). L'ajout du champignon permet d'accroître le rendement en éthanol de près de 20% (ill. 9) (Brethauer et al., 2017).



III. 8 Représentation schématique du réacteur aérobie-anaérobie qui permet la culture simultanée de la pourriture blanche *Irpex lacteus* et de la levure *Saccharomyces cerevisiae*. L'oxygène est amené dans le réacteur anaérobie à travers une membrane dense – Studer, HESB.



III. 9 Le rendement en éthanol peut être accru de près de 20% grâce au champignon.

Transformation et valorisation de la lignine

Dans la plupart des installations actuelles de production d'éthanol à partir de lignocellulose, les résidus solides de la fermentation, qui sont composés presque exclusivement de lignine, sont séparés et brûlés dans une chaudière afin de produire de la chaleur et de l'électricité (ill. 7). Le procédé de production est donc autonome en énergie, et de l'électricité peut souvent même être revendue à des tiers. La chaudière à lignine constitue néanmoins l'élément le plus onéreux de l'installation, et la combustion de la lignine humide est peu productive énergétiquement. Des concepts alternatifs

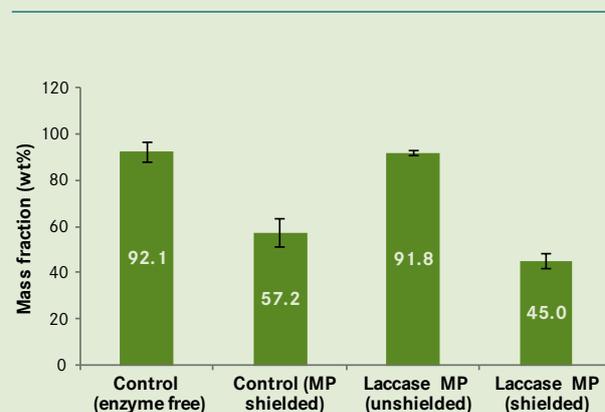
permettant d'utiliser la lignine à moindre coût et avec une valeur ajoutée plus élevée sont donc étudiés. Il pourrait pour ce faire être recouru à des méthodes biotechnologiques, catalytiques ou thermochimiques ou à une combinaison de ces procédés. Quatre projets du PNR66 se sont penchés sur différents aspects en relation avec cette problématique (voir encadrés «La combinaison de méthodes enzymatiques et chimiques pour l'oxydation de la lignine», «Principe de la décomposition enzymatique de la lignine», «Transformation catalytique de la lignine», «Études sur la pyrolyse flash de la lignine» et «Études sur la dépolymérisation oxydative de la lignine»).

La combinaison de méthodes enzymatiques et chimiques pour l'oxydation de la lignine – résultats du projet de recherche *Corvini* (HES-SO) du PNR66

Une combinaison de traitements enzymatiques et chimiques a été testée afin d'oxyder la lignine et de permettre son utilisation comme matière première pour la production de composés chimiques aromatiques à haute valeur (Gasser et al., 2012; Gasser et al., 2013) (ill. 10).

La lignine a dans un premier temps été traitée avec une laccase (une enzyme qui oxyde les substances phénoliques au moyen d'oxygène) immobilisée par des nano-aimants (Arca-Ramos et al., 2016; Gasser et al., 2016). En appliquant un champ magnétique, cette méthode permet de séparer facilement le précieux biocatalyseur de la lignine résiduelle et de le réutiliser ensuite. Ce traitement enzymatique a permis de produire un monomère, la 2,6-diméthoxy-benzoquinone (11 kg/t), qui peut être utilisé comme matériau de base dans les médicaments et les pesticides. Il a par ailleurs été démontré qu'apporter une protection supplémentaire aux enzymes immobilisées en les intégrant à une fine couche d'organosilane permettait en présence d'un médiateur redox de réduire de 12% la part insoluble de la lignine après le traitement enzymatique (Gasser et al., 2016). Plus simplement, cela signifie que la dépolymérisation enzymatique de la lignine s'en trouve améliorée, vraisemblablement parce que cela inhibe les liaisons covalentes des résidus de lignine oxydés avec la laccase (ill. 10). Au cours de la seconde étape, les résidus solides

ont été traités avec des acides aminés et extraits ensuite avec de l'acétate d'éthyle. Outre quelques dérivés monomères comme l'acide vanillique, cela a surtout permis de produire des fragments de lignine avec un rendement pouvant atteindre 30%, oligomères qui pourront par exemple être utilisés dans l'industrie chimique afin de produire des résines époxy (Gasser et al., 2017).

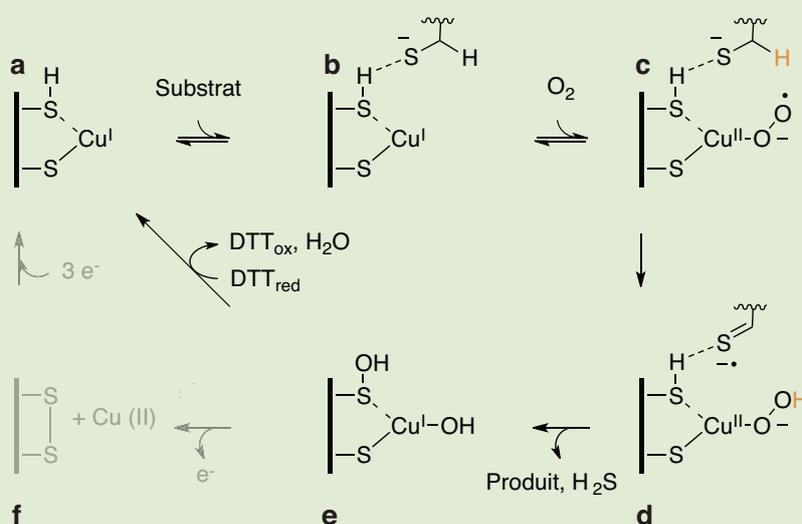


III. 10 Le graphique représente la fraction insoluble de la lignine après un traitement biocatalytique avec 100 U L⁻¹ de laccase et 7 mmol/L HOBt (hydroxybenzotriazole) pendant 24 heures avec un pH 6. Protéger les enzymes immobilisées par une couche supplémentaire d'organosilane permet de solubiliser 12% de lignine supplémentaires- *Corvini*, HES-SO.

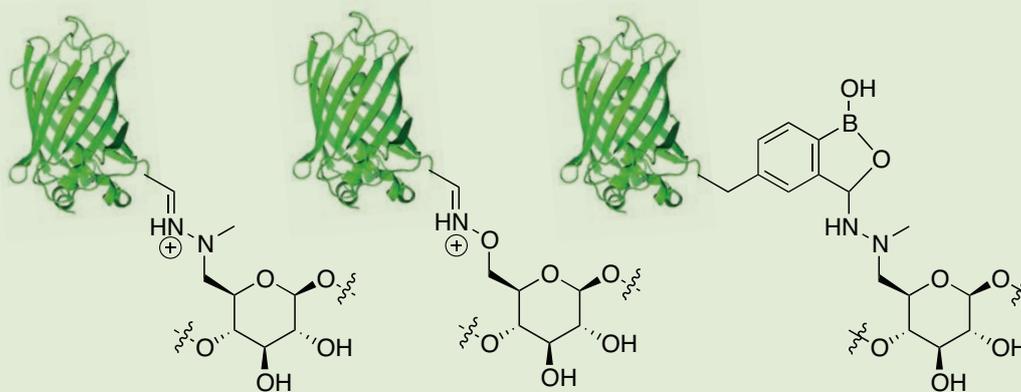
Principe de la décomposition enzymatique de la lignine – résultats du projet Seebeck (Université de Bâle) du PNR66

La décomposition biologique du bois par les champignons et les bactéries constitue l'une des réactions chimiques les plus complexes et les plus diversifiées connues. Afin de mieux comprendre ces réactions en chaîne et de permettre à long terme l'élaboration de nouveaux concepts biotechnologiques de transformation du bois en produits chimiques, le projet était consacré à l'étude des réactions enzymatiques aérobies. Un nouveau type d'enzyme, qui parvient en présence de cuivre

à activer l'oxygène et à briser des liaisons C-H stables (ill. 11), a ainsi été découvert (Knop et al., 2015; Knop et al., 2017). L'efficacité de l'enzyme découverte a pu être accrue d'un facteur de 20 grâce à des études mécanistiques et à une transformation ciblée. L'enzyme améliorée s'est avérée un outil pratique pour la production de protéines modifiées. Cette modification permet d'ancrer de manière ciblée les protéines sur des cristaux de cellulose afin de produire des matériaux composites qui pourraient à l'avenir se substituer aux matières plastiques pétrochimiques (ill. 12).



III. 11 Mécanisme catalytique de l'enzyme produisant de la formylglycine (FGE). Ce catalyseur unique utilise un cation de cuivre (a) pour fixer le substrat (b) ainsi que l'oxygène (c). Par sa liaison avec le cuivre, l'oxygène moléculaire est activé et réagit avec le substrat (d). Pour régénérer ensuite le catalyseur (e), des équivalents réducteurs supplémentaires sous forme de thiols sont nécessaires. Grâce à leur réactivité, les FGE peuvent être utilisées de maintes façons dans la modification chimique des protéines.

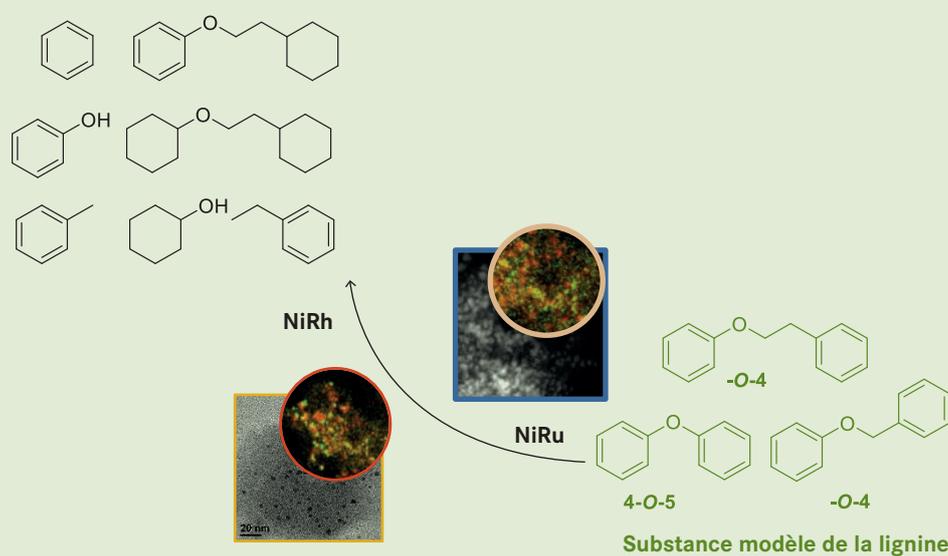


III. 12 Les protéines modifiées par les FGE, notamment la « protéine fluorescente verte » (vert), peuvent être liées avec une grande précision à la cellulose modifiée chimiquement. Cette approche permet de réaliser diverses liaisons covalentes.

Transformation catalytique de la lignine – résultats du projet *Dyson* du PNR66

Pour extraire des produits chimiques de haute valeur de la lignine, il est nécessaire de rompre de manière ciblée des liaisons aromatiques C-O stables. Afin de rompre ces liaisons par l'addition de H₂ (hydrogénolyse), des nanoparticules métalliques devant jouer le rôle de catalyseurs ont été fabriquées et leur efficacité a été testée à l'aide de substances modèles de la lignine (divers éthers aromatiques, voir ill. 13). Les catalyseurs à base de rhodium et de ruthénium se sont révélés très efficaces, mais ces métaux sont très onéreux. Des

catalyseurs bimétalliques, comprenant différentes proportions de nickel, ont par conséquent également été étudiés (Bulut et al., 2015; Bulut et al., 2017). Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les catalyseurs Ru₆₀Ni₄₀ et Rh₆₀Ni₄₀: les substrats modèles ont été entièrement fractionnés en monomères. Réaction secondaire indésirable, l'hydrogénation – c'est-à-dire l'addition d'hydrogène aux liaisons doubles C-C – n'a ainsi été observée qu'à un très faible volume. Les résultats obtenus sont donc très prometteurs et les catalyseurs développés seront prochainement testés avec la lignine sous forme de substrat.



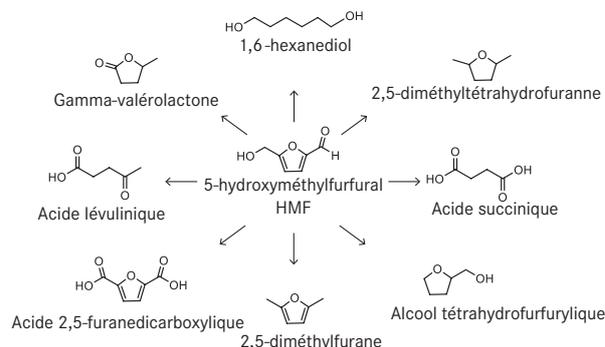
III. 13 À l'aide de catalyseurs à base de rhodium et de ruthénium, des liaisons stables C-O ont pu être rompues de manière ciblée par fixation de l'hydrogène, et des produits chimiques de haute valeur ont été extraits des substances modèles de la lignine – *Dyson*, EPFL.

Méthodes chimiques de transformation de la cellulose et de l'hémicellulose

En alternative à la plate-forme lignocellulosique biotechnologique décrite plus haut, des méthodes purement chimiques de transformation du bois ont également été étudiées dans le cadre du PNR66. Il est connu depuis longtemps que les acides minéraux concentrés, comme l'acide sulfurique ou chlorhydrique, peuvent transformer directement la cellulose et l'hémicellulose en sucres simples. Cette méthode permet certes d'obtenir des rendements importants, mais ses coûts sont aus-

si très élevés parce qu'il est nécessaire d'utiliser des réacteurs résistants à la corrosion et que les acides doivent ensuite être recyclés. Les procédés chimiques les plus modernes recourent à des catalyseurs métalliques et à des solvants sur mesure. Ils permettent de générer des sucres destinés à être utilisés comme produits intermédiaires lors d'un raffinage secondaire, mais aussi de fabriquer directement différents produits finis. Les liquides dits ioniques – des sels qui fondent à température ambiante et sont donc liquides – peuvent dissoudre la cellulose, une propriété qui peut être utilisée pour la production de glucose (Socha et al., 2014).

Un projet du PNR66 s'est focalisé sur le développement de catalyseurs et de liquides ioniques novateurs afin de transformer la cellulose et la lignine en produits chimiques de haute valeur comme le 5-hydroxyméthylfurfural (5-HMF) (voir encadré « Transformation catalytique directe de la cellulose en HMF »), un produit chimique plate-forme qui peut à son tour être utilisé pour produire un grand nombre de substances (ill. 14).

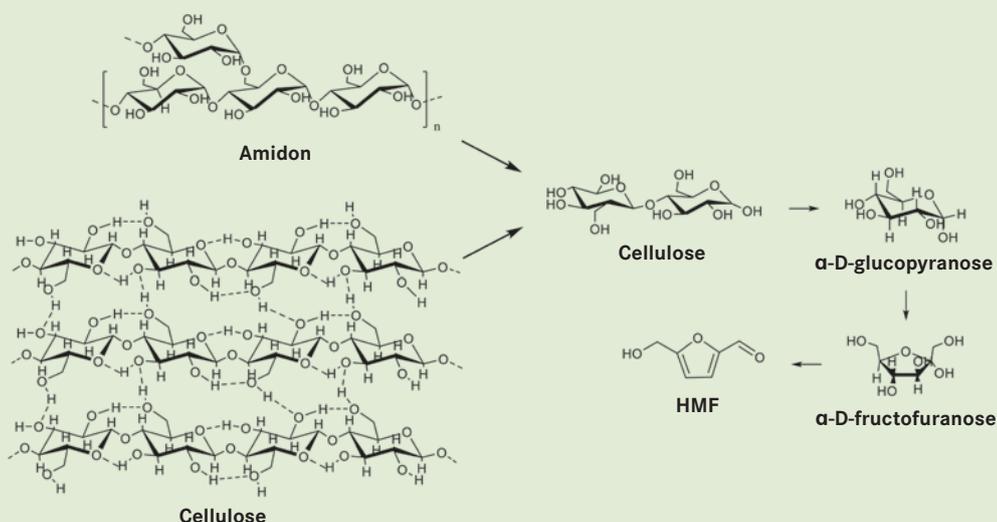


III. 14 Exemples de produits chimiques importants pouvant être fabriqués à partir de 5-hydroxyméthylfurfural (5-HMF) (Siankevich et al., 2015).

Transformation catalytique directe de la cellulose en HMF – résultats du projet *Dyson* du PNR66 (EPFL)

Le 5-hydroxyméthylfurfural (5-HMF) est un produit chimique plate-forme important qui peut être transformé en un grand nombre de produits comme l'acide 2,5-furanedicarboxylique ou le 2,5-diméthylfurane (Siankevich et al., 2014; Siankevich et al., 2017). Ce projet était consacré au développement d'une nouvelle technologie visant à produire directement du 5-HMF à partir de cellulose (ill. 15). 16 liquides ioniques différents – des sels liquides à température ambiante – ont

été synthétisés et testés comme milieu de réaction afin de transformer du glucose en 5-HMF en présence de CrCl_2 comme pré-catalyseur (Siankevich et al., 2014; Siankevich et al., 2015). Une combinaison de deux liquides ioniques différents a permis d'obtenir un rendement de 5-HMF de 92 % en deux heures (Siankevich et al., 2016). Au final, les conditions de réaction ont pu être optimisées de telle manière qu'un rendement de 62 % de 5-HMF a pu être également obtenu en utilisant la cellulose comme matière première.



III. 15 Avec une combinaison de deux liquides ioniques différents, la cellulose a pu être directement déshydratée et transformée en 5-HMF avec un rendement de 62 % – *Dyson, EPFL*.

Plate-forme gaz synthétique

Le cœur de cette plate-forme est constitué par la gazéification thermochimique du bois et d'autres biomasses lignocellulosiques en gaz de synthèse, un mélange principalement composé de CO et de H₂. Le raffinage secondaire permet de transformer le gaz de synthèse en différents produits tels que le méthane, souvent appelé «gaz naturel synthétique» (GNS), l'hydrogène, des alcools et le diesel Fischer-Tropsch. Lorsque le produit secondaire est un carburant liquide, cette technologie est également qualifiée de «Biomass to Liquid» (BtL). Cette dénomination fait apparaître la parenté qui existe entre cette méthode et les procédés «Coal to Liquid» et «Natural Gas to Liquid» qui sont basés sur des matériaux fossiles et déjà disponibles sur le marché. Le principe: du charbon ou du gaz naturel sont transformés en gaz de synthèse qui joue le rôle de produit intermédiaire central.

