

## LIVRE BLANC

# Le bois-énergie en Suisse: potentiel énergétique, développement technologique, mobilisation des ressources et rôle dans la transition énergétique

Oliver Thees, Matthias Erni, Vanessa Burg, Gillianne Bowman, Serge Biollaz, Theodoros Damartzis, Timothy Griffin, Jeremy Luterbacher, François Maréchal, Thomas Nussbaumer, Tilman Schildhauer, Janine Schweier, Michael Studer, Oliver Kröcher



## Impressum

Oliver Thees<sup>1</sup>, Matthias Erni<sup>1</sup>, Vanessa Burg<sup>1</sup>, Gillianne Bowman<sup>1</sup>, Serge Biollaz<sup>2</sup>, Theodoros Damartzis<sup>3</sup>, Timothy Griffin<sup>4</sup>, Jeremy Luterbacher<sup>3</sup>, François Maréchal<sup>3</sup>, Thomas Nussbaumer<sup>5</sup>, Tilman Schildhauer<sup>2</sup>, Janine Schweier<sup>1</sup>, Michael Studer<sup>6</sup>, Oliver Kröcher<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Institut fédéral suisse de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf

<sup>2</sup> Paul Scherrer Institute (PSI), Villigen

<sup>3</sup> École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Sion et Lausanne

<sup>4</sup> Université des sciences appliquées et des arts du Nord-Ouest de la Suisse (FHNW), Windisch

<sup>5</sup> Université des sciences appliquées et des arts de Lucerne (HSLU), Lucerne

<sup>6</sup> Université des sciences appliquées de Berne (BFH), Zollikofen



**HSLU** Lucerne University  
of Applied Sciences  
and Arts



**EPFL**



**n|w** University of Applied Sciences and Arts  
Northwestern Switzerland

## Citation suggérée :

Thees, O.; Erni, M.; Burg, V.; Bowman, G.; Biollaz, S.; Damartzis, T.; Griffin, T.; Luterbacher, J.; Marechal, F.; Nussbaumer, T.; Schildhauer, T.; Schweier, J.; Studer, M.; Kröcher, O., 2023: Livre blanc – Le bois-énergie en Suisse: potentiel énergétique, développement technologique, mobilisation des ressources, et rôle dans la transition énergétique. SCCER-BIOSWEET ; Birmensdorf, Institut fédéral de recherches WSL. 34 pages. <https://doi.org/10.55419/wsl:32793>

Ce livre blanc est disponible en anglais (original), en allemand et en français.

Photos de couverture: Oliver Thees (WSL), Thomas Fillbrandt (Université de Fribourg, Allemagne)

Editeur: Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, Birmensdorf, 2023



Cette publication est en libre accès; tous les textes et photos pour lesquels rien d'autre n'est indiqué sont soumis à la licence Creative Commons CC BY 4.0. Ils peuvent être reproduits, diffusés et modifiés librement à condition d'en préciser la source.

## Objectif du livre blanc

L'objectif de ce livre blanc est de fournir aux décideurs les **résultats des recherches récentes** afin de promouvoir l'utilisation optimale de la bioénergie issue du bois, ainsi que de certains autres types de biomasse solide, dans le cadre de la transition énergétique suisse. À cette fin, les résultats du Centre suisse de compétence pour la recherche en bioénergie – **SCCER BIOSWEET** – sont résumés et présentés dans un contexte plus large concernant l'état des connaissances de la recherche et sa mise en œuvre dans la pratique. Sauf indication contraire, les bilans se réfèrent à la Suisse et, dans le cas des matières premières, au potentiel de la biomasse du pays.

L'**accent est mis sur le bois** et, surtout dans le domaine de la technologie de combustion, sur la biomasse solide non ligneuse, qui ne peut être mise à disposition pour la production d'énergie **que si elle n'est pas nécessaire pour des ressources matérielles ou alimentaires concurrentes**. Le bois-énergie comprend le bois directement récolté dans mais aussi hors des forêts, les résidus de bois provenant de l'industrie et les déchets provenant des produits en bois après leur utilisation. Les résidus herbacés de l'agriculture et de l'industrie alimentaire sont des exemples de biomasse solide non ligneuse.

## Partenaires et remerciements

Ce livre blanc a été soutenu financièrement par l'Agence suisse pour l'encouragement de l'innovation Innosuisse et a été rédigé dans le cadre du Centre suisse de compétence pour la recherche énergétique SCCER BIOSWEET.

Nous remercions aussi les organisations suivantes pour leur soutien, leur collaboration, leur expertise et la mise à disposition de données et le financement :

- Ammann Schweiz AG, Langenthal; arv Baustoffrecycling Schweiz, Schlieren; Axpo Biomasse AG, Baden; Office fédéral de l'énergie, Berne; COOP, Bâle
- Commission européenne (projets REsenseng et Pulp & Fuel), Gaznat SA, Vevey; GEO Partner AG, Zürich
- Heitzmann AG, Schachen; Holzenergie Schweiz, Zürich; Kaskad-E GmbH, Bâle; KlimaG-Rischa Klimastiftung Graubünden, Coire; Liebi LNC AG, Oey-Diemtigen; Oekosolve AG, Plons; SCHMID AG Energy Solutions, Eschlikon

Nous remercions Dr. Sandra Hermlé (OFEN), Andreas Keel (Holzenergie Schweiz), Prof. Dr. Karl Keilen (keilenANALYTICS) et Prof. Dr. Frédéric Vogel (FHNW, PSI) pour la révision du manuscrit, ainsi que Dr. Kurt Bollmann (WSL) pour la révision de la section 4.3.2 (biodiversité).

Pour la relecture, la mise en page et les traductions, nous remercions : Jacqueline Annen, Sandra Gurzeler, Martin Moritz (tous de WSL), ainsi que le Dr. Gillianne Bowman (WSL), Melissa Dawes et TTN Translation Network.

## Définitions et abréviations

- **La bioéconomie** «...englobe la production de ressources biologiques renouvelables et la conversion de ces ressources et des flux de déchets en produits à valeur ajoutée, tels que les denrées alimentaires, les aliments pour animaux, les produits biosourcés et la bioénergie» (Commission Européenne 2012).
- **Le bois-énergie** englobe le bois provenant des forêts, le bois provenant d'arbres hors forêt (par exemple, résultant de l'entretien des paysages), les résidus de bois transformés à des fins matérielles, et enfin les déchets de bois, qui ont été précédemment utilisés comme produit en bois.
- **Le carbone biogénique** désigne le carbone exclusivement renouvelable (par opposition au carbone fossile tel que le charbon et le pétrole), tel que défini par l'Agence Internationale de l'Energie Bioenergy (2022).
- **L'énergie finale ou d'utilisation finale** est l'énergie livrée aux consommateurs pour la consommation finale, comme l'électricité pour l'éclairage ou l'essence pour les véhicules.
- **GNS** signifie gaz naturel de synthèse. Il est principalement composé de méthane.
- **NMT** signifie Niveau de maturité technologique et indique le degré de développement d'une technologie sur une échelle de 1 à 9.
- **Le pétajoule (PJ)** est l'unité utilisée pour l'énergie primaire, tandis que **le gigawattheure (GWh)** est l'unité utilisée pour l'énergie finale (1 PJ ≈ 278 GWh).
- «Le **potentiel de réchauffement planétaire (PRP)** a été mis au point pour permettre de comparer les effets de différents gaz sur le réchauffement planétaire. Plus précisément, il s'agit de mesurer la quantité d'énergie que les émissions d'une tonne d'un gaz absorberont sur une période donnée, par rapport aux émissions d'une tonne de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Plus le PRP est élevé, plus un gaz donné réchauffe la Terre par rapport au CO<sub>2</sub> sur cette période. La période de temps habituellement utilisée pour les PRP est de 100 ans» (EPA 2021).
- **Les sources d'énergie primaire** (par exemple, le bois, le charbon, le pétrole brut, le gaz naturel et l'eau) sont présents dans la nature et n'ont encore subi aucune transformation, qu'ils soient ou non directement utilisables sous leur forme brute.

## Résumé

Pour permettre la transition énergétique en Suisse, SCCER BIOSWEET (i) a évalué les potentiels actuels et futurs de l'énergie primaire provenant des différents types de biomasse ligneuse en Suisse; (ii) a développé et mis en œuvre des technologies innovantes pour l'utilisation de la biomasse dans les domaines de la chaleur, de l'électricité et des carburants; et (iii) a étudié le rôle futur de la biomasse ligneuse dans le système énergétique.

SCCER BIOSWEET a commencé avec l'objectif de 100 pétajoules (PJ) de consommation d'énergie primaire par an provenant de la bioénergie d'ici 2050, ce qui signifie un doublement de la consommation d'énergie actuelle provenant de la biomasse. Selon les résultats des analyses réalisées par SCCER BIOSWEET, cet objectif est réalisable et la biomasse ligneuse pourrait y contribuer à hauteur de 50%. Néanmoins, en ce qui concerne l'efficacité des ressources et la décarbonisation de l'industrie et de la société, la priorité doit être accordée à l'utilisation matérielle du bois (utilisation en cascade), par exemple comme produits chimiques dans les bioraffineries. En Suisse, l'utilisation du bois à des fins énergétiques devrait idéalement inclure la production de chaleur à haute température pour le chauffage des processus industriels, ainsi que de carburants sous forme gazeuse et liquide pour les transports terrestres et aériens. Un autre point essentiel est la nécessité de compenser les fluctuations de la production d'autres sources d'énergie, notamment solaire.

## Table des matières

<b>1 Introduction</b>	<b>4</b>
1.1 Un centre de compétences pour la recherche sur les bioénergies	4
1.2 Utilisation actuelle du bois-énergie	4
1.3 Défis et questions	4
<b>2 Matières premières nationales</b>	<b>5</b>
2.1 Potentiels du bois-énergie	5
2.2 Bois de forêt	7
2.3 Disponibilité future du bois-énergie	11
<b>3 Technologies d'utilisation du bois-énergie</b>	<b>12</b>
3.1 Vue d'ensemble	12
3.3 Production de carburants gazeux	17
3.4 Production de combustibles liquides	20
3.5 Bio-raffinage: approches intégrées pour la conversion du bois	22
<b>4 Le rôle de la biomasse ligneuse dans le système énergétique</b>	<b>23</b>
4.1 Utilisation comme matériau ou comme énergie ?	23
4.2 Possibilités d'utilisation de l'énergie	24
4.3 Utilisation optimale de l'énergie	25
<b>5 Conclusions et recommandations</b>	<b>28</b>
<b>6 Références</b>	<b>30</b>

# 1 Introduction

## 1.1 Un centre de compétences pour la recherche sur les bioénergies

La Suisse est confrontée à une transformation progressive et profonde de son système énergétique. Afin d'identifier des solutions aux défis techniques, sociaux et politiques liés à la transition énergétique, le Conseil fédéral et le Parlement ont lancé le plan d'action « Recherche énergétique coordonnée suisse », dans le cadre duquel la CTI (aujourd'hui Innosuisse), le Fonds national suisse (FNS) et l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) ont été mandatés pour développer et gérer des réseaux de recherche interdisciplinaires entre les hautes écoles. Huit centres de compétences suisses pour la recherche énergétique (SCCER), en activité de 2014 à 2020 dans sept champs d'action, ont été créés pour soutenir la stratégie énergétique 2050 du gouvernement suisse (CTI 2013).

SCCER BIOSWEET (BIOmass for SWiss EnErgy future) était un consortium de partenaires universitaires, privés et publics. Ses recherches sur la biomasse visaient à amener les processus de conversion à des niveaux de maturité technologique (NMT) plus élevés, dans le but de contribuer à des solutions pour la transition énergétique. Une contribution de 100 pétajoules (PJ) d'énergie primaire par an provenant de la biomasse ligneuse et non ligneuse a été envisagée pour l'année 2050. Pour atteindre cet objectif, il faudrait doubler l'utilisation actuelle de la biomasse à des fins énergétiques, le bois contribuant pour moitié à la valeur envisagée. Les activités de recherche et de développement de SCCER BIOSWEET ont été orientées vers cet objectif ambitieux : utiliser de façon durable le potentiel de la biomasse comme source d'énergie. BIOSWEET a permis de découvrir de nouvelles idées, et la présente synthèse est largement basée sur les informations/connaissances acquises par le consortium.

## 1.2 Utilisation actuelle du bois-énergie

Le bois est une source de carbone biogénique qui a capté le CO<sub>2</sub> atmosphérique par photosynthèse. Les arbres vivants des forêts suisses contiennent environ 121 t C/ha (Rigling *et al.* 2015). Le bois-énergie solide d'aujourd'hui provient de matériaux ligneux issus de forêts, d'arbres hors forêt, de résidus de bois résultant de la transformation du bois à des fins matérielles, et enfin de déchets, disponibles à la fin du cycle de vie d'un produit en bois. Selon la statistique de l'énergie (OFEN 2021a), **en 2019, l'ensemble du bois-énergie représentait 4,9% (41 PJ) de la consommation finale totale d'énergie** en Suisse (836 PJ). Cette dernière valeur est tombée à 747 PJ au cours de la première année de la pandémie, en 2020, et la part représentée par tous les combustibles ligneux a augmenté pour atteindre 5,3%.

Selon la statistique forestière suisse (OFEV 2022), 1,9 Mm<sup>3</sup> (19 PJ) **de bois-énergie provenant des forêts**

**suisses** a été récolté en 2019 (et 1,6% de plus en 2020, première année de pandémie). Environ 60% de ce volume était constitué de plaquettes et 40% de bûches. La part des plaquettes de bois dans le volume total de bois-énergie provenant des forêts est en augmentation depuis des années. **La consommation totale de bois-énergie** est en augmentation depuis plus de 20 ans, atteignant des valeurs de 5,5 Mm<sup>3</sup> en 2019 et 5,6 Mm<sup>3</sup> en 2020. La plus grande part (environ 70%) a été utilisée dans des systèmes de combustion automatisés. La biomasse ligneuse est principalement brûlée pour produire de la chaleur (95%) et, dans une faible mesure, de l'électricité (5%) dans des centrales de production combinée de chaleur et d'électricité (PCCE) (500 GWh/a en 2019 et 590 GWh/a en 2020; OFEV 2021, OFEV 2022).

## 1.3 Défis et questions

Ce livre blanc présente des informations issues des recherches actuelles en matière de technologie et de sciences sociales et traite des opportunités et des risques importants liés à l'utilisation du bois et de certains types de biomasse solide non ligneuse à des fins énergétiques. En raison des nombreuses utilisations possibles de la biomasse, mais aussi des effets écologiques de ces utilisations qui peuvent devenir très importants, les problèmes associés sont très complexes. Selon la situation, les acteurs responsables de la politique, de l'administration et de l'économie peuvent être confrontés aux défis suivants :

- **Matière première limitée et potentiel dépendant du marché**, associé au risque d'un manque de disponibilité des ressources de biomasse ou d'incertitudes dans l'approvisionnement, souvent causés par la concurrence, les restrictions environnementales et les conditions de propriété des forêts.
- **Coûts de production et de logistique élevés dans l'ensemble de la chaîne de processus**, associés au risque de réduction de l'efficacité économique et de la compétitivité et à la difficulté de mobiliser le potentiel supplémentaire de la forêt (lié aux coûts, au marché du bois en raison des coproduits, et aux incertitudes résultant du changement climatique et des exigences politiques). Des problèmes similaires se posent dans l'agriculture et l'industrie alimentaire. En ce qui concerne les coûts, il est peu probable qu'ils diminuent au cours de la transition énergétique, contrairement aux autres options renouvelables, qui bénéficient d'économies d'échelle.
- **Incidences environnementales négatives sur les différents processus**, en particulier l'élimination non durable des nutriments lors de la récolte du bois de forêt et la pollution atmosphérique, principalement sous la forme de particules et de composés organiques provenant des petits appareils de combustion, ainsi que les problèmes d'élimination des cendres.

- **Allocation sous-optimale des ressources en termes d'efficacité énergétique et de ressources, ainsi que d'empreinte carbone, en particulier pour le bois :**
  - Une utilisation de l'énergie qui intervient trop tôt dans la chaîne de processus (ne suivant pas la cascade de l'utilisation des matériaux ou l'utilisation circulaire, avant l'utilisation de l'énergie).
  - Applications impliquant uniquement la production de chaleur à basse température au lieu de la puissance combinée ou production de combustible et de chaleur, qui permet d'atteindre une valeur énergétique plus élevée et a un impact plus important en termes de substitution des combustibles fossiles.

- Ces activités entraîneraient une réduction de la contribution maximale à la protection du climat, à la conservation des ressources et au développement durable.
- **Exigences techniques élevées pour l'utilisation de la biomasse solide de qualité inférieure.** Par rapport au bois, la biomasse solide provenant de sources non ligneuses, comme les résidus de céréales et le marc de café, est un combustible de moindre qualité, en raison de sa teneur élevée en cendres, en azote et en autres composés qui interfèrent avec un traitement thermique. Ainsi, de nouvelles technologies de combustion permettant d'exploiter le potentiel énergétique du bois et d'autres types de biomasse solide sont nécessaires, et en particulier celles pouvant être appliquées à des combustibles de faible qualité.

## 2 Matières premières nationales

### 2.1 Potentiels du bois-énergie

Le bois-énergie comprend toutes les sources de biomasse ligneuse utilisées à des fins énergétiques (bois de forêt, bois d'arbres hors forêt, résidus de scieries et de menuiseries, et déchets ayant déjà fait l'objet d'une utilisation matérielle). En principe, seul le bois cultivé en Suisse a été pris en compte dans l'analyse de potentiel présentée ci-dessous, qui se base sur une précédente étude exhaustive (Thees *et al.* 2017; Burg *et al.* 2018). Cependant, le bois résiduel (provenant des menuiseries) et les déchets contiennent du bois venant de l'étranger, pourtant comptabilisé comme un potentiel du pays disponible. Les pellets sont un dérivé principalement des résidus de scierie et n'ont pas été inclus dans les potentiels de bois-énergie pour éviter un double comptage.

Il faut noter que les potentiels de bois-énergie présentés ici font partie de l'étude mentionnée ci-dessus, qui couvre tous les types de biomasse pertinents sur la base des données suisses de 2014 à 2016. Il n'existe pas d'études comparables en Suisse basées sur des données plus récentes. Les potentiels dépendent du marché et du climat et ne sont donc pas constants; néanmoins, les chiffres restent fiables dans leur ordre de grandeur.

La limite supérieure – **le potentiel théorique** – de toutes les ressources nationales de biomasse est de 209 PJ/a d'énergie primaire (Burg *et al.* 2018) (fig. 1). La part du bois-énergie théoriquement disponible est de 56%, ce qui correspond à 117 PJ/a. Les principales contraintes qui pèsent sur la disponibilité de la biomasse produite de manière durable pour l'utilisation énergétique sont dues à des restrictions écologiques et économiques. Si l'on tient compte de ces restrictions, le potentiel théorique de production annuelle de bio-énergie est approximativement divisé par deux, ce qui signifie que **le potentiel durable** est de 97 PJ/a pour tous les types de biomasse et de 50 PJ/a si l'on considère uniquement la biomasse ligneuse (50 PJ/a ~ 14 TWh/a, soit 5,43 Mt/a de CO<sub>2</sub> biogénique). Si l'on soustrait la biomasse ou le bois-énergie déjà utilisés, on obtient le

**potentiel durable supplémentaire:** environ 44 PJ/a de la biomasse suisse (4% de la consommation brute d'énergie), ou **14 PJ/a dans le cas de la biomasse ligneuse, sont disponibles en plus pour produire de l'énergie** (fig. 1). Cependant, ces potentiels ne sont actuellement pas utilisés, principalement pour des raisons économiques.

Le **bois de forêt** présente le plus grand potentiel de bois-énergie de toute la biomasse ligneuse (fig. 1). Son potentiel durable (26 PJ/a) est supérieur à la somme des trois autres types de biomasse ligneuse (24 PJ/a). La distribution spatiale montre des différences considérables entre les plaines et les régions montagneuses (pour plus de détails, voir la section 2.2.4). Le potentiel durable de **résidus de bois** (8 PJ/a) se trouve principalement sur le Plateau, notamment dans le nord-est de la Suisse, où sont concentrées les industries du bois. Si la moitié du potentiel se trouve dans les scieries, l'autre moitié est dispersée dans de nombreuses installations de transformation du bois. Il n'y a pas de potentiel supplémentaire pour ces résidus de bois, qui sont utilisés comme énergie ou comme matériau pour les panneaux de particules, selon la situation du marché. Le potentiel durable de **déchets de bois** est de 12 PJ/a, avec de grandes différences entre les régions. Elle varie de quelques kilos à plus de 200 kg par habitant et par an. Un tiers du potentiel théorique des déchets de bois est exporté et utilisé à l'étranger, la moitié pour des matériaux et l'autre moitié pour une utilisation énergétique (Erni *et al.* 2017; Thees *et al.* 2017). Le potentiel durable des **arbres hors forêts** (5 PJ/a) se situe principalement dans les régions peuplées du Plateau et des vallées du Rhin et du Rhône. Des potentiels existent également dans les régions plus alpines, principalement sous la forme de haies et le long des cours d'eau, mais ils sont peu accessibles.

Pour mettre en œuvre le potentiel du bois-énergie pour la transformation du système énergétique, il est important de comprendre sa distribution au niveau communal (Fig. 2). **Exprimés par km<sup>2</sup> de terrain, les potentiels les plus importants se trouvent dans le Jura et sur le Plateau (fig. 2 à gauche). Si l'on considère les potentiels des**

## Énergie primaire (PJ par an)

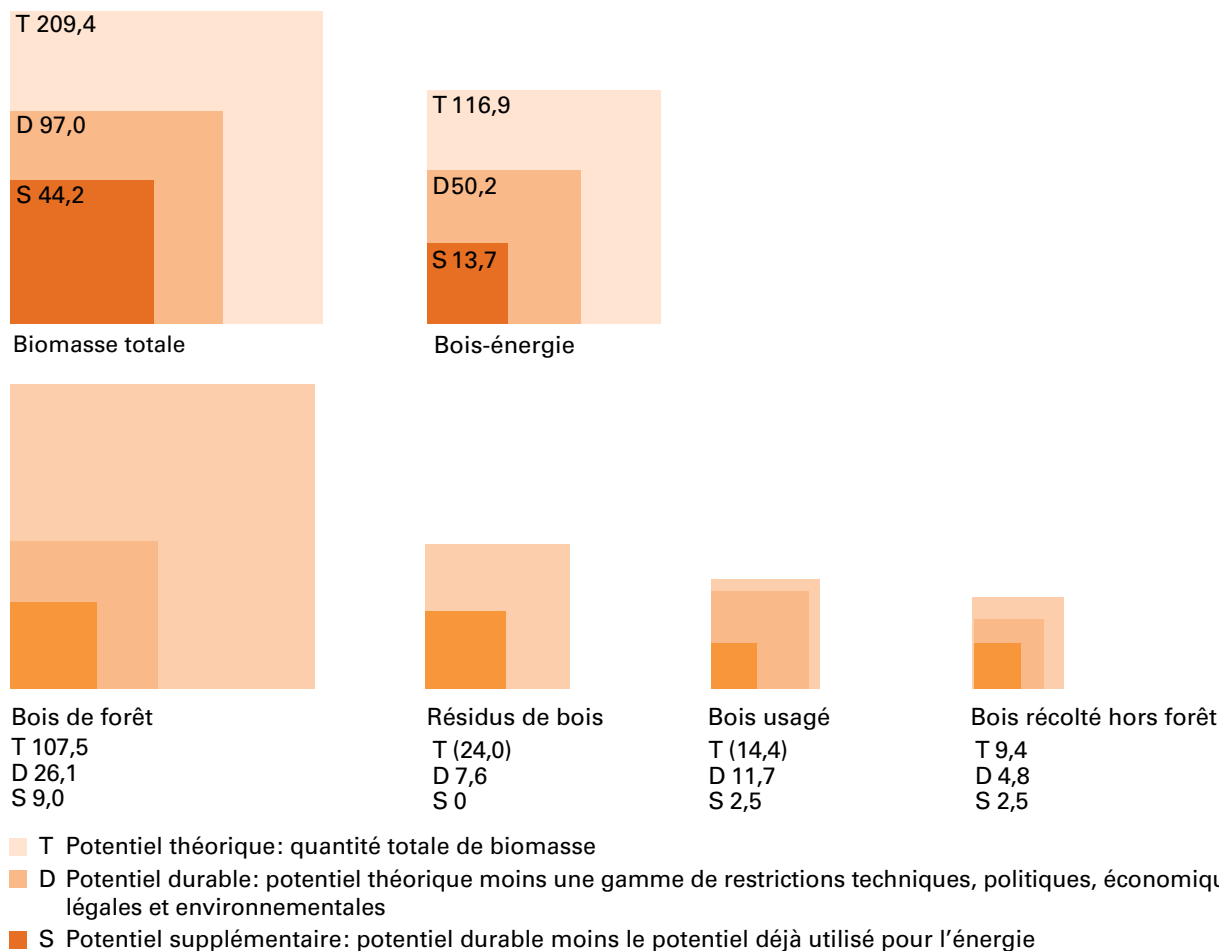


Figure 1: Biomasse totale annuelle et potentiel de bois-énergie des quatre types de biomasse ligneuse en Suisse. La surface de chaque carré est proportionnelle à la quantité d'énergie primaire qu'il représente. Pour le bois-énergie provenant des forêts, le chiffre se réfère aux forêts dont l'exploitation d'intensité moyenne équivaut à une réduction modérée des stocks et dont le marché est moins favorable au bois-énergie (c'est-à-dire que la valorisation sous forme de matériaux domine le marché du bois; Thees *et al.* 2020). Remarque: le bois de forêt et les arbres hors forêt sont les sources de toute la biomasse ligneuse suisse et de ses utilisations ultérieures. Par conséquent, l'addition des potentiels théoriques du bois forestier et des résidus ou déchets de bois industriels conduit à un double comptage, car le potentiel du bois transformé (résidus de bois, bois usagé) est en partie basé sur les arbres qui ont poussé dans le pays. Il convient également de noter que les potentiels peuvent être soumis à des incertitudes difficiles à quantifier (voir section 1.3).

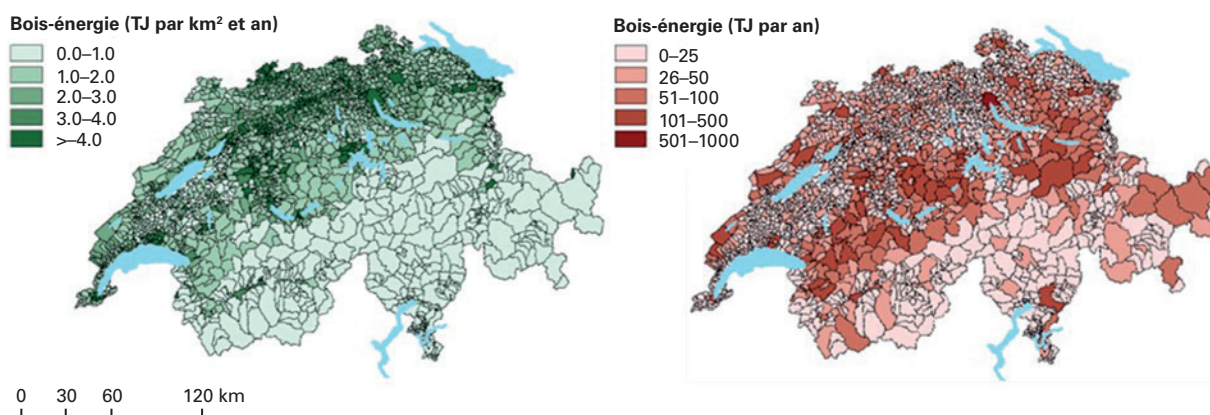


Figure 2: Potentiels de bois-énergie écologiquement et économiquement durables par commune en 2014: Valeurs relatives en térajoules (1 TJ = 0,001 PJ) par km<sup>2</sup> et par an (à gauche) et valeurs absolues en TJ par an (à droite). De plus amples informations sont disponibles sur [map.geo.admin.ch](http://map.geo.admin.ch) (sous « biomasse ligneuse »).

différentes communes, les plus importants se trouvent dans les Préalpes et les Alpes (fig. 2 à droite).

Pour mieux comprendre la situation sur le Plateau, la faisabilité de la transition énergétique dans le canton d'Argovie a fait l'objet d'une étude approfondie concernant toutes les formes d'énergie renouvelable (Lemm *et al.* 2020). Différentes stratégies pour satisfaire la demande locale d'électricité, de chaleur et de carburant d'ici 2035 ont été explorées, en particulier la contribution potentielle de la biomasse. Les résultats indiquent que les sources d'énergie renouvelables disponibles de manière durable en Argovie ne seront probablement pas suffisantes pour couvrir la demande énergétique prévue en 2035, ni avec les technologies de conversion de la biomasse actuellement disponibles, ni avec celles à venir. Dans ces scénarios, 74% de la demande énergétique pourraient être satisfaits par des sources d'énergie renouvelables. **L'énergie de la biomasse peut augmenter le degré d'autarcie jusqu'à 13%, le bois-énergie y contribuant pour moitié environ.** Selon le scénario, 26–43% (2500–5700 GWh) de la demande totale d'énergie n'est pas satisfaite, notamment pour la mobilité. Ces résultats démontrent que la transformation du système énergétique ne peut être envisagée uniquement au niveau local; le système global au niveau national et international doit être pris en compte pour élaborer des solutions durables et fiables.

## 2.2 Bois de forêt

**Le bois de forêt est la principale source de bois-énergie, mais son potentiel n'est pas une quantité stable.**

En outre, il dépend de divers facteurs, tels que les stratégies de gestion forestière liées aux restrictions écologiques, la demande sur les marchés du bois et de l'énergie, ainsi que les coûts d'approvisionnement et les subventions dans le secteur forestier. Ces facteurs sont, à leur tour, influencés par des conditions telles que les politiques en matière de ressources et d'énergie, ainsi que par l'environnement, le climat et les changements interdépendants de ces deux éléments.

### 2.2.1 Stratégies de gestion forestière et situation du marché

Les stratégies de gestion forestière et les situations de marché ont une grande influence sur les potentiels de bois de chauffage. Dans l'analyse des potentiels de bois-énergie (Thees *et al.* 2020), les stratégies de gestion forestière suivantes ont été appliquées:

- Aucune évolution**, ce qui représente un accroissement continu du stock (ACS). Cette stratégie reflète les pratiques actuelles de récolte et de gestion en Suisse et peut donc être considérée comme un scénario de référence. Elle entraîne une augmentation

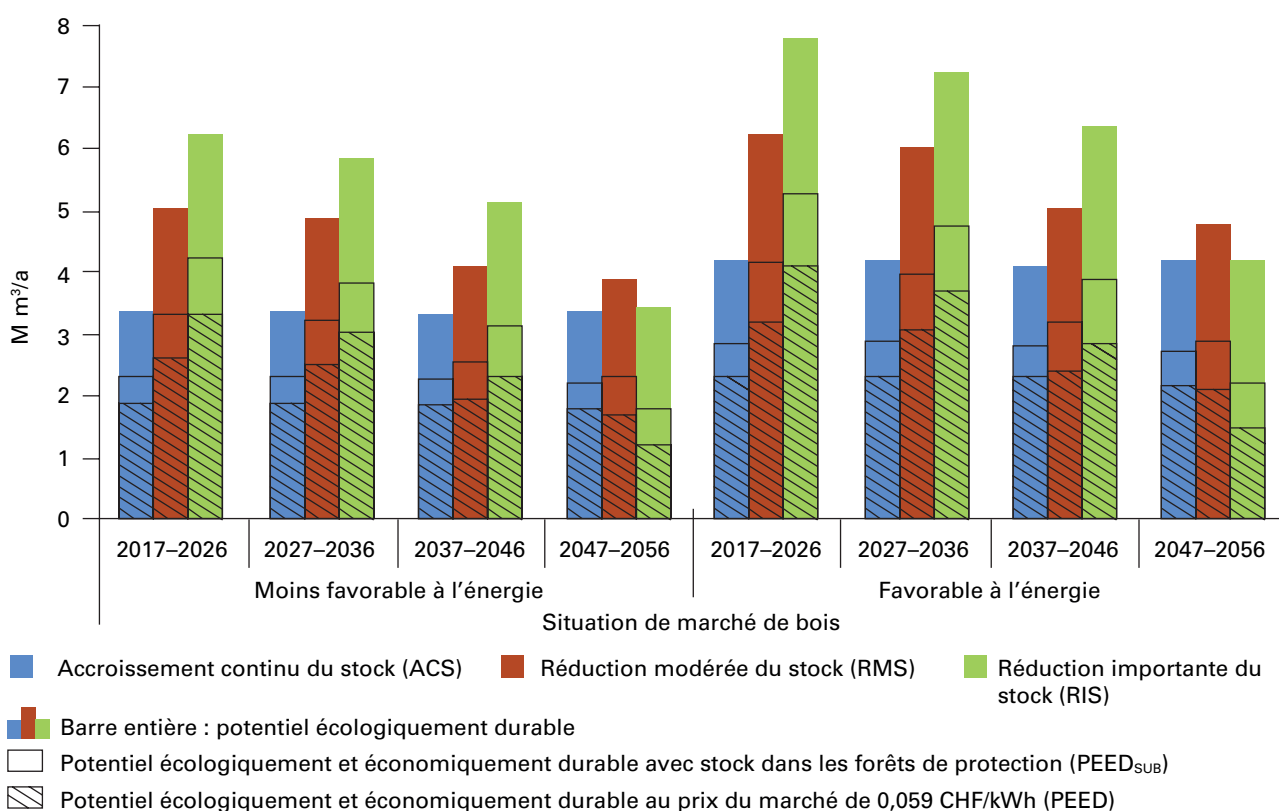


Figure 3: Potentiel de production de bois-énergie durable (en volumes [Mm<sup>3</sup>/a]) pour chacune des quatre décennies, selon trois scénarios de gestion forestière (ACS, RMS, RIS) et deux situations de marché du bois (moins favorable à l'énergie et favorable à l'énergie) dans toute la Suisse (Thees *et al.* 2020).

des stocks sur pied dans toutes les régions, à l'exception du Plateau; en moyenne, le stock s'élève actuellement à 370 m<sup>3</sup>/ha.

- b. **Gestion d'intensité moyenne**, représentant une réduction modérée du stock (RMS). Cette stratégie vise des stocks en croissance avec 300–310 m<sup>3</sup>/ha d'ici 2046 et a pour but d'accélérer cette croissance.
- c. **Gestion à haute intensité**, représentant une réduction importante du stock (RIS). Cette stratégie tient compte d'une forte demande de bois-énergie en provenance des forêts d'ici 2046, ce qui conduit à des éclaircies plus fréquentes et à des rotations plus courtes de 40%, avec des stocks sur pied cibles de 250 m<sup>3</sup>/ha.

Si l'on fait la moyenne des trois scénarios de gestion forestière, le potentiel de bois-énergie des forêts était de 22% plus élevé dans une situation de marché du bois plus favorable à l'énergie que dans une situation moins favorable à l'énergie (fig. 3). Cette dernière a conduit à une plus grande utilisation sous forme de matériau. Alors que le scénario de gestion « aucune évolution » a permis l'approvisionnement le plus constant sur plusieurs décennies, les deux **scénarios de réduction des stocks ont produit des potentiels totaux cumulés plus importants**. Sur l'ensemble de la période, les scénarios de réduction des stocks ont conduit à une augmentation de 32% (RMS) ou de 52% (RIS) des potentiels écologiquement durables (PED) (8–16 PJ/a ou 1,1–2,2 Mm<sup>3</sup>/a) par rapport au scénario de gestion habituel ACS. Lorsque les restrictions économiques ont également été prises en compte, les scénarios de gestion plus intensive ont conduit à une augmentation de 25% (RMS) ou 41% (RIS) du potentiel écologiquement et économiquement durable avec des subventions dans les forêts de protection (PEEDsub) (4–9 PJ/a ou 0,6–1,2 Mm<sup>3</sup>).

Les stratégies de gestion forestière plus intensives ont montré un surplus de biomasse à court et moyen terme (fig. 3). **Adopter ces stratégies pourrait offrir des potentiels supplémentaires sur une base temporaire pendant la phase de transition énergétique.** Cepen-

dant, contrairement à la stratégie de gestion forestière de réduction importante des stocks (RIS), la stratégie de réduction modérée des stocks (RMS) n'a pas entraîné une baisse considérable de la quantité de bois-énergie provenant des forêts, prévue pour 2050. Une carte interactive sur [www.waldwissen.net](http://www.waldwissen.net) permet de calculer, au niveau des cantons, le potentiel écologiquement durable dans différentes conditions de sylviculture et d'exploitation (Erni *et al.* 2021).

## 2.2.2 Coûts et revenus de l'approvisionnement

Les coûts d'approvisionnement (récolte, transport et coupe) d'une part et les revenus du bois-énergie d'autre part influencent largement les potentiels durables résultant des différents scénarios de gestion forestière. Aux prix actuels du marché de 0,059 CHF/kWh, 1,9 Mm<sup>3</sup> de combustible de feuillus et 0,6 Mm<sup>3</sup> de combustible de conifères pourraient être mobilisés par an (fig. 4). En raison de leur contenu énergétique plus élevé par unité de volume, la plupart des combustibles à base de bois de feuillus pourraient être produits à moindre coût; la fourniture de bois-énergie de conifères est plus coûteuse et plus uniformément répartie sur toutes les classes de coûts. Lorsque les prix du marché sont inférieurs à 0,059 CHF/kWh, les feuillus dominent de plus en plus l'approvisionnement en bois-énergie, tandis que la part des conifères augmente lorsque les prix du marché dépassent 0,08 CHF/kWh. **Une augmentation du prix de 0,01 CHF/kWh par rapport à un prix de référence de 0,059 CHF/kWh augmenterait le bois-énergie disponible de ~1 Mm<sup>3</sup>/a** (Thees *et al.* 2020).

**Le transport de la biomasse** représente une part importante du coût final et du prix de l'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques, et il entraîne des émissions de gaz à effet de serre. Une analyse technico-économique du transport de la biomasse (Schnorf *et al.* 2021) a identifié les chaînes de transport les plus courantes, du fournisseur au consommateur final. Les dis-

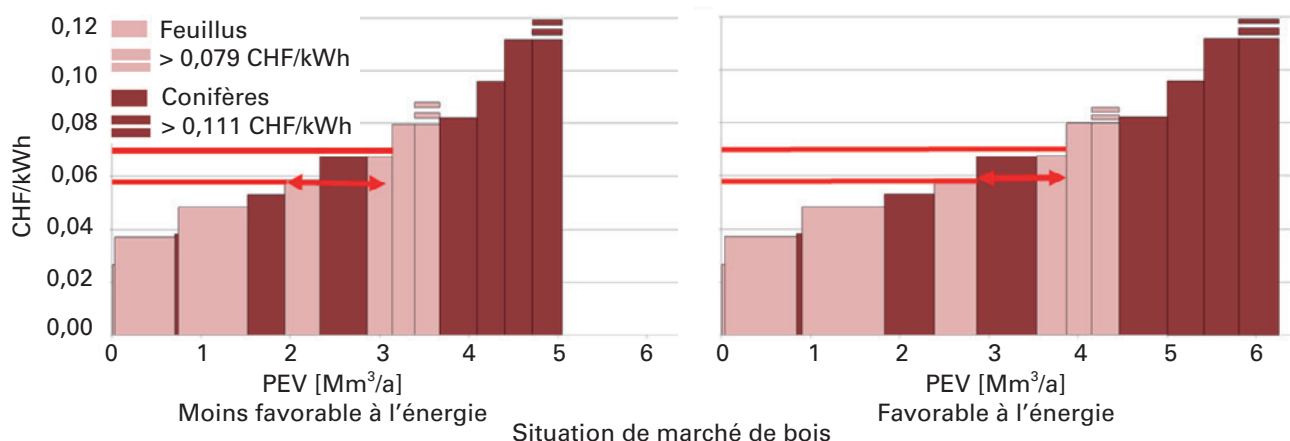


Figure 4: Effet des prix de l'énergie sur les potentiels annuels de bois-énergie. Le potentiel écologiquement viable (PEV) entre 2017 et 2026 est illustré pour le scénario de gestion forestière de réduction modérée des stocks dans une situation de marché moins favorable (à gauche) et favorable (à droite). La largeur des barres reflète le volume supplémentaire par classe de coût qui serait disponible à un prix de marché donné. Les lignes rouges montrent le potentiel supplémentaire pour une augmentation de prix de 0,01 CHF/kWh.



tances de transport jusqu'à ce dernier sont comprises entre 1 et 15 km pour le bois de chauffage (bûches ou morceaux de bois prêts à être brûlés) et entre 5 et 30 km pour les plaquettes de bois. Le transport des plaquettes est plus efficace que celui des bûches en termes de coût, de bilan énergétique et d'émissions de CO<sub>2</sub>, sauf lorsque des transporteurs de bois de chauffage hautement professionnalisés sont impliqués. **En Suisse, le principal obstacle au transport de la biomasse est le coût** plutôt que la consommation d'énergie des véhicules ou les émissions de CO<sub>2</sub>.

### 2.2.3 Subventions

La gestion des forêts de protection (jusqu'à 90% de la surface forestière dans les régions de montagne) est subventionnée en Suisse pour garantir un entretien minimal selon les directives nationales (Losey 2013). Ainsi, **les subventions disponibles pour la gestion des forêts de protection augmentent la quantité de bois-énergie disponible**. Thees *et al.* (2020) ont constaté que les quantités d'énergie pouvaient être augmentées de 25% en moyenne et les volumes de bois de 28% en moyenne dans les trois scénarios de gestion présentés sur la figure 3. La différence entre les quantités d'énergie et les volumes de bois reflète la prédominance des conifères dans les zones montagneuses, ces derniers ayant un contenu énergétique plus faible par unité de volume. Comme prévu, les augmentations relatives les plus importantes de la quantité de bois-énergie provenant des forêts, résultant des subventions, se produisent dans la région alpine.

### 2.2.4 Différences régionales

**Les analyses régionales ont révélé des résultats contrastés entre les régions alpines et non alpines et fournissent des indications sur les régions qui pourraient bénéficier d'investissements pour promouvoir l'utilisation durable du bois-énergie.** Les contraintes économiques ont réduit les potentiels absolus de bois-énergie dans les régions alpines à moins de la moitié du PED dans les scénarios de réduction des stocks et à un peu plus de la moitié dans le scénario ACS. Cependant, dans une large mesure, ces potentiels ne peuvent être mobilisés dans les régions alpines qu'avec l'aide de subventions. En revanche, les réductions du potentiel de bois-énergie dues aux contraintes économiques étaient beaucoup plus faibles dans le Jura et sur le Plateau, où le terrain est plus accessible et où les peuplements sont composés majoritairement de feuillus. Ce sont donc les régions où les investissements stratégiques seraient particulièrement avantageux. Cependant, même dans le Jura et sur le Plateau, la disponibilité de bois-énergie supplémentaire provenant des forêts est assez limitée (par ex. scénario RMS sur la période 2017–2026: Jura 2,7 PJ/a, Plateau 4,4 PJ/a).

**Les points hotspots et coldspots de la bioénergie ont été identifiés** (Fig. 5) et comparés aux caractéristiques socio-économiques (Mohr *et al.* 2019). Cette description complète de la situation au niveau local peut contribuer à une mise en œuvre efficace de la bioénergie. **Les hotspots, qui représentent un potentiel élevé de bois-énergie provenant des forêts par unité de surface, se trouvent dans le nord du pays, c'est-à-dire sur le Plateau et dans le Jura, tandis que les coldspots sont situés**

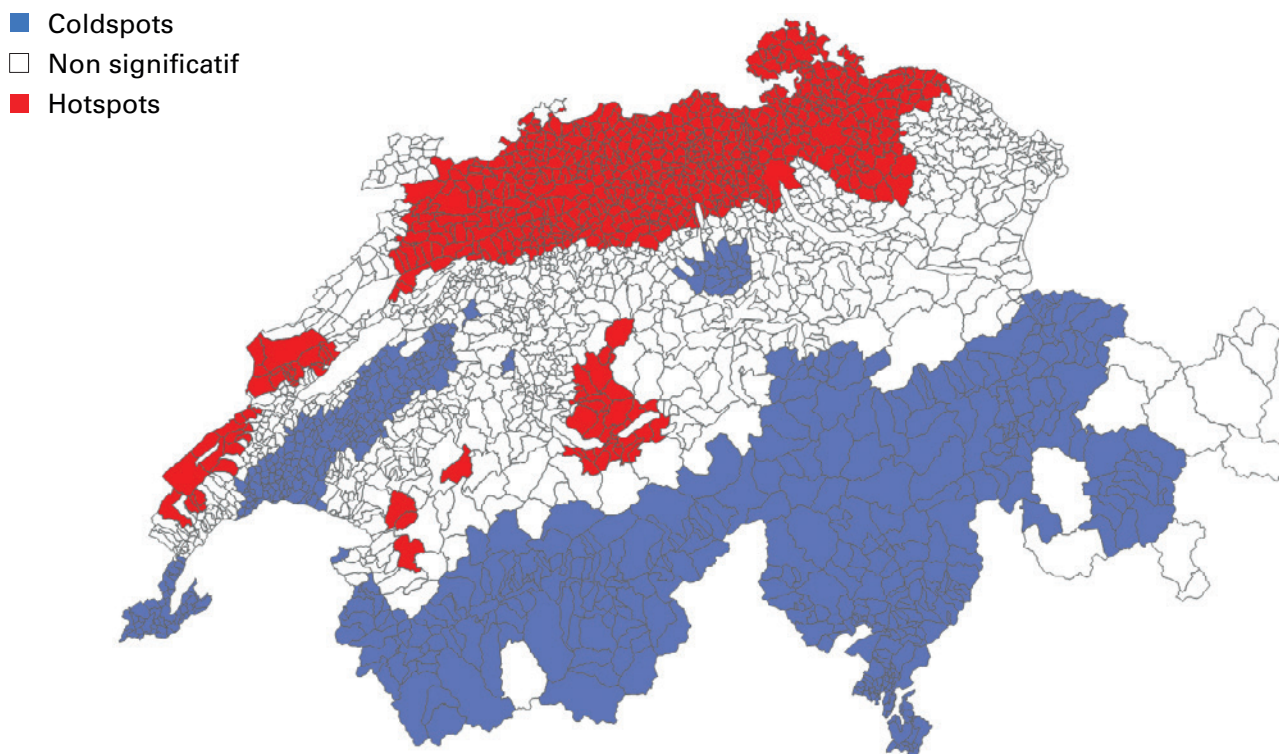


Figure 5: Hotspots et coldspots du potentiel durable par unité de surface du bois-énergie provenant des forêts.