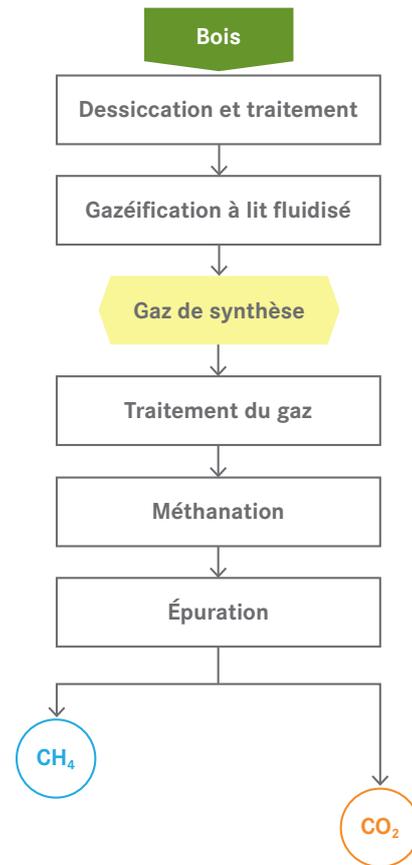
De façon générale, la plate-forme gaz de synthèse comprend trois étapes: la gazéification du bois, l'épuration du gaz de synthèse et la transformation catalytique menant au produit fini (ill. 16), qui sont décrites plus en détail ci-dessous.

Production de gaz de synthèse à partir de biomasse

Lors de la gazéification, une oxydation partielle de tous les composants de la biomasse a lieu en présence de vapeur, d'air ou d'oxygène pur: le CO, l'H₂ et le CH₄ en sont les produits principaux, le CO₂ et la vapeur d'eau les produits secondaires. La gazéification permet donc de transformer n'importe quel matériau organique en un produit intermédiaire homogène qu'il est ensuite possible de transformer à son tour. La réaction s'effectue à une température comprise entre 750 et 1250 °C. La chaleur nécessaire peut être fournie par une combustion partielle dans le réacteur de gazéification (procédé autothermique) ou par un apport extérieur (procédé allothermique). Les procédés allothermiques sont utilisés pour permettre une gazéification en présence de vapeur tandis que les gazéificateurs à air recourent en règle générale à un fonctionnement autothermique.

Épuration du gaz de synthèse

La deuxième étape du procédé consiste à épurer le gaz de synthèse, qui comporte des impuretés comme des goudrons et des cendres particulaires, des hydrocarbures supérieurs, des composés sulfurés et chlorés ainsi que des éléments traces. Le goudron constitue surtout un problème pour les



III. 16 La bioraffinerie à gaz de synthèse illustrée par la production de méthane.

installations techniques utilisées pour la transformation ultérieure du gaz de synthèse. À basse température, le goudron se condense et obstrue les vannes, les tuyaux et les échangeurs de chaleur. À haute température, il se polymérise en structures plus complexes. De leur côté, les composés sulfurés et les éléments traces désactivent même en faible concentration de l'ordre des ppm les catalyseurs utiles aux étapes de synthèse en aval.

Les techniques d'épuration du gaz employées de nos jours sont basées sur des procédés en plusieurs étapes qui s'effectuent toutes à des températures très différentes. Les particules solides sont par exemple retenues par un filtre à une température pouvant atteindre 200 °C ou éliminées au moyen de filtres en céramique ou à lit de sable. Le gaz de synthèse est ensuite refroidi au moyen, par exemple, d'un épurateur à diesel afin d'éliminer des substances comme le goudron, l'eau et les composés sulfuriques organiques à température ambiante. Les impuretés restantes peuvent entre

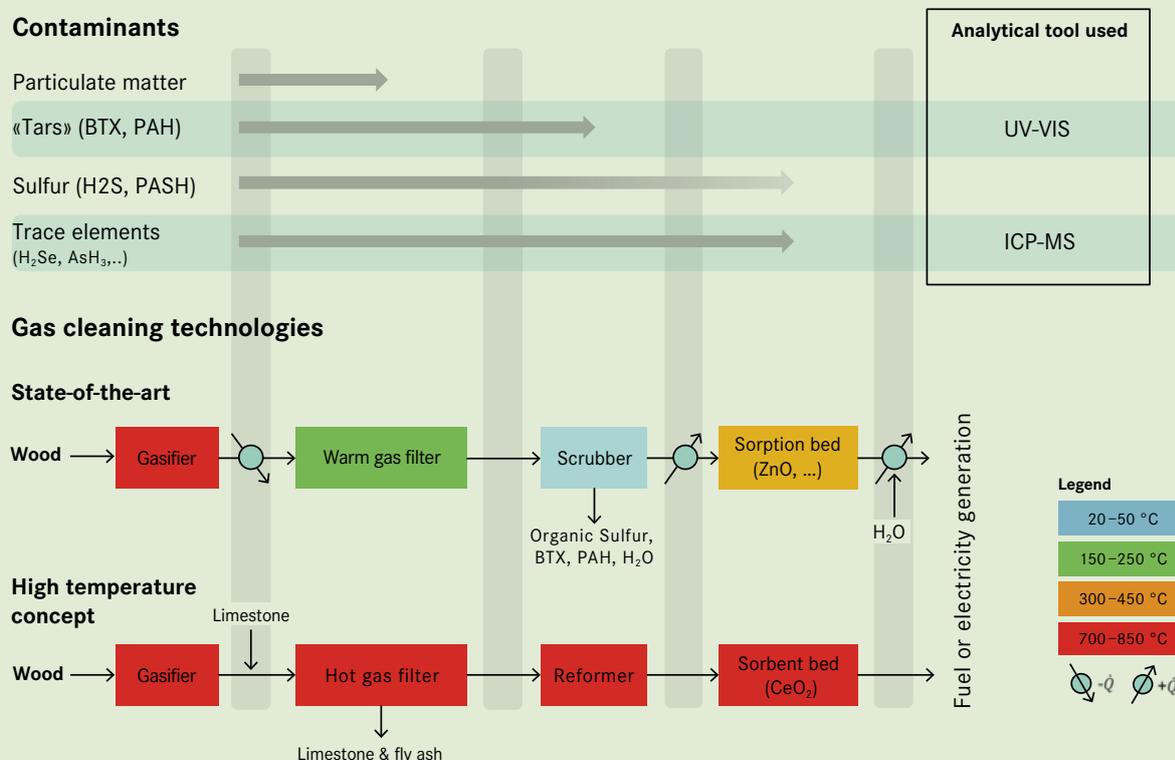
autres être fixées grâce à un agent de sorption à environ 350 °C. Même lorsque du gaz naturel est utilisé comme matériau de départ, l'épuration du gaz dans un train Fischer-Tropsch constitue l'une des étapes les plus onéreuses. Par rapport au gaz d'origine fossile, l'utilisation de biomasse multiplie approximativement par deux les coûts d'épuration (Zhang, 2010). Améliorer l'épuration du gaz consti-

tue par conséquent un thème de recherche très actuel qui a également été étudié dans le cadre du PNR66 (voir encadrés « Développement d'un système d'épuration du gaz à haute température » et « Développement de procédés d'analyse rapides et hautement sensibles pour la détermination des impuretés contenues dans le gaz de synthèse »).

Développement d'un système d'épuration du gaz à haute température – résultats du projet Biollaz (PSI) du PNR66

Afin d'éviter les étapes de chauffe et de refroidissement décrites plus haut inhérentes à la technologie actuelle d'épuration du gaz, un système d'épuration du gaz à haute température a été développé dans le cadre de ce projet (Rhyner, 2013; Heidenreich et al., 2016). Il a été choisi pour ce faire de recourir à une séquence de préépuration effectuée au moyen d'un filtre céramique à haute température, d'un reformeur catalytique pour décomposer les goudrons et d'une adsorption à haute température. Tous ces procédés auront lieu à la température du gazéifieur.

Dans le cadre des activités menées autour de l'épuration des gaz à chaud, il a pu être démontré que le catalyseur de reformage le plus prometteur devait atteindre une température de fonctionnement optimale de 850 °C pour permettre l'élimination de toutes les substances interférentes critiques. Cela présuppose qu'une installation de filtration des gaz à chaud soit disponible sur le marché. Actuellement, des températures de filtration pouvant atteindre 600 °C peuvent être atteintes sans difficulté. L'optimisation des différentes étapes du procédé doit par conséquent être effectuée au cas par cas.



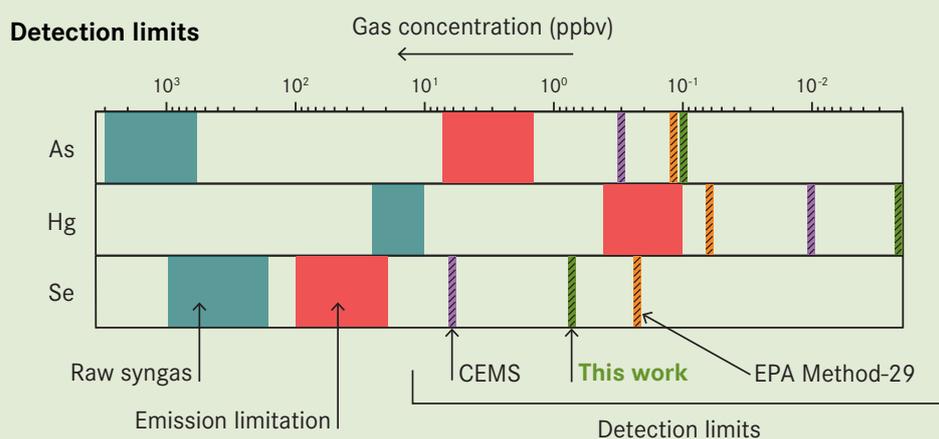
III. 17 Le développement du système d'épuration du gaz à haute température permet d'éliminer les différents types d'impuretés sans soumettre la température de gazéification à des étapes de chauffe et de refroidissement – Biollaz, PSI.

Développement de procédés d'analyse rapides et hautement sensibles pour la détermination des impuretés contenues dans le gaz de synthèse – résultat du projet Biollaz (PSI) du PNR 66

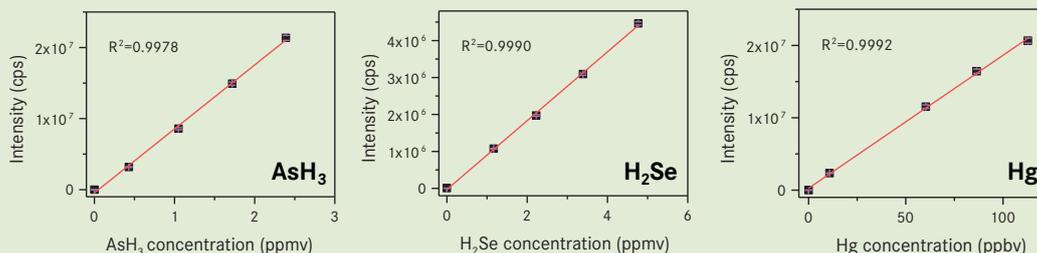
Des procédés d'analyse rapides et hautement sensibles pour mesurer les impuretés ont été perfectionnés afin de développer et d'évaluer ces étapes d'épuration (ICP-MS, UV-VIS) (Edinger et al., 2016; Edinger et al., 2016). De par les possibilités nettement plus étendues qu'elles offrent, les mesures par ICP-MS permettent ainsi d'évaluer à quelles utilisations le gaz épuré se prête le mieux (production hautement efficace d'électricité, synthèse de CH_4 , carburants liquides). Cela revêt une importance particulière pour divers assortiments

de bois, entre autres le vieux bois et le bois brut. De nouveaux procédés analytiques en ligne permettant une analyse élémentaire des particules dissoutes dans les aérosols sont actuellement développés (SMPS-ICPMS) (Hess et al., 2015). Il a récemment été démontré que cette méthode pouvait également être utilisée afin de déterminer la composition des gaz issus de la combustion du bois (Hess et al., 2016).

Ces procédés de mesures améliorés permettent de caractériser de manière ciblée les différents agents de sorption dans différentes conditions, entre autres à des températures élevées, afin d'optimiser le déroulement des processus.



Calibration curves



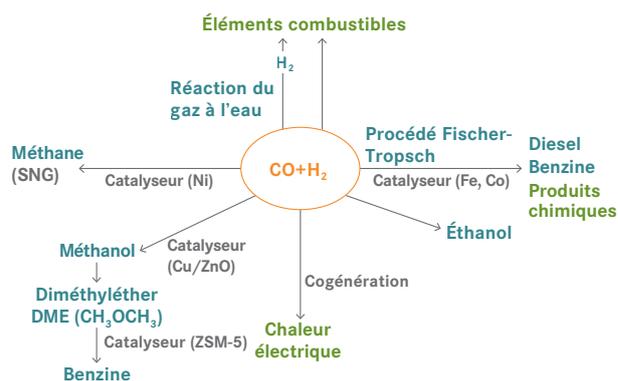
III. 18 Le perfectionnement de procédés d'analyse rapides permet de déterminer la composition du gaz de synthèse épuré pour le procédé de catalysation en aval, par exemple la méthanisation – Biollaz, PSI.

Transformation du gaz synthétique en produits finis

La troisième étape de cette plate-forme consiste à transformer le gaz de synthèse en différents produits finis. L'illustration 19 donne un aperçu des produits les plus fréquemment obtenus. Les technologies correspondantes ont été développées dès les années 1920 et se basaient à l'époque sur la gazéification du charbon. Le choix adapté des catalyseurs, de la température, de la pression et de la forme du réacteur permet d'orienter le rendement vers le produit souhaité. Si le procédé Fischer-Tropsch (catalyseurs au fer et au cobalt) et la synthèse de méthanol (catalyseurs au cuivre et à l'oxyde de zinc) donnent les meilleures performances à des températures inférieures à 250°C et à des pressions élevées, les catalyseurs au nickel permettent de produire du méthane (également qualifié de «gaz naturel synthétique bio» ou de GNS bio) à des températures plus élevées et à des pressions plus basses.

Les procédés correspondants sont basés sur plusieurs catalyseur et les réactions chimiques qui en

découlent sont bien connues. Leur transposition à l'échelle industrielle représente néanmoins toujours un défi, en particulier lorsqu'il s'agit d'utiliser du gaz de synthèse biosourcé. Dans le cadre du PNR66, deux projets étaient par conséquent consacrés au bioraffinage secondaire du gaz de synthèse (voir encadrés «Méthanisation du gaz de synthèse dans un réacteur à lit fluidisé» et «Production d'hydrogène de grande pureté»).

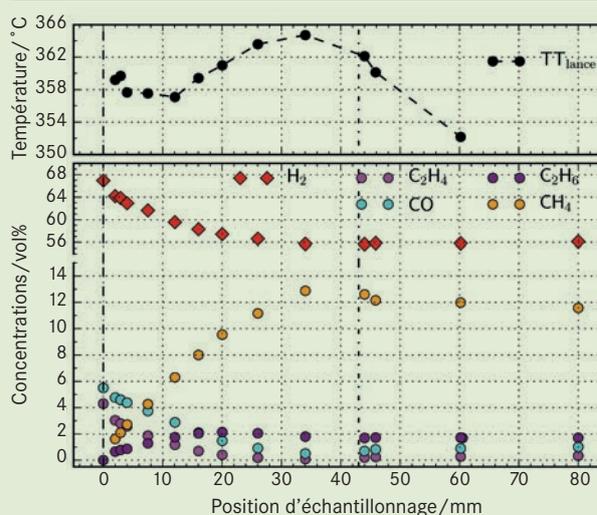


III. 19 Les produits les plus connus issus d'une bioraffinerie de gaz synthétique (adapté à partir de Zhang, 2010).

Méthanisation du gaz de synthèse dans un réacteur à lit fluidisé – résultats du projet Schildhauer (PSI) du PNR66

Le biométhane est un vecteur énergétique renouvelable très prometteur, car il peut être stocké dans le réseau de gaz naturel et offre ainsi une large palette d'applications. Ce projet a étudié en détail les réactions et la dynamique des fluides liées à la production de méthane à partir du bois dans un réacteur à lit fluidisé, si bien que des modèles informatiques précis ont ainsi pu être développés afin de procéder à des simulations proches de la réalité. Ces modèles revêtent une grande valeur pour l'optimisation et la transposition du procédé à une échelle industrielle et commerciale. Il a par ailleurs été démontré que la méthanisation à lit fluidisé est beaucoup plus tolérante vis-à-vis des hydrocarbures insaturés que les réacteurs classiques à lit fixe. Ces hydrocarbures insaturés, en particulier l'éthylène, l'acétylène et le benzol, sont des composants que l'on retrouve dans le gaz de synthèse issu de gazéificateurs à bois allothermiques. Dans les chaînes de procédés utilisées jusqu'alors, ils devaient être éliminés à grands frais alors qu'un réacteur à lit fluidisé per-

met de les transformer en un produit valorisable (Tshedanoff, 2013). Par voie de conséquence, cela simplifie l'épuration du gaz et permet de réduire les coûts d'investissement.

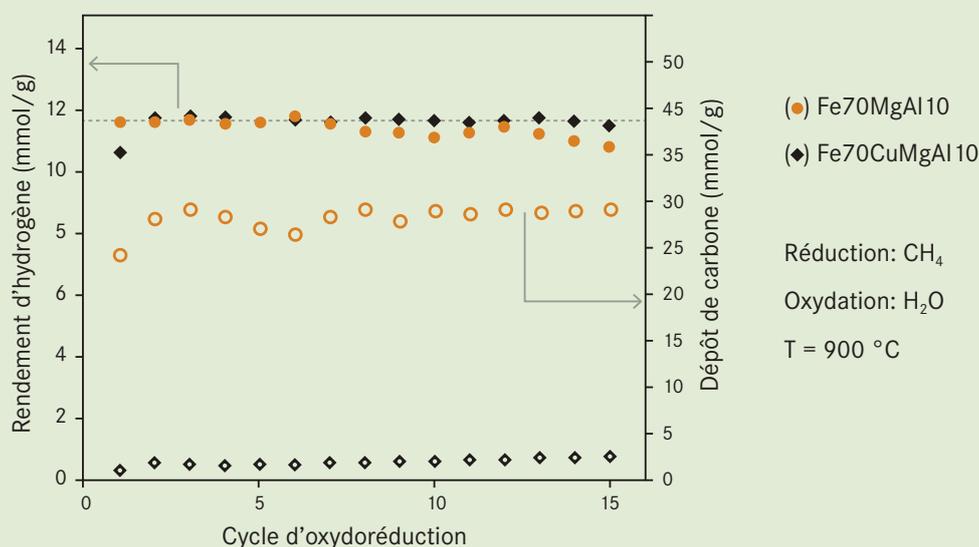


III. 20 Le projet a étudié les réactions intervenant lors de la méthanisation du bois dans un réacteur à lit fluidisé. Le graphique présente des données relatives à l'hydratation de l'éthène après application de monoxyde de carbone – Schildhauer, PSI.

Production d'hydrogène de grande pureté – résultats du projet Müller (EPFZ) du PNR 66

Ce projet s'est focalisé sur la production d'hydrogène de grande pureté à partir du bois. Afin qu'il puisse être utilisé dans les piles à combustible pour produire de l'électricité, l'hydrogène ne doit en effet pas contenir plus de 50 ppm de monoxyde de carbone. À l'heure actuelle, l'hydrogène est principalement produit par reformage du méthane à la vapeur, ce qui n'est possible que dans de très grandes installations. Ce procédé n'est donc pas adapté à la transformation en hydrogène de la ressource bois du fait de sa collecte décentralisée. L'équipe de Müller propose donc un procédé innovant dans lequel la biomasse est tout d'abord gazéifiée. Le gaz de synthèse réduit l'oxyde de fer (Fe_2O_3) en fer (Fe) qui est finalement à nouveau oxydé en Fe_2O_3 en présence de vapeur puis d'air, ce qui produit de l'hydrogène. La répétition de ce cycle exige des matériaux à base d'oxyde de fer qui affichent une performance redox stable, ce qui constitue l'un des défis que ce nouveau procédé se doit de relever. Les chercheuses et chercheurs sont parvenus à mettre au point un catalyseur qui

a montré une haute réactivité vis-à-vis du CO et du CH_4 durant 15 cycles d'oxydoréduction (Imtiaz et al., 2015). Les études réalisées ont également démontré que les dépôts de carbone pouvaient presque entièrement être évités à la surface des matériaux redox modifiés avec de l'oxyde de cuivre (Imtiaz et al., 2014; Imtiaz et al., 2016). Contrairement aux matériaux conventionnels à base d'oxyde de fer, l'hydrogène qu'ils permettent de produire durant le procédé aval ne contient pas un taux excessif de produits d'oxydation comme le CO (ill. 21). D'autres analyses ont révélé que les substances soufrées H_2S , COS et $\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$ étaient présentes dans le gaz synthétique. Habituellement la réduction de Fe_2O_3 en Fe produit du sulfate de fer (FeS) qui s'oxyde en H_2S et SO_2 lors de l'oxydation à l'eau et souille ainsi l'hydrogène produit. L'utilisation de matériaux redox à base d'oxyde de fer modifiés avec du CuO retarde notablement la formation de H_2S et SO_2 , qui ne se déclenche que lorsque la production d'hydrogène est presque achevée.



III. 21 Au cours d'un procédé circulaire, de l'hydrogène est produit à partir de bois ou de gaz de synthèse en réduisant de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) en fer (Fe) qui est à nouveau oxydé en Fe_2O_3 en présence de vapeur et d'air afin de produire de l'hydrogène. Un rendement élevé en hydrogène a pu être obtenu durant 15 cycles redox avec du CO (●) alors qu'avec le CH_4 (◆), les rendements baissaient au fur et à mesure que le nombre de cycles augmentait en raison de dépôts de carbone solide dus à l'oxyde de fer. Les symboles creux indiquent les dépôts de carbone et les symboles pleins le rendement en hydrogène. La modification du Fe_2O_3 avec du CuO réduit notablement les dépôts de carbone – Müller, EPFZ.

Plate-forme huile pyrolytique

Par pyrolyse, on entend la décomposition thermique sous vide de la biomasse à des températures comprises entre 450 et 600°C. Si la pyrolyse se déroule en quelques secondes, avec des temps de chauffe, de refroidissement et de réaction extrêmement courts, on parle alors de pyrolyse flash et son principal produit est l'huile pyrolytique. À ces températures élevées, les produits gazeux réagissent et se condensent en refroidissant pour former ce mélange constitué de plus de 350 composés différents : acides, aldéhydes, cétones et molécules aromatiques. Le reste de la biomasse est décomposé à parts plus ou moins égales en gaz et résidus solides appelés le coke de pyrolyse (Hofbauer et al., 2016). L'huile pyrolytique est le principal produit intermédiaire de cette plate-forme. Cette huile biosourcée est constituée par une émulsion de substances huileuses organiques dans une phase aqueuse contenant également des substances organiques solubles dans l'eau.

Principalement du fait de son acidité élevée et de sa forte teneur en oxygène, et des propriétés corrosives comme du faible pouvoir calorifique en résultant, cette huile doit être traitée et ne peut pas être employée directement comme biocarburant. Elle contient par ailleurs de nombreuses substances réactives, si bien que des réactions de polymérisation se déclenchent lors du stockage ou des procédés thermiques ultérieurs, ce qui augmente la viscosité et l'instabilité de l'émulsion.

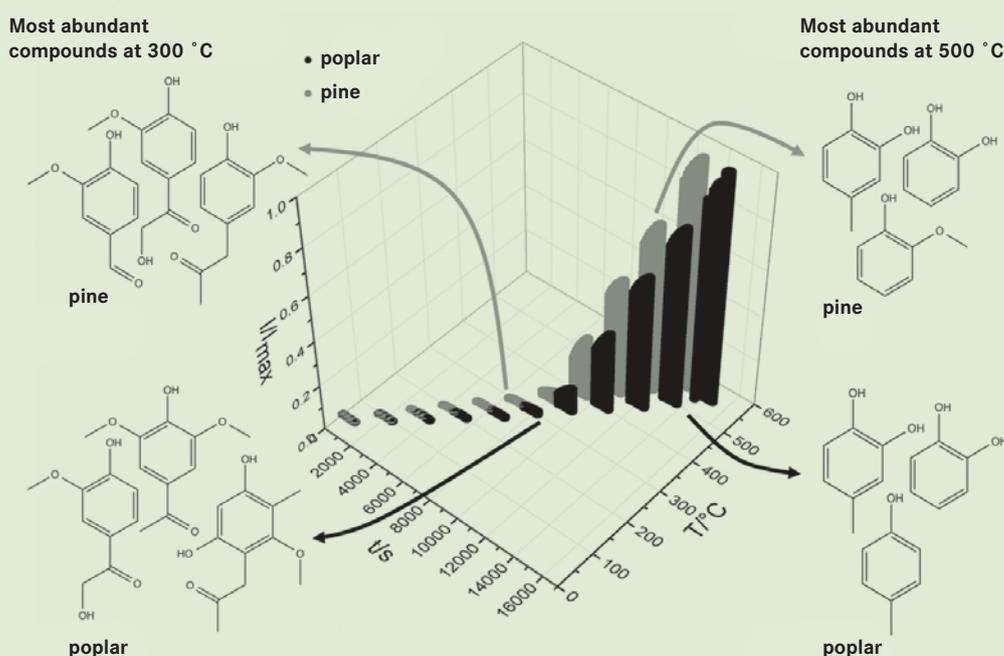
La pyrolyse flash classique a connu récemment un nouveau développement, la pyrolyse flash catalytique, qui améliore la qualité de cette huile biosourcée (Lin et Huber, 2009). La pyrolyse flash catalytique se prête également à la production de composés aromatiques lorsque la lignine est le matériau de base utilisé (Alonso et al., 2010). Néanmoins, transformer par catalyse la lignine en produits finis s'avère encore plus difficile que pour l'hémicellulose et la cellulose. Il en résulte donc une quantité encore plus importante de résidus qui ne peuvent pas être transformés pour obtenir le liquide souhaité. La lignine étant l'un des trois principaux composants du bois, dont elle représente près de 40% du pouvoir calorifique, elle devrait pouvoir être valorisée de manière aussi rentable que possible. Lors de la pyrolyse flash catalytique, la lignine est transformée en substances aromatiques et en phénols par le biais de réactions catalysées par un acide et par dissociation des groupes contenant de l'oxygène (dialcoxylation).

L'efficacité du procédé augmente en fonction du nombre de groupes acides du catalyseur et permet des rendements de plus de 70% massique en ce qui concerne la lignine (Ma et al., 2012). La pyrolyse catalytique permet donc la production ciblée de substances aromatiques et phénolées pour lesquelles on obtient des rendements élevés, la valeur économique de ces produits reste cependant plutôt faible (Vispute et al., 2010). Afin de pouvoir produire des phénols substitués de plus grande valeur (comme de la vanilline, du syringaldéhyde ou du p-hydroxybenzaldéhyde, qui sont des substances aromatiques ou des produits intermédiaires importants pour la synthèse de produits chimiques), les liaisons chimiques doivent être dissociées de manière sélective dans la lignine. Lors du choix des conditions de réaction, il est par ailleurs nécessaire de tenir compte de la réactivité plus élevée, ou de la stabilité plus faible, de ces molécules.

Études sur la pyrolyse flash de la lignine – résultats du projet Vogel (PSI, HES-SO) du PNR66

Ce projet avait pour but d'étudier les processus complexes observés durant la pyrolyse flash catalytique et d'obtenir des informations sur la réactivité de différents types de lignine (Ma et al., 2015). Pour ce faire, les lignines du hêtre, de l'épicéa, du peuplier et du pin ont été extraites au moyen de trois méthodes différentes (hydrolyse acide, extraction à l'éther et procédé Organosolv), et leur structure et leur réactivité ont été analysées (ill. 22). Il est apparu que la méthode d'extraction, en particulier, et la température de pyrolyse exerçaient une influence importante sur la formation de radicaux libres et leur concentration ainsi que sur le rendement et la palette de pro-

duits. À l'inverse, l'origine botanique de la lignine ne joue qu'un rôle subalterne (Bahrle et al., 2015). Les lignines extraites dans des conditions rudes, au moyen par exemple du procédé Organosolv, conviennent moins à la production de phénols de forte valeur. Typique pour ces lignines est en effet le fait qu'elles présentent des poids moléculaires plus faibles et des liaisons (C-C) plus stables. À l'inverse, les lignines extraites dans des conditions douces tendent à avoir des poids moléculaires plus importants et des liaisons plus fragiles (C-O-C) (Custodis et al., 2015). Les résultats démontrent néanmoins que les liaisons chimiques ne peuvent pas encore être dissociées de manière ciblée et qu'il est nécessaire de poursuivre les recherches dans ce domaine.



III. 22 Concentrations normalisées de bois de peuplier et de hêtre durant la pyrolyse flash et composés les plus fréquemment rencontrés se dissociant des échantillons à 300 et 500 °C (Bahrle et al., 2014) – Vogel, PSI, HES-SO.

La dépolymérisation de la lignine en milieu aqueux à des températures plus douces que celles de la pyrolyse flash permet d'obtenir un rendement plus élevé de produits chimiques de plus grande valeur, comme la vanilline. Un tel procédé est utilisé depuis longtemps à des fins commerciales afin de produire de la vanilline à partir de la liqueur

noire résultant de la production de pâte à papier. Dans le cadre du PNR66, il a été étudié si ce procédé pouvait également être appliqué à d'autres lignines durant la phase aqueuse afin de déterminer si d'autres substances à haute valeur ajoutée pouvaient être extraites avec des rendements similaires.

Études sur la dépolymérisation oxydative de la lignine – résultats du projet Vogel (PSI, HES-SO) du PNR 66

Ce projet avait pour but d'étudier si les produits intermédiaires et finaux issus de la dépolymérisation oxydative de la lignine pouvaient être séparés et stabilisés durant la dépolymérisation. Pour ce faire, des expériences ont été réalisées avec un milieu de réaction biphasique composé d'une phase aqueuse et d'une phase organique. Différentes lignines ont été dissoutes, ou mises en suspension, dans la phase aqueuse et mélangées à une phase organique insoluble. Une dépolymérisation oxydative

de la lignine a été induite au moyen d'oxygène sous pression et d'ions de cuivre dissous dans l'eau. Des produits organiques (comme la vanilline) ont ainsi été directement extraits de la phase organique durant la réaction. Un rendement en vanilline jusqu'à 1,4% a ainsi pu être atteint, ce qui représente un chiffre 14 fois supérieur au rapport obtenu lors d'une expérience réalisée sans une deuxième phase organique.

Plate-forme chaleur et électricité

La plate-forme chaleur et électricité peut constituer un élément important dans les bioraffineries étant donné que leur exploitation requiert une consommation élevée d'électricité pour le fonctionnement des unités auxiliaires et de chaleur pour la mise en œuvre des procédés thermiques. La mise à disposition combinée de chaleur et d'électricité s'effectue par l'intermédiaire d'installations de cogénération utilisant du bois brut, un produit intermédiaire (p. ex. du gaz de synthèse) ou des résidus de bioraffinage. Les grosses installations produisent ainsi de la vapeur, qui est utilisée pour mettre en œuvre des procédés thermiques à haute température ou entraîner une turbine et produire de l'électricité, tandis que la chaleur résiduelle à basse température est utilisée à des fins de chauffage. Le couplage chaleur-force permet ainsi une utilisation plus efficace du combustible que la seule production d'électricité dans le cadre de laquelle une partie de la chaleur est évacuée dans l'environnement par l'intermédiaire de tours de refroidissement. À l'heure actuelle, la production de chaleur destinée à alimenter les bâtiments en chaleur et en eau chaude est encore la plus importante application énergétique du bois. En tant que combustible stockable, le bois complète l'utilisation de l'énergie solaire qui exige de recourir à un chauffage d'appoint afin de produire de la «chaleur à la demande». Étant donné que de telles applications à basse température peuvent néanmoins également être assurées par des pompes à chaleur récupérant les calories dans l'environnement, le bois revêtira à l'avenir une importance décisive

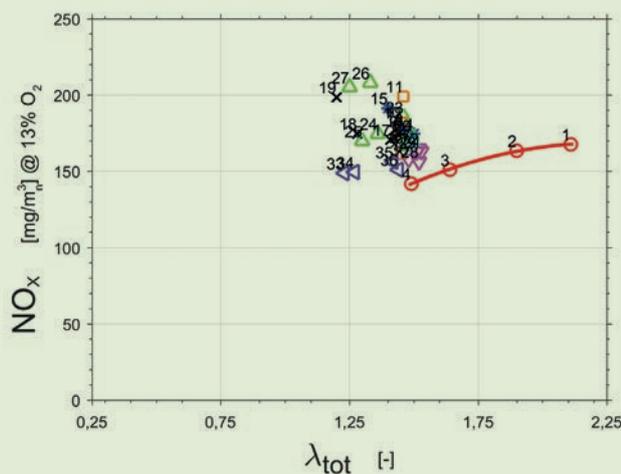
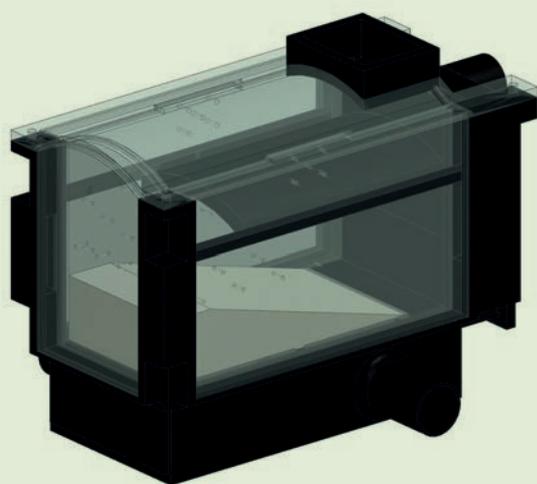
pour la mise à disposition de chaleur de processus de plus de 200°C dans la mesure où ces applications sont actuellement principalement couvertes par les énergies fossiles et où les pompes à chaleur ne se prêtent pas à de tels niveaux de température.

Dans le cas de la plate-forme chaleur et électricité, la combustion est à l'heure actuelle couplée à des turbines à vapeur (à partir de 5 MWe) et des installations ORC (à partir de 500 kWe). À l'avenir, la gazéification du bois pourrait aussi être utilisée de manière renforcée et permettre des niveaux de rendements électriques plus élevés dans les grosses installations de cogénération. Les principaux défis posés par les techniques de combustion sont les émissions de polluants qui en résultent en particulier les poussières fines, les composés organiques et les oxydes d'azote (NO_x) (Nussbaumer, 2013). Des concepts visant à optimiser les chaudières à grille ont donc été développés dans le cadre du projet du PNR 66 (voir encadré «Optimisation des chaudières à grille»).

Optimisation des chaudières à grille – résultats du projet *Nussbaumer* (HES Lucerne) du PNR66

Les assortiments de bois de qualité inférieure présentent souvent une teneur élevée en cendres et une humidité variable. En utilisation stationnaire à charge nominale, les systèmes à grille actuels atteignent une haute qualité de combustion avec ces assortiments, mais leur rendement se révèle limité à charges partielles et ils génèrent des émissions élevées d'oxydes d'azote. La formation thermique de NO_x à partir de l'azote du bois est induite par des pics de température locaux (hot spots) qui apparaissent sur la grille aux endroits où l'air est injecté et du fait de la répartition non homogène du comburant air le long de la grille et des parois de la chambre de combustion (Martinez-Garcia et Nussbaumer, 2015). Afin d'améliorer le fonctionnement à charges partielles et la répartition de l'air, une chaudière à grille mobile a été développée dans le cadre de ce projet. Celle-ci dispose de quatre zones de combustion

dont la mobilité et l'alimentation en air peuvent être contrôlées séparément, chacune de ces zones pouvant optionnellement être complétée par une recirculation des gaz d'échappement. Les effets dus aux parois ont par ailleurs été réduits en adaptant les éléments de la grille attenants. Cette combustion optimisée permet ainsi d'obtenir une postcombustion complète avec un lit de combustible homogène même en cas de fonctionnement à charge partielle (environ 30% de la charge nominale) et de teneur élevée en cendres. Le fonctionnement plus stable obtenu à charges partielles permet également de piéger plus efficacement les poussières fines. Les émissions de dioxyde d'azote ont par ailleurs pu être réduites de 25% (ill. 23) en régulant l'excès d'air alimentant la zone de combustion en position basse. Cette nouvelle technologie permet de valoriser des assortiments de bois plus économiques et moins demandés sans qu'il en résulte des émissions supérieures de substances nocives. Elle peut ainsi accroître la part du bois dans l'approvisionnement énergétique.