**dans les Alpes.** Dans les régions alpines de haute altitude, escarpées et éloignées, la récolte du bois est souvent trop coûteuse, ce qui se traduit par un potentiel de ressources durables plus faible. Les caractéristiques socio-économiques, telles que le revenu des ménages, l'orientation politique et la densité de population, se sont avérées très différentes entre hotspots et coldspots. La comparaison montre une corrélation plutôt qu'une causalité, mais elle met tout de même en évidence des synergies entre les domaines, et les connaissances acquises par l'analyse peuvent être appliquées à des projets dans des domaines similaires. Par exemple, **l'attitude de la population vis-à-vis de la transition énergétique est en moyenne plus positive dans les coldspots** que dans les hotspots. Ainsi, inclure davantage la population locale dans le débat sur l'énergie pourrait contribuer à garantir que les endroits les plus favorables au développement de la bioénergie bénéficient de son soutien.

### 2.2.5 Opportunités et risques

**En ce qui concerne les opportunités, le bois est une ressource renouvelable et une source de carbone biogénique unique qui peut être utilisée de nombreuses façons, tant comme matériau que pour l'énergie.** Des utilisations séquentielles multiples, c'est-à-dire **utilisations en cascade**, sont possibles, avec une production d'énergie en bout de chaîne. L'utilisation successive du même bois est particulièrement efficace et permet d'économiser les ressources. Elle offre des avantages écologiques et économiques, tels que la mitigation des GES, le stockage du carbone, la création de valeur ajoutée, le soutien à la transition énergétique et une meilleure intégration du bois dans l'économie circulaire. La **facilité de stockage** du bois, sur pied en forêt ou en stock, est une autre propriété importante; elle permet une utilisation flexible dans le temps des ressources en bois, une caractéristique particulièrement précieuse dans le contexte de l'utilisation de l'énergie. En outre, **le bois, tant comme matière première que comme produit, stocke le carbone** et contribue ainsi à l'objectif de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (Thürig et Kaufmann 2008, 2010; Werner *et al.* 2010; Steubing 2013; Mehr *et al.* 2018). Le bois a une **teneur élevée en carbone** (environ 50 % de la masse sèche, par exemple Diestel et Weimar 2014) et convient donc à la production durable de produits chimiques et de carburants (Brethauer *et al.* 2021). En raison de sa **production décentralisée**, le bois est disponible dans tout le pays. Là encore, la plus grande partie est produite dans les forêts, qui apportent ainsi **un service écosystémique important** grâce à leur gestion durable et multifonctionnelle, lorsque le bois est produit et récolté d'une manière écologiquement rationnelle. La production de bois dans les forêts et les paysages crée en outre des emplois, représentant un important gisement dans les zones rurales, et contribue à la conservation des espèces et à la biodiversité.

**En ce qui concerne l'énergie, le bois peut être utilisé pour générer plusieurs différentes utilisations finales: chaleur, électricité et carburant.** Par exemple, lors d'un déficit d'électricité en hiver, il est possible d'augmenter la production en utilisant du bois, ou de réduire la de-

mande d'électricité des pompes à chaleur en augmentant le nombre de systèmes de chauffage au bois. En raison de la facilité de stockage du bois, la flexibilité du moment de son utilisation pour l'énergie est considérable, et il convient au couplage sectoriel. À cet égard, le bois-énergie peut **compenser les fluctuations des énergies renouvelables** telles que l'énergie éolienne ou solaire. Il est considéré comme neutre en CO<sub>2</sub>, car il n'émet pas plus de ce gaz dans l'atmosphère pendant sa combustion qu'il n'en a absorbé pendant la croissance de la plante. Cela est **favorable en tant que substitut aux combustibles fossiles**, dont l'utilisation augmente la quantité totale de carbone dans la biosphère-atmosphère. C'est pourquoi les exploitants d'installations ne sont pas tenus d'acheter des permis d'émission pour la biomasse dans le cadre du système communautaire d'échange de quotas. En outre, la bioénergie à base de bois (et de produits non ligneux) associée au captage et au stockage du carbone (BECCS; voir section 3.1, fig. 7) est l'une des options techniques susceptibles de produire des émissions négatives (AIE 2020).

**En Europe centrale, le bois-énergie provenant des forêts** (assortiments de bois fins ou de mauvaise qualité) est généralement un sous-produit de la récolte des grumes; néanmoins, le bois-énergie est devenu le produit principal de nombreuses entreprises forestières suisses (>50 % des assortiments traités). C'est également une conséquence de la récolte non planifiée après des événements extrêmes provoqués par le changement climatique et de la migration de l'industrie de la pâte et du papier. En sylviculture, la production de bois-énergie génère non seulement des revenus, mais permet également de refinancer l'entretien des peuplements forestiers et de les protéger contre les maladies causées par les insectes et les champignons. **D'un point de vue récent et global, l'utilisation de bois-énergie provenant des forêts a pu être soumise à des critiques.** Des centaines de scientifiques exigent d'arrêter complètement l'utilisation directe du bois-énergie provenant des forêts pour des raisons de protection du climat (Raven *et al.* 2021). Néanmoins, d'après l'AIE, cette exigence est basée sur des erreurs d'appréciation (AIE 2020, 2021). L'AIE (2020) a tenté de dissiper ces malentendus concernant l'utilisation de la biomasse forestière à des fins énergétiques comme stratégie d'atténuation du changement climatique dans un résumé compact, mais le débat se poursuit (Norton *et al.* 2021), Sterman *et al.* 2022). Dans de nombreux cas, on constate un manque de connaissances sur la gestion durable des forêts en Europe. Par exemple, Schulze *et al.* (2021) ont indiqué, d'un point de vue allemand, que la gestion durable des forêts et l'utilisation connexe de matériaux et d'énergie du bois récolté contribueraient davantage à long terme à la protection du climat que le développement des forêts naturelles sans aucune utilisation du bois. En outre, Blair *et al.* (2021) ont montré que les chaînes d'approvisionnement de la biomasse ligneuse issue des forêts répondent aux objectifs de durabilité des Nations unies, qui incluent également des objectifs autres que le stockage du CO<sub>2</sub>.

Fehrenbach *et al.* (2022) arrivent à des résultats contraires pour l'Allemagne et demandent que le bilan du stockage du carbone dans les forêts soit également pris en compte dans le bilan des gaz à effet de serre des produits en bois.

**Les résultats de telles analyses de l'utilisation du bois de forêt dépendent fortement de la durée ainsi que des limites du système et de la différenciation de l'analyse.** En ce qui concerne l'utilisation énergétique, il est donc, par exemple, pertinent de voir au regard de l'effet sur le climat

- si, en plus de la combustion traditionnelle pour la production de chaleur, des technologies modernes de transformation qui produisent non seulement de la chaleur mais aussi de l'électricité et des carburants avec une grande efficacité énergétique et une faible émission de CO<sub>2</sub> (voir chapitres 3 et 4) sont prises en compte;
- dans quelle mesure les différents sites, essences, périodes de rotation ainsi que les forces et fréquences des mesures de récolte, qui varient en Suisse (et en Europe centrale), sont considérés de manière différenciée;
- dans quelle mesure il est tenu compte de la part différente, pour les résineux et les feuillus, du bois récolté destiné à une utilisation énergétique (et non à une utilisation matérielle, à privilégier du point de vue du CO<sub>2</sub>).

Il existe **des limites institutionnelles** aux augmentations à court terme de la récolte de bois-énergie. En Suisse, environ 245 000 petits propriétaires forestiers privés possèdent 29% de la forêt (surface moyenne de 1,5 ha). La volonté de ces propriétaires de récolter (beaucoup) plus dans les prochaines années ou même de récolter tout court est souvent surestimée. Une grande partie de ceux-ci n'ont pas un comportement purement économique. Dans le cas des plus petites forêts privées, les propriétaires ne considèrent souvent pas leur forêt comme une véritable source de revenus (problème dit de l'insignifiance). En outre, les communes, qui sont responsables de 50% de la surface forestière en Suisse, n'ont souvent pas un comportement orienté vers le profit pour diverses raisons. **La structure de propriété peut fortement influencer les volumes et la vitesse de récolte du bois, et les effets des incitations financières sont limités.** En outre, la capacité de récolte, en particulier le nombre de personnes affectées à celle-ci, devrait alors être considérablement augmentée à court terme.

Au niveau opérationnel, les **risques environnementaux** possibles de l'utilisation du bois-énergie en forêt sont principalement liés à la surexploitation (mais aussi à la sous-exploitation), ainsi qu'à la récupération de broussailles, de feuilles et d'aiguilles de telle sorte que l'équilibre nutritif des sols forestiers soit affecté. Les services forestiers cantonaux suisses contrôlent le respect des dispositions légales et garantissent une gestion durable des forêts afin de minimiser ces risques. Les systèmes de certification forestière, tels que FSC et PEFC, poursuivent le même objectif. À un niveau plus élevé, il existe un **risque de réduction de rentabilité des ressources** en raison de la proportion élevée de l'utilisation du bois-énergie dans la forêt ou de l'utilisation directe du bois brut à des fins énergétiques, en négligeant l'utilisation en cascade. Cette allocation de la ressource exacerbe la concurrence avec les industries du bois matériau (par exemple, la produc-

tion de panneaux de particules) sur les marchés d'approvisionnement et peut encourager leur migration.

Les **risques éventuels d'un manque d'efficacité économique** de la récolte du bois à des fins énergétiques sont liés à l'approvisionnement limité en bois-énergie, à son approvisionnement coûteux dans les forêts et le paysage, et aux processus ultérieurs relativement coûteux de conversion, de purification des gaz résiduels, de distribution et d'élimination. Ces risques peuvent être contrôlés par une utilisation judicieuse de l'énergie, par exemple en couvrant les pics de demande par la production de chaleur industrielle ou en générant des produits énergétiques à haute valeur ajoutée comme le carburant d'aviation. Les **risques éventuels d'un approvisionnement incertain en matières premières** aux installations de conversion sont également importants. Toutefois, dans le cas du bois-énergie, il est possible de conclure des contrats d'approvisionnement à long terme avec les exploitations forestières, ce qui permet de réduire ces risques.

## 2.3 Disponibilité future du bois-énergie

Selon les calculs de certains modèles (Erni *et al.* 2020), **on peut s'attendre à ce que le potentiel énergétique durable du bois augmente légèrement jusqu'en 2035, puis diminue un peu jusqu'en 2050** (fig. 6). L'application de la stratégie de gestion forestière habituelle (exploitation forestière < croissance) se traduit par un potentiel durable futur de bois-énergie plutôt constant. Par rapport à la biomasse ligneuse durable totale, on peut s'attendre à ce que les stratégies alternatives de gestion forestière se traduisent par des parts plus importantes (4–7%) de la consommation annuelle brute d'énergie (énergie primaire) au cours des 15 prochaines années (2020, 2035). La part de la biomasse ligneuse durable par rapport à l'ensemble de la biomasse durable varie de 42–64% d'ici 2035 à 37–57% d'ici 2050.

Une autre considération dans ce contexte est que la convergence politiquement souhaitée vers **une cascade et une économie circulaire** en Suisse (OFEV, OFEN et SECO 2018) et en Europe (par exemple AEE 2018; Husgafvel *et al.* 2018) **pourrait temporairement diminuer les potentiels de bois-énergie** provenant des forêts et des résidus. Les assortiments de bois de faible valeur pourraient être de plus en plus transformés en produits en bois, tels que des matériaux d'isolation et d'emballage, afin d'éviter les matières premières fossiles, et donc concurrencer l'utilisation pour l'énergie. Le potentiel du bois-énergie pourrait également diminuer si les résidus et les déchets issus de la transformation des produits sont mieux intégrés dans les cascades (innovantes) et le recyclage. Plus tard, lorsque le bois sera utilisé plus efficacement pour les matériaux, on pourra s'attendre à un transfert du bois-énergie vers le bois usagé (Erni *et al.* 2020). On peut également s'attendre à ce que le bois-énergie devienne non compétitif et soit finalement remplacé sur le marché de la chaleur basse température à mesure que les pompes à chaleur deviennent plus efficaces.

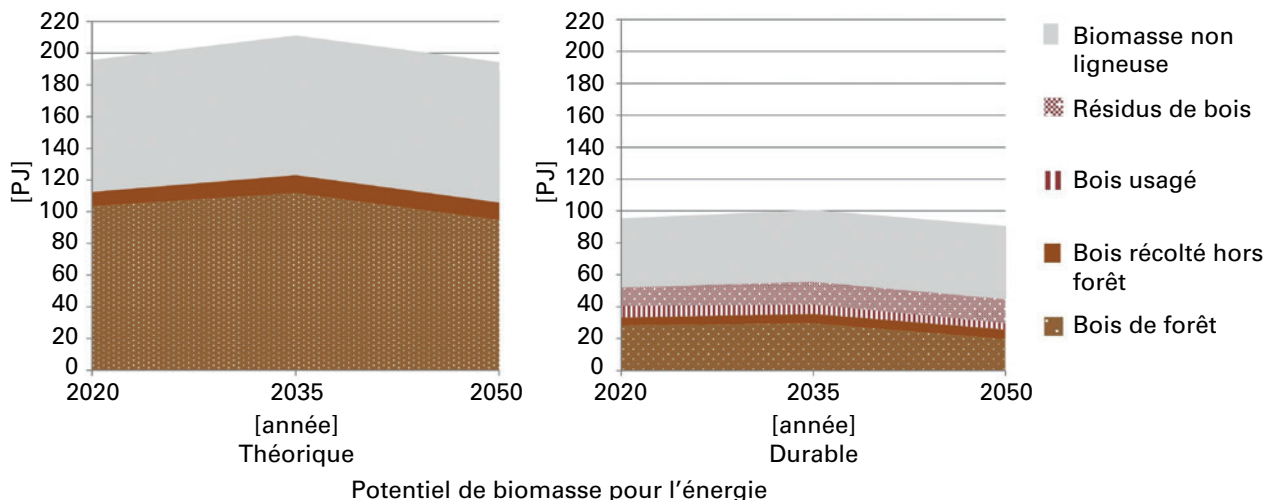


Figure 6: Potentiels annuels théoriques (à gauche) et durables (à droite) de la biomasse, aujourd'hui et à l'avenir. Pour le bois-énergie provenant des forêts, le chiffre se réfère à une stratégie d'exploitation forestière d'intensité moyenne correspondant à une réduction modérée des stocks et à un marché moins favorable au bois-énergie. Dans le potentiel théorique, les déchets et les résidus de bois sont inclus dans les sources d'origine que sont le bois de forêt et les arbres hors forêt. Adapté de Burg *et al.* (2019) et Erni *et al.* (2020, Supplementary Material).

### 3 Technologies d'utilisation du bois-énergie

#### 3.1 Vue d'ensemble

Contrairement aux autres sources d'énergie renouvelables, la biomasse ligneuse peut être utilisée pour une multitude de services énergétiques. Cette variété peut devenir cruciale pour la transition énergétique, car elle flexibilise le système. Toutefois, cette flexibilité demande des chaînes de processus de conversion complexes de la biomasse et donc un vaste champ de recherche et de développement multidisciplinaire (fig. 7). Les sections suivantes décrivent **les contributions de recherche du SCCER BIOSWEET aux principales voies de conversion et d'utilisation de la biomasse ligneuse.**

La combustion de la biomasse ligneuse ou de ses intermédiaires, ainsi que des vecteurs énergétiques qui en

sont dérivés, permet de produire directement de l'électricité et de la chaleur (voir section 3.2). La combustion est donc appliquée pour la production combinée de chaleur et d'électricité (CCE) ou pour la production de chaleur dédiée. À l'avenir, cette dernière sera de préférence réservée à la couverture des pics de consommation (par exemple, en cas de pénurie d'électricité renouvelable en hiver) et à la chaleur industrielle à haute température. La production de vecteurs énergétiques augmente la flexibilité en ce qui concerne le moment et le lieu de l'utilisation (voir la section 3.3 sur la production de combustibles gazeux et la section 3.4 sur la production de combustibles liquides). Il est intéressant de noter que la synthèse des carburants est un processus exothermique; ainsi, une partie du contenu énergétique initial est libérée sous

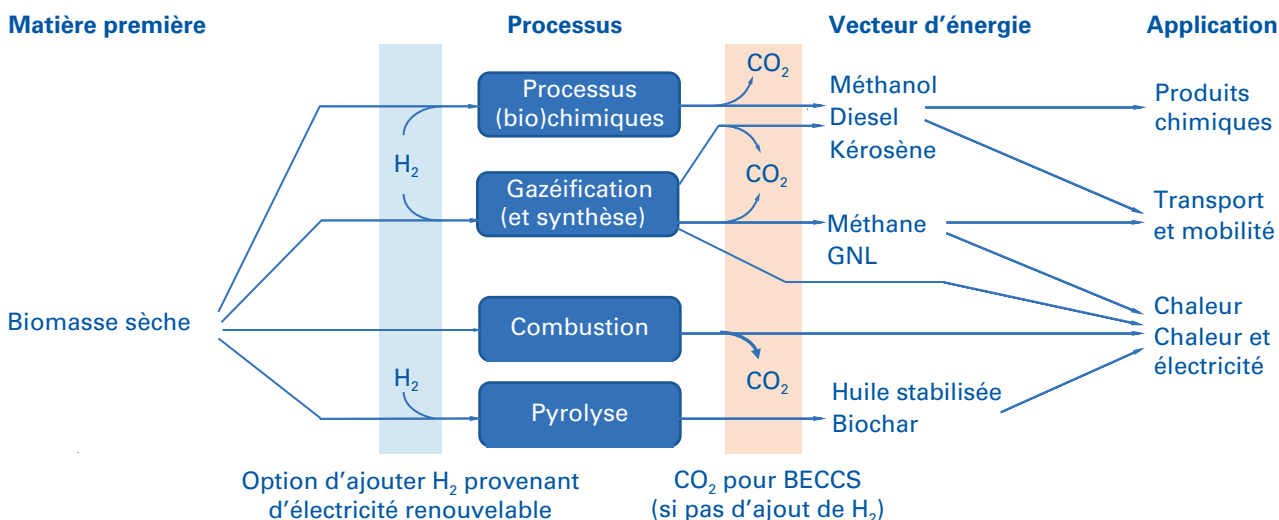


Figure 7: Aperçu des principales voies de conversion de la biomasse sèche (BECCS : bioénergie avec captage et stockage du carbone, GNL: gaz naturel liquéfié). Adapté de Schildhauer *et al.* (2021).

forme de chaleur résiduelle, qui peut à son tour être utilisée pour obtenir des rendements globaux plus élevés (voir section 3.3.4). En outre, la teneur en oxygène de la biomasse ligneuse est supérieure à celle des principaux vecteurs énergétiques respectivement les carburants (essence, diesel et kérosène), et l'oxygène doit donc être éliminé sous forme de CO<sub>2</sub> ou de H<sub>2</sub>O. Cela ouvre la possibilité soit de produire de l'hydrogène renouvelable (Power-to-X) à partir des étapes de synthèse, ce qui augmente la quantité d'énergie générée à partir d'une certaine quantité de biomasse, soit de séparer en aval le CO<sub>2</sub>, qui pourrait ensuite être séquestré avec des émissions de carbone négatives. La production de combustibles liquides pourrait également faciliter une nouvelle conversion en produits chimiques destinés à être utilisés comme matériaux (voir section 3.5 sur le bio-raffinage).