III. 23 Le développement d'une chaudière à grille mobile pour les assortiments de bois de qualité inférieure permet de stabiliser le fonctionnement à charges partielles et de réduire les émissions de dioxyde d'azote de 25%. Croquis de gauche: modèle de la chambre de combustion pour les mesures de flux. Graphique de droite: émissions de dioxyde d'azote en fonction de l'excès d'air total pour différents réglages de l'aération. Les réglages 1 à 4 (ligne rouge) représentent l'influence d'une réduction successive de l'excès d'air dans la zone primaire de 1,3 à 0,7. Des conditions optimales avec combustion échelonnée ont été obtenues au point 4 avec un excès d'air primaire de 0,7 pour des émissions de dioxyde d'azote de 142 mg/m^3 . Les émissions de CO correspondantes atteignaient 14 mg/m^3 et étaient inférieures de plus d'un ordre de grandeur à la valeur limite d'émission définie. L'excès d'air total de 1,5 permet simultanément un taux de rendement nettement supérieur à 90%. (Les points de mesure non abordés résultent d'autres configurations de procédés.) – Nussbaumer, HSLU.

Évaluation et comparaison des plates-formes

Comme cette synthèse l'a montré, les processus auxquels il est possible de recourir pour transformer le bois en différents produits sont très nombreux. Les projets poursuivis dans le cadre du PNR66 couvrent l'ensemble du spectre de ces possibilités. Comparer systématiquement, et donc évaluer, les procédés innovants de valorisation de la ressource bois présentés plus haut et qui pourraient partiellement être intégrés à une bioraffinerie optimale n'est donc pas chose facile. Le stade de développement encore précoce de nombre de ces technologies et procédés représente en effet un facteur d'incertitude conséquent. Les données qui sont utilisées à des fins de comparaison se basent par conséquent généralement sur des expériences à petite échelle et n'ont pas encore été validées par une utilisation industrielle. Même à ce stade, une analyse comparative comme celle réalisée sous la direction de François Maréchal dans le cadre du PNR66 peut néanmoins fournir des indications précieuses pour le développement ultérieur de ces procédés – informations dont la science, l'industrie et la politique peuvent bénéficier (voir encadrés «Développement d'une plate-forme informatique

pour l'évaluation des options de transformation du bois en produits chimiques» et «Étude de cas : comparaison de la production de différents produits dans une bioraffinerie à base de bois suisse en fonction de critères économiques et écologiques»).

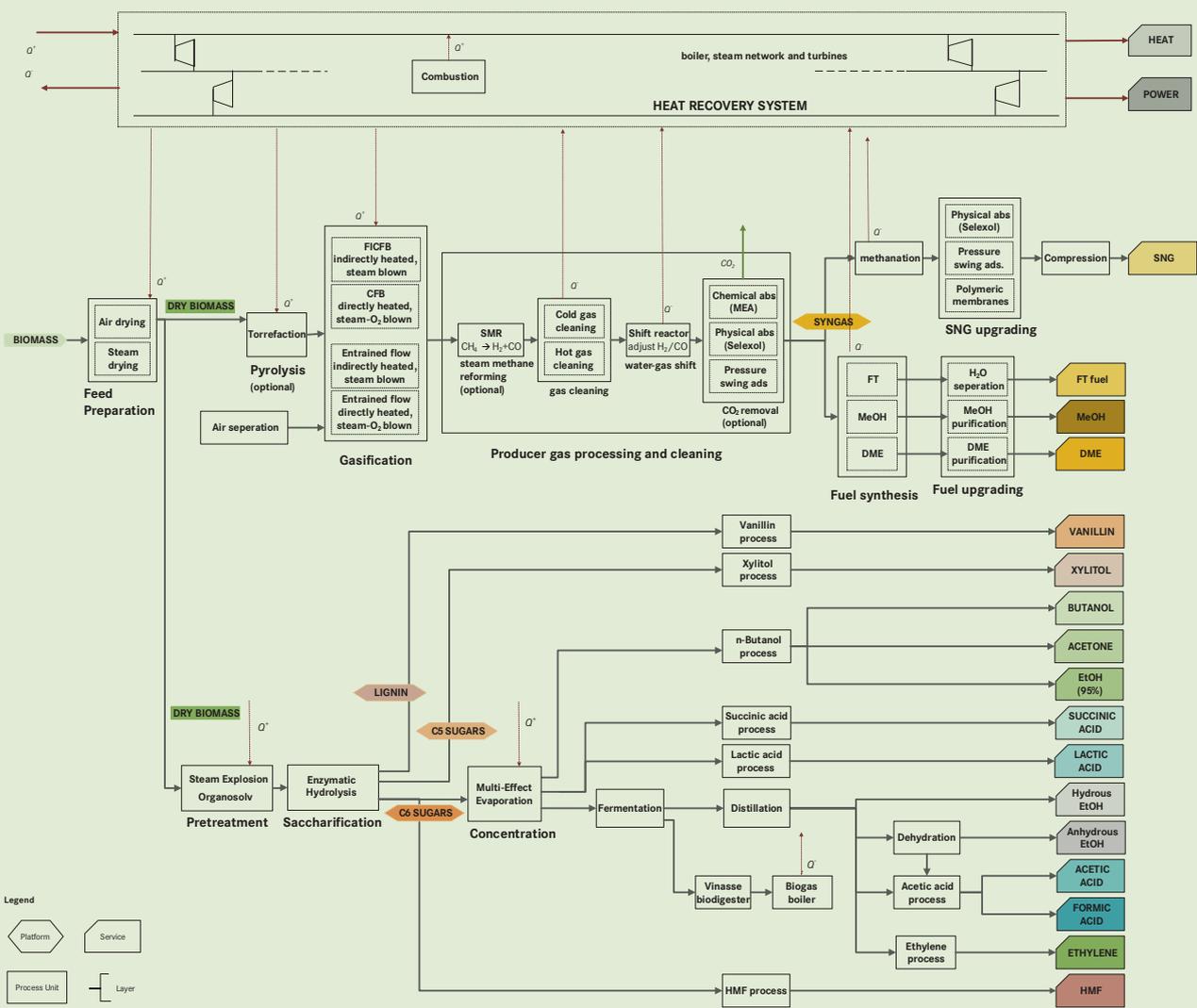
À l'heure actuelle, il est encore impossible de prévoir quels procédés pourront en fin de compte être mis en œuvre et combinés avec succès à l'échelle industrielle. Comme présenté dans les chapitres «La bioéconomie dans le contexte international» et «Situation en Suisse», il existe des installations de démonstration basées sur des procédés de transformation aussi bien biochimiques que thermochimiques au sein desquelles la capacité d'industrialisation de ces procédés est étudiée. Il est nécessaire de poursuivre les travaux de recherche et de développement relatifs à toutes les plates-formes afin de concevoir des bioraffineries qui soient à la fois bon marché et durables, car ce n'est que dans ces conditions que le bioraffinage pourra concurrencer les procédés usuels basés sur les énergies fossiles. Les questions encore en suspens concernent par exemple l'influence que la qualité des matières premières et leur disponibilité variable pourraient exercer sur le rendement des procédés.

Développement d'une plate-forme informatique pour l'évaluation des options de transformation du bois en produits chimiques – résultats du projet *Maréchal* (EPFL/EPFZ) du PNR66

Dans le cadre du projet «Wood2Chem» du PNR66, une plate-forme informatique d'aide à la décision pour la conception d'une bioraffinerie a été développée à l'EPFL sous la direction de François Maréchal. Celle-ci permet de concevoir des systèmes de bioraffinage et de prévoir les performances énergétiques, économiques et écologiques des procédés observés sur un site de production en mettant à profit leurs effets de synergie. «Wood2Chem» place les unités que constituent les technologies et les procédés de transformation du bois au sein d'une arborescence de niveau supérieur appelée superstructure (ill. 24). Les modèles thermodynamiques sur lesquels se fonde cette superstructure ont été développés en collaboration avec le groupe de Konrad Hungerbühler (EPFZ). Ces modèles permettent de modéliser l'ensemble des interactions possibles au sein du système en fonction des technologies retenues (Morales et al., 2016). L'illustration 24 montre comment est constituée une telle

superstructure en prenant l'exemple du couplage d'une plate-forme lignocellulosique et d'une plate-forme gaz de synthèse. Les logiciels utilisés sont conçus de manière modulaire, et des modèles de procédés actualisés, ou entièrement nouveaux, peuvent en permanence être intégrés à la banque de données sur laquelle ils sont basés.

La plate-forme informatique recourt à une méthode de calcul innovante qui se base sur une optimisation à objectifs multiples (Maronese et al., 2015) et qui permet de générer systématiquement les configurations possibles de la bioraffinerie et de classer les concepts correspondants en fonction d'indicateurs thermodynamiques (valorisation des ressources), économiques (coûts d'investissement et frais d'exploitation, valeur actuelle sur le marché et amortissement) et écologiques (émissions de gaz à effet de serre et consommation d'eau). Elle constitue par conséquent un outil d'aide à la décision très précieux pour l'élaboration de futurs concepts de bioraffinage comme le démontre l'étude de cas réalisée pour une bioraffinerie à base de bois suisse (voir encadré suivant).

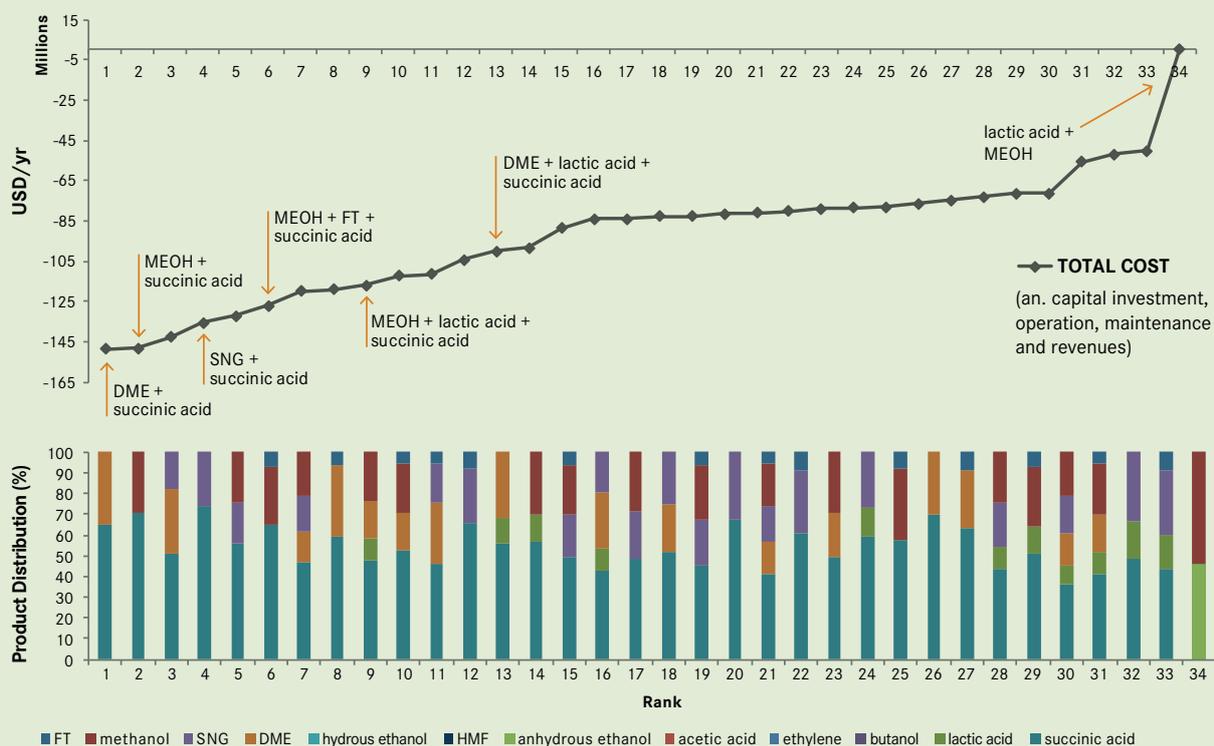


III. 24 Superstructure d'une bioraffinerie intégrée à deux plates-formes (lignocellulose et gaz de synthèse) – Maréchal, EPFL.

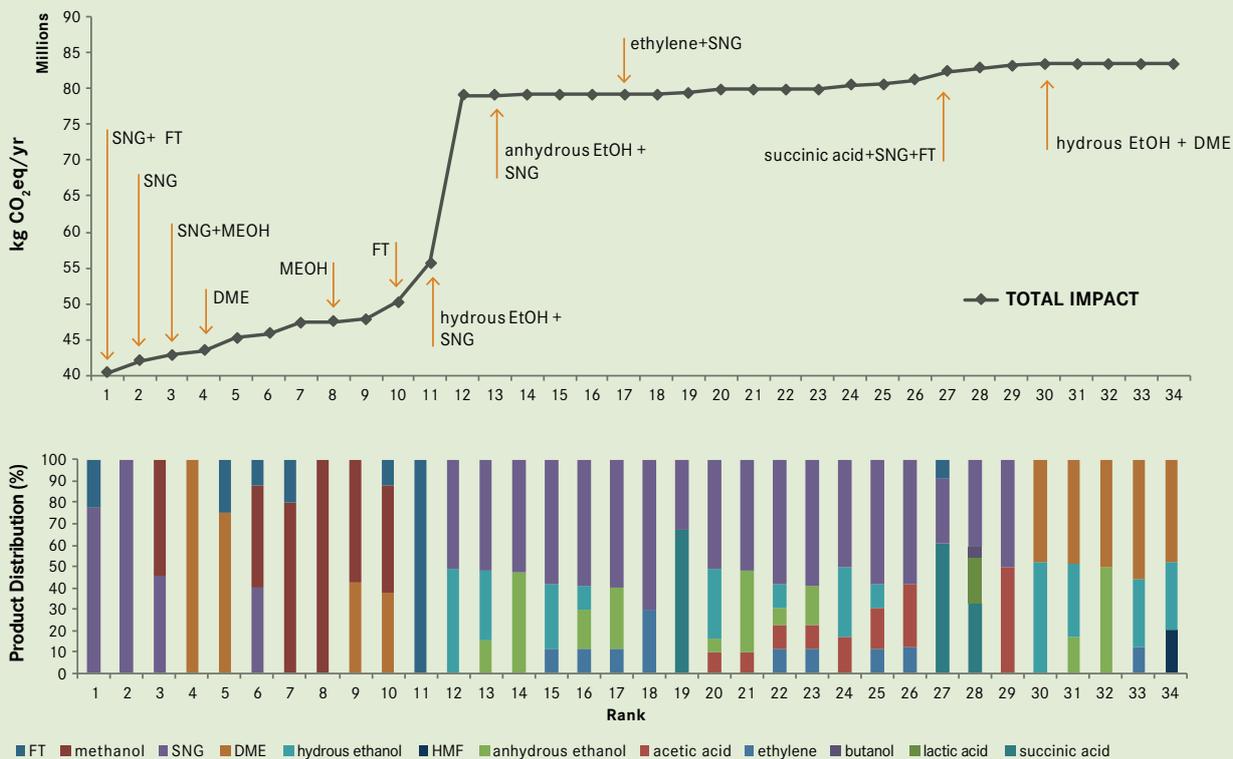
Étude de cas : comparaison de la production de différents produits dans une bioraffinerie à base de bois suisse en fonction de critères économiques et écologiques – résultats du projet *Maréchal* (EPFL/EPFZ) du PNR 66

Une étude de cas réalisée grâce à « Wood2Chem » évalue la production de différents produits dans une bioraffinerie hypothétique à base de bois suisse dans laquelle sont intégrées la plate-forme lignocellulosique et la plate-forme gaz de synthèse. Les premiers résultats indiquent que c'est une production combinée d'acide succinique par l'intermédiaire de la plate-forme lignocellulosique et de DME, méthanol ou GNS (gaz naturel synthétique) par l'intermédiaire de la plate-forme gaz de synthèse qui permet d'obtenir les meilleures performances économiques (ill. 25). En ce qui concerne la consommation d'eau douce, ce sont le bioéthanol et ses dérivés qui sont les moins

gourmands. À l'inverse, si l'on s'intéresse à une possible réduction des gaz à effet de serre, ce sont le GNS, le diesel Fischer-Tropsch, le méthanol et le diméthyléther qui occupent le haut du classement en raison du potentiel de substitution des énergies fossiles qu'ils représentent (ill. 26). Du fait de l'approche intégrée, les résidus de la plate-forme lignocellulosique sont utilisés comme matières premières pour la plate-forme gaz de synthèse tandis que la chaleur résiduelle de celle-ci sert à couvrir les besoins thermiques de la plate-forme lignocellulosique. Ces solutions maximisent la quantité de carbone biogène contenu dans les produits. Les coûts de production peuvent ainsi être réduits grâce à la vente de biocarburant ou à la cogénération d'électricité. Non contentes d'être les plus rentables, ces solutions sont aussi les plus favorables au climat.



III. 25 Optimisation du spectre de produits d'une bioraffinerie intégrée à deux plates-formes (lignocellulose et gaz de synthèse) en fonction de critères économiques à l'aide de Wood2Chem – *Maréchal*, EPFL.



III. 26 Optimisation du spectre de produits d'une bioraffinerie intégrée à deux plates-formes (lignocellulose et gaz de synthèse) en fonction de critères écologiques à l'aide de Wood2Chem – Maréchal, EPFL.

Étude de cas : comparaison de l'efficacité des ressources de divers produits à base de bois – résultats du projet Maréchal (EPFL) du PNR66

La raréfaction croissante de la ressource bois et l'intensification du changement climatique entraînent les questions suivantes: quelles procédures de transformation faut-il favoriser dans le but d'obtenir un meilleur rendement global? Plus spécifiquement, est-il préférable de brûler le bois en tirant parti de son rendement ou de l'utiliser comme matière première dans une bioraffinerie?

L'utilisation de produits chimiques et de carburants et combustibles biogènes permet de boucler le cycle du carbone, ce qui constitue un grand avantage : il est ainsi possible d'éviter les émissions de carbone fossile. Lors de sa croissance, la plante assimile du CO₂ issu de l'atmosphère; les chercheurs peuvent donc mesurer le « rendement » d'une procédure de transformation en analysant les émissions évitées de CO₂ fossile par rapport au CO₂ assimilé à partir de l'atmosphère par le biais de la photosynthèse. En tenant compte des données relatives au cycle de vie (que l'on appelle également « inventaire du cycle de vie »), il est possible de calculer les émis-

sions de carbone fossile remplacées par unité de carbone dans le produit biogène (cf. tableau 2). Les produits biologiques ont un taux de substitution tendanciellement plus élevé que les sources de bioénergie.

Tab. 2 Émissions évitées de CO₂ fossile par unité de carbone dans le produit biogène (Wernet et al., 2016).

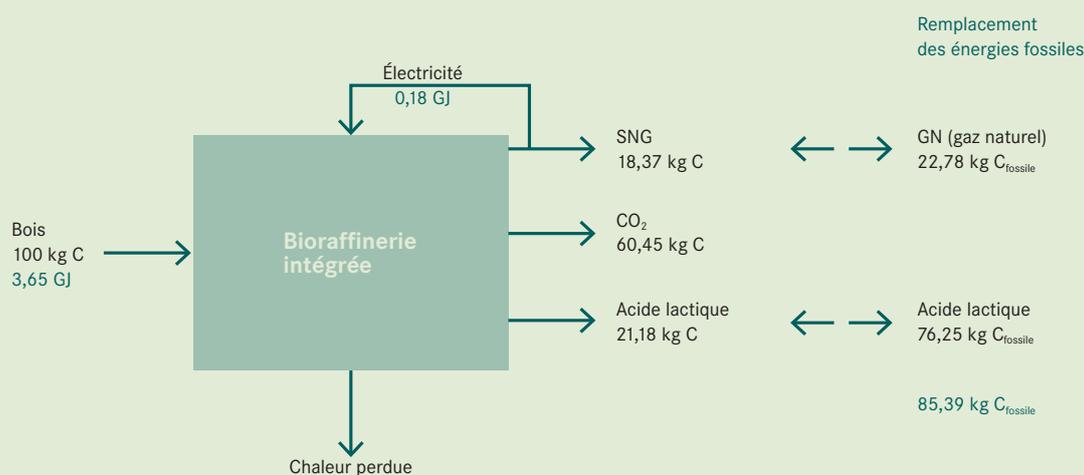
	$C_{\text{fossile évité}} / C_{\text{biogène}}$
Produits biochimiques	
Butanol	1,89
Acétone	1,98
Acide succinique	2,30
Acide lactique	3,60
Éthylène	1,45
HMF	1,40
Acide acétique	2,27
Acide formique	2,30
Biocarburants	
SNG	1,24
DME	1,21
FT	1,20
Éthanol anhydre	1,37
Éthanol (95%)	1,35
Méthanol	1,54

La biomasse totale ne pouvant pas toujours être transformée dans le produit considéré, le rendement de l'utilisation en carbone doit cependant

être pris en considération pour une comparaison juste de l'efficacité des ressources des différentes procédures de transformation. Prenons comme exemple une bioraffinerie qui, parallèlement à la production biochimique d'acide lactique à partir des matières résiduelles, produit également du gaz de synthèse par voie thermochimique (ill. 27). La chaleur émise lors de la gazéification ainsi qu'une partie du gaz produit sont utilisées pour couvrir les besoins en chaleur et en électricité du modèle de bioraffinerie. Le carbone fossile remplacé peut ainsi être additionné. Dans le modèle de bioraffinerie, il est ainsi possible d'obtenir 0,99 unité de carbone fossile remplacé par unité de carbone biogène. Ce bilan est comparable à celui de la combustion du bois pour la production de chaleur. Supposons qu'une chaudière à bois (rendement de 85%) remplace une chaudière fonctionnant au gaz naturel (rendement de 90%), il en résulte 0,65 unité de carbone fossile remplacé par unité de carbone biogène. Basé sur le CO₂ assimilé durant la photosynthèse, le modèle de bioraffinerie adopté remplace donc 52% de carbone fossile de plus que la combustion correspondante.

Dans le cadre d'une extension du modèle, on suppose en outre que le gaz de synthèse fabriqué par la bioraffinerie est transformé en électricité et en chaleur dans une centrale de cogénération (rendement de 60%). L'électricité est utilisée par le biais d'une pompe à chaleur (coefficient de performance de 4) de manière à délivrer de la chaleur pour le logement dans le but de remplacer le brûleur à gaz fossile mentionné ci-dessus. Dans ce cas, il est possible de remplacer 0,38 unité de carbone fossile en plus grâce à l'unité de carbone biogène mise en œuvre dans la bioraffinerie comme matière première. Au total, le bois utilisé dans cette bioraffinerie remplacerait ainsi 2,1 fois plus de CO₂ fossile que le bois utilisé dans une chaudière.

Bien que le facteur cumulé de substitution dépende fortement des produits principaux et des sous-produits sélectionnés ainsi que des procédures de transformation appliquées, ces calculs révèlent clairement que l'approche des bioraffineries intégrées, où le bois est utilisé pour la production de produits biologiques et de biocarburants, est préférable à la seule combustion délivrant de la chaleur à des fins de chauffage.



III. 27 Étude de cas relative à l'acide lactique intégré et à la production de gaz de synthèse (adapté à partir de Celebi et al., 2017).

LA BIOÉCONOMIE DANS LE CONTEXTE INTERNATIONAL

A l'étranger, l'établissement d'une bioéconomie, et donc des bioraffineries, suit des rythmes assez différents. Les instruments politiques dépendent du contexte mais sont souvent liés à l'existence d'une stratégie bioéconomique.

Stratégies internationales de développement d'une bioéconomie

Contrairement à une économie basée sur le pétrole, une bioéconomie est un système économique qui repose sur la création et l'utilisation de ressources biogènes. La nécessité et les avantages d'une bioéconomie sont reconnus à l'échelle internationale, tant au niveau économique que sociétal. Ils se reflètent également dans la formulation des stratégies de développement correspondantes actuellement poursuivies dans 45 pays, dont tous les États du G7. Une compilation et une comparaison de ces stratégies ont été publiées en 2015 par le Haut conseil allemand à la bioéconomie (German Bioeconomy Council, 2015a, 2015b).

Adoptant une approche descendante, des pays comme les États-Unis, l'Allemagne, la Finlande, la Suède et le Japon ont formulé des stratégies bioéconomiques exhaustives aux objectifs ambitieux qui sont coordonnées par leurs gouvernements respectifs. Au niveau international, l'Allemagne occupe une position de leader dans ce domaine. Elle est en effet l'un des premiers pays à avoir publié fin 2010 une stratégie nationale de recherche sur la bioéconomie d'ici à 2030 (Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030) (Ministère allemand de la Formation et de la Recherche, 2010). En 2013, le gouvernement allemand a subséquemment adopté une stratégie politique nationale pour la bioéconomie

(Nationale Politikstrategie Bioökonomie) (Ministère allemand de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Protection des Consommateurs, 2014). Pour l'élaboration de cette stratégie de recherche comme de sa stratégie politique, le gouvernement allemand a été conseillé par le Haut conseil à la bioéconomie. Constitué en 2009, cet organe se compose d'experts scientifiques et économiques issus de différentes disciplines. Il élabore des recommandations relatives au développement de futurs axes de recherche et s'engage dans un dialogue avec tous les groupes de la société civile (www.Biooekonomie.de, www.biooekonomierat.de).

D'autres pays comme la France, la Grande-Bretagne, l'Italie et le Canada misent à l'inverse sur une approche ascendante, et par voie de conséquence sur les initiatives de l'industrie privée, et limitent donc leur action à l'instauration de conditions-cadres favorables. La bioéconomie est ainsi soutenue à travers l'encouragement de la recherche ou l'adoption de mesures réglementaires au niveau des consommateurs, comme l'adjonction obligatoire de biocarburant.

De manière générale, les objectifs politiques poursuivis et les mesures adoptées varient fortement d'un pays à l'autre, entre autres du fait qu'ils se différencient fortement quant à leur état d'industrialisation et aux ressources dont ils disposent. Des priorités différentes sont par conséquent fixées

dans les domaines politiques concernés que sont l'énergie, la recherche, la formation, le transfert de technologies et la commercialisation. À travers le développement d'une bioéconomie, les pays disposant de ressources abondantes comme les États-Unis et le Canada visent à renforcer les secteurs traditionnellement importants de la sylviculture et de l'agriculture et soutiennent ainsi le développement rural et l'indépendance vis-à-vis des importations de pétrole. Les pays hautement industrialisés et pauvres en matières premières comme l'Allemagne ou le Japon considèrent à l'inverse la bioéconomie comme une opportunité en termes d'innovation et de renaissance industrielle, la bioéconomie étant par ailleurs aussi fortement encouragée par la Commission européenne.

La réduction des gaz à effet de serre, la transition vers une base de ressources fondée sur les matières premières renouvelables, la préservation des prestations écosystémiques, un renforcement de la force d'innovation et la création d'emplois comptent parmi les objectifs communs des différentes stratégies. Il est pour l'heure difficile de déterminer quelles seront au final les approches et les stratégies couronnées de succès. Récemment achevé, le projet «S2Biom» initié par l'Union européenne visait cependant à identifier d'ores et déjà les modèles politiques européens particulièrement prometteurs. Dans le cadre de celui-ci, une banque de données regroupant les mesures politiques adoptées par les pays européens a ainsi été constituée afin d'identifier au moyen de différents indicateurs celles qui portaient leurs fruits le long de la chaîne de création de valeur. Il apparaît que les installations de cogénération basées sur les matières premières renouvelables sont encouragées de manière exemplaire en Allemagne, en Autriche et en Grande-Bretagne et que les biocarburants bénéficient d'un soutien similaire au Danemark, en Grande-Bretagne et en Finlande. L'identification de bonnes pratiques dignes d'être imitées a été facilitée par le regroupement des pays ou régions présentant des conditions similaires et pour lesquels l'adoption de mesures similaires fait sens (Van Dael et al., 2014).

Encouragement de la recherche relatif aux bioraffineries

Au niveau international, l'encouragement de projets de recherche et de développement dans le domaine du bioraffinage est doté depuis environ dix ans de fonds conséquents.

À l'échelle mondiale, les États-Unis occupent la tête du peloton depuis que le Président George W.

Bush a exigé en 2006 dans un discours sur l'état de la nation que l'utilisation d'éthanol de cellulose soit renforcée. Depuis lors, plusieurs centaines de millions de dollars issus des fonds publics sont venus alimenter la recherche, le développement et la démonstration de concepts de bioraffinage. Le Ministère de l'Énergie américain soutient entre autres trois grands «Bioenergy Research Centers» sur une durée de dix ans et il a créé un programme de garantie de crédit pour lequel les exploitants de bioraffineries peuvent postuler lorsqu'ils souhaitent démontrer que des technologies de bioraffinage qui ne sont pas encore établies sont adaptées à une utilisation industrielle.

Au cours de la dernière décennie, l'encouragement des projets de bioraffinage a également gagné en importance au sein de l'UE. Dans le cadre du 7^e Programme cadre (2007-2013), les projets de bioraffinage ont par exemple été encouragés à hauteur de 70 millions d'euros au total. Le programme Horizon 2020 a pris la relève et accorde également une haute priorité à la bioéconomie et aux bioraffineries. De nombreux programmes de recherche sont actuellement opérationnels, comme le programme européen ERIFORE prévu sur deux ans et destiné à permettre une mise en réseau des différents projets de recherche. À l'heure actuelle, plus d'une centaine d'universités européennes travaillent à des projets consacrés à la disponibilité et à la mise à disposition de la biomasse bois. À l'échelle du continent, 103 projets de recherche et de développement s'intéressent au prétraitement du bois. La plupart d'entre eux sont, comme l'on pouvait s'y attendre, implantés dans des pays riches en forêts comme la Norvège, l'Allemagne, la France, l'Autriche et l'Espagne.

Les stratégies d'encouragement régionales des États membres viennent par ailleurs compléter les programmes européens. L'Allemagne se révèle très active à ce titre: le gouvernement fédéral a mis à disposition depuis 2010 des fonds d'un montant total de 2,4 milliards d'euros sur une durée de six ans dans le cadre de sa stratégie nationale de recherche sur la bioéconomie d'ici à 2030. Le Biocampus de Straubing constitue un exemple de pôle de recherche au sein duquel l'utilisation et la commercialisation des matières premières renouvelables sont étudiées et enseignées.

Commercialisation de concepts de bioraffinage

Au cours des dernières années, des technologies de transformation de la lignocellulose ont

été développées jusqu'aux niveaux de maturité technologiques 7 à 9, ce qui signifie qu'elles sont opérationnelles à l'échelle industrielle. Parmi ces installations, on trouve aussi bien des exemples de plates-formes thermochimiques (tableau 3) que

des exemples de plates-formes lignocellulosiques (tableau 4). La première installation (Ineos Bio) n'a vu le jour qu'en 2013 aux États-Unis, ce qui montre combien ce marché est encore jeune.

Tab. 3 Transformation industrielle de la lignocellulose basée sur des plates-formes thermochimiques (selon Brown, 2015).

Société	Matière première	Technologie	Capacité (mio l /an)	Coûts (en millions de dollars US)
Ineos Bio (États-Unis)	Bois, déchets organiques	Gazéification, fermentation en éthanol	30	130
Enerkem (Canada)	Déchets ménagers	Gazéification, synthèse de méthanol et d'éthanol	38	75
Lanzatech (États-Unis)	Bois, miscanthus	Gazéification, fermentation en éthanol	38	Aucunes données
Cool Planet (États-Unis)	Pin jaune	Pyrolyse catalytique	38	56
Fulcum Sierra Biofuels (États-Unis)	Déchets ménagers	Gazéification, synthèse d'éthanol	42	266
GoBiGas	Bois	Gazéification, méthanisation	15 mio Nm ³ /an	222

Tab. 4 Transformation industrielle de la lignocellulose basée sur des plates-formes lignocellulosiques biotechnologiques (selon Brown, 2015).

Société	Matière première	Technologie	Capacité (mio l /an)	Coûts (en millions de dollars US)
Beta Renewables (Italie)	Paille de blé, bois	Prétraitement à la vapeur, hydrolyse enzymatique, fermentation en éthanol	76	150
Abengoa Bioenergy (États-Unis)	Paille de maïs, paille de blé	Prétraitement à la vapeur avec ajout d'acide, hydrolyse enzymatique, fermentation en éthanol	95	231
Poet DSM (États-Unis)	Paille de maïs, rafles de maïs	Prétraitement à la vapeur en deux étapes, hydrolyse enzymatique, fermentation en éthanol	76	250
GranBio (Brésil)	Bagasse	Prétraitement à la vapeur, hydrolyse enzymatique, fermentation en éthanol	83	195
DuPont Danisco (États-Unis)	Paille de maïs	Prétraitement à l'ammoniac, hydrolyse enzymatique, fermentation en éthanol	95	276

Si les données de base relatives aux installations de démonstration sont bien connues, en revanche on dispose de peu d'information sur leur fonctionnement et les difficultés rencontrées. Les données précises relèvent en effet du secret de fabrication et ne sont pas destinées à être rendues publiques. Brian Foody, PDG de Iogen Corporation, une société pionnière dans la production d'éthanol de cellulose à partir de paille, a néanmoins laissé entendre lors d'une conférence donnée aux États-Unis que la phase de démarrage de la plupart des installations de production s'avérait plus difficile que prévu. Pour confirmer cette information, il a comparé les volumes d'éthanol de cellulose déclarés auprès des services environnementaux à l'aide du Numéro d'identification des énergies renouvelables (RIN) avec la capacité totale théorique des installations américaines. Fin 2015, l'analyse mensuelle des volumes d'éthanol de cellulose enregistrés révélait qu'ils représentaient au plus 10% de la valeur théorique maximale, un chiffre qui laisse présumer que l'exploitation des installations pose des problèmes substantiels. À l'heure actuelle, Iogen produit elle-même de l'éthanol à partir de bagasse de canne à sucre au Brésil et elle a, selon ses propres indications, obtenu un taux d'utilisation de plus de 80% dix mois après le démarrage d'une installation dotée d'une technologie dite de « 8^e génération ».

La fermeture actuellement rendue publique de quelques installations de production de biocarburant de la deuxième génération comme Kior (Columbus, Michigan, États-Unis; pyrolyse catalytique), Ineos Bio (Vero Beach, Floride, États-Unis; gazéification thermochimique et fermentation en éthanol) et Abengoa (Hugoton, Kansas, États-Unis; éthanol biotechnologique via une plate-forme lignocellulosique) met également en exergue combien la transposition à l'échelle commerciale de projets qui fonctionnent au niveau R & D est exigeante. Si ces exemples ne remettent aucunement en cause les technologies en tant que telles, ils font néanmoins apparaître que de nombreux travaux de recherche et de développement doivent encore être menés à bien. Il convient cependant de remarquer que les projets aux USA ont soufferts d'une forte concurrence venant de l'exploitation des gaz de schiste.

Outre les installations précitées, qui produisent principalement de l'éthanol lignocellulosique, il existe également des projets où des produits chimiques et des carburants sont produits à partir de matières premières oléagineuses ou amyliques. Une banque de données exhaustive peut être consultée à ce sujet à l'adresse <http://demoplants.bioenergy2020.eu/> (en anglais).

Globalement, la production commerciale de produits chimiques à partir de matières premières renouvelables s'est développée plus lentement qu'espéré par les milieux politiques, et le transfert des résultats de la recherche à l'industrie s'avère souvent difficile. Lors d'une enquête réalisée par l'European Joint Research Center, des entreprises de ce secteur ont indiqué que l'augmentation de la production de produits chimiques biosourcés se heurtait aux obstacles suivants :

- La disponibilité de la matière première à des prix concurrentiels est entachée d'incertitudes.
- Le financement octroyé aux projets de recherche, de développement et de transposition à grande échelle est limité.
- Le financement des entreprises dérivées et des start-up est limité.

La compétitivité, la profitabilité et les performances écologiques ont été citées comme moteurs de la recherche et de la production de produits biosourcés (Natrass et al., 2016).

Conclusion

Il est mondialement reconnu que la transition vers une bioéconomie offre des chances très favorables de réduire les émissions de gaz à effet de serre, de préserver les prestations écosystémiques, de stimuler l'innovation et de renforcer l'économie. Tous les États du G7 et 35 autres pays ont par conséquent développé des stratégies dans le monde entier afin d'encourager la transition vers une bioéconomie. L'encouragement des projets de recherche et de développement dans le domaine du bioraffinage, qui représente une part importante d'une bioéconomie, est doté depuis environ dix ans de fonds conséquents. Transposer avec succès les résultats de la recherche dans des applications commercialisables constitue néanmoins un défi ambitieux. Dans ce domaine, il existe encore un fort potentiel d'amélioration. Des processus de transformation thermochimiques et biochimiques sont actuellement mis en œuvre à l'échelle industrielle dans le cadre de projets de démonstration. Les faibles rendements obtenus laissent néanmoins présumer de difficultés techniques qui ne pouvaient se matérialiser qu'à une telle échelle.