## 3.2 Production d'électricité et de chaleur

### 3.2.1 Situation initiale

La combustion du bois, le combustible de biomasse sèche le plus couramment utilisé, est largement répandue aujourd'hui, principalement pour fournir de la chaleur aux bâtiments, avec une part mineure pour la chaleur industrielle à haute température et pour la production combinée de chaleur et d'électricité. Au cours des dernières décennies, l'évolution vers des rendements élevés et une réduction des émissions polluantes a été obtenue grâce à une variété de technologies pour différents combustibles ligneux et différentes tailles. Dans un contexte résidentiel, des bûches sont utilisées dans des poêles à chargement manuel pour le chauffage direct des pièces (généralement 5–15 kW) et pour le chauf-

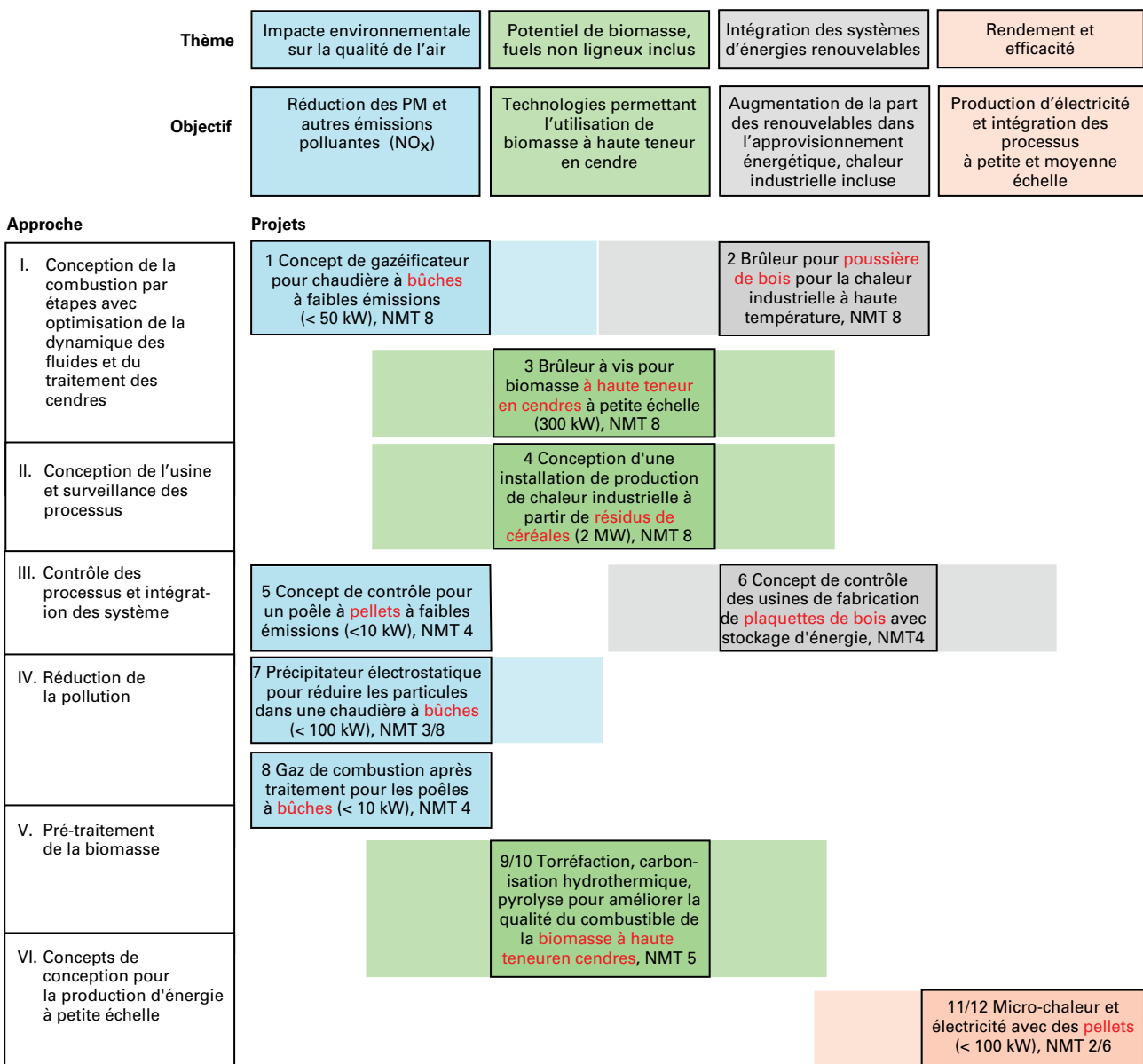


Figure 8 : Approches d'innovation suivies dans les projets SCCER BIOSWEET dans le domaine de la combustion et de la production combinée de chaleur et d'électricité. Les ombres colorées représentent les thèmes des projets qui se chevauchent. Les projets sont numérotés de 1 à 12 pour une meilleure orientation dans le texte. NMT : niveau de maturité technologique.

fage central dans des chaudières à bois (généralement 15–70 kW). Ces dernières sont associées à un réservoir de stockage de la chaleur pour permettre une combustion ininterrompue, évitant ainsi les émissions élevées dues à la réduction de la charge. L'utilisation de bûches a toutefois diminué au cours des trois dernières décennies, passant d'environ 25 PJ/a à 15 PJ/a, tandis que la combustion automatisée du bois a augmenté de moins de 10 PJ/a à plus de 30 PJ/a. Dans la gamme de puissances allant de 200 kW à 10 MW, les chaudières à alimentation mécanique et à grille mobile sont couramment utilisées avec des plaquettes de bois et des résidus de bois déchiquetés pour le chauffage central et le chauffage urbain. En outre, les pellets de bois sont devenus courants sur le marché, permettant la mise en place de systèmes de combustion automatisés à petite échelle. D'autre part, pour les applications à l'échelle industrielle, la combustion en lit fluidisé est utilisée dans un nombre limité d'installations de combustion >10 MW, permettant un rendement plus élevé grâce à une combustion améliorée aussi dans des conditions d'excès d'air minimisé. Bien que des systèmes commerciaux soient disponibles pour une large gamme de puissances, des défis subsistent (voir ci-dessous) pour une utilisation économique et respectueuse de l'environnement, et s'appliquent non seulement au bois, la ressource de biomasse la plus importante quantitativement, mais aussi à certains autres types de biomasse non ligneuse :

- i. **La combustion du bois reste une source d'aérosols nocifs pour la santé** (Zotter *et al.* 2019), notamment à partir de systèmes à petite échelle exploités de manière inappropriée (Nussbaumer 2017, 2020). Cependant, au cours des 30 dernières années, les émissions de particules provenant des foyers ont diminué de 7 000 t/a à 2 000 t/a, alors même que la quantité de bois-énergie utilisée est passée de 3,2 à 5,6 Mm<sup>3</sup> sur la même période.
- ii. **Les ressources de biomasse non ligneuse à forte teneur en cendres** (par exemple, les résidus agricoles secs) sont **encore largement inutilisées** en raison des difficultés techniques, qui sont principalement dues aux constituants inorganiques du combustible tels que les cendres et l'azote.
- iii. **L'intégration des sources renouvelables dans le système énergétique nécessite des adaptations pour répondre aux déséquilibres temporels**, per ex., l'écart saisonnier entre le rendement solaire et la demande peut être partiellement compensé par l'utilisation de la biomasse ligneuse comme vecteur énergétique stockable, tandis que le couplage bois-soleil pourrait permettre d'économiser la biomasse rare en été.
- iv. **La production d'électricité à partir du bois et d'autres biomasses**, par exemple pour compléter l'énergie solaire en hiver, **a un faible rendement et un coût élevé** pour les applications à l'échelle qui intéresse la Suisse (c.-à-d. <100 MWeI; Bauer *et al.* 2017).

Dans le cadre du SCCER BIOSWEET, la recherche sur la combustion et les développements technologiques visaient à créer des innovations techniques répondant à ces quatre défis et à leurs objectifs connexes, comme le résume la figure 8. L'objectif principal était de maximiser

l'efficacité de l'utilisation du potentiel du bois et d'autres biomasses solides pour la production d'énergie dans le système suisse tout en maintenant un faible impact sur l'environnement.

### 3.2.2 Approches innovantes

La **première approche innovante** comprenait le **concept de combustion** et le développement de technologies de combustion avancées, notamment par l'introduction de **solutions de gazéification** (projet 1 : chaudière à gazéification) et **combustion étagée** (projet 2 : brûleur à poussière de bois [fig. 9]; projet 3 : brûleur à vis [fig. 10]). Le développement d'une application a rendu possible de produire de la chaleur de processus à haute température afin d'augmenter la valorisation par rapport aux applications actuelles dans les bâtiments (projet 2), tandis que dans une autre approche, des mesures visant à améliorer l'élimination des cendres de la section de combustion sont appliquées afin d'étendre la gamme de combustibles utilisables à la biomasse à forte teneur en cendres dans les systèmes à petite et moyenne échelle (projet 3). En outre, la modélisation de la combustion, y compris la mécanique des fluides numérique (MFN) et les études aérodynamiques laser, a été développée et est maintenant disponible pour faire progresser la conception des mesures primaires visant à réduire les émissions de polluants (Winkler *et al.* 2018; Barroso *et al.* 2019a).

Dans la **deuxième approche, la conception des installations et la surveillance des processus** ont été développés pour fournir de la chaleur à la chaîne de transformation alimentaire en utilisant des résidus de grains de blé (projet 4). La surveillance du processus permet de prévoir les besoins de maintenance et de minimiser la consommation de combustibles fossiles, grâce à des arrêts minimisés de l'installation de biomasse. En outre, le fonctionnement du système de réduction des émissions de NO<sub>x</sub> a été optimisé pour réduire les émissions polluantes de ce gaz et de produits secondaires (Nussbaumer *et al.* 2019).

La **troisième approche** comprenait des développements et une modélisation pour le **contrôle avancé des processus et l'intégration des systèmes de biomasse**. Les applications étudiées vont des applications résidentielles (projet 5 : FHNW 2019) aux réseaux de chauffage urbain, où la production combinée de chaleur et d'électricité peut être utilisée pour fournir de l'électricité supplémentaire (projet 6 : Schumacher *et al.* 2020).

Dans la **quatrième approche**, des mesures secondaires de **réduction des polluants pour des applications à petite échelle** ont été développées. L'accent a été mis sur les systèmes de combustion de bûches, qui peuvent entraîner une augmentation des émissions de particules. Pour les applications de chauffage central, un précipitateur électrostatique (projet 7) a été intégré dans une chaudière à bûches, ce qui, par rapport à un dispositif similaire situé en aval dans le système d'échappement, a permis de réduire la durée de l'efficacité limitée de la séparation lors du démarrage et du fonctionnement avec une température limitée des gaz de combustion (fig. 11; Wüest *et al.* 2019). Une autre option pour l'élimination des particules des poêles à bois consiste à utiliser des filtres de

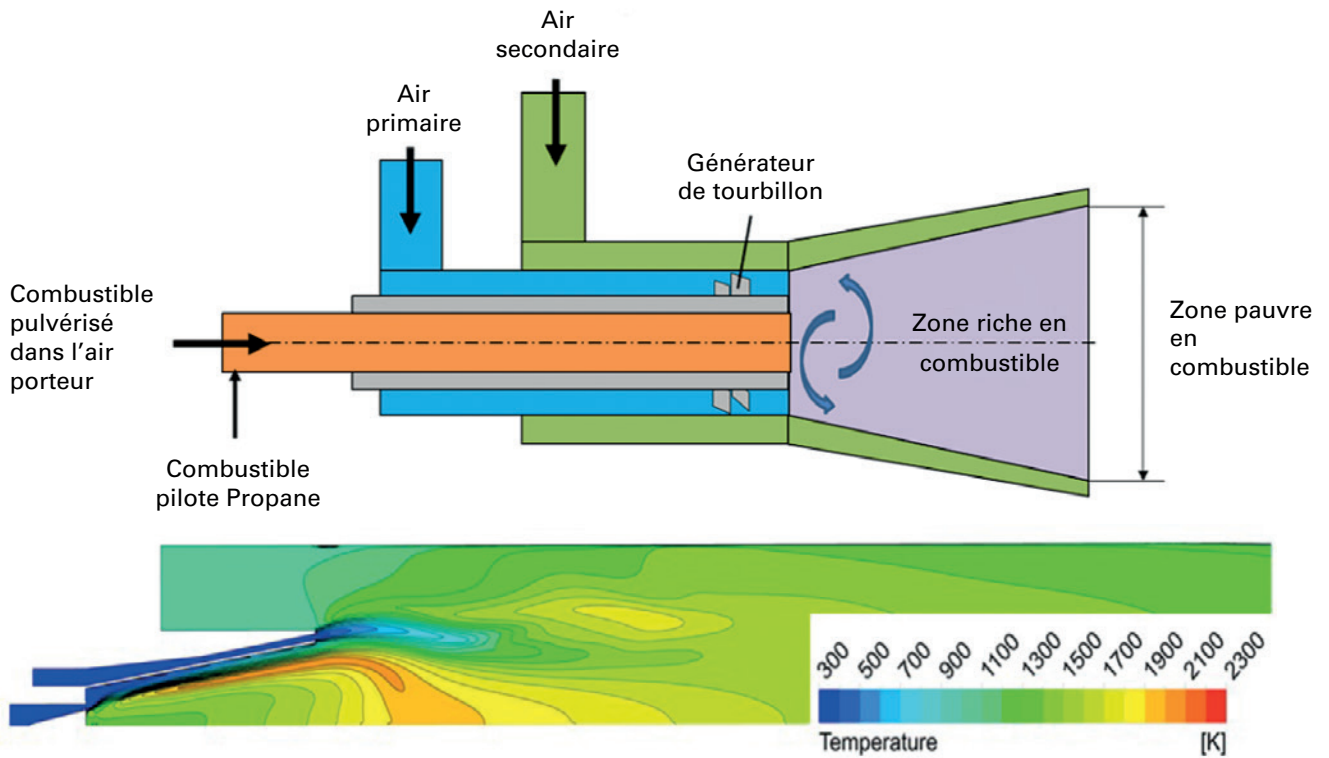


Figure 9: Brûleur à tourbillon stabilisé pour la combustion étagée de combustibles pulvérisés tels que la poussière de bois (Winkler *et al.* 2018). Haut: principe de conception du brûleur. Bas: profils de température calculés à partir de la modélisation de la combustion à l'aide de la mécanique des fluides numérique (MFN). Ce modèle est basé sur une approche eulérienne/lagrangienne et a évolué à partir d'un modèle de combustion de charbon pulvérisé. Une zone de recirculation centrale a été conçue pour être riche en carburant afin de réduire les émissions de  $\text{NO}_x$ ; l'augmentation du tourbillon favorise la propagation radiale des particules de carburant, ce qui réduit les émissions de CO.

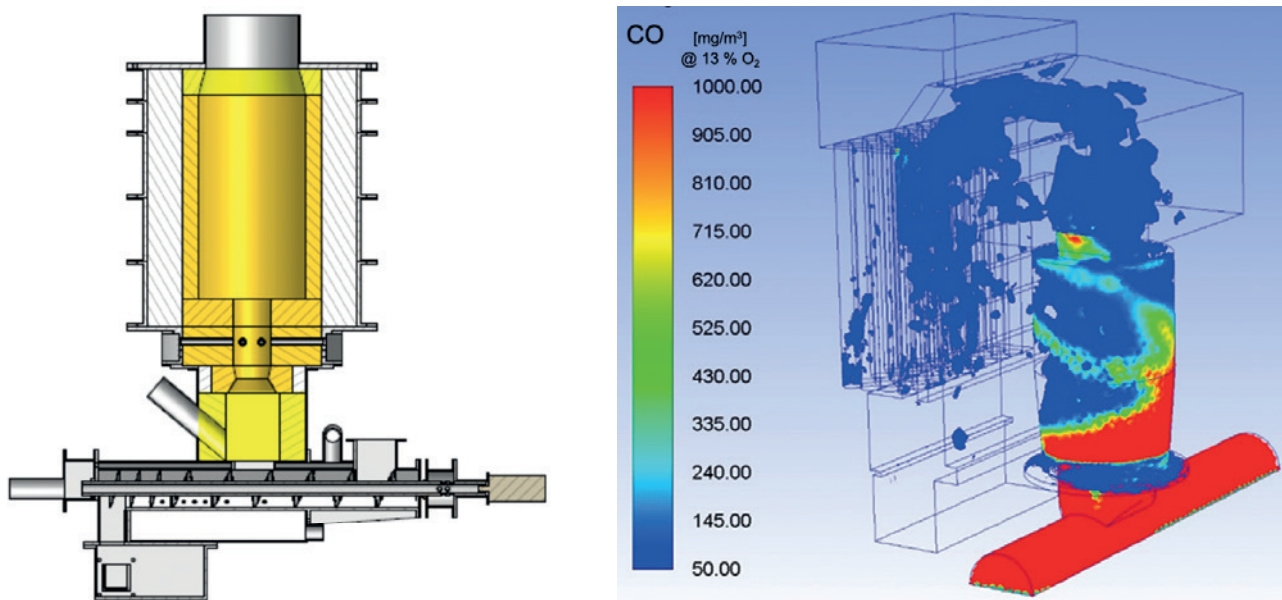


Figure 10: Brûleur à vis pour les combustibles à base de biomasse à forte teneur en cendres dans des applications de 100 à 300 kW (Barroso *et al.* 2019b). À gauche: le principe du brûleur à vis permet d'éliminer en continu les cendres de la zone de combustion afin d'éviter la fusion et le dépôt de cendres, processus qui entrave l'utilisation de combustibles à forte teneur en cendres dans les petites chaudières classiques. À droite: concentration de CO indiquée à titre d'exemple des résultats de la modélisation de la mécanique des fluides numérique (Barroso *et al.* 2019 c). La modélisation de la dynamique des fluides et les expérimentations permettent d'optimiser l'injection d'air et la géométrie de la combustion afin d'obtenir une combustion avec un excès d'air minimal et, par conséquent, une efficacité accrue, et de réduire les émissions polluantes, en particulier les composés carbonés imbrûlés et les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ).

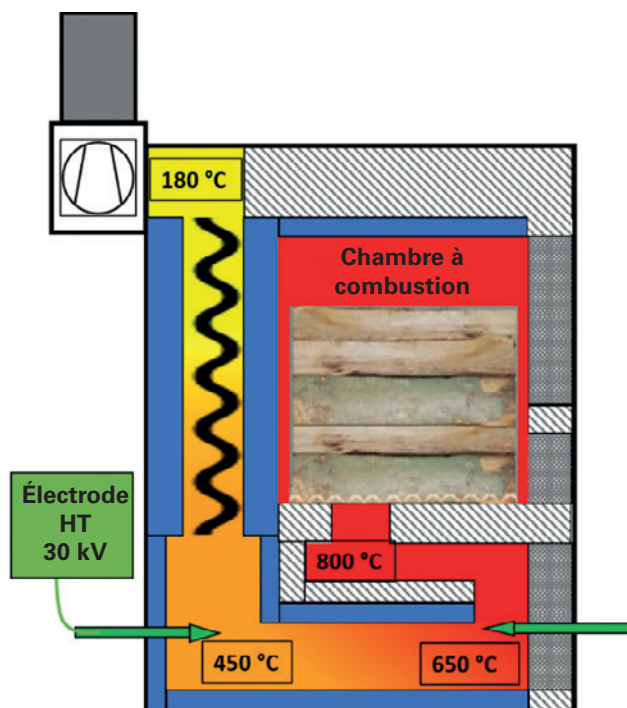


Figure 11: Chaudière à bûches avec réduction des particules par précipitateur électrostatique intégré. L'électrode haute tension (HT) destinée à charger électriquement les particules est placée dans la chaudière, soit à 450 °C, soit à 650 °C (flèche verte à droite). Cette intégration améliore les performances globales d'élimination des particules et réduit les coûts.

piégeage à flux continu, semblables à ceux utilisés pour réduire les émissions des moteurs diesel. Des concepts pour leur utilisation dans les poêles à bûches, soit pour de nouvelles installations, soit pour des rénovations, ont été évalués dans le projet 8 (Ropp *et al.* 2019). Bien que ces filtres offrent la possibilité d'atteindre une efficacité élevée d'élimination des particules, des conceptions robustes sont nécessaires pour effectuer la régénération et pallier le blocage des filtres.

**Dans la cinquième approche**, les **prétraitements** torréfaction, carbonisation hydrothermique et pyrolyse ont été étudiés en tant qu'options **pour augmenter la qualité du combustible des résidus de biomasse** présentant des propriétés indésirables pour les applications de combustion, telles qu'une faible densité apparente, une teneur élevée en cendres et une durabilité limitée (projet 9, Michel 2017; projet 10, Mehli *et al.* 2021). En appliquant de tels traitements thermiques à une température modérée et avec une disponibilité réduite en oxygène, la biomasse de faible densité apparente peut être convertie en un produit solide (par exemple, du biochar). Un produit solide a une teneur en carbone accrue et des propriétés favorables comme combustible courant (par exemple par broyage et granulation) ou pour des applications en agriculture pour l'amélioration des sols et la séquestration du CO<sub>2</sub>. Les dispositions légales doivent toutefois être respectées (OFAG 2020).

Dans la **sixième approche**, des concepts thermiques pour la **production d'énergie dans des applications à pe-**

**tite échelle** ont été développés (projets 11 et 12). À cette fin, une turbine à air chaud a été mise en œuvre pour convertir la chaleur de la combustion du bois en électricité, permettant ainsi la production combinée de chaleur et d'électricité dans des systèmes de moins de 100 kW (Schmid *et al.* 2014).

### 3.2.3 Contribution à la stratégie énergétique suisse 2050

Le bois est un combustible renouvelable flexible, source biogénique de carbone qui jouera un rôle majeur dans la transition énergétique suisse en raison de sa facilité de stockage, de sa flexibilité d'utilisation et de sa source de carbone biogénique. La recherche sur la combustion contribue à surmonter les difficultés d'utilisation complète du potentiel de la biomasse pour les applications énergétiques et à accroître sa valorisation. En particulier, le **stock de combustible peut être étendu** en incluant les combustibles à forte teneur en cendres, y compris la biomasse non ligneuse, grâce à des développements spécifiques réduisant les effets liés aux cendres dans la combustion. En outre, **l'impact environnemental de la combustion de la biomasse peut être considérablement réduit** par des mesures primaires telles que la conception avancée de la combustion, la combustion étagée et le contrôle de la combustion. En outre, des mesures secondaires, telles que l'élimination des particules, permettent de réduire les polluants dans des applications à petite échelle. Enfin, **la contribution de la biomasse à l'approvisionnement énergétique peut être améliorée sur le plan qualitatif**, par l'intégration de systèmes avancés réduisant le déséquilibre temporel entre la production d'énergie renouvelable et la demande énergétique à grande échelle, ainsi que par la possibilité de produire de l'électricité à partir de la biomasse à petite échelle.

### 3.2.4 Travaux futurs

Bien que des progrès aient été réalisés dans la conception de la combustion, le **potentiel d'amélioration des dispositifs de combustion de la biomasse est encore considérable**, tant en ce qui concerne l'**efficacité** (y compris, par exemple, la récupération de chaleur par condensation) que la réduction des **émissions de polluants** (notamment en ce qui concerne les particules et les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), qui pourraient être plus importantes avec une utilisation plus large des combustibles de biomasse à forte teneur en cendres). En outre, **il convient de développer davantage les mesures secondaires pour améliorer la fiabilité, faire baisser les coûts et éviter les produits dérivés** (par exemple, réduire les émissions de NO<sub>x</sub>). Pour les applications à petite et moyenne échelle, les dispositifs d'épuration des gaz doivent être intégrés au système de combustion et de transfert de chaleur afin de réduire les coûts et d'améliorer les conditions de fonctionnement et l'entretien.

**L'intégration des processus**, y compris les concepts de contrôle, l'utilisation intelligente des capteurs et le stockage de l'énergie thermique pour les centrales de chauffage et les applications de cogénération, **doivent encore**



**être améliorées pour garantir des conditions optimales à des charges variables.** Pour un système durable, l'énergie répondant à la demande, donc indépendante des fluctuations saisonnières ou quotidiennes, est un critère important. Aujourd'hui, l'énergie à la demande est assurée par les combustibles fossiles, mais ils pourraient être remplacés par la biomasse si des mesures appropriées sont mises en place. En outre, il est avantageux de mettre en œuvre des réseaux énergétiques, pouvant regrouper différents vecteurs. Dans ces réseaux, **la biomasse pourrait devenir un système de secours pour pallier les fluctuations de l'énergie solaire et éolienne.** En raison de la nécessité de changements rapides de la charge, cela entraînerait des exigences accrues pour les systèmes de conversion de la biomasse et leurs concepts de contrôle. À cette fin, **des systèmes de production de chaleur et d'électricité à partir de la biomasse pourraient être combinés à des systèmes rapides de stockage de l'énergie thermique (SET).** Ceci constitue un nouvel axe de recherche, parallèlement à l'amélioration des concepts d'intégration et de contrôle des systèmes.

Pour accroître l'efficacité de la biomasse dans le système énergétique, il convient de mettre l'accent sur les technologies qui fournissent de la chaleur industrielle (à haute température) plutôt que de la chaleur à basse température pour les bâtiments, ainsi que sur les systèmes qui livrent de l'électricité combinée à de la chaleur comme produit secondaire pour équilibrer les énergies renouvelables fluctuantes. Dans ces conditions, **il faudrait cibler et développer à la fois les technologies pour la production de chaleur industrielle et les procédés de production d'électricité à haut rendement.**

Avec l'utilisation croissante de la biomasse ligneuse comme source d'énergie, une élimination adéquate des cendres devient de plus en plus importante. Par conséquent, il faudra à l'avenir trouver des voies d'élimination spécifiques pour les cendres issues de la biomasse afin d'accroître la valorisation des constituants inorganiques de celle-ci et d'éviter des coûts d'élimination élevés.