En ce sens, les futures stratégies bioéconomiques devraient intégrer suffisamment de mesures destinées à encourager et à soutenir efficacement le transfert de technologie afin de surmonter l'obstacle de l'installation pionnière dans son genre, sans pour autant privilégier une technologie en particulier.

SITUATION EN SUISSE

Diverses stratégies politiques enjoignent la Suisse à promouvoir un développement durable, à se libérer de la dépendance vis-à-vis du pétrole et à mieux valoriser le bois. Toutefois, une véritable stratégie bioéconomique fait encore défaut.

Axes prioritaires de la politique énergétique, environnementale et économique de la Suisse

La politique suisse s'attache depuis longtemps déjà à développer des stratégies et des mesures appropriées afin de relever les défis sociétaux actuels que posent la sortie de la production énergétique basée sur les ressources fossiles limitées, la nécessité d'endiguer le réchauffement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et la sécurité alimentaire. Les visions et stratégies de la Suisse quant à l'utilisation optimale de la ressource bois ainsi que les principes et objectifs valables à l'heure actuelle pour l'utilisation de la biomasse sont présentés ci-après.

Stratégies pour une politique climatique, énergétique et économique durable

En Suisse, l'obligation de mettre en œuvre une politique de développement durable est ancrée dans la constitution fédérale (article 2, Confédération suisse, 1999). L'«Agenda 2030 pour le développement durable» de l'ONU représente en ce sens un important cadre d'orientation (ONU, 2015). Trois des 17 «Objectifs de développement durable» (ODD) formulés au total concernent la politique énergétique, climatique et économique :

ODD 7: Garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable

ODD 12: Établir des modes de consommation et de production durables

ODD 13: Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions

Dans ce contexte, une vision dotée d'une perspective à long terme a été formulée pour différents domaines d'action. Celle-ci représente un idéal à atteindre. Si elle n'intègre pas d'horizon temporel défini, elle n'en constitue pas moins une base essentielle pour la mise en œuvre d'une politique cohérente.

Vision à long terme – consommation et production

«L'État et les entreprises appliquent systématiquement le principe de précaution et celui du pollueur-payeur en Suisse et à l'étranger. Lors de la production et de la fourniture de services, les entreprises assument leur responsabilité sociétale dans le monde entier; elles respectent en particulier les droits de l'homme et les standards sociaux. Elles limitent l'impact sur l'environnement le long de toutes les chaînes de création de valeur et préservent les ressources naturelles.

L'approvisionnement de base en biens et services vitaux est assuré à long terme pour toute la population. Les biens de consommation et de production sont fabriqués selon le principe d'utilisation efficace des ressources et celui d'innocuité, dans le respect de la société et de l'environnement. Les biens durables consomment peu et ont une longue durée de vie, ils sont conçus et fabriqués pour être facilement réparables et bien recyclables. Les biens sont utilisés avec modération et recyclés après consommation lorsque cela est judicieux. Leurs caractéristiques et leurs effets externes le long des chaînes de création de valeur et sur l'ensemble de leur cycle de vie sont décrits de manière transparente.» (Conseil fédéral, 2016 : Stratégie pour le développement durable 2016–2019)

Vision à long terme – énergie et climat

« Le besoin en énergie est couvert à partir de sources renouvelables sûres qui n'émettent pas de gaz à effet de serre nuisible au climat. Un système international efficace et stable de production, de stockage et de distribution d'énergies renouvelables garantit une sécurité d'approvisionnement élevée. Le potentiel indigène économiquement utilisable de production d'électricité et de chaleur à partir d'énergies renouvelables est exploité après une évaluation systématique et transparente des intérêts en présence dans le respect de la diversité biologique et paysagère. Le besoin en énergie primaire se stabilise à 2000 watts par personne.

Les émissions de gaz à effet de serre sont réduites de manière à ce que la Suisse contribue pour sa part à l'objectif de limiter le réchauffement climatique mondial à moins de 2 °C par rapport aux valeurs préindustrielles. La société, l'économie et les écosystèmes sont capables de s'adapter aux changements climatiques et de se protéger contre les dangers naturels : ils présentent une capacité de résilience et une flexibilité suffisantes pour faire face à l'évolution des conditions de vie et d'environnement. » (Conseil fédéral, 2016 : Stratégie pour le développement durable 2016–2019)

Stratégies du Conseil fédéral

La Confédération a élaboré différentes stratégies et plans directeurs afin de faciliter la transition vers une économie durable. En voici un aperçu :

- **Le Masterplan Cleantech – une stratégie de la Confédération en matière d'efficacité des ressources et d'énergies renouvelables (DFE et OFEV, 2011).** Son objectif est de positionner de manière optimale l'économie suisse sur le marché global en pleine expansion des technologies, produits et prestations qui permettent une utilisation efficace des ressources à l'horizon 2020. La Suisse doit par conséquent occuper une position de leader dans la recherche comme dans la production liées aux Cleantech, ce secteur étant perçu comme exemplaire au regard de la qualité suisse. La Stratégie Cleantech de la Confédération a pour vocation de regrouper les connaissances issues des domaines scientifiques, économiques, administratifs et politiques afin de créer un instrument politique de niveau supérieur dans le but de coordonner les différentes activités des pouvoirs publics.
- **Le plan d'action Economie verte (OFEV, 2013b, 2016).** Celui-ci encourage « une économie et un

mode de consommation qui tiennent compte de la rareté des ressources non renouvelables et de la capacité de régénération des ressources renouvelables, qui améliorent l'efficacité dans l'utilisation de ces ressources et qui augmentent ainsi la performance économique tout en accroissant le bien-être général. Au total, 27 mesures pouvant être classées dans les trois domaines « Consommation et production », « Déchets et matières premières », « Instruments transversaux » ont été définies.

- **La Stratégie énergétique 2050.** Elle prévoit une restructuration progressive de l'approvisionnement énergétique de la Suisse. Les trois axes prioritaires du premier paquet de mesures adopté par le Parlement sont l'amélioration de l'efficacité énergétique, la promotion des énergies renouvelables et la sortie du nucléaire.
- **La Politique forestière 2020 (OFEV, 2013a).** L'objectif principal de l'orientation stratégique de la Politique forestière 2020 est de coordonner de manière optimale les exigences écologiques, économiques et sociétales posées aux forêts afin de permettre une exploitation forestière durable. L'instauration de conditions-cadres favorables doit par ailleurs permettre une gestion efficace et novatrice des forêts et de l'industrie du bois.

Utilisation du bois et de la biomasse : principes et buts

Développés individuellement ou collectivement par l'OFEN, l'OFAG, l'ARE et l'OFEV, les instruments politiques « **Stratégie de gestion de la biomasse** » (OFEN et al., 2009), « **Stratégie énergétique suisse en matière de biomasse** » (OFEN, 2010), « **Politique de la ressource bois** » et l'instrument de mise en œuvre « **Plan d'action bois** » (OFEV et al., 2014) reflètent les principes valables du point de vue des offices fédéraux pour garantir une utilisation optimale du bois et de la biomasse et formulent des buts afin de renforcer l'utilisation de ces ressources. Il s'agit par conséquent de produire, de transformer et d'utiliser la biomasse et le bois de manière optimale selon les trois axes de la durabilité (écologie, économie, société). Les buts suivants constituent par ailleurs le dénominateur commun de ces instruments :

- Le potentiel énergétique de la biomasse indigène durable est exploité entièrement et si possible sur le sol suisse.
- L'utilisation en cascade (la réutilisation d'une ressource le long d'une chaîne de valeur décrois-

sante) de la biomasse génère une valeur ajoutée élevée et permet une haute efficacité des ressources (le rapport entre la création de valeur et l'utilisation des ressources nécessaires à sa production) (OFEV et al., 2014).

- La biomasse est utilisée selon un principe circulaire.
- L'utilisation durable de la biomasse réduit les émissions de gaz à effet de serre et atténue les effets du changement climatique.

En matière de bioraffinage du bois, il est important que la Suisse s'attache à valoriser davantage le bois de feuillus. En pleine expansion du fait de la gestion naturelle des forêts poursuivie par la politique forestière, les peuplements de feuillus connaissent une évolution opposée aux possibilités de vente et d'utilisation, en particulier en ce qui concerne le bois de hêtre. À côté des utilisations traditionnelles en tant que matériau et combustible, une valorisation chimique de ces essences doit par conséquent aussi être explicitement envisagée (OFEV et al., 2014). Il est donc nécessaire que des mesures correspondantes soient adoptées afin d'encourager la recherche, le développement et l'innovation. Le PNR66 a apporté sa contribution à ces efforts.

Environnement économique de la Suisse

La Suisse est l'un des pays les plus prospères d'Europe et elle est dotée d'une économie florissante. La stabilité politique, l'orientation libérale de la Constitution et des lois, la paix du travail et une culture sociétale fondée sur la fiabilité comptent parmi les facteurs traditionnels qui expliquent le succès qu'elle rencontre jusqu'à aujourd'hui.

L'économie suisse est fortement liée à l'étranger, et la quote-part du commerce extérieur (somme des exportations et des importations de biens et de services) a continuellement progressé au cours des dernières années. À l'heure actuelle, les produits chimiques et pharmaceutiques constituent à ce titre le groupe de marchandises le plus important, car ils représentent près d'un tiers du commerce extérieur suisse. La part élevée des exportations reflète la vitalité de la place économique suisse pour ces industries. De manière générale, l'industrie à l'exportation s'oriente de plus en plus vers des produits à fort coefficient de savoir et à valeur ajoutée élevée ou occupe des créneaux spécifiques (Dümmler et Kienast, 2016). La Suisse se distingue donc par une force d'innovation exceptionnellement élevée comme le confirment les places de choix qu'elle occupe régulièrement dans différents classements (DFE et DETEC, 2011).

La recherche et le développement de nouvelles technologies afin de transformer le bois et la biomasse représentent par conséquent une chance pour l'économie suisse dans la mesure où elle pourra ainsi asseoir sa position de leader technologique sur les marchés encore relativement jeunes des Cleantech.

Encouragement de la recherche

En Suisse, l'encouragement de projets – de la recherche fondamentale au développement d'installations pilotes et de démonstrations – est réparti entre plusieurs bailleurs de fonds.

Le Fonds national suisse (FNS) a introduit une série d'instruments pour financer la recherche spécifique à la transition énergétique. Après le PNR 66, le FNS a lancé le PNR 70 «Virage énergétique» qui encourage la recherche fondamentale orientée vers l'application relative à la transition énergétique en général à hauteur de 37 millions de francs et qui est opérationnel depuis 2015. Le FNS a également mis en place deux programmes spécifiques dans le domaine énergétique afin d'encourager des spécialistes: «Ambizione Energy» et «Assistant Professor Energy».

Dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050, la Commission pour la technologie et l'innovation (CTI) a lancé le Biomass for Swiss Energy Future (BIOSWEET) qui constitue l'un des huit «Swiss Competence Centers for Energy Research» (SC-CER). Il permet le développement de compétences dans le domaine de la valorisation énergétique de la biomasse et a pour vocation de jeter un pont entre la recherche universitaire et l'industrie. La première phase de BIOSWEET couvrait la période 2014–2017 et était dotée de 7,9 millions de francs, la deuxième phase s'étend de 2017 à 2020 et est encouragée à hauteur de 11,6 millions de francs. De 2013 à 2016, la CTI avait par ailleurs mis à disposition des fonds supplémentaires d'un montant de 46 millions de francs afin d'encourager l'innovation.

Les projets pilotes et de démonstration sont encouragés par l'OFEV dans le domaine des technologies environnementales et par l'OFEN dans le secteur énergétique. En outre, l'OFEN soutient des projets phares dans le but de renforcer le rayonnement des innovations Cleantech suisses au-delà des frontières nationales. Les investissements prévus à ce titre par l'OFEN s'élèvent à près de 35 millions de francs par an pour la période 2015–2020.

La Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE) formule des recommandations

thématiques pour une utilisation adaptée des financements octroyés à la recherche dans le Plan directeur de la recherche énergétique qui est mis à jour tous les quatre ans par la Confédération. Dans le domaine «Systèmes énergétiques» de demain, le concept 2017–2020 actuel (DETEC, 2016) comprend également des thèmes de recherche relatifs à la valorisation énergétique de la biomasse. Les thèmes proposés concernent entre autres le développement de technologies de fermentation afin de produire directement des biocombustibles ou d'augmenter le rendement en gaz naturel synthétique, l'amélioration des technologies de gazéification de la biomasse humide et sèche, l'optimisation de la production d'électricité à partir de biomasse ou des procédés de combustion échelonnés afin de réduire les émissions.

Installations pilotes et de démonstration

Il n'existe pas encore, ou plus, d'installations de démonstration ou de bioraffineries commerciales en Suisse et aucune ne devrait voir le jour dans un avenir proche. Il est cependant à noter que la société suisse Clariant possède et exploite en Allemagne une installation pilote destinée à transformer de la paille en bioéthanol depuis qu'elle a procédé au rachat de l'entreprise Südchemie. Grâce à un procédé baptisé «SunLiquid», près de 4500 tonnes de paille sont transformées chaque année en bioéthanol dans la ville bavaroise de Straubing. La technologie employée correspond dans les grandes lignes à la voie de transformation représentée sur l'illustration 3 (voir plate-forme lignocellulosique). Celle-ci décrit le prétraitement de la biomasse, l'hydrolyse enzymatique et la fermentation des sucres en C5 et C6 en éthanol.

À Muttenz, la société AVA Biochem exploite une installation pilote de bioraffinage qui produit depuis 2012 du 5-HMF à partir de sucre. L'installation pourrait théoriquement également produire du 5-HMF directement à partir de bois de hêtre, mais le rendement correspondant est encore trop faible.

À Mont-la-Ville dans le canton de Vaud, la gazéification du bois et sa méthanisation consécutive font l'objet du projet Lignogaz. La société CTU AG réalise en effet une étude de faisabilité portant sur une installation qui atteindrait à pleine charge une production annuelle de 2,7 MW de GNS. Près de 12500 tonnes de bois par an seraient nécessaires à cette production (CTU Clean Technology Universe AG, 2014).

À l'inverse, des projets de production combinée de chaleur et d'électricité de plus petite taille à partir de la plate-forme gaz de synthèse sont déjà disponibles. À Escholzmatt, la société Josef Bucher AG consomme 15 m³ de copeaux de bois par jour pour produire 135 kW d'électricité et 240 kW de chaleur et valorise les produits secondaires (charbon de bois et goudron) comme additifs pour la production de terreau (Terra Preta) ou comme matières premières pour l'industrie cosmétique.

Conclusion et évaluation

Comme le confirment les visions et stratégies mentionnées plus haut, la politique suisse s'est fixé des objectifs ambitieux pour le développement durable de la société et de l'économie. En tant que l'un des pays les plus prospères d'Europe doté d'une économie florissante et d'une force d'innovation exceptionnellement élevée, la Suisse a de fortes chances d'atteindre ces objectifs si les mesures correspondantes continuent d'être développées.

Jusqu'à présent, les possibilités offertes par une bioéconomie – c'est-à-dire une économie basée sur les ressources renouvelables – n'ont pas reçu l'attention qu'elles méritent bien que les technologies dont elles découlent puissent clairement être rattachées aux domaines des Cleantech et de l'Économie verte pour lesquels des plans d'action ont d'ores et déjà été adoptés. La mention de la possible utilisation chimique du bois de feuillus dans la «Politique de la ressource bois» constitue la seule exception à cet égard. Le bois énergie est globalement considéré comme un combustible et non comme une matière première alors qu'il pourrait précisément constituer un substrat potentiellement précieux pour le bioraffinage.

Il est important et sensé de reconnaître la disponibilité limitée des ressources biogènes de la Suisse afin d'encourager leur valorisation intelligente. Néanmoins, les objectifs formulés pour l'utilisation optimale de la biomasse sont en partie contradictoires. D'un côté, la combustion de biomasse pour la production de chaleur est encouragée afin d'atteindre un taux de substitution maximal des vecteurs énergétiques fossiles (OFEN, 2002; OFEV, 2014). De l'autre, de l'énergie de haute valeur doit être mise à disposition en apportant une valeur ajoutée élevée (OFEN et al., 2009; OFEN, 2010), critères auxquels la production de chaleur ne peut pas répondre à elle seule.

Comparée à la combustion d'énergie fossile, la combustion du bois permet des économies de CO₂

élevées et pourrait apparaître comme ayant un potentiel important en matière de réduction des émissions de CO₂. Cependant, d'autres formes d'énergies renouvelables comme l'eau, le vent, le soleil et la géothermie peuvent être utilisées pour fournir ces mêmes services. Contrairement au bois, ces dernières s'avèrent néanmoins moins adaptées lorsqu'il s'agit de remplacer les combustibles liquides pour les services de transport routiers et aériens (Steubing et al., 2015). L'approche systémique montre que lorsque les ressources renouvelables sont mises en compétition, la production d'énergie stockée et distribuée au départ de la biomasse est privilégiée à celle de la combustion (Moret et al., 2016). L'argument avancé par les Offices fédéraux pour l'énergie et l'environnement à l'encontre de la transformation du bois en biocarburant liquide, à savoir qu'elle ne permet qu'une trop faible économie de ressources (rendement global) (OFEN, 2008; OFEV et al., 2014; OFEN, 2014), apparaît par conséquent réducteur. Le bioraffinage du bois en différents produits, qui englobent outre les biocarburants aussi des substances de haute valeur comme les produits chimiques, offre de plus la possibilité de parvenir à une valeur ajoutée élevée à partir de cette matière première. De plus, l'approche intégrée dans laquelle la biomasse est utilisée en cogénération de produits biosourcés et d'énergie stockable et distribuée (gaz naturel et ou carburant liquide) s'avère avoir un potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre plus important que la seule conversion énergétique (Maréchal, en cours de publication).

Digression

Le bioraffinage du bois dans le contexte suisse : résultats d'un séminaire réunissant les parties prenantes

Une analyse contextuelle réalisée dans le cadre de la plate-forme de dialogue 2 « Nouvelles voies dans le bioraffinage du bois » a mis en exergue les éléments moteurs et les obstacles qui conditionnent le développement ultérieur des bioraffineries en Suisse. Les résultats relatifs au contexte politique, sociétal et économique de la Suisse ont été présentés sous la forme d'une matrice SWOT (Strengths/Forces, Weaknesses/Faiblesses, Opportunities/Opportunités, Threats/Risques). Dans cette analyse, les forces et les faiblesses dont la liste est dressée se rapportent aux acteurs respectivement concernés. Les opportunités et les risques reflètent la manière dont chaque acteur évalue le bioraffinage du bois en fonction de sa propre perspective.

Pour des raisons de cohérence, la matrice SWOT a été publiée sur le site Internet du PNR 66 : www.nfp66.ch

RECOMMANDATIONS

Les recommandations issues des résultats de recherche du PNR 66 et des discussions menées avec les groupes cibles s'adressent, d'une part, aux responsables politiques et, d'autre part, au monde de la recherche.

Recommandations à l'intention des responsables politiques

Adopter une stratégie bioéconomique suisse: la transformation de l'actuelle économie basée sur le pétrole en une économie centrée sur les ressources renouvelables pourrait insuffler au paysage suisse de la recherche et de l'industrie de nouvelles impulsions importantes. Le Conseil fédéral devrait par conséquent élaborer une stratégie bioéconomique comportant les points suivants.

- **Utiliser le bois comme matière première:** la biomasse constitue une ressource limitée qui doit être utilisée de manière réfléchie et ciblée en atteignant un haut degré d'efficacité énergétique et en apportant une valeur ajoutée élevée. À long terme, le bois énergie devrait par conséquent servir en premier lieu de matière première dans les bioraffineries produisant des produits chimiques ou des combustibles de haute valeur comme les biocarburants destinés aux transports routiers et aériens, les autres sources d'énergie renouvelables comme le soleil, le vent ou la géothermie n'étant pas adaptées à ces secteurs. Par l'intermédiaire de la plate-forme gaz de synthèse, les résidus des bioraffineries devraient être transformés en méthane, gaz qui peut être stocké et distribué dans le réseau de gaz naturel, l'énergie de la conversion pouvant de plus être utilisée pour fournir des besoins de chaleur à haute température de l'industrie. Le carbone biogénique du bois peut de plus être utilisé pour compenser les variations saisonnières des énergies renouvelables dans les concepts «power to gaz et power to liquid».
- **Générer une valeur ajoutée indigène élevée grâce au bois:** l'économie suisse a la réputation d'être innovante et durable. Pour qu'elle continue à satisfaire à sa réputation, le bois suisse doit générer une valeur ajoutée aussi élevée que

possible sur le sol suisse. Les conditions-cadres doivent donc être aménagées de manière attrayante afin que le bois indigène puisse être valorisé en Suisse et non pas uniquement exporté en tant que matière première. De plus, les nouvelles technologies de valorisation du bois pourront elles-mêmes être exportées avec profit.

- **Assurer la stabilité à long terme des conditions-cadres politiques:** les conditions-cadres politiques devant contribuer à la concrétisation d'une bioéconomie en Suisse devraient être orientées vers des objectifs et suffisamment stables pour que l'industrie puisse s'y adapter et procéder aux investissements nécessaires afin de construire de nouvelles installations de recherche, de développement et de production.

Mesures pour la mise en œuvre de la stratégie bioéconomique:

- **Commission fédérale pour la recherche en bioéconomie:** un organe consultatif similaire à la Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE) devrait être créé et subordonné au Conseil fédéral et aux départements concernés – DEFR et DETEC. La commission élabore une stratégie détaillée et réalisable pour la recherche en bioéconomie et procède au contrôle et à la révision des mesures de mise en œuvre correspondantes.
- **Centre de compétence pour le bioraffinage:** conformément aux axes de recherche définis dans la stratégie bioéconomique, une bioéconomie ne peut devenir réalité que si les institutions de recherche et l'industrie coopèrent étroitement afin de développer de manière ciblée des stratégies permettant de fabriquer à partir du bois et d'autres matières premières renouvelables des produits attractifs susceptibles de générer une importante création de valeur. Cette collaboration devrait être encouragée par la création d'un centre de compétence pour le bioraffinage similaire dans sa forme aux Swiss Competence Centers for Energy Research (SCCER). Cependant, le centre de compétence pour la recherche sur le bioraffinage devrait être doté de moyens finan-

ciers supplémentaires dédiés à la recherche, au développement et à la transposition à l'échelle industrielle.

- **Démonstrateur de bioraffinage:** afin de pouvoir transposer aussi rapidement que possible à l'échelle industrielle les résultats de recherche prometteurs, il est nécessaire de pouvoir disposer d'installations pilotes et de démonstration. Les coûts de telles installations sont souvent insurmontables, précisément pour les projets à la fois risqués et prometteurs, dans la mesure où ils requièrent, en dehors du processus principal de transformation déjà fort coûteux, que la chaîne des processus intervenant en amont et en aval soit également constituée. Les pouvoirs publics devraient par conséquent financer et construire une bioraffinerie pilote flexible et conçue de manière modulaire. Ce démonstrateur de bioraffinage permettrait, d'une part, aux chercheuses et chercheurs de se concentrer sur le développement et l'industrialisation de leur technologie. Ils pourraient, d'autre part, adapter les procédés clés de manière à les intégrer dans la bioraffinerie afin de générer une valeur ajoutée aussi élevée que possible à partir du bois tout en exerçant une influence minimale sur l'environnement.
- **Programme fédéral d'acquisition de produits durables biosourcés:** la construction d'une bioéconomie peut être encouragée si l'écoulement des biens biogènes est soutenu, tout au moins durant les premières années. Les pouvoirs publics et leurs mandataires devraient par conséquent être dans l'obligation d'acquérir et d'utiliser des produits biosourcés (p. ex. nettoyants, peintures, bioplastiques) dans les secteurs où il existe des alternatives aux produits pétrochimiques similaires. Cette mesure devrait s'accompagner d'un programme de certification permettant d'attester la durabilité de ces produits, accompagné de l'information pour l'utilisateur de l'empreinte écologique des produits qu'il consomme.

Recommandations à l'intention de la recherche et de la formation

Fractionnement en substances valorisables: le bois est constitué d'un grand nombre de structures moléculaires complexes et précieuses. Afin d'abaisser fortement les coûts d'investissement lors de la production de composés chimiques, les structures moléculaires nécessaires devraient si possible être directement extraites de la biomasse. Cette voie directe doit être préférée à celle de la synthèse basée sur un composant

simple, comme l'éthylène produit par l'industrie pétrochimique.

Nouveaux procédés de transformation: il est nécessaire de développer, d'élargir, voire de combiner les processus de transformation thermochimiques, catalytiques et biochimiques. Dans un premier temps, cela permettrait le fractionnement de la structure complexe de la biomasse en produits intermédiaires de haute valeur (p. ex. production de lignine native, fibres/sucres), et, dans un second, la synthèse de produits finis à partir de ces produits intermédiaires plus complexes. Ces procédés devraient être hautement intégrés afin d'être aussi réalisables à petite échelle et rentables sur le territoire suisse.

Instrument de conseil pour l'industrie: sur la base du projet *Maréchal* relatif à la comparaison, à l'intégration et à l'évaluation des procédés de transformation, un instrument de conseil devrait être créé à l'intention de l'industrie sur la base d'une banque de données. Le but de cet instrument serait d'établir et de renforcer les liens et synergies existants entre les technologies, les entreprises et l'industrie du bois.

Cycle de formation en bioraffinage: les compétences présentes au sein des EPF, des universités et des HES suisses dans le domaine des différentes plates-formes de bioraffinage, de leur étude et de leur mise en œuvre devraient être regroupées et utilisées afin d'instaurer un cycle de formation centralisé en bioraffinage.

RÉFÉRENCES

- Alonso, D.M., Bond, J.Q., Dumesic, J.A., 2010. Catalytic conversion of biomass to biofuels. *Green Chem.* 12 (9), 1493.
- Alvira, P., Tomas-Pejo, E., Ballesteros, M., Negro, M.J., 2010. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource technology* 101 (13), 4851–4861.
- Arca-Ramos, A., Ammann, E.M., Gasser, C.A., Nastold, P., Eibes, G., Feijoo, G., Lema, J.M., Moreira, M.T., Corvini, P.F.-X., 2016. Assessing the use of nanoimmobilized laccases to remove micropollutants from wastewater. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 23 (4), 3217–3228.
- Bahrle, C., Custodis, V., Jeschke, G., van Bokhoven, J.A., Vogel, F., 2014. In situ observation of radicals and molecular products during lignin pyrolysis. *ChemSusChem.* 7 (7), 2022–2029.
- Bahrle, C., Nick, T.U., Bennati, M., Jeschke, G., Vogel, F., 2015. High-field electron paramagnetic resonance and density functional theory study of stable organic radicals in lignin: influence of the extraction process, botanical origin, and protonation reactions on the radical g tensor. *J. Phys. Chem. A* 119 (24), 6475–6482.
- Balan, R., Brethauer, S., Studer, M.H.-P., 2017a. Steam explosion pretreatment of beech wood. Part 1: comparison of the enzymatic hydrolysis of washed solids and whole pretreatment slurry at different solid loadings. *Biotechnol. Biofuels* soumis.
- Balan, R., Brethauer, S., Studer, M.H.-P., 2017b. Steam explosion pretreatment of beech wood. Part 2: quantification of cellulase inhibitors and their effect on Avicel hydrolysis. *Biotechnol. Biofuels* soumis.
- BETARENEWABLES: Crescentino/ The project. <http://www.betarenewables.com/en/crescentino/the-project>.
- Brethauer, S., Lawrence, R.S., Studer, M.H.-P., 2017. Enhanced simultaneous saccharification and fermentation of pretreated beech wood by in situ treatment with the white rot fungus *Irpex lacteus* in a membrane aerated biofilm reactor. *Bioresource technology*, 237, 135–138.
- Brethauer, S., Studer, M.H., 2015. Biochemical conversion processes of lignocellulosic biomass to fuels and chemicals – a review. *Chimia* 69 (10), 572–581.
- Brown, T.R., Brown, R., Vonnice, E., 2015. Commercial-scale production of lignocellulosic biofuels. *CEP Magazine*.
- Bulut, S., Fei, Z., Siankevich, S., Zhang, J., Yan, N., Dyson, P.J., 2015. Aqueous-phase hydrogenation of alkenes and arenes: The growing role of nanoscale catalysts. *Catal. Today* 247, 96–103.
- Bulut, S., Siankevich, S., Savoglidis, G., Alexander, D.T., Hatzimanikatis, V., Yan, N., Dyson, P.J., Zhang, J., 2017. Efficient bimetallic nanoparticle water-based catalysts for the cleavage of aryl ether C–O linkages. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* accepté.
- Celebi, A.D., Ensinas, A.V., Sharma, S., Maréchal, F., 2017. Early-stage decision making approach for the selection of optimally integrated biorefinery processes. *Energy*.
- Cherubini, F., Jungmeier, G., Wellisch, M., Willke, T., Skiadas, I., van Ree, R., Jong, E. de, 2009. Toward a common classification approach for biorefinery systems. *Biofuel. Bioprod. Bioref.* 3 (5), 534–546.
- Confédération suisse, 1999. Constitution fédérale de la Confédération suisse 101. <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19995395/201702120000/101.pdf>
- Conseil fédéral suisse, 2016. « Stratégie pour le développement durable 2016–2019 », 76 pp. Accessed 29 March 2017.
- Custodis, V.B., Bährle, C., Vogel, F., van Bokhoven, J.A., 2015. Phenols and aromatics from fast pyrolysis of variously prepared lignins from hard- and softwoods. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 115, 214–223.
- Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC), 2016. Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération 2017–2020, Élaboré par la Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE), Berne.
- Département fédéral de l'économie (DFE), Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC), 2011. Masterplan Cleantech: Une stratégie de la Confédération en matière d'efficacité des ressources et d'énergies renouvelables, Berne.

- Dümmler, P., Kienast, K., 2016. Handel statt Heimatschutz: Eine 3-Säulen-Strategie für die Aussenwirtschaft der Schweiz. Avenir Suisse, Zurich.
- Edinger, P., Schneebeli, J., Struis, R.P., Biollaz, S.M., Ludwig, C., 2016. On-line liquid quench sampling and UV-Vis spectroscopy for tar measurements in wood gasification process gases. *Fuel* 184, 59–68.
- Edinger, P., Tarik, M., Hess, A., Testino, A., Ludwig, C., 2016. Online detection of selenium and its retention in reducing gasification atmosphere. *Energy Fuels*.
- Gasser, C., Mucha, M., Wintgens, T., Corvini, P.F.-X., 2013. Nanobiocatalytic depolymerization of lignin for the production of platform phenolic chemicals. *Chimia* 67 (9), 648–657.
- Gasser, C.A., Ammann, E.M., Schaffer, A., Shahgaldian, P., Corvini, P.F.-X., 2016. Production of superparamagnetic nanobiocatalysts for green chemistry applications. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 100 (16), 7281–7296.
- Gasser, C.A., Cvancarova, M., Ammann, E.M., Schaffer, A., Shahgaldian, P., Corvini, P.F.-X., 2017. Sequential lignin depolymerization by combination of biocatalytic and formic acid/formate treatment steps. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 101 (6), 2575–2588.
- Gasser, C.A., Hommes, G., Schaffer, A., Corvini, P.F.-X., 2012. Multicatalysis reactions: new prospects and challenges of biotechnology to valorize lignin. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 95 (5), 1115–1134.
- German Bioeconomy Council, 2015a. Bioeconomy Policy – Synopsis and Analysis of Strategies in the G7.
- German Bioeconomy Council, 2015b. Bioeconomy Policy (Part II) – Synopsis of National Strategies around the World, Berlin.
- Heidenreich, S., Müller, M., Foscolo, P.U., 2016. Advanced biomass gasification: New concepts for efficiency increase and product flexibility. Academic Press.
- Hermann, R., 2016. Innovationen aus dem Wald – Finnlands Forstindustrie erfindet sich neu. *NZZ*, 25.5.2016.
- Hess, A., Tarik, M., Foppiano, D., Edinger, P., Ludwig, C., 2016. Online size and element analysis of aerosol particles released from thermal treatment of wood samples impregnated with different salts. *Energy Fuels* 30 (5), 4072–4084.
- Hess, A., Tarik, M., Ludwig, C., 2015. A hyphenated SMPS-ICPMS coupling setup: Size-resolved element specific analysis of airborne nanoparticles. *J. Aerosol Sci.* 88, 109–118.
- Hofbauer, H., Kaltschmitt, M., Keil, F., Meier, D., Welling, J., 2016. Pyrolyse, in: Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. (Eds.), *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*, éd. 3. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 1183–1265.
- Holderegger, U., 2009. Schlussstrich unter Atisholz: Borregaard will unrentable Zellstofffabrik schliessen – 440 Stellen gehen verloren. *NZZ*, 29.08.2009.
- Holzindustrie Schweiz, 2008. Jahresbericht 2008: Holzindustrie Schweiz, Berne
- Imtiaz, Q., Broda, M., Müller, C.R., 2014. Structure–property relationship of co-precipitated Cu-rich, Al₂O₃- or MgAl₂O₄-stabilized oxygen carriers for chemical looping with oxygen uncoupling (CLOU). *Appl. Energ.* 119, 557–565.
- Imtiaz, Q., Kurlov, A., Rupp, J.L.M., Müller, C.R., 2015. Highly efficient oxygen-storage material with intrinsic coke resistance for chemical looping combustion-based CO₂ capture. *ChemSusChem.* 8 (12), 2055–2065.
- Imtiaz, Q., Yüzbaşı, N.S., Abdala, P.M., Kierzkowska, A.M., van Beek, W., Broda, M., Müller, C.R., 2016. Development of MgAl₂O₄-stabilized, Cu-doped, Fe₂O₃-based oxygen carriers for thermochemical water-splitting. *J. Mater. Chem.* 4 (1), 113–123.
- Jong, E. de, Jungmeier, G., 2015. Biorefinery concepts in comparison to petrochemical refineries, dans: Pandey, A., Höfer, R., Taherzadeh, M. (Eds.), *Industrial biorefineries and white biotechnology*, Elsevier, Amsterdam, 3–33.
- Jungmeier, G., Van Ree, R., de Jong, E., Stichnothe, I., de Bari, I., Jørgensen, H., Wellisch, M., Bell, G., Spaeth, J., Torr, K., Kimura, S., 2015. The «Biorefinery Fact Sheet» and its application to wood-based biorefining – case studies of IEA Bioenergy Task 42 «Biorefining».
- Kamm, B., Gruber, P.R., Kamm, M., 2000. Biorefineries–industrial processes and products, in: Elvers, B. (Eds.), *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*. Wiley-VCH, Weinheim, 1–38.
- Kim, S., Dale, B.E., 2015. Comparing alternative cellulosic biomass biorefining systems: Centralized versus distributed processing systems. *Biomass Bioenerg.* 74, 135–147.
- Kim, S., Dale, B.E., 2016. A distributed cellulosic biorefinery system in the US midwest based on corn stover. *Biofuel. Bioprod. Bioref.* 10 (6), 819–832.
- Knop, M., Dang, T.Q., Jeschke, G., Seebeck, F.P., 2017. Copper is a cofactor of the formylglycine-generating enzyme. *ChemBioChem.* 18 (2), 161–165.
- Knop, M., Engi, P., Lemnar, R., Seebeck, F.P., 2015. In vitro reconstitution of formylglycine-generating enzymes requires copper(I). *ChemBioChem.* 16 (15), 2147–2150.
- Lin, Y.-C., Huber, G.W., 2009. The critical role of heterogeneous catalysis in lignocellulosic biomass conversion. *Energy Environ. Sci.* 2 (1), 68–80.
- Ma, Z., Custodis, V., Hemberger, P., Bahrlé, C., Vogel, F., Jeschke, G., van Bokhoven, J.A., 2015. Chemicals from lignin by catalytic fast pyrolysis, from product control to reaction mechanism. *Chimia* 69 (10), 597–602.
- Ma, Z., Troussard, E., van Bokhoven, J.A., 2012. Controlling the selectivity to chemicals from lignin via catalytic fast pyrolysis. *Appl. Catal. A-Gen.* 423–424, 130–136.