### 3.3 Production de carburants gazeux

Le bois peut certes être immédiatement utilisé pour couvrir les besoins en énergie, notamment par la combustion pour la chaleur ou pour la production d'électricité, mais la transformation du bois (résidus) en combustibles est avantageuse pour plusieurs raisons. L'infrastructure actuelle pour les combustibles gazeux permet leur transport et leur stockage, et des technologies d'utilisation très efficaces peuvent être appliquées. Il existe de multiples voies pour la production de combustibles gazeux à partir de matières premières biogènes. Dans les digesteurs anaérobies, les types de biomasse humide, tels que les résidus agricoles, les déchets verts et les boues d'épuration, peuvent être convertis en biogaz brut, un mélange de 50 à 65% de méthane (CH<sub>4</sub>) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). **En raison de la grande quantité de lignine présente dans le bois, la biomasse ligneuse ne peut être convertie en biogaz dans les digesteurs anaérobies. C'est pour cela que des procédés thermochimiques, tels que la gazéification, sont appliqués pour transformer le bois en un com-**

**bustible gazeux.** En principe, toutes les qualités de bois peuvent être gazéifiées, que ce soient les pellets, les résidus de production ou les plaquettes forestières. Toutefois, la réglementation relative au traitement des déchets fixe des limites, par exemple en ce qui concerne l'utilisation de bois peint ou imprégné.

#### 3.3.1 Production d'hydrogène à partir du bois

Dans le gaz brut de production des **gazéificateurs à haute température**, par exemple les dispositifs à flux entraîné à l'oxygène à 1200 °C, on ne trouve que des traces de composés autres que le CO<sub>2</sub> et l'hydrogène. C'est un avantage si l'hydrogène est la molécule ciblée et s'il peut être distribué et stocké efficacement. Dans ce cas, une simple épuration des gaz (principalement l'adsorption de H<sub>2</sub>S) suivie d'une réaction de déplacement de gaz vers l'eau, de la séparation du CO<sub>2</sub> et du séchage conduit à la production d'hydrogène pur (Tock *et al.* 2012; Antonini *et al.* 2021), comme le montrent les études auxquelles participent les chercheurs du SCCER BIOSWEET. **Les coûts spécifiques relativement élevés des équipements à haute température signifient que de grandes unités sont nécessaires (>250 MW, soit environ 60 t/h de plaquettes de bois séchées à l'air)** pour bénéficier d'économies d'échelle. Dans le domaine de la biomasse, les grandes unités sont pénalisées par l'augmentation des coûts logistiques liée au transport de volumes de bois plus importants. Cette situation, ainsi que l'absence d'une infrastructure (par exemple un réseau) permettant de distribuer les grandes quantités d'hydrogène produites, ont entravé les tentatives commerciales de production à partir du bois. **Cependant, comme la conversion du bois en hydrogène est intrinsèquement liée à la production de CO<sub>2</sub> biogène, elle contribue à l'objectif d'atteindre des émissions nettes nulles;** une rémunération suffisante dans ce domaine pourrait améliorer la faisabilité économique de cette option à l'avenir.

#### 3.3.2 Production de méthane à partir du bois

Par rapport à la conversion en hydrogène, la situation est différente pour la production de CH<sub>4</sub> renouvelable à partir du bois (Gassner *et al.* 2012; Schildhauer 2018). **La gazéification en lit fluidisé double à basse température (~850 °C) est rentable à des échelles petites et intermédiaires** et produit un gaz avec une teneur en CH<sub>4</sub> allant jusqu'à 10 % en vol., ce qui est bénéfique pour l'efficacité globale de la chaîne de processus (Heyne *et al.* 2016). L'exemple le plus approprié de gazéificateur à basse température pour la production de gaz renouvelable est le dispositif allotherm à double lit fluidisé (DLF) (Bajohr *et al.* 2014; Heyne *et al.* 2016). En raison de l'utilisation de la vapeur comme agent, un gazéifieur DLF fournit un gaz de production riche en hydrogène. La chaleur nécessaire à la gazéification endothermique est produite dans un réacteur de combustion séparé (environ 900 °C) auquel sont envoyés le matériau du lit et les chars non brûlés. Le matériau du lit chauffé (olivine) est renvoyé dans la chambre de gazéification (820–850 °C). Dans ce type de

gazéificateur, parallèlement à la production de CH<sub>4</sub>, des hydrocarbures supérieurs tels que l'éthane, l'éthylène, l'acétylène et des aromatiques (en particulier le benzène) sont formés (Heyne *et al.* 2016), accompagnés d'autres composants à l'état de traces tels que les goudrons et différentes espèces de soufre organique. Une épuration et un conditionnement appropriés du gaz sont nécessaires avant que le gaz de production brut puisse être converti, dans un réacteur de méthanation, en un mélange gazeux similaire au biogaz composé principalement de CH<sub>4</sub>, de CO<sub>2</sub> et de quelques pour cent d'hydrogène, comme l'ont montré les chercheurs du SCCER BIOSWEET. La valorisation finale du gaz par des laveurs d'amines, un séchage et des membranes est nécessaire pour recycler l'hydrogène non converti et produire du biométhane injectable. Une purification plus poussée des effluents gazeux de CO<sub>2</sub> peut fournir du carbone biogénique qui peut être séquestré pour produire des émissions négatives (Gassner *et al.* 2009). Dans les applications de conversion d'électricité en gaz, de l'hydrogène renouvelable pourrait être ajouté pour convertir la fraction de CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub> supplémentaire en intégrant un électrolyseur dans le processus. Dans ce cas, l'hydrogène alimenterait, avec le gaz de production épuré, un réacteur de méthanation légèrement plus grand (Gassner *et al.* 2008; Bajohr *et al.* 2014; Teske 2014; Leimert *et al.* 2018). Pour les applications au bois, les études menées au sein du SCCER BIOSWEET suggèrent que la production de méthane peut être doublée avec un rendement marginal de près de 80 % pour la puissance électrique injectée. En outre, l'option de conversion d'électricité en gaz peut, si elle est exploitée en période de bas prix de l'électricité renouvelable, être complétée par l'effet négatif sur les émissions du captage et de la séquestration du CO<sub>2</sub>, lorsqu'il n'y a pas d'hydrogène renouvelable disponible (Moioli et Schildhauer 2022, 2021).

### 3.3.3 Concepts de réacteurs et de procédés pour produire du méthane à partir du bois

Des procédés de production de CH<sub>4</sub> à partir du bois ont été développés par plusieurs consortiums jusqu'à l'échelle de démonstration pilote et industrielle. Les différentes étapes de la synthèse de méthanation permettent de résoudre les problèmes liés à la réaction fortement exothermique et limitée par l'équilibre: la chaleur produite doit être évacuée et utilisée efficacement dans la chaîne du processus. Les deux principaux concepts de réacteurs développés et testés jusqu'à présent pour la méthanation du gaz de bois sont: (i) les réacteurs à lit fixe adiabatiques en série avec refroidissement intermittent et recyclage; et (ii) les réacteurs à lit fluidisé, qui ont fait l'objet de recherches intensives au sein du SCCER BIOSWEET.

Le concept de **réacteur à lit fixe adiabatique** est à la pointe de la technologie dans les procédés de transformation du charbon en GNS (gaz naturel synthétique) et a été choisi par le projet de biogaz de Göteborg (GoBiGas, usine de démonstration NMT 8) en Suède (Held 2016; Schildhauer 2018) et le Centre de recherche sur l'énergie (TNO-ECN, usine pilote NMT 5) aux Pays-Bas (Rabou et Bos 2012; Rabou *et al.* 2016). Les réacteurs à lit

fixe adiabatique consistent en de grandes cuves remplies de particules de catalyseur. La réaction exothermique entraîne une augmentation de la température, ce qui augmente encore les taux de réaction jusqu'à ce que le réacteur atteigne l'équilibre thermodynamique. Ce concept de réacteur supporte la formation de points chauds dus à l'emballement thermique et limite son étendue en faisant recirculer les gaz effluents refroidis du réacteur et/ou en ajoutant de la vapeur jusqu'à ce qu'un niveau acceptable pour le catalyseur spécifique soit atteint (Schildhauer et Biollaz, 2015; Schildhauer 2016). Le premier réacteur n'atteignant pas la conversion totale, le gaz effluent doit donc être refroidi et alimenté dans une série d'autres réacteurs adiabatiques pour atteindre la conversion totale (Schildhauer 2016). En raison du point chaud dans le premier réacteur, les composés aromatiques, tels que le benzène et d'autres espèces insaturées (éthylène et acétylène), doivent être éliminés ou convertis en amont pour éviter la désactivation irréversible du catalyseur par le dépôt de carbone dans les zones chaudes du réacteur.

Pour surmonter ces limitations et simplifier le processus de méthanation, et surtout pour minimiser le nombre de réacteurs, **des réacteurs de méthanation refroidis ont été développés** au sein du SCCER BIOSWEET. Le déplacement des particules de catalyseur dans un **lit fluidisé gaz-solide** répartit la chaleur produite par les réactions exothermiques sur une grande partie du réacteur, ce qui augmente fortement la surface de transfert de chaleur utilisable. En outre, le mouvement des particules de catalyseur augmente généralement le transfert de chaleur vers les surfaces de refroidissement par des effets de turbulence. Cela permet un fonctionnement pratiquement isothermique et contribue à éviter la désactivation du catalyseur par la formation de coke. En conséquence, un niveau considérable d'hydrocarbures non saturés dans le gaz de gazéification est acceptable, ce qui simplifie le processus d'épuration du gaz.

Alors que la méthanation en lit fluidisé a déjà été développée jusqu'à l'échelle de démonstration (20 MW) pour le procédé de transformation du charbon en GNS à la fin des années 1970 (procédé Comflux; Schildhauer 2016), son utilisation pour **la conversion du gaz de bois en méthane** est étudiée par l'Institut Paul Scherrer (PSI) depuis une vingtaine d'années. Des expériences en laboratoire et des tests de longue durée à NMT 5 ont été réalisés pour aider à développer une unité pilote et de démonstration (UPD, c'est-à-dire NMT 7) de 1 MW à Güssing (Autriche) dans le cadre du projet BIOSNG de l'Union européenne. L'UPD a fait la démonstration de la chaîne complète allant du bois au GNS, y compris la gazéification DLF, l'épuration du gaz, la méthanation en lit fluidisé et la purification du gaz, à une échelle semi-commerciale. Entre-temps, d'autres groupes de recherche ont étudié la méthanation en lit fluidisé, par exemple dans le cadre du projet français GAYA (GAYA 2021). Au sein du SCCER BIOSWEET, l'application de ce type de réacteur dans les applications de conversion d'électricité en gaz a été étudiée par modélisation/simulation et lors d'expériences jusqu'à NMT 5. Afin d'élargir la base de connaissances, nécessaire pour des applications sûres à plus grande échelle, la dynamique des fluides dans le réacteur, en par-



Figure 12: Installation pilote SCCER BIOSWEET (NMT 6) utilisée pour étudier les effets de la pression (jusqu'à 10 bar), des vitesses de gaz et de la taille des particules sur la surface de transfert de masse disponible dans le réacteur de méthanation à lit fluidisé (photo: PSI). Ces connaissances peuvent être utilisées pour améliorer les modèles d'optimisation des réacteurs et les simulations de processus. Les simulations du réacteur seront validées par des expériences dans cette installation.

ticulier le transfert de chaleur, le processus de mélange et les interfaces de transfert de masse disponibles, a été étudiée dans une installation pilote NMT 6 pour comprendre l'influence des vitesses de gaz, de la taille des particules de catalyseur et de la pression (fig. 12).

Le projet GoBiGas (Suède) et les développements au TNO-ECN (Pays-Bas) visaient les centrales commerciales de 100 MW ou plus, qui nécessitent une logistique du bois à grande échelle basée sur le transport par bateau, avec importation partielle (si possible). Par conséquent, une technologie relativement complexe peut être appliquée si les coûts spécifiques diminuent en augmentant les volumes, simplement en raison des effets d'échelle. Les usines de biométhane situées loin des côtes et des ports, par exemple en Suisse et dans d'autres parties continentales de l'Europe, ne peuvent pas compter sur une logistique du bois à grande échelle. Dans ces régions, des échelles de 1–30 MW d'apport thermique (en

viron 0,25–8 t/h de bois séché à l'air) sont plus réalistes et ont donc été ciblées dans le cadre du SCCER BIOSWEET. À ces échelles, les coûts d'investissement spécifiques des procédés de méthanation à lit fixe, y compris leurs étapes complexes d'épuration des gaz, pourraient être prohibitifs. Une étude de pré-ingénierie (CTU 2014) a montré que **d'importantes simplifications du processus sont possibles avec la méthanation à lit fluidisé plus robuste, permettant une diminution substantielle des coûts d'investissement spécifiques.**

Aujourd'hui, la valeur ajoutée par la production de méthane renouvelable à partir de résidus de bois est légèrement trop faible pour qu'une usine de transformation du bois en GNS soit rentable dans les conditions actuelles du marché. **L'option d'utiliser de l'hydrogène renouvelable pour convertir de manière flexible le CO<sub>2</sub> biogène du processus en biométhane supplémentaire (notamment en été, lorsque la production d'électricité photovoltaïque est élevée) ou une incitation à séquestrer le CO<sub>2</sub> pour des émissions négatives (par exemple en hiver, lorsque l'électricité renouvelable est chère) ouvriront d'autres possibilités de revenus.** En outre, la demande croissante de carburants renouvelables (objectif « net zéro » d'ici 2050) et les options limitées d'importation de carburants renouvelables pourraient considérablement améliorer l'attrait de l'utilisation du bois comme source d'énergie flexible et l'utilisation du CO<sub>2</sub> biogénique dans les processus basés sur la biomasse comme matière première pour les carburants et les produits chimiques.

### 3.3.4 Production combinée de chaleur et de combustible

La conversion du bois sec (calculée comme pouvoir calorifique inférieur) en gaz naturel synthétique a un rendement d'environ 65 %, les 35 % restants étant théoriquement disponibles sous forme de chaleur. Avec une conception adéquate du processus, 40 % de cette chaleur est disponible à une température suffisamment élevée pour remplacer une chaudière industrielle, ce qui permet la production combinée de chaleur et de carburant. Ce concept peut également intégrer la conversion d'électricité en gaz par électrolyse et alternativement le captage et la séquestration du CO<sub>2</sub>. Par conséquent, comme le montre le contexte de SCCER BIOSWEET, la production combinée de chaleur et de carburant permet **une technologie à émissions négatives** qui contribue à l'optimisation de l'utilisation des énergies renouvelables et à la décarbonisation de l'industrie (Celebi *et al.* 2019). Dans le cadre du programme SCCER BIOSWEET, il a été démontré que **l'allocation du bois pour la production combinée de chaleur et de carburant est particulièrement avantageuse comparée à la combustion directe du bois.** Si l'on prend comme référence une chaudière à mazout industrielle, l'utilisation du bois dans une chaudière industrielle permet de remplacer 0,3 kg de CO<sub>2</sub> fossile par kilo de CO<sub>2</sub> biogénique, tandis que la production combinée de chaleur et de combustible avec intégration de la conversion de l'électricité en gaz a un effet de substitution 2,5 à 3 fois supérieur pour la même quantité de bois (Celebi *et al.* 2019).

## 3.4 Production de combustibles liquides

### 3.4.1 Importance des combustibles liquides

Les préoccupations croissantes concernant l'extraction et l'utilisation des ressources fossiles ont conduit la société à rechercher des alternatives renouvelables aux combustibles liquides. L'électricité renouvelable est de plus en plus envisagée comme un substitut à plusieurs utilisations actuelles des combustibles fossiles. Cependant, un certain nombre d'applications énergétiques, notamment celles liées à la mobilité et aux transports, ne peuvent être directement connectées aux principaux réseaux d'énergie (électricité ou gaz) et nécessitent donc un stockage d'énergie efficace avec des densités d'énergie élevées qui, à ce jour, ne peuvent être obtenues que par des combustibles liquides. Il s'agit notamment des carburants pour l'aviation et pour certains transports maritimes au long cours, où les batteries n'ont pas encore atteint la densité d'énergie requise et où les carburants liquides, probablement à base de carbone, seront probablement nécessaires à moyen ou long terme. La biomasse lignocellulosique étant la plus grande source de carbone biogénique de la planète, elle constitue une matière première intéressante pour ces carburants spéciaux destinés au transport.

**Bien que la biomasse lignocellulosique soit prometteuse dans les applications de carburants liquides, des défis majeurs doivent être relevés pour l'intégration des biocarburants dans l'industrie des transports, en particulier l'aviation.** Pour une intégration rapide et transparente dans la chaîne d'approvisionnement actuelle, les biocarburants drop-in sont les plus adaptés (van Dyk *et al.* 2019) car il s'agit de « bio-hydrocarbures liquides fonctionnellement équivalents aux carburants pétroliers et totalement compatibles avec les infrastructures existantes de raffinage et de distribution du pétrole » (IEA Bioenergy Task 39, 2019). Aujourd'hui, les principales matières premières pour ces biocarburants « drop-in » sont les lipides, tels que les huiles végétales ou les huiles de cuisine usagées, et leur production a atteint une échelle commerciale. Cependant, les coûts, la disponibilité limitée et la production souvent non durable de ces matières premières constituent des défis majeurs qui ne permettront probablement pas une grande expansion de la technologie. Ainsi, diverses voies de transformation basées sur la lignocellulose sont en cours de développement. Elles peuvent être divisées en plusieurs catégories: (i) les approches non ciblées qui reposent en grande partie sur de nombreuses réactions parallèles et successives, qui comprennent plusieurs approches thermochimiques; et (ii) les approches ciblées, qui reposent sur des voies de réaction spécifiques pour chaque composant de la biomasse, ce qui inclut les approches biochimiques et hybrides.

### 3.4.2 Conversion thermochimique de la biomasse en liquide

**Les deux approches thermochimiques dominantes pour la production de combustible liquide à partir de la biomasse sont la gazéification et la liquéfaction.** Ces deux

approches non ciblées impliquent la transformation rapide de la biomasse lignocellulosique par de nombreuses réactions, à partir des principaux composants de celle-ci : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. **Dans la filière gazéification**, la biomasse est convertie en gaz de synthèse (voir section 3.3), un produit relativement uniforme, car les nombreuses réactions impliquées conduisent presque toujours aux produits gazeux thermodynamiquement favorisés. Ce processus initial est suivi d'une épuration approfondie du gaz de synthèse et peut être suivi d'une conversion catalytique en hydrocarbures liquides, soit par le procédé Fischer-Tropsch (qui nécessite alors généralement un hydrotraitement supplémentaire pour obtenir des hydrocarbures dans la gamme des carburants; Peduzzi *et al.* 2018) ou par la synthèse catalytique du méthanol ou de l'éther diméthylque (Peduzzi *et al.* 2013). L'épuration du gaz de synthèse est effectuée pour éviter l'empoisonnement des catalyseurs de Fischer-Tropsch, ce qui est beaucoup plus difficile, et donc plus coûteux, par rapport à des procédés similaires de conversion thermochimique de matières premières fossiles. **Les procédés de liquéfaction** comprennent la pyrolyse rapide, la pyrolyse catalytique et la liquéfaction hydrothermique, qui nécessitent tous une deuxième étape de valorisation de la bio-huile dérivée pour transformer le mélange résultant de molécules souvent partiellement oxygénées en biocarburant. Toutes ces voies restent peu sélectives et sujettes à des problèmes de stabilité du catalyseur. Au sein du SCCER BIOSWEET, la première étape de la transformation de la biomasse solide par liquéfaction hydrothermale a été étudiée. La cellulose, l'hémicellulose et la lignine sont décomposées par hydrolyse dans de l'eau chaude sous pression. Comme cette étape est lente et qu'elle régit le taux de production de la bio-huile, un nouveau catalyseur a été mis au point. Il est basé sur du carbone sulfoné et un prétraitement du bois par broyeur à boulets en présence du catalyseur (Scholz *et al.* 2018, 2019).

### 3.4.3 Voies biochimiques vers les carburants liquides à partir de la biomasse

Dans les processus biochimiques en condition ambiante, les polymères glucidiques de la biomasse sont convertis dans les produits souhaités par des enzymes et des micro-organismes. Si l'éthanol (qui peut être mélangé à l'essence ou utilisé comme biocarburant dans des moteurs adaptés) a été produit par voie biochimique à l'échelle de démonstration par des entreprises telles que Clariant, la production directe de carburants d'appoint pour les avions à réaction ou de diesel « drop-in » à partir de sucres dérivés de la biomasse est beaucoup plus difficile. Leur production microbienne nécessite des micro-organismes sophistiqués issus du génie génétique et est entravée par des rendements et des concentrations de produits très faibles. Dans le cadre du SCCER BIOSWEET, et avec un financement supplémentaire du Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique PNR 70, **une voie hybride consistant en la conversion biochimique des hydrates de carbone en acides carboxyliques et la conversion catalytique des acides en hydrocarbures a été développée.**

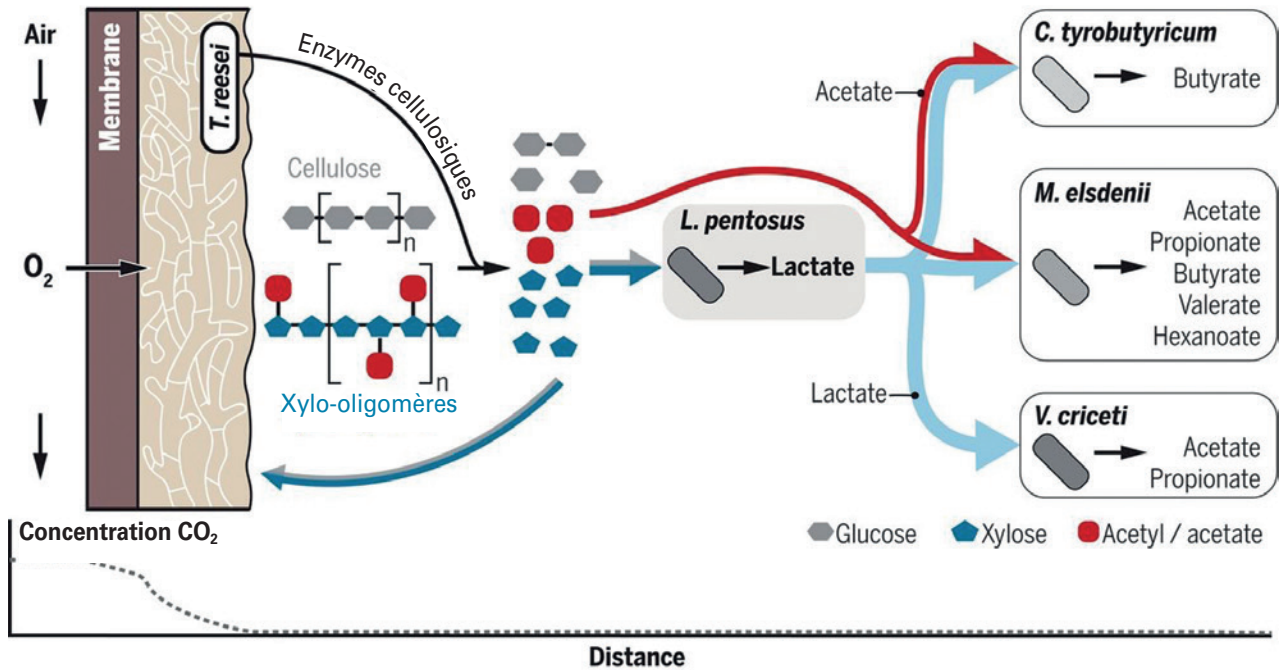


Figure 13: La plateforme de lactate permet le biotraitement consolidé des polysaccharides lignocellulosiques et de l'acétate en plusieurs produits, dont des acides carboxyliques. Adapté de Shahab *et al.* (2020).

Dans la première étape de ce processus, du bois de hêtre prétraité à la vapeur a été transformé par un consortium microbien artificiel adaptable en différents acides carboxyliques comme produits finaux dans un processus appelé « plateforme lactate ». Grâce à cette plateforme, il est désormais possible de convertir les différents sucres contenus dans la biomasse d'abord en acide lactique, comme produit intermédiaire commun, puis en acide cible en sélectionnant la souche consommatrice d'acide lactique correspondante (fig. 13; Shahab *et al.* 2020).

Dans la deuxième étape, des procédés catalytiques transforment les acides carboxyliques dérivés du bois en carburants pour avions et en  $\alpha$ -oléfines, qui comptent parmi les substances de base les plus importantes dans la production chimique de plastiques et d'intermédiaires chimiques (Rozmysłowicz *et al.* 2019). Les estimations de coûts basées sur ces premières expériences à l'échelle du laboratoire montrent que les carburants pour avions produits avec cette technologie seraient deux fois plus chers que les carburants fossiles sur le marché. Le coût élevé par rapport aux combustibles fossiles est également un obstacle pour d'autres procédés hybrides plus matures, tels que l'éthanol de LanzaTech ou l'isobutanol-to-jet de Gevo, mais ils sont néanmoins activement poursuivis, et les produits ont reçu la certification de l'ASTM (Geleynse *et al.* 2018). Dans ces procédés hybrides, les produits intermédiaires que sont l'éthanol et l'isobutanol sont produits à partir de la lignocellulose par procédé biochimique, tandis que la conversion secondaire est un procédé catalytique. Comme le processus biochimique se déroule dans des solutions aqueuses, la présence d'eau dans la matière première lignocellulosique ne pose pas de problème. En outre, la sensibilité des micro-organismes reste faible et ils peuvent s'adapter aux substances introduites avec des matières premières de faible qualité. Avant la conversion

catalytique, les produits intermédiaires peuvent être partiellement purifiés par des procédés courants, tels que la distillation, pour éviter l'empoisonnement du catalyseur.

Parallèlement, on observe des développements d'approches hybrides d'exploitation de la lignine, la troisième grande fraction de la biomasse, pour la production de carburants liquides. En théorie, cette fraction est très intéressante pour la production de carburant liquide, car sa structure aromatique ressemble beaucoup plus à celle du pétrole brut que celle des fractions glucidiques de la biomasse. Cette structure fait également de la lignine la plus dense en énergie des trois principales fractions. En pratique, toutefois, l'exploitation de la lignine présente des défis énormes. Sa structure et sa réactivité sont les principaux obstacles à sa transformation. Ce biopolymère tend à se condenser rapidement pendant le fractionnement initial, première étape de la plupart des transformations, notamment les approches biochimiques et hybrides décrites plus haut. Cela entraîne une fraction de lignine hautement récalcitrante à la dégradation et difficile à convertir en un carburant liquide. Dans le cadre du SCCER BIOSWEET, le fractionnement assisté par l'aldéhyde (FAA) a été développé pour dégrader la lignine avec des aldéhydes de manière stable et il permet de prévenir largement la condensation (fig. 14; Shuai *et al.* 2016; Amiri *et al.* 2019). Ce procédé permet d'obtenir une fraction de lignine qui peut être convertie en composés monophénoliques et oligomères, ensuite facilement valorisés sous forme de mélange aromatique liquide à forte densité énergétique avec des hydrocarbures similaires à ceux que l'on trouve dans les fractions de carburacteur (Du *et al.* 2018). Cela complète les approches de fractionnement catalytique réducteur développées par d'autres, qui donnent des résultats similaires au FAA en ce qui concerne la lignine, mais impliquent de mettre le catalyseur en contact direct avec la biomasse (Questell-Santiago *et al.* 2020), ce qui

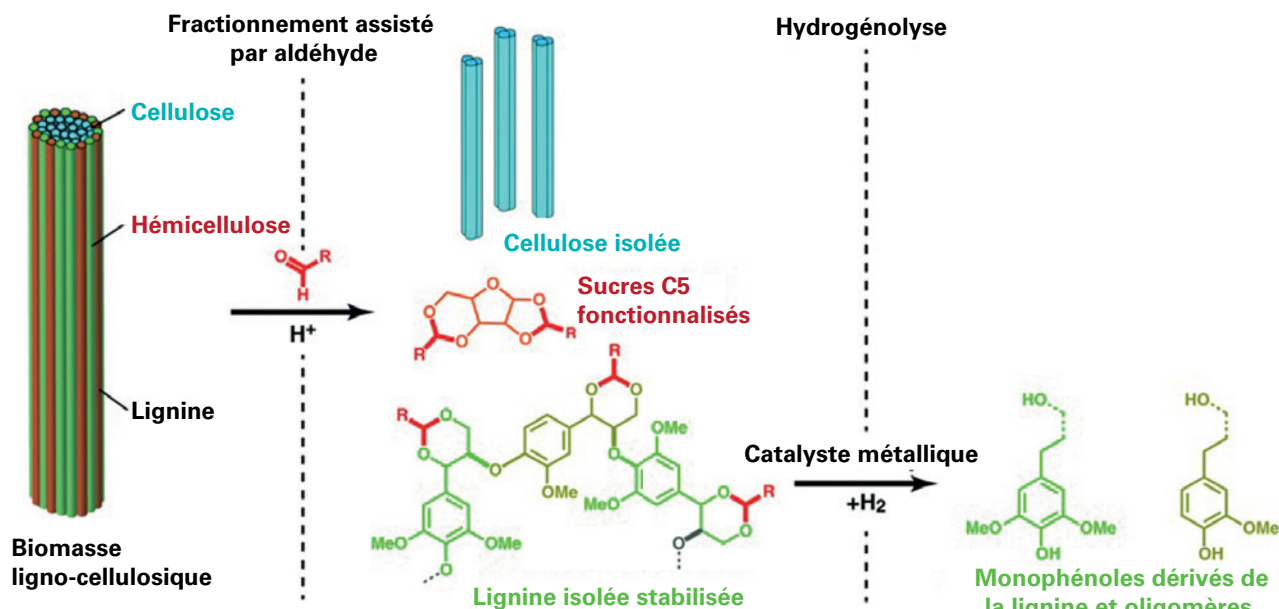


Figure 14: Aperçu du procédé de fractionnement assisté par aldéhyde (FAA), qui produit une fraction de lignine dépolymérisable pouvant être utilisée pour produire des monoaromatiques à partir de la lignine à des rendements proches de la théorie basée sur le clivage de l'éther (environ 40% en poids de la lignine). Adapté de Abu-Omar *et al.* (2021).

pose d'importants problèmes de séparation qui n'ont pas encore été résolus. L'opportunité offerte par le FAA de déconstruire la lignine a conduit à la création d'une société essaimée de l'EPFL (Bloom Biorenewables Ltd), qui cherche à commercialiser des molécules dérivées de la lignine, y compris celles qui sont pertinentes pour les carburants. Cette société est presque entièrement basée sur la recherche développée dans le cadre du programme SCCER BIOSWEET. Ses activités actuelles sont au stade de la démonstration.

#### 3.4.4 Perspectives

Dans l'ensemble, plusieurs voies existent pour produire des fractions de carburant mélangeables à partir de la biomasse lignocellulosique. En particulier, les solutions hybrides, dont celles développées au sein de SCCER BIOSWEET, offrent des voies permettant de valoriser simultanément toutes les fractions importantes de la biomasse lignocellulosique avec une grande sélectivité, ce qui pourrait maximiser l'énergie récupérée. Cependant, toutes ces technologies sont immatures (NMT 5 à 7) et entrent en concurrence avec des procédés pétrochimiques bien établis qui ont bénéficié de plus de 100 ans de développement et d'optimisation. **Le soutien continu du gouvernement pour créer un cadre de développement favorable, ainsi que des incitations financières, sera essentiel** pour amener ces technologies sur le marché et offrir une voie pour sortir des carburants fossiles dans des secteurs de transport exigeants, y compris l'industrie aéronautique.

### 3.5 Bio-raffinage: approches intégrées pour la conversion du bois

Les voies de conversion thermo-chimique en combustible liquide sont généralement exothermiques à haute température, tandis que les voies biochimiques sont endothermiques à des températures beaucoup plus basses. La production thermo-chimique de combustible liquide doit donc être évaluée dans des configurations de production combinée de chaleur et de combustible. L'intégration des voies thermo-chimique, biochimique et catalytique est une caractéristique essentielle des bioraffineries qui transforment les ressources en bois en différents produits chimiques et combustibles biogènes (Brethauer *et al.* 2021). **Une bioraffinerie de conception optimale viserait donc la production de produits à haute valeur ajoutée (polymères, produits chimiques fins, pulpes) tout en maximisant la conversion du carbone biogénique en un vecteur énergétique stockable et facile à distribuer** (Celebi *et al.* 2017). Comme pour la production de combustible gazeux, celle d'un combustible liquide implique l'intégration de l'électrolyse avec un rendement marginal de plus de 90% du faible pouvoir calorifique nécessaire pour convertir le combustible en électricité (Peduzzi *et al.* 2018). Dans une bioraffinerie, l'hydrogène produit serait utilisé non seulement comme vecteur d'énergie renouvelable, mais aussi comme élément constitutif de produits chimiques. En outre, le CO<sub>2</sub> est un sous-produit de la production de carburant liquide, de sorte que le processus peut potentiellement contribuer aux émissions négatives grâce à la séquestration du carbone biogénique.

## 4 Le rôle de la biomasse ligneuse dans le système énergétique

En se référant à la disponibilité du bois en Suisse (chapitre 2) et aux différentes technologies possibles pour l'utilisation énergétique du bois (chapitre 3), l'utilisation optimale de cette ressource limitée est maintenant discutée d'un point de vue systémique, environnemental et économique. Du point de vue systémique, la demande totale d'énergie en Suisse pour différents services et les substituts non fossiles potentiellement disponibles sont analysés afin de déduire des objectifs significatifs pour l'utilisation du bois.

### 4.1 Utilisation comme matériau ou comme énergie ?

Ressource limitée et à usages multiples, le bois doit être utilisé de manière à optimiser ses avantages environnementaux et socio-économiques, de la production à la consommation. L'économie des ressources fossiles, l'augmentation de l'efficacité des ressources et la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> jouent ici un rôle particulièrement important. À cet égard, **il est important que le bois soit utilisé comme matériau** (par exemple pour la construction et les matériaux d'isolation) dans la plus grande mesure possible et de préférence en cascade, c'est-à-dire plusieurs fois de suite pour l'utilisation matérielle et seulement à la fin pour l'énergie. Cela s'applique, en principe, à tous les types de biomasse ligneuse, y compris les déchets de bois. On oublie souvent, cependant, que des résidus de bois s'accumulent en quantités importantes tout au long de la chaîne de transformation, par exemple dans les scieries, les menuiseries et les fabriques de meubles. Il s'agit presque exclusivement de bois-énergie à faible coût d'approvisionnement et de haute qualité (sec et exempt d'impuretés minérales). Cela signifie que le bois-énergie se retrouve tout au long de la chaîne de production (en tant que déchets de bois), grâce à l'utilisation en cascade.

En Suisse, le bois-énergie forestier, quantitativement important, est généralement un sous-produit de la récolte et de la transformation des grumes et du bois industriel, dans la mesure où il y a toujours des parties d'un arbre qui ne peuvent pas être utilisées comme matériau, pour des raisons techniques et/ou économiques. Mehr *et al.* (2018) ont indiqué que la mise en cascade multiple du bois en Suisse pourrait diminuer les impacts environnementaux: sur l'horizon modélisé de 200 ans, les réductions totales des émissions systémiques par rapport à la mise en cascade unique (c'est-à-dire que tous les déchets de bois sont directement incinérés) se situaient entre 35 et 59 Mt équivalent CO<sub>2</sub> et 43 et 63 kt équivalent PM10. Les questions pertinentes sont les suivantes: quels autres produits sont substitués au cours de la cascade ? Dans quelle mesure le bois peut-il être utilisé complètement et efficacement pour la production d'énergie au final ? En outre, il est plus important d'augmenter l'utilisation du bois primaire, ce qui n'est pas le cas actuellement (Suter *et al.* 2017). Les facteurs qui déterminent les incidences environnementales des futurs scénarios d'utilisation du bois sont l'efficacité du

traitement des déchets, les effets du stockage (dans le cas de la comptabilisation du carbone biogénique) et les options en cascade disponibles. Pourtant, ces dernières années, **l'utilisation du bois en cascade a peu progressé**. D'une part, il manque en Suisse des capacités de production pour l'utilisation matérielle des assortiments de bois actuellement utilisés pour l'énergie, à savoir les industries de la pâte à papier et des panneaux de particules, ce qui signifie que l'utilisation énergétique reste la seule alternative. D'autre part, le bois-énergie est de plus en plus utilisé pour remplacer les sources d'énergie non renouvelables, ce qui présente également des avantages. Sur la base d'une analyse du cycle de vie, Vadenbo *et al.* (2018) ont démontré qu'un déploiement accru du bois-énergie d'origine nationale – à l'exclusion du bois forestier adapté comme matériau – serait bénéfique pour l'environnement.

**Le bois de moindre qualité est généralement utilisé à des fins énergétiques, mais les bioraffineries peuvent également en faire un usage matériel** (Celebi *et al.* 2017). Une étude de cas menée par l'EPFL (Studer et Poldervaart 2017) analyse une bioraffinerie qui produit du butanol, de l'acétone et de l'éthanol par voie biochimique, tout en convertissant les résidus par voie thermo-chimique en gaz de synthèse. Ce gaz synthétique est utilisé pour produire de la chaleur et de l'électricité pour la bioraffinerie, une unité de carbone biogénique remplaçant 0,85 unité de CO<sub>2</sub> fossile. Avec l'approche de la production combinée de chaleur et de carburant, la substitution des émissions PRG par unité de carbone biogénique atteint 2,5 à 3 fois la valeur obtenue avec le bois dans une chaudière (Celebi *et al.* 2019). Les bioraffineries n'existent pas encore en Suisse, mais leur faisabilité est discutée, notamment en termes d'approvisionnement, de produits, de taille des installations, d'efficacité économique et de compétitivité (Poldervaart 2016; Riediker 2021).

**L'allocation du bois est décidée par le marché et la politique.** Jusqu'à présent, les décisions en faveur de l'utilisation en tant que matériau ont été prises dans la pratique, principalement pour des raisons économiques et non sur la base d'arguments environnementaux. C'est pourquoi la demande structurellement décroissante de bois d'industrie et de grumes de feuillus (dé-industrialisation) et la demande croissante de bois-énergie ont conduit à une situation où les forêts fournissent une grande partie du bois-énergie. Cette situation pourrait changer à l'avenir. L'objectif politique de décarbonisation de l'économie européenne peut donner un nouvel élan à l'utilisation matérielle du bois, car de nombreuses matières premières fossiles devront être remplacées d'ici 2050. Par exemple, dans le secteur de l'isolation, des assortiments de bois de qualité inférieure peuvent être utilisés à grande échelle, ce qui permet d'obtenir des prix plus élevés et de concurrencer leur utilisation énergétique. Dans le même temps, cependant, on assiste à l'émergence de l'utilisation du bois de qualité supérieure à des fins énergétiques. Plus précisément, en raison de la place croissante que prend le bois (et d'autres biomasses) pour combler les lacunes

du secteur énergétique, il est désormais possible d'obtenir des prix plus élevés pour le bois-énergie. Dans ce contexte, le bois est plus susceptible d'être rentable dans le secteur de la chaleur et de la mobilité que dans le secteur de l'électricité, où le photovoltaïque (PV) et l'éolien sont plus compétitifs pour la production d'énergie. Cependant, le photovoltaïque et l'éolien sont intermittents et stochastiques, avec des variations saisonnières, tandis que le bois est un combustible stocké qui peut être utilisé à la demande. Facile à distribuer, il peut ensuite être converti en de multiples services énergétiques pour l'utilisation finale. Par conséquent, **on peut s'attendre à une augmentation de la demande de bois, tant pour l'utilisation comme matériau que pour l'énergie**, et cela pourrait être plus qu'un phénomène à court terme étant donné l'objectif politique de neutralité climatique. Il convient donc de garder à l'esprit que les possibilités d'utilisation énergétique présentées ici et leur diffusion dépendront aussi fortement des choix effectués dans le contexte plus large de l'utilisation du matériau bois et de l'exploitation des forêts en général. Cependant, les quantités demandées d'assortiments de bois de qualité inférieure peuvent être très différentes pour les matériaux et pour l'énergie; dans le cas d'une utilisation matérielle, des produits de haute qualité peuvent être fabriqués à partir de ces assortiments, mais dans une quantité inférieure à celle qui est possible lorsque le bois est utilisé à des fins énergétiques.

## 4.2 Possibilités d'utilisation de l'énergie

La consommation globale d'énergie finale en Suisse s'est élevée à 834 PJ en 2019 et à 747 PJ en 2020 (OFEN 2021a, tableau 14), première année de pandémie. Sur ces valeurs totales, 201 PJ en 2019 (24%) et 203 PJ en 2020 (27%) sont issus de ressources renouvelables (OFEN 2021b). Le bois a représenté 4,7% (2019) et 5,3% (2020) de la consommation d'énergie renouvelable. Les principaux secteurs consommateurs d'énergie sont la chaleur, la mobilité et l'électricité (pour les applications autres que la chaleur et la mobilité). Les parts de consommation finale d'énergies renouvelables en 2020 étaient de 24% pour la production de chaleur et de 60% pour la consommation d'électricité, tandis que la part pour la mobilité restait très faible. Le bois joue actuellement un rôle substantiel dans le chauffage (environ 11%; Energie-bois Suisse 2016), mais un rôle subordonné dans l'électricité et surtout dans la mobilité.

**Le chauffage** est le secteur qui consomme le plus d'énergie annuellement (OFEN 2021c). La quantité totale d'énergie consommée pour le chauffage a diminué de 5% de 2019 à 2020, mais sa part dans la consommation totale d'énergie a augmenté (de 43% à 48%). La chaleur est utilisée pour fournir de l'eau chaude et du chauffage aux bâtiments, mais aussi comme énergie de processus pour les applications industrielles. L'eau chaude et le chauffage des locaux sont des applications à basse température qui pourraient également être fournies par des pompes à chaleur électriques, des panneaux solaires et l'énergie géothermique, qui présentent tous un potentiel d'expansion important. Toutefois, ces solutions ne sont

guère adaptées à la fourniture de chaleur industrielle à haute température. La combustion du bois pour ces applications semble donc être la solution la plus adaptée. D'autres solutions pour fournir cette chaleur industrielle sont la production combinée de chaleur et de combustible, la production de biocarburant gazeux ou liquide, ainsi que la combustion de résidus de bois après que certaines fractions, comme les hydrates de carbone, ont été utilisées pour synthétiser des combustibles liquides ou des produits chimiques. La rentabilité de la fourniture de chaleur industrielle reste toutefois un défi majeur, contrairement aux installations de bois-énergie avec réseau de chaleur (OFEN 2021d). Afin de remplacer les combustibles fossiles, il est prévu de développer les réseaux thermiques alimentés par la chaleur des déchets et les énergies renouvelables, qui distribuent de la chaleur ou du froid à différents niveaux de température (EnergieSuisse 2021). Les réseaux thermiques alimentés par le bois ou d'autres énergies renouvelables joueront un rôle important à l'avenir, notamment dans les agglomérations, comme l'indiquent les Perspectives énergétiques 2050+ (OFEN 2022).

**Le secteur de la mobilité** présente la deuxième plus grande consommation annuelle d'énergie, soit 38% de la consommation totale en 2019 et 32% en 2020 (OFEN 2021c). Le transport individuel et le transport de marchandises sont les plus dépendants des énergies fossiles, avec une part de 95% (OFEN 2019a). Il y a donc un besoin croissant d'électrification de ce secteur, mais cela nécessite des mesures différentes pour chaque sous-secteur. L'électrification à court et moyen terme est possible pour le trafic individuel de passagers en alimentant les véhicules à moteur avec des batteries. Des progrès encourageants ont également été réalisés dans le domaine de l'électrification des poids lourds (Transport et Environnement 2021). Cependant, l'aviation continuera probablement à utiliser des carburants liquides à haute densité énergétique pendant de nombreuses années. Ainsi, la synthèse de ces carburants à partir de ressources renouvelables, comme le bois ou d'autres matières premières lignocellulosiques, est fortement recommandée, même si la demande totale ne peut être couverte par la biomasse domestique.

**L'électricité** est déjà un vecteur énergétique important pour plusieurs applications et, principalement en raison de la grande part de l'énergie hydraulique en Suisse, seulement env. 40% du mix électrique actuel est non renouvelable (principalement nucléaire; OFEN 2021b). Ainsi, pour répondre à la demande actuelle, il faudrait produire en plus environ 80 PJ/a d'électricité à partir de ressources renouvelables. Cependant, avec l'électrification croissante prévue de la mobilité, entre autres, la demande future augmentera probablement. Pour satisfaire cette demande, il est possible de développer l'énergie hydraulique, l'énergie photovoltaïque, l'énergie éolienne et l'énergie de la biomasse. On estime que l'énergie hydraulique et éolienne en Suisse ne peut être augmentée que d'environ 12 PJ/a et 32 PJ/a, respectivement (OFEN 2019b). En revanche, le potentiel total du photovoltaïque en Suisse est estimé à 240 PJ/a (OFEN 2019c). Cependant, la nature fluctuante de la production d'électricité avec les technologies éoliennes et



solaires représente un défi pour le futur système énergétique. Afin de stabiliser le réseau électrique, de nouveaux systèmes de contrôle doivent être développés, ainsi que des technologies de stockage de l'électricité. La biomasse peut également être convertie en électricité, par exemple dans des centrales de cogénération ou en la transformant en méthane, qui peut ensuite être transformé en électricité dans une centrale de cogénération, soit directement, soit à la demande, après avoir été injecté dans le réseau de gaz naturel. Le stockage du méthane est donc un moyen prometteur d'équilibrer les fluctuations de l'énergie solaire.

**Dans l'ensemble, les contributions raisonnables du bois au futur système énergétique comprennent la conversion en biocarburants, la production de chaleur haute température, et l'équilibrage des fluctuations de l'énergie solaire.**

### 4.3 Utilisation optimale de l'énergie

Pour la conception du futur système énergétique suisse, la double nature du bois, en tant qu'énergie, mais aussi en tant que source de carbone, doit être prise en considération. Plus précisément, l'utilisation du bois (c'est-à-dire du carbone renouvelable) pour satisfaire la demande énergétique du système national contribue non seulement à l'approvisionnement nécessaire en énergie, mais sert également à remplacer le carbone fossile. **Afin de minimiser les émissions de carbone et d'obtenir une circulation maximale du carbone au sein du système énergétique, il convient de recourir au bois en cascade, à des technologies de capture du CO<sub>2</sub> adaptées et à des stratégies de réutilisation du carbone.** En capturant et en reconvertissant le carbone émis par les technologies de conversion primaire en carburants et produits de valeur, les émissions nettes de carbone sont réduites et l'efficacité globale de la conversion du carbone dans le système énergétique national est améliorée.