- Maronese, S., Ensinas, A.V., Mian, A., Lazzaretto, A., Maréchal, F., 2015. Optimum biorefinery pathways selection using the integer-cuts constraint method applied to a MILP problem. *Ind. Eng. Chem. Res.* 54 (28), 7038–7046.
- Martinez-Garcia, J., Nussbaumer, T., 2015. A one-dimensional transient solid fuel conversion model for grate combustion optimization. *Combust. Sci. Technol.* 187 (8), 1208–1228.
- McMillan, J.D., Jennings, E.W., Mohagheghi, A., Zuccarello, M., 2011. Comparative performance of precommercial cellulases hydrolyzing pretreated corn stover. *Biotechnol. Biofuels* 4, 29.
- Ministère allemand de la Formation et de la Recherche (BMBF), 2010. Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030: Unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft.
- Ministère allemand de l'Alimentation et de l'Agriculture (BMEL), 2014. Nationale Politikstrategie Bioökonomie – Nachwachsende Ressourcen und biotechnologische Verfahren als Basis für Ernährung, Industrie und Energie.
- Ministère allemand de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Protection des Consommateurs (BMELV), Ministère allemand de la Formation et de la Recherche (BMBF), Ministère allemand de l'Environnement (BMU), Ministère allemand de l'Environnement et de la Technologie (BMWi), 2012. Roadmap Bioraffinerien: im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Berlin.
- Morales, M., Ataman, M., Badr, S., Linster, S., Kourlimpinis, I., Papadokonstantakis, S., Hatzimanikatis, V., Hungerbühler, K., 2016. Sustainability assessment of succinic acid production technologies from biomass using metabolic engineering. *Energy Environ. Sci.* 9 (9), 2794–2805.
- Moret, S., Peduzzi, E., Gerber, L., Maréchal, F., 2016. Integration of deep geothermal energy and woody biomass conversion pathways in urban systems. *Energy Conversion and Management* 129, 305–318.
- Natrass, L., Biggs, C., Bauen, A., Parisi, C., Rodriguez Cerezo, E., Gomez Barbero, M., 2016. The EU bio-based industry: Results from a survey EUR 27736 OP LF-NA-27736-EN-N. Publications Office of the European Union.
- Neubauer, Y., 2008. Online-Analyse von Teer aus der Biomassenvergasung mit Lasermassenspektrometrie, Thèse, TUB, Berlin.
- Nussbaumer, T., 2013. Entwicklungstrends der Holzenergie und ihre Rolle in der Energiestrategie 2050. *Schweiz. Z. Forstwes.* 164 (12), 389–397.
- Office fédéral de l'énergie OFEN, 2002. « Énergie du bois: document de réflexion – Objectifs et priorités pour l'utilisation énergétique du bois: recherche, démonstration et marketing en Suisse ».
- Office fédéral de l'énergie OFEN, 2008. « Prise de position sur les carburants biogènes », Berne.
- Office fédéral de l'énergie OFEN, 2010. « Stratégie énergétique suisse en matière de biomasse, Stratégie pour l'utilisation énergétique de la biomasse en Suisse », Berne.
- Office fédéral de l'énergie OFEN, 2014a. Machbarkeitsstudie und Businessplan Lignogaz: Methan aus Holz, Projektierung einer 2,67-MW-Anlage für den Standort Mont-Laville (VD), Ittigen.
- Office fédéral de l'énergie OFEN, 2014b. « Stratégie de la Confédération relative à l'énergie du bois dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050, 13.074 n Stratégie énergétique 2050: premier volet », Ittigen.
- Office fédéral de l'énergie OFEN, Office fédéral de l'agriculture OFAG, Office fédéral du développement territorial ARE, Office fédéral de l'environnement OFEV, 2009. « Stratégie de la Suisse en matière de biomasse : Stratégie relative à la production, la transformation et l'utilisation de biomasse en Suisse ».
- Office fédéral de l'environnement (OFEV), 2013a. « Politique forestière 2020 – Visions, objectifs et mesures pour une gestion durable des forêts suisses », Bern.
- Office fédéral de l'environnement OFEV, 2013b. « Économie verte : compte rendu et plan d'action, Rapport au Conseil fédéral », Berne.
- Office fédéral de l'environnement OFEV, 2016. « Économie verte : mesures de la Confédération pour préserver les ressources et assurer l'avenir de la Suisse, rapport à l'attention du Conseil fédéral », Berne.
- Office fédéral de l'environnement OFEV, Office fédéral de l'énergie OFEN, Secrétariat d'État à l'économie SECO, 2014. « Politique de la ressource bois – stratégie, objectifs et plan d'action bois », Berne.
- Organisation des Nations Unies, 2015. Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung: Resolution der Generalversammlung, verabschiedet am 25. September 2015 A/RES/70/1*.
- Overend, R.P., Chornet, E., Gascoigne, J.A., 1987. Fractionation of lignocelluloses by steam-aqueous pretreatments. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 321 (1561), 523–536.
- Pielhop, T., Amgarten, J., Rohr, P.R. von, Studer, M.H., 2016. Steam explosion pretreatment of softwood: the effect of the explosive decompression on enzymatic digestibility. *Biotechnol. Biofuels* 9, 152.
- Pielhop, T., Larrazábal, G.O., Rudolf von Rohr, P., 2016. Autohydrolysis pretreatment of softwood – enhancement by phenolic additives and the effects of other compounds. *Green Chem.* 18 (19), 5239–5247.
- Pielhop, T., Larrazábal, G.O., Studer, M.H., Brethauer, S., Seidel, C.-M., Rudolf von Rohr, P., 2015. Lignin repolymerisation in spruce autohydrolysis pretreatment increases cellulase deactivation. *Green Chem.* 17 (6), 3521–3532.
- Rhyner, U., 2013. Reactive hot gas filter for biomass gasification. Diss. ETH No. 21102. ETH, Zürich.
- Rubin, E.M., 2008. Genomics of cellulosic biofuels. *Nature* 454 (7206), 841–845.

- Siankevich, S., Fei, Z., Scopelliti, R., Jessop, P.G., Zhang, J., Yan, N., Dyson, P.J., 2016. Direct conversion of mono- and polysaccharides into 5-hydroxymethylfurfural using ionic-liquid mixtures. *ChemSusChem*. 9 (16), 2089–2096.
- Siankevich, S., Fei, Z., Scopelliti, R., Laurenczy, G., Katsyuba, S., Yan, N., Dyson, P.J., 2014. Enhanced conversion of carbohydrates to the platform chemical 5-hydroxymethylfurfural using designer ionic liquids. *ChemSusChem*. 7 (6), 1647–1654.
- Siankevich, S., Fei, Z., Yan, N., Dyson, P.J., 2015. Application of ionic liquids in the downstream processing of lignocellulosic biomass. *Chimia* 69 (10), 592–596.
- Siankevich, S., Mozzettini, S., Bobbink, F., Yan, N., Fei, Z., Dyson, P.J., 2017. Influence of the anion on the oxidation of 5-hydroxymethylfurfural using platinum nanoparticle-ionic polymer supported catalysts. *ChemCatChem*. (accepted).
- Siankevich, S., Savoglidis, G., Fei, Z., Laurenczy, G., Alexander, D.T., Yan, N., Dyson, P.J., 2014. A novel platinum nanocatalyst for the oxidation of 5-hydroxymethylfurfural into 2,5-furandicarboxylic acid under mild conditions. *J. Catal.* 315, 67–74.
- Sieber, B., 1956. 75 Jahre Cellulosefabrik Attisholz AG.
- Socha, A.M., Parthasarathi, R., Shi, J., Pattathil, S., Whyte, D., Bergeron, M., George, A., Tran, K., Stavila, V., Venkatachalam, S., Hahn, M.G., Simmons, B.A., Singh, S., 2014. Efficient biomass pretreatment using ionic liquids derived from lignin and hemicellulose. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 111 (35), E3587–95.
- Steubing, B., Suter, F., Heeren, N., Chaudhary, A., Ostermeyer, Y., Hellweg, S., 2015. Welches sind die ökologischsten Holzverwendungen? *Schweiz. Z. Forstwes.* 166 (5), 335–338.
- Thees, O., Burg, V., Erni, M., Bowman, G., Lemm, R., 2017. Biomasepotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung. Rapport final SCCER Biosweet.
- Tschedanoff, V., 2013. Reactive hot gas filter for biomass gasification. Thèse. ETH No. 21102. ETH, Zurich.
- Van Dael, M., Pelkmans, L., Devriendt, N., Guissson, R., 2014. D6.2 Report on benchmarking of country policy approaches: S2Biom Project Grant Agreement n° 608622, 155 pp. http://www.s2biom.eu/images/Publications/S2Biom_Report_D6.2_20161223.pdf.
- Vispute, T.P., Zhang, H., Sanna, A., Xiao, R., Huber, G.W., 2010. Renewable chemical commodity feedstocks from integrated catalytic processing of pyrolysis oils. *Science* 330 (6008), 1222–1227.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *Int J Life Cycle Assess* 21 (9), 1218–1230.
- Wyman, C.E., Dale, B.E., 2015. Producing biofuels via the sugar platform. *Chem. Eng. Prog.* 111 (3), 45–57.
- Yazaki, Y., 2015. Utilization of flavonoid compounds from bark and wood: a review. *Nat. Prod. Commun.* 10 (3), 513–520.
- Zhang, W., 2010. Automotive fuels from biomass via gasification. *Fuel Process. Technol.* 91 (8), 866–876.

LE PNR 66 EN BREF

Les programmes nationaux de recherche PNR fournissent des contributions scientifiques étayées pour remédier à des problèmes urgents d'envergure nationale. Ils sont réalisés sur mandat du Conseil fédéral et sous la direction du Fonds national suisse pour la recherche. Les PNR sont rattachés à la division IV « Programmes » (www.fns.ch).

Programme national de recherche « Ressource bois »

Dans le cadre d'un dialogue avec les représentants des milieux économiques et des autorités, le programme national de recherche « Ressource bois » (PNR66) a élaboré des bases scientifiques et des solutions pour optimiser la disponibilité et l'utilisation du bois en Suisse. Le programme coordonné par la Commission pour la technologie et l'innovation CTI disposait d'une enveloppe budgétaire de 18 mio fr. Les travaux de recherche se sont échelonnés de 2012 à fin 2016. 30 équipes de recherche de Suisse y ont participé.

Les **30 projets de recherche du PNR66** reflètent l'éventail des nouvelles approches de l'exploitation du bois et indiquent les voies à suivre pour améliorer la disponibilité des ressources et inscrire le management du cycle de matière dans une perspective durable. Fin 2013, le comité de direction a défini quatre dialogues thématiques. Ceux-ci portent sur les principaux domaines de la chaîne de valeurs forêt/bois et ont été développés de concert avec les représentants des milieux économiques, des associations et des autorités dans le cadre des plates-formes de dialogue. Les résultats des travaux de recherche et des plates-formes de dialogue sont résumés dans les quatre synthèses partielles.

Pour plus d'informations cf. www.pnr66.ch



Plate-forme de dialogue et synthèse 1: avancées dans la construction en bois

Bois de hêtre en placage stratifié pour structures porteuses

Frangi Andrea, EPF Zurich

Assemblage assisté par robot de structures porteuses complexes en bois

Kohler Matthias, EPF Zurich

Construction de planchers en bois dur à l'acoustique optimisée

Krajčiči Lubos, Soundtherm GmbH

Assemblage par collage d'éléments de structures porteuses en bois de feuillus

Niemz Peter, EPF Zurich

Ouvrage porteur en bois résistant aux séismes pour bâtiments à plusieurs étages

Steiger René, Empa, Dübendorf

Dimensionnement des assemblages par collage dans la construction en bois

Vasilopoulos Anastasios, EPF Lausanne

Bois et béton de bois allégé: les matériaux de demain ?

Zwicky Daia, École d'ingénieurs et d'architectes, Fribourg

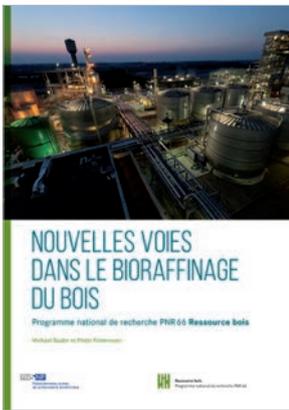


Plate-forme de dialogue et synthèse 2 : nouvelles voies dans le bioraffinage du bois

L'épuration des gaz à chaud améliore la rentabilité de la transformation du bois en gaz

Biollaz Serge, Institut Paul Scherrer (PSI), Villigen

Division de la lignine pour former des composés aromatiques

Corvini Philippe, Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz

Transformation simultanée du bois en produits chimiques de base

Dyson Paul, EPF Lausanne

Wood2CHem: une plateforme informatique pour le développement de bio-raffinerie

Maréchal François, EPF Lausanne

Génération d'hydrogène de grande pureté à partir de bois

Müller Christoph, EPF Zurich

Chaudières à grille optimisées pour combustibles ligneux

Nussbaumer Thomas, Hochschule Luzern

Fabrication combinée de carburants et de produits chimiques à partir de bois

Rudolf von Rohr Philipp, EPF Zurich

Optimisation des processus de synthèse du gaz naturel issu de bois

Schildhauer Tilman, Institut Paul Scherrer (PSI), Villigen

Mise au point de protéines synthétiques pour optimiser l'exploitation chimique du bois

Seebeck Florian, Université de Bâle

De l'éthanol pour remplacer l'essence: comment produire efficacement du carburant à partir du bois

Studer Michael, Haute école spécialisée bernoise, Zollikofen

Les radicaux libres dans la lignine: la clé de la fabrication de substances chimiques «vertes»

Vogel Frédéric, Institut Paul Scherrer (PSI), Villigen



Plate-forme de dialogue et synthèse 3 : innovations dans les matériaux à base de bois

Profils de propriétés du bois améliorés pour les ouvrages en bois

Burgert Ingo, EPF Zurich

La nanotechnologie au service de la conservation du bois

Fink-Petri Alke Susanne, Université de Fribourg

Traitement des surfaces en bois à l'aide de photo-initiateurs

Grützmaker Hansjörg, EPF Zurich

Extraction de tanins de l'écorce de résineux indigènes

Pichelin Frédéric, Haute école spécialisée bernoise, Bienne

Panneau en bois ultraléger à base bio et au cœur de mousse

Thoemen Heiko, Haute école spécialisée bernoise, Bienne

Autoprotection contre les UV des surfaces de bois grâce aux fibres de cellulose

Volkmer Thomas, Haute école spécialisée bernoise, Bienne

Nouvelles méthodes de production de nanocomposites à base de cellulose

Weder Christoph, Université de Fribourg

Nanofibrilles de cellulose (NFC) dans les revêtements pour surfaces en bois (MoNaCo)

Zimmermann Tanja, Empa, Dübendorf



Plate-forme de dialogue et synthèse 4: approvisionnement et utilisation durable du bois

MOBSTRAT: stratégies de mobilisation du bois issu des forêts suisses

Brang Peter, Institut fédéral de recherches WSL, Birmensdorf

Exploitation écologique des ressources de bois en Suisse

Hellweg Stefanie, EPF Zurich

Analyse économique du marché du bois en Suisse

Olschewski Roland, Institut fédéral de recherches WSL, Birmensdorf

Comprendre le marché du bois: entre approvisionnement et multifonctionnalité

Zarin-Nejadan Milad, Université de Neuchâtel

IMPRESSUM

Auteurs :

Prof. Michael Hans-Peter Studer, Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires, Haute école spécialisée bernoise, Zollikofen
Pieter Poldervaart, Pressebüro Kohlenberg, Bâle

Citation recommandée :

Michael Studer, Pieter Poldervaart (2017) : Nouvelles voies dans le bioraffinage du bois, synthèse thématique dans le cadre du programme national de recherche PNR 66 « Ressource bois », Fonds national suisse pour la recherche, Berne.

Synthèse thématique élaborée et publiée avec le soutien du Fonds national suisse pour la promotion de la recherche scientifique dans le cadre du programme national de recherche PNR 66 « Ressource bois ».



Ressource bois
Programme national de recherche PNR 66



FONDS NATIONAL SUISSE
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Comité de direction :

Dr Martin Riediker (président) ; Prof. Charlotte Bengtsson, Skogforsk (the Forestry Research Institute of Sweden), Uppsala, Suède ; Prof. Alain Dufresne, École d'ingénieurs en sciences du papier, de la communication imprimée et des biomatériaux, PAGORA, Institut Polytechnique de Grenoble, France ; Prof. Birgit Kamm, Forschungsinstitut Bioaktive Polymersysteme, Teltow, Allemagne ; Prof. Jakob Rhyner, Université des Nations Unies (UNU), Bonn, Allemagne ; Prof. Liselotte Schebek, Institut IWAR, Technische Universität Darmstadt, Allemagne ; Prof. Alfred Teischinger, Institut für Holzforschung, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Autriche ; Prof. Philippe Thalmann, Laboratoire d'économie urbaine et de l'environnement, EPF Lausanne.

Coordinateur de la synthèse et de la plate-forme de dialogue « Nouvelles voies dans le bioraffinage du bois » :

Enrico Bellini, IC Infraconsult, Berne

Membres du groupe de suivi et du comité

consultatif de la présente synthèse partielle :

François Maréchal (EPFL) ; Oliver Thees (WSL) ; Frédéric Vogel (PSI) ; Pascal Favre (Cosvegaz) ; Thomas Kläusli (AVA Biochem) ; Oliver Kröcher (SCCER BIOSWEET) ; Ludwig Lehner (bwc) ; Jan Lucht (scienceindustries) ; Urs Rhyner (AGRO Energie SZ) ; Achim Schafer (OFEV) ; Martin Spitzer (SI Group) ; Christian Suter (SATW).

Délégués de la division IV du Conseil national de la recherche :

Prof. Nina Buchmann, EPF Zurich (jusqu'à fin 2015) ; Prof. Claudia Binder, EPF Lausanne (à compter de 2016)

Représentant de la Confédération :

Rolf Manser, Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne

Coordinatrice du programme :

Dr Barbara Flückiger Schwarzenbach, Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS), Berne

Chargé du transfert de connaissances et de technologies :

Thomas Bernhard, IC Infraconsult, Berne ; Dr Krisztina Beer-Toth, IC Infraconsult, Berne (de mai 2015 à février 2017)

Mise en page et illustrations :

cR Kommunikation, Zurich ; Alber Visuelle Kommunikation, Zurich

Traduction : Trad8, Delémont

Protographies :

Installation de bioraffinage. Source: biochemtex, Italie (page de couverture)

Les équipes de recherche respectives sont responsables des résultats mentionnés, les auteurs sont responsables des synthèses et des recommandations. Leurs points de vue ne doivent pas nécessairement correspondre à ceux du Fonds national suisse de la recherche scientifique, des membres du comité de direction ou des groupes de suivi.

La majorité des produits chimiques sont actuellement issus du pétrole. Une bioraffinerie du bois permettrait d'élaborer des substances chimiques à partir de cette biomasse, et donc de substituer au pétrole une matière première locale tout en développant un savoir-faire technique. La synthèse partielle de la plate-forme de dialogue « Nouvelles voies dans le bioraffinage du bois » met en évidence les progrès réalisés dans le cadre du PNR66 ainsi que les efforts encore nécessaires pour que cette technologie soit prête à être mise sur le marché.