#### 4.3.1 Modèles de décision pour une utilisation optimale de l'énergie en termes de CO<sub>2</sub> et d'efficacité

Un **modèle d'optimisation mathématique** qui prend en compte l'ensemble du système énergétique de la Suisse a été développé à l'aide du concept Energyscope ([www.energyscope.ch](http://www.energyscope.ch)) **pour définir le rôle du bois dans le futur mix énergétique** (Gironès *et al.* 2017; Li *et al.* 2020). La situation actuelle de l'utilisation du bois comme combustible a été simulée et validée, en tenant compte de tout le potentiel d'utilisation du bois dans les chaudières pour la production de chaleur. Cependant, les considérations relatives à la maximisation de l'efficacité, aux coûts variables des processus et à la disponibilité des matières premières, ainsi que la nécessité de minimiser les émissions, rendent impérative la recherche de solutions alternatives pour la stratégie future. À cette fin, près de mille scénarios différents, tenant compte des diverses disponibilités de biomasse et des coûts d'investissement variables pour les processus de conversion,

ont été utilisés pour reproduire l'incertitude inhérente à ces paramètres cruciaux (Li *et al.* 2020). Tous les scénarios utilisés prennent en compte la décarbonisation complète du système énergétique d'ici 2050, et l'objectif de satisfaire le plus efficacement possible la demande énergétique du système tout en minimisant le coût global.

**Une analyse approfondie des résultats de l'optimisation révèle que, pour une charge variable de 13–17 TWh/a (47–61 PJ/a) de bois dans le système énergétique, la quantité totale est toujours utilisée pour produire des biocarburants gazeux et liquides ou, dans une faible mesure, contribuer aux besoins en chaleur du système** (Li *et al.* 2020). Dans la majorité des scénarios optimisés, la biomasse ligneuse est directement convertie en gaz naturel synthétique (GNS) par gazéification et reformage ultérieur. En effet, la gazéification du bois peut fournir au système jusqu'à 9,5 TWh/a de GNS et constitue la plus grande ressource de production de gaz de ce type. Une partie du bois est utilisée pour fournir jusqu'à 3,7 TWh/a de combustibles liquides synthétiques en couplant la gazéification de la biomasse et la synthèse Fischer-Tropsch. Selon l'analyse des différents scénarios, la transformation directe de la biomasse ligneuse en **combustibles liquides synthétiques représente jusqu'à 40%** de leur production au sein du système énergétique. La partie restante est dérivée de processus de synthèse alternatifs qui utilisent l'option de conversion d'électricité en gaz, en convertissant le CO<sub>2</sub> capturé (y compris le CO<sub>2</sub> biogénique) et l'hydrogène renouvelable (H<sub>2</sub>). La production de H<sub>2</sub> est également présente dans un nombre limité, mais non négligeable de solutions, s'élevant à un maximum de 5,5 TWh/a obtenu par gazéification du bois.

La gazéification du bois est utilisée de préférence pour produire des biocarburants gazeux et liquides, en raison de leur stockage plus facile. En revanche, **l'utilisation du bois pour la chaleur et l'électricité dans les centrales de cogénération semble plutôt limitée, avec un maximum de 18% de l'énergie totale fournie.** En effet, la chaleur est principalement produite par la combustion de déchets et la cogénération avec du gaz naturel. En outre, **la récupération de la chaleur résiduelle des gazéificateurs à haute température peut contribuer à 10–13% de la chaleur totale produite à haute température.** Il s'agit d'un aspect important, car cela signifie que de la chaleur supplémentaire est fournie au système, mais aussi que l'efficacité du processus de conversion de la biomasse peut être maximisée. Une quantité supplémentaire de chaleur à haute température (7–10%) peut également être produite indirectement à partir du bois en valorisant le GNS produit.

Selon l'analyse des scénarios, **il ne faut pas privilégier la production directe d'électricité à partir du bois**, car l'énergie nécessaire peut être fournie par d'autres sources renouvelables, telles que l'énergie photovoltaïque (PV) et l'énergie hydraulique. C'est ce que l'on constate en comparant le potentiel de la biomasse et la capacité des autres sources d'énergie renouvelables. Outre les économies d'électricité et l'efficacité, un facteur clé de la gestion de l'approvisionnement en électricité dans le système énergétique suisse reste l'utilisation

des barrages hydroélectriques et des systèmes photovoltaïques existants (stockage H<sub>2</sub>), qui détiennent la plus grande part des technologies de stockage saisonnier (70–85% de l'énergie stockée; Li *et al.* 2021).

L'utilisation du carbone biogénique pour stocker indirectement l'énergie sous une forme chimique en utilisant le concept de conversion d'électricité en gaz est une autre opportunité importante. Jusqu'à 6 TWh/a de H<sub>2</sub> renouvelable peuvent être produits par électrolyse, en utilisant de l'électricité qui ne peut pas être utilisée directement dans le système énergétique et qui doit être stockée. Dans la plupart des solutions, cependant, la part de la **conversion de l'électricité en gaz dans la production totale de GNS est limitée à 4–6%** en raison de contraintes économiques et d'efficacité, la majeure partie du carbone capturé étant utilisée pour synthétiser des biocarburants liquides pour l'aviation.

Les considérations ci-dessus relatives à la stratégie d'utilisation de la biomasse ligneuse, principalement pour les biocarburants et accessoirement pour la production de chaleur et d'électricité, supposent qu'il existe des **stratégies efficaces de séquestration du CO<sub>2</sub>** pour éliminer le carbone du système, ce qui n'est pas encore le cas. La figure 15 montre la distribution mensuelle simulée des flux de carbone élémentaire dans le système énergétique en 2050. Ces valeurs sont dérivées des émissions équivalentes de CO<sub>2</sub> attribuées aux différents processus et secteurs producteurs et consommateurs d'énergie. Les valeurs positives représentent les processus libérant du carbone dans le système énergétique (c'est-à-dire la consommation de biomasse et de déchets, ainsi que la production de ciment), tandis que les valeurs négatives représentent les processus

éliminant le carbone existant en l'utilisant comme ressource dans les technologies de conversion d'électricité en produits (carburants, chaleur et électricité), ainsi que la séquestration. La figure 15 fait référence à un scénario optimisé indicatif pour 2050 et représente la masse équivalente de carbone qui circule dans le système énergétique sur une base mensuelle. En outre, cette catégorisation permet d'identifier les principaux « acteurs » sous la forme de technologies émettrices ou consommatrices de carbone. Les technologies de séquestration jouent clairement un rôle crucial dans le maintien du bilan carbone dans le système. En effet, cela est vrai pour tous les résultats, où la séquestration du CO<sub>2</sub> est toujours employée pour éliminer davantage de carbone du système et contribuer à une décarbonisation complète. Dans l'ensemble, l'analyse des scénarios montre que, **pour parvenir à un système énergétique net zéro en 2050, il faut séquestrer 10,5 à 12,6 Mt/a de CO<sub>2</sub>**. Cette valeur comprend également une contribution moyenne de 6 Mt/a de CO<sub>2</sub> provenant des activités agricoles.

**En résumé:** Dans le système énergétique net zéro simulé pour la Suisse en 2050, la biomasse, et notamment la biomasse ligneuse, est utilisée pour la gestion de l'énergie, soit par la production de chaleur et d'électricité en période hivernale, soit par la production de combustible stocké qui peut être facilement converti en carburants pour les applications de transport. Les procédés de conversion du bois sont également utilisés pour produire de la chaleur à haute température dans l'industrie par la production combinée de chaleur et de carburant pour le transport. Le choix entre combustible liquide et gazeux est principalement associé au système de transport. Lorsque l'aviation est incluse dans le sys-

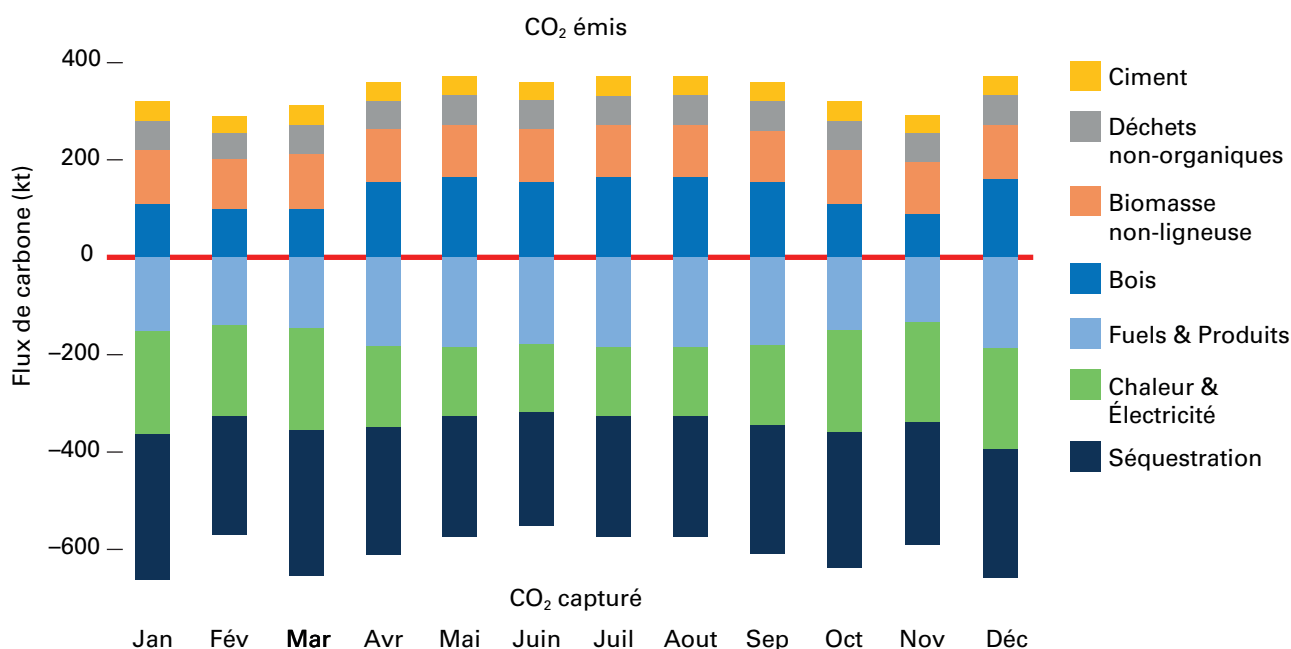


Figure 15: Distribution mensuelle des flux de carbone dans un scénario du système énergétique suisse en 2050. Les valeurs positives correspondent au rejet de CO<sub>2</sub> (conversion de la biomasse et des déchets, ainsi que de la production du ciment), tandis que les valeurs négatives correspondent à l'utilisation du CO<sub>2</sub> capturé, comme dans les technologies de conversion électricité vers les produits (carburants, chaleur et électricité, séquestration). Même si la majorité des flux de carbone peuvent être fermés dans le système énergétique suisse, une part importante du CO<sub>2</sub> doit être séquestrée pour parvenir à des émissions nettes de carbone nulles en 2050. Adapté de Li *et al.* (2020).

tème énergétique, la production de biocarburant est prioritaire dans l'utilisation de la biomasse. En outre, la conversion de la biomasse permet de produire du CO<sub>2</sub> biogénique, qui peut à son tour être séquestré pour compenser les émissions inévitables de l'agriculture.

#### 4.3.2 Autres considérations

Les besoins en terres, l'acceptation sociale, les effets sur les revenus ou l'emploi, et l'impact sur la biodiversité, ainsi que l'élimination des particules et des cendres de bois, sont d'autres critères importants qui doivent être pris en considération lors de la recherche de solutions optimales pour l'utilisation du bois à des fins énergétiques.

En ce qui concerne les **besoins en terres**, l'utilisation du bois forestier à des fins énergétiques peut être efficace. En Suisse, une petite surface (4,3 km<sup>2</sup>) est occupée par l'ensemble des installations de la chaîne d'approvisionnement afin d'utiliser tout le potentiel durable (Bowman *et al.* 2021). En effet, la forêt est cultivée à des fins diverses et la surface supplémentaire nécessaire à l'exploitation du bois-énergie est uniquement constituée de zones constructibles (par exemple pour des installations de conversion) et non de forêts ou de terres agricoles. Pour toute la biomasse ligneuse de la Suisse, on estime qu'une surface de 12,6 km<sup>2</sup> serait nécessaire.

Si, en général, l'**acceptation sociale** des énergies renouvelables est élevée, un rejet éventuel local peut entraver le développement de projets d'énergie renouvelable (Segreto *et al.* 2020). En principe, cela s'applique également à la bioénergie, mais dans une bien moindre mesure dans le cas spécifique de l'utilisation du bois-énergie. Néanmoins, lors de la réalisation de grandes installations de bois-énergie, les recours de personnes concernées peuvent représenter un obstacle important (OFEN 2021d). Ils peuvent retarder et augmenter considérablement le coût des projets, et finalement stopper leur réalisation. Toutefois, la pratique suisse montre que les recours peuvent être évités grâce à une bonne planification (notamment le choix du site), ainsi qu'à une communication précoce et continue avec les personnes concernées. Les procédures d'approbation devraient être accélérées en optimisant les processus au niveau cantonal et municipal. Il est important de bien comprendre les éléments qui influencent les attitudes du public (Wüstenhagen *et al.* 2007; Stadelmann-Steffen 2017).

L'utilisation comme matériau génère plus d'**emplois** (et de valeur ajoutée) que l'utilisation comme énergie, tant en termes absolus que par rapport à un mètre cube de bois, à toutes les étapes de la chaîne de valeur (OFEV 2013). L'utilisation du bois comme matériau nécessite globalement plus d'étapes de transformation et donne lieu à des produits de grande valeur. Cependant, en Suisse, on manque de capacités de transformation pour l'utilisation comme matériau des assortiments de bois correspondants, de valeur plutôt faible. Les avantages de l'utilisation en cascade sont donc actuellement de nature théorique, bien que les effets positifs de l'utili-

sation comme énergie sur l'emploi soient déjà valables aujourd'hui et ne soient pas négligeables.

L'effet de la production de bois et de la production de bioénergie sur la **biodiversité** est très complexe. Elle est très spécifique au site et dépend des essences, de la gestion des ressources et de la chaîne d'approvisionnement, ainsi que du type de conversion et d'utilisation de l'énergie, ce qui inclut les technologies de recyclage et d'élimination appliquées. En général, la production de bois dans les forêts peut être considérée comme particulièrement risquée pour la biodiversité. En Suisse, la loi sur les forêts exige la production durable de tous les assortiments de bois. Dans le cadre de la gestion durable des forêts, la régénération naturelle et les structures hétérogènes des peuplements sont encouragées, tandis que les coupes claires sont interdites. L'utilisation réglementée du bois entraîne des changements périodiques des conditions d'habitat, qui peuvent même améliorer la biodiversité des forêts exploitées (Krumm *et al.* 2020).

Le bois-énergie suisse n'est pas produit dans des plantations dédiées; il s'agit d'un sous-produit des grumes issu de la sylviculture durable avec de longues périodes de rotation. En outre, le bois mort est conservé de manière ciblée et n'est pas utilisé à des fins énergétiques, et la récupération du petit bois est largement évitée. Une utilisation complète des arbres, qui est économiquement essentielle pour la gestion des forêts de protection dans les régions alpines, pourrait avoir des conséquences négatives pour les utilisateurs de bois mort (faune, champignons et flore) à moyen et long terme. Ces conséquences peuvent être minimisées par une conception appropriée du processus, par exemple le retour des branches dans le peuplement. Jusqu'à présent, aucun impact négatif de l'utilisation du bois-énergie provenant des forêts et des paysages sur la biodiversité en général n'a été démontré. À l'avenir, le plus grand conflit avec la biodiversité forestière est à prévoir là où les durées de rotation sont réduites, car celles-ci se multiplient actuellement pour des raisons d'adaptation au climat et de production de bois-énergie (Bollmann et Braunisch 2013, 2016).

La combustion du bois est à l'origine de **polluants, notamment de particules**, qui ont des effets divers sur la santé et le climat. Ces particules peuvent être divisées en deux groupes: (i) les aérosols primaires sous forme de sels, de suie et de composés organiques condensables (COC); et (ii) les aérosols secondaires – outre les nitrates et les sulfates – en particulier les aérosols organiques secondaires (AOS), qui sont formés par des réactions photochimiques à partir de composés organiques volatils (COV) dans l'atmosphère. Ils sont également produits par des poêles à bois mal utilisés. La part des particules provenant du chauffage au bois augmente fortement pendant les mois d'hiver. Les poêles à bois en sont une source importante en Suisse (Baltensberger *et al.* 2013). Toutefois, il est possible d'y remédier à l'aide de filtres et d'autres technologies et – à ne pas négliger – grâce à un meilleur comportement des utilisateurs et à une meilleure éducation pour éviter l'incinération illégale des déchets et donc la production et le rejet de métaux lourds, d'acide chlorhydrique et de dioxine.

En Suisse, les **cendres de bois** (cendres de grille, de cyclone et de filtre) sont considérées comme des déchets. Elles sont fortement enrichies en métaux lourds, qui sont en partie présents sous la forme de composés chimiques facilement solubles dans l'eau. Les cendres de bois sont donc éliminées dans des décharges (Tobler et Jutz 2020), avec une approche réglementée par l'ordonnance sur la prévention et l'élimination des déchets

VVEA (RS 814.600). Les nutriments contenus dans le bois ne sont pas utilisés aujourd'hui et sont donc perdus. Tant que les cendres ne peuvent pas être utilisées pour la fertilisation, une économie basée sur le bois ne peut pas être entièrement circulaire. Les cendres de bois sont d'ailleurs également produites dans les processus de gazéification du bois et pas exclusivement dans les applications de combustion.

## 5 Conclusions et recommandations

La biomasse ligneuse est une source unique de carbone biogénique qui peut être utilisée pour obtenir des matériaux et de l'énergie sous la forme de divers produits et services. Ses potentialités sont toutefois limitées et, pour des raisons d'efficacité écologique, il convient de privilégier l'utilisation du bois comme matériau. Néanmoins, le bois peut également apporter une contribution importante à la transition énergétique en tant que source d'énergie renouvelable, grâce à sa capacité de stockage, sa flexibilité d'utilisation et son rôle de source de carbone biogénique. Les **avantages de son utilisation comme énergie** sont:

- i. la biomasse ligneuse peut être utilisée pour fournir de la chaleur et de l'électricité, ainsi que des combustibles gazeux ou liquides;
- ii. toutes les voies d'utilisation sont appropriées du point de vue du changement climatique:
  - pour remplacer les combustibles fossiles et donc l'émission de CO<sub>2</sub> fossile,
  - pour permettre la capture du CO<sub>2</sub> biogénique, qui peut être séquestré et donc contribuer aux émissions négatives de carbone;
- iii. le bois-énergie peut stabiliser l'approvisionnement en énergie et le réseau électrique, car sa grande capacité de stockage contribue à l'équilibrage et joue un rôle central dans le couplage des différentes énergies renouvelables.

En conclusion, d'un point de vue fonctionnel, le bois-énergie revêt une importance plus grande que ne le laisse supposer son potentiel comparativement faible. Plus encore que les autres biomasses, le bois-énergie est un **«joker» pour la gestion de la transition énergétique** en raison de sa grande diversité d'utilisation.

L'utilisation énergétique du bois est **technologiquement hétérogène**: des processus biochimiques, thermo-chimiques et physico-chimiques sont nécessaires pour sa conversion en vecteurs énergétiques solides, gazeux ou liquides et pour fournir de la chaleur, de l'électricité ou de la mobilité. Les technologies de conversion multiple ont connu des avancées majeures avec l'aide de BIOSWEET; cependant, certaines technologies innovantes ne sont pas encore prêtes pour le marché. D'autres recherches et mesures politiques sont nécessaires pour utiliser au mieux le bois dans le contexte de la transition énergétique et du changement climatique et pour exploiter les potentiels existants, comme le précisent les Perspectives énergétiques 2050+ (OFEN 2020).

**La technologie de combustion avancée** permet d'élargir la base de matières premières (utilisation de combustibles de biomasse riches en cendres, y compris la biomasse non ligneuse) et facilite ainsi l'exploitation de tous les potentiels. L'impact environnemental de la combustion peut être considérablement réduit par des mesures primaires, telles que des concepts de combustion avancés, la combustion étagée, la surveillance des processus et le contrôle de la combustion. En outre, des mesures secondaires, telles que la séparation des particules, permettent de réduire les polluants dans les émissions atmosphériques, même dans les applications à petite échelle. Enfin, des campagnes sur l'utilisation responsable des appareils de chauffage au bois peuvent contribuer à réduire les émissions.

**Du point de vue de la protection du climat, le bois devrait être utilisé comme matériau dans la mesure du possible.** Cela est particulièrement vrai pour le bois de forêt, mais aussi pour le bois provenant de l'entretien des paysages, les résidus de bois industriels et les déchets de bois. Si possible, le bois doit être utilisé en cascade, c'est-à-dire plusieurs fois de suite comme matériau et seulement ensuite pour l'énergie. En Suisse, il existe des limites à l'utilisation en cascade de bois de mauvaise qualité, principalement parce que les industries classiques du bois (pâte à papier et panneaux de particules) ont largement disparu, notamment pour des raisons économiques. Toutefois, à l'avenir, les bioraffineries pourraient offrir de nouvelles possibilités d'utilisation matérielle du bois de faible qualité, car celui-ci a une teneur élevée en carbone biogénique. En outre, il est important de s'assurer que tout le bois utilisé provient d'une production durable, ce qui est exigé en Suisse.

**L'offre limitée de bois** signifie que les gros projets d'investissement doivent s'assurer de sa disponibilité dans le temps. Dans ce contexte, il faut tenir compte de la concurrence entre l'utilisation comme matériau et comme énergie, mais aussi des changements possibles dans l'environnement politique. En ce qui concerne la production de bois dans la forêt, les stratégies de réduction des stocks offrent la possibilité d'augmenter l'offre de bois-énergie dans une fenêtre temporelle de plusieurs décennies.

Le potentiel limité du bois en tant que source d'énergie biogénique précieuse **nécessite une utilisation efficace**. Avec l'utilisation actuelle du bois-énergie (95% comme chauffage), ce n'est pas le cas. En hiver, la production de chaleur et d'électricité à partir du bois est avantageuse. **Cependant, en termes d'efficacité énergé-**

**tique et de substitution du carbone fossile par du carbone biogénique, il est plus avantageux de produire de la chaleur industrielle à haute température et des combustibles gazeux et liquides. Vient ensuite la production d'électricité dans les centrales de cogénération. Dans la mesure du possible, il convient d'utiliser la chaleur résiduelle et de capter le CO<sub>2</sub> biogénique libéré** pour compenser les émissions inévitables, par exemple celles de l'agriculture. Pour des raisons liées à la politique de l'énergie, du climat et de la lutte contre la pollution de l'air, la chaleur du bois devrait être produite principalement dans des installations automatiques de grande taille associés à des réseaux de chaleur.

Le choix entre la production de combustible gazeux ou liquide dépend principalement du stockage nécessaire et du système de transport prévu. Bien qu'elle soit moins efficace que la production de gaz naturel synthétique, la production de carburant liquide est privilégiée pour les solutions de transport qui nécessitent une densité énergétique et un rendement de conversion élevés,

comme les carburants pour les réacteurs. En outre, les systèmes de conversion d'électricité en gaz permettent le stockage saisonnier de l'énergie renouvelable dans les réseaux de distribution de gaz existants.

En définitive, la **situation concrète** de la demande et de l'offre de toutes les sources d'énergie renouvelables est cruciale pour déterminer la voie appropriée d'utilisation du bois-énergie. L'évaluation de son utilisation doit être élargie dans le sens d'une analyse d'impact globale de toute la chaîne d'approvisionnement et soutenue par des bases orientées vers la pratique et un cadre politique permettant d'exploiter le potentiel suisse de bois-énergie (OFEN 2021d). **La recherche** sur le rôle futur du bois en tant que source d'énergie devrait soutenir ces approches holistiques, en mettant particulièrement l'accent sur les effets sur le climat et la durabilité et sur l'intégration du bois dans les systèmes d'utilisation de l'énergie et des ressources. Cela nécessite une recherche transdisciplinaire et axée sur le système, impliquant toutes les parties prenantes.

## 6 Références

- Abu-Omar, M.M.; Barta, K.; Beckham, G.T.; Luterbacher, J.S.; Ralph, J.; Rinaldi, R.; Romañ-Leshkov, Y.; Samec, J.S.M.; Selsand, B.F.; Wang, F., 2021: Guidelines for performing lignin-first biorefining. *Energy & Environmental Science* 14: 262–292. <https://doi.org/10.1039/d0ee02870c>
- Amiri, M.T.; Dick, G.R.; Questell-Santiago, Y.M.; Luterbacher, J.S., 2019: Fractionation of lignocellulosic biomass to produce uncondensed aldehyde-stabilized lignin. *Nature Protocols* 14, 3: 921–954. <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0121-7>
- Antonini, C.; Treyer, K.; Moiola, E.; Bauer, C.; Schildhauer, T.J.; Mazzotti, M., 2021: Hydrogen from wood gasification with CCS—a techno-environmental analysis of production and use as transport fuel. *Sustainable Energy and Fuels* 5, 10: 2602–2621. <https://doi.org/10.1039/d0se01637c>
- Bajohr, S.; Schollenberger, D.; Buchholz, D.; Weinfurter, T.; Götz, M.; 2014: Kopplung der PtG-Technologie mit thermochemischer Biomassevergasung: Das KIC Projekt «DemoSNG». *gwf – Gas/Erdgas* 155: 470–475.
- Baltensperger, U.; Bruns, E.; Dommen, J.; El Haddad, I.; Heringa, M.F.; Prévôt, A.S.H.; Slowik, J.G.; Weingartner, E.; Hueglin C.; Herich, H.; Keller, A.; Burtscher, H.; Heck, T.; Meyer, N.K.; 2013: Holzfeuerungen: eine bedeutende Quelle von Feinstaub in der Schweiz. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 164, 12: 420–427. <https://doi.org/10.3188/szf.2013.0420>
- Barroso, G.; Roth, S.; Nussbaumer, T., 2019a: Investigation of biomass conversion on a moving grate by pyrolysis gas analysis and fuel bed modelling. *Energy* 174: 897–910. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.002>
- Barroso, G.; Hediger, L.; Nussbaumer, T., 2019b: Modelling and validation of biomass combustion in a screw burner. *Fuel* 254: 115672. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115672>
- Barroso, G.; Nussbaumer, T.; Ulrich, M.; Reiterer, T.; Feldmeier, S., 2019c: Scale-up methodology for automatic biomass furnaces. *Journal of the Energy Institute* 93, 2: 591–604. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.06.006>
- Bauer, C.; Hirschberg, S.; Bäuerle, Y.; Biollaz, S.; Calbry-Muzyka, A.; Cox, B.; Heck, T.; Lehnert, M.; Meier, A.; Prasser, H.-M.; Schenler, W.; Treyer, K.; Vogel, F.; Wieckert, H.C.; Zhang, X.; Zimmermann, M.; Burg, V.; Bowman, G.; Erni, M.; Saar, M.; Tran, M.Q., 2017: Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies. Final report in English with summaries in German and French. Paul Scherrer Institute. <https://www.psi.ch/sites/default/files/import/lea/HomeEN/Final-Report-BFE-Project.pdf>
- Blair, M.J.; Gagnon, B.; Klain, A.; Kulišić B., 2021: Contribution of biomass supply chains for bioenergy to sustainable development goals. *Land* 10, 2: 181. <https://doi.org/10.3390/land10020181>
- Bollmann, K.; Braunisch, V., 2013: To integrate or to segregate: balancing commodity production and biodiversity conservation in European forests. In: Kraus D., Krumm F. (eds.), *Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity*, pp. 18–31. European Forest Institute (EFI).
- Bollmann, K.; Braunisch, V., 2016: Auswirkungen des Klimawandels auf Bergwaldvogelarten. In: Pluess A.R., Augustin S., Brang P. (eds.), *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*, pp. 287–309. Haupt. <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:10622>
- Bowman, G.; Burg, V.; Erni, M.; Thees, O.; Björnsen, A., 2021: Energy and land requirements for bioenergy, *GCB Bioenergy*, 13, 9: 1466–1480. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12869>
- Brethauer, S.; Riediker, M.; Thees, O.; Studer, M.H.P., 2021: Die Rolle von Biomasse im zukünftigen schweizerischen Energie- und Rohstoffsystem. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 172, 1: 7–15. <https://doi.org/10.3188/szf.2021.0007>
- Burg, V.; Bowman, G.; Erni, M.; Lemm, R.; Thees, O., 2018: Analyzing the potential of domestic biomass resources for the energy transition in Switzerland. *Biomass Bioenergy* 111: 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.007>
- Burg, V.; Bowman, G.; Hellweg, S.; Thees, O., 2019: Long-term wet bioenergy resources in Switzerland: drivers and projections until 2050. *Energies* 12, 18: 3585. <https://doi.org/10.3390/en12183585>
- Celebi, A.D.; Ensinas, A.; Sharma, S.; Maréchal, F., 2017: Early-stage decision making approach for the selection of optimally integrated biorefinery processes. *Energy* 137: 908–916. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.080>
- Celebi, A.D.; Sharma, S.; Ensinas, A.V.; Maréchal, F., 2019: Next generation cogeneration system for industry – combined heat and fuel plant using biomass resources. *Chemical Engineering Science* 204: 59–75. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.04.018>
- CTI, Commission pour la technologie et l'innovation (dès 2018 Innosuisse), 2013: Pôles de compétence en recherche énergétique (SCCER): feu vert concernant deux requêtes. communiqué de presse. <https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiques.msg-id-50481.html>
- CTU AG, 2014: Lignogaz – Methan aus Holz, Projektierung einer 2.67 MW für den Standort Mont-la-Ville (VD). Bundesamt für Energie. <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=61169&Load=true>
- Diestel, S.; Weimar, H., 2014: Der Kohlenstoffgehalt in Holz- und Papierprodukten – Herleitung und Umrechnungsfaktoren. *Thünen Working Paper* 38. urn:nbn:de:gbv:253-201412-dn054392-0
- Du, Y.P.; Héroguel, F.; Luterbacher, J.S., 2018: Slowing the kinetics of alumina sol-gel chemistry for controlled catalyst overcoating and improved catalyst stability and selectivity. *Small* 14, 34: 1801733. <https://doi.org/10.1002/smll.201801733>
- EEA, European Environment Agency, 2018: The circular economy and the bioeconomy, partners in sustainability. EEA Report, 8. [https://www.eea.europa.eu/ds\\_resolveuid/b2e1e5d081ab4ecf9503320c2bf9c4d1](https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/b2e1e5d081ab4ecf9503320c2bf9c4d1)
- EnergieSchweiz, 2021: Faktenblatt Thermische Netze. <http://www.verenum.ch/Dokumente/Faktenblatt.pdf>
- EPA, United States Environmental Protection Agency, 2021: Understanding Global Warming Potentials. <https://epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>. (last updated on March 2022)
- Erni, M.; Thees, O.; Lemm, R., 2017: Altholzpoteziale der Schweiz für die energetische Nutzung. Ergebnisse einer

- Vollerhebung. WSL Berichte 52. WSL. <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A9107/datastream/PDF/view>
- Erni, M.; Burg, V.; Bont, L.; Thees, O.; Ferretti, M.; Stadelmann, G.; Schweizer, J., 2020: Current (2020) and Long-Term (2035 and 2050) Sustainable potentials of wood fuel in Switzerland. *Sustainability* 12, 22: 9749. <https://doi.org/10.3390/su12229749>
- Erni, M.; Holm, S.; Thees, O.; Schweizer, J., 2021: Verfügbarkeit von Waldenergieholz in der Schweiz. Neue interaktive Karte. *Wald und Holz* 102, 6: 6–7. <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:27094>
- European Commission, 2012: Directorate-General for Research and Innovation, Innovating for sustainable growth: a bioeconomy for Europe. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/6462>
- Fehrenbach, H.; Bischoff, M.; Böttcher, H.; Reise, J.; Hennenberg, K.J., 2022: The Missing Limb: Including Impacts of Biomass Extraction on Forest Carbon Stocks in Greenhouse Gas Balances of Wood Use. *Forests* 13, 3: 365. <https://doi.org/10.3390/f13030365>
- FHNW, University of Applied Sciences Northwestern Switzerland, 2019: ERA-LEARN Project, Development of a new low-cost low-emission micro-scale pellet stove with advanced process control. <https://www.era-learn.eu/network-information/networks/bioenergy/12th-joint-call-of-era-net-bioenergy-and-2nd-additional-call-of-bestf3/development-of-a-new-low-cost-low-emission-micro-scale-pellet-stove-with-advanced-process-control> (last updated March 2020)
- Gassner, M.; Maréchal, F., 2008: Thermo-economic optimisation of the integration of electrolysis in synthetic natural gas production from wood. *Energy* 33, 2: 189–198. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.09.010>
- Gassner, M.; Maréchal, F., 2012: Thermo-economic optimisation of the polygeneration of synthetic natural gas (SNG), power and heat from lignocellulosic biomass by gasification and methanation. *Energy & Environmental Science* 5, 2: 5768–5789. <https://doi.org/10.1039/C1EE02867G>
- Gassner, M.; Baciocchi, R.; Maréchal, F.; Mazzotti, M., 2009: Integrated design of a gas separation system for the upgrade of crude SNG with membranes. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 48, 9: 1391–1404. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2009.07.002>
- GAYA, 2021: Project GAYA. <http://www.projetgaya.com/en/> (last updated March 2022)
- Geleynse, S.; Brandt, K.; Garcia-Perez, M.; Wolcott, M.; Zhang, X., 2018: The alcohol-to-jet conversion pathway for drop-in biofuels: Techno-Economic Evaluation. *Chemistry-Sustainability-Energy-Materials* 11, 21: 3728–3741. <https://doi.org/10.1002/cssc.201801690>
- Gironès, V.C.; Moret, S.; Peduzzi, E.; Nasato, M.; Maréchal, F., 2017: Optimal use of biomass in large-scale energy systems: Insights for energy policy. *Energy* 137: 789–797. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.027>
- Held, J., 2016: SNG from Wood – the biogas project. In: Schildhauer, T.J.; Biollaz, S.M. (eds.), *Synthetic natural gas from coal, dry biomass, and Power-to-Gas applications*, pp. 181–190. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119191339.ch6>
- Heyne, S.; Seemann, M.; Schildhauer, T.J., 2016: Coal and biomass gasification for SNG production. In: Schildhauer, T.J.; Biollaz, S.M. (eds.), *Synthetic natural gas from coal, dry biomass, and Power-to-Gas applications*, pp. 5–40. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119191339.ch2>
- Holzenergie Schweiz, 2016: Warum Holzenergie für das Klima. [https://www.holzenergie.ch/ueber-holzenergie/warum-holzenergie/fuer-das-klima.html#:~:text=Heizen%20mit%20Holz!&text=Holzenergie%20tr%C3%A4gt%20aktuell%20\(Stand%202016,Anteil%20am%20Schweizer%20Energienmix%20bei](https://www.holzenergie.ch/ueber-holzenergie/warum-holzenergie/fuer-das-klima.html#:~:text=Heizen%20mit%20Holz!&text=Holzenergie%20tr%C3%A4gt%20aktuell%20(Stand%202016,Anteil%20am%20Schweizer%20Energienmix%20bei)
- Husgafvel, R.; Linkosalmi, L.; Hughes, M.; Kanerva, J.; Dahl, O., 2018: Forest sector circular economy development in Finland: A regional study on sustainability driven competitive advantage and an assessment of the potential for cascading recovered solid wood. *Journal of Cleaner Production* 181: 483–497. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.176>
- IEA Bioenergy, 2019: Task 39: ‘Drop-in’ Biofuels. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/09/Task-39-Drop-in-Biofuels-Full-Report-January-2019.pdf>
- IEA Bioenergy, 2020: The use of forest biomass for climate change mitigation: dispelling some misconceptions. <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/the-use-of-forest-biomass-for-climate-change-mitigation-dispelling-some-misconceptions/>
- IEA Bioenergy, 2021: Campaigns questioning the use of woody biomass for energy are missing key facts. <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/campaigns-questioning-the-use-of-woody-biomass-for-energy-are-missing-key-facts> (last updated March 2022)
- IEA Bioenergy, 2022: Fossil vs biogenic CO<sub>2</sub> emissions. <https://www.ieabioenergy.com/iea-publications/faq/woodybiomass/biogenic-co2/> (last updated March 2022)
- Krumm, F.; Rigling, A.; Bollmann, K.; Brang, P.; Dürr, C.; Gessler, A.; Schuck, A.; Schulz-Marty, T.; Winkel, G., 2020: Synthesis: improving biodiversity conservation in European managed forests needs pragmatic, courageous, and regionally-rooted management approaches. In: Krumm, F.; Schuck, A.; Rigling, A. (eds.), *How to balance forestry and biodiversity conservation – A view across Europe*, pp. 609–633. European Forest Institute (EFI); Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL). <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:25784>
- Leimert, J.M.; Neubert, M.; Treiber, P.; Dillig, M.; Karl, J., 2018: Combining the Heatpipe Reformer technology with hydrogen-intensified methanation for production of synthetic natural gas. *Applied Energy* 217, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.127>
- Lemm, R.; Haymoz, R.; Björnsen Gurung, A.; Burg, V.; Strelbel, T.; Thees, O., 2020: Replacing fossil fuels and nuclear power with renewable energy: utopia or valid option? A Swiss case study of bioenergy. *Energies* 13, 8: 2051. <https://doi.org/10.3390/en13082051>
- Li, X.; Damartzis, T.; Stadler, Z.; Moret, S.; Meier, B.; Friedl, M.; Maréchal, F., 2020: Decarbonization in complex energy systems: a study on the feasibility of carbon neutrality for Switzerland in 2050. *Frontiers in Energy Research* 8: 549615. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.549615>
- Li, X.; Damartzis, T.; Maréchal, F., 2021: Decarbonization of Swiss Energy Systems in 2050: Integrated Scenario Analysis with the SES-EPFL Model. SCCER JASM Report. EPFL. [https://sccer-jasm.ch/JASMPapers/JASM\\_results\\_ses\\_epfl.pdf](https://sccer-jasm.ch/JASMPapers/JASM_results_ses_epfl.pdf)

- Losey, S.; Wehrli, A., 2013: Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. Office fédéral de l'environnement (OFEV). <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/29559.pdf>
- Mehli, A.; Winkler, D., Griffin, T., Kaiser, S., Garcia, A., Gerner, G., Kulli, B., Baier, U., Kühni, M., Treichler, A., 2021: HTC Innovationscampus Rheinmühle -Pilotanlage zur Hydrothermalen Karbonisierung: Prozessoptimierung & Verfahrenserkenntnisse. Schlussbericht. Office fédéral de l'énergie (OFEN). <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=40894>
- Mehr, J.; Vadenbo, C.; Steubing, B.; Hellweg, S., 2018: Environmentally optimal wood use in Switzerland—Investigating the relevance of material cascades. *Resources, Conservation and Recycling* 131: 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.026>
- Michel, J.B., 2017: TORPLANT – Pilote de polygénération de pellets Torpalnt de biomasse torréfiée, de chaleur et d'électricité. DGE-DIREN. Canton de Vaud.
- Mohr, L.; Burg, V.; Thees, O.; Trutnevyte, E., 2019: Spatial hot spots and clusters of bioenergy combined with socio-economic analysis in Switzerland. *Renewable Energy* 140: 840–851. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.093>
- Moioli, E.; Schildhauer, T., 2021: Negative CO<sub>2</sub> emissions from flexible biofuel synthesis: concepts, potentials, technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158: 112120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112120>
- Nussbaumer, T., 2017: The role of aerosols from biomass combustion. 25th European Biomass Conference and Exhibition, 12–15. Juni 2017, Stockholm. [https://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/07/Nussbaumer\\_IEA\\_T32\\_Aerosol-Report\\_2017\\_07\\_14.pdf](https://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/07/Nussbaumer_IEA_T32_Aerosol-Report_2017_07_14.pdf)
- Nussbaumer, T.; Lauber, A.; Hennemann, P.; Meierhans, T.; Guthoerl, D.; Jacquet, S., 2019: Staubförmiger Biomasse-Brennstoff für den Thermoölprozess. Schlussbericht. Office fédéral de l'énergie (OFEN). <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=50894&Load=true>
- Nussbaumer, T., 2020: Introduction to biomass combustion and pollutant reduction in wood stoves and boilers. 6th Central European Biomass Conference, 22–24. Januar 2020, Graz. [https://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/2/2020/07/01\\_2020-01-23\\_CE-BC-Graz\\_Nussbaumer-Homepage.pdf](https://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/2/2020/07/01_2020-01-23_CE-BC-Graz_Nussbaumer-Homepage.pdf)
- Norton, M.; Walloe, L.; Brack, D.; Booth, M.; Jones, M.B., 2021: Time is of the essence when it comes to forest bioenergy. *GCB Bioenergy* 14: 108–109. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12905>
- OFAG, Office fédéral de l'agriculture, 2020: Voraussetzungen und Vorschriften für die Bewilligung von Biokohle. [https://www.a-p-d.ch/wp-content/uploads/2021/11/Voraussetzungen\\_und\\_Vorschriften\\_fuer\\_die\\_Bewilligung\\_von\\_Biokohle\\_\\_15.06.2020-BLW.pdf](https://www.a-p-d.ch/wp-content/uploads/2021/11/Voraussetzungen_und_Vorschriften_fuer_die_Bewilligung_von_Biokohle__15.06.2020-BLW.pdf)
- OFEV, Office fédéral de l'environnement, 2013: Inländische Wertschöpfung bei der stofflichen und energetischen Verwendung von Holz. Schlussbericht. [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/fachinfo-daten/inlaendische\\_wertschoepfungbeiderstofflichenundenergetischenverw.pdf.download.pdf/inlaendische\\_wertschoepfungbeiderstofflichenundenergetischenverw.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/fachinfo-daten/inlaendische_wertschoepfungbeiderstofflichenundenergetischenverw.pdf.download.pdf/inlaendische_wertschoepfungbeiderstofflichenundenergetischenverw.pdf)
- OFEV, Office fédéral de l'environnement; SFOE, Swiss Federal Office of Energy; SECO, Staatssekretariat für Wirtschaft, (Eds.) 2018: Ressourcenpolitik Holz. Strategie, Ziele und Aktionsplan Holz.; Bern, Switzerland
- OFEV, Office fédéral de l'environnement, 2020: Jahrbuch Wald und Holz 2019
- OFEV, Office fédéral de l'environnement, 2021: Jahrbuch Wald und Holz 2020
- OFEV, Office fédéral de l'environnement, 2022: Jahrbuch Wald und Holz 2021
- OFEN, Office fédéral de l'énergie, 2019a: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2018. <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/9774>
- OFEN, Office fédéral de l'énergie, 2019b: Wasserkraftpotenzial der Schweiz. Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung im Rahmen der Energiestrategie 2050. Bundesamt Energie.
- OFEN, Office fédéral de l'énergie, 2019c: Schweizer Hausdächer und -fassaden könnten jährlich 67 TWh Solartrom produzieren. Medienmitteilung des Bundesamts für Energie vom 15.4.2019.
- OFEN, Office fédéral de l'énergie, 2020: Perspectives énergétiques 2050+. Résumé des principaux résultats. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wd-WJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZnVlcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTAzMjA=.html>
- OFEN, Office fédéral de l'énergie, 2021a: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2020.
- OFEN, Office fédéral de l'énergie, 2021b: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien. Ausgabe 2020.
- OFEN, Office fédéral de l'énergie, 2021c: Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2020 nach Verwendungszwecken.
- OFEN, Office fédéral de l'énergie, 2021d: Analyse von Hemmnissen und Massnahmen zur Ausschöpfung des Holzenergiepotenzials. Schlussbericht. Bundesamt für Energie BFE. <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10487>
- OFEN, Office fédéral de l'énergie, 2022: Perspectives énergétiques 2050+. Rapport succinct. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wd-WJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZnVlcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTAzMjM=.html>
- Peduzzi, E.; Boissonnet, G.; Haarlemmer, G.; Maréchal, F., 2018: Thermo-economic analysis and multi-objective optimisation of lignocellulosic biomass conversion to Fischer-Tropsch fuels. *Sustainable Energy & Fuels* 2, 5: 1069–1084. <https://doi.org/10.1039/C7SE00468K>
- Peduzzi, E.; Tock, L.; Boissonnet, G.; Maréchal, F., 2013: Thermo-economic evaluation and optimization of the thermo-chemical conversion of biomass into methanol. *Energy* 58: 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.029>
- Poldervaart, P., 2016: 2. Workshop zum Thema «Antriebskräfte und wichtige Voraussetzungen für die Entwicklung einer holzbasierten Bioraffinerie in der Schweiz». Kurzbericht. Ressource Holz (NFP 66), Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Zollikofen. [http://www.nfp66.ch/SiteCollectionDocuments/nfp66\\_kurzbericht\\_wsii\\_schlussversion.pdf](http://www.nfp66.ch/SiteCollectionDocuments/nfp66_kurzbericht_wsii_schlussversion.pdf)



- Questell-Santiago, Y.M.; Galkin, M.V.; Barta, K.; Luterbacher, J.S., 2020: Stabilization strategies in biomass depolymerization using chemical functionalization. *Nature Reviews Chemistry* 4, 6: 311–330. <https://doi.org/10.1038/s41570-020-0187-y>
- Rabou, L.P.; Bos, L., 2012: High efficiency production of substitute natural gas from biomass. *Applied Catalysis B: Environmental* 111–112: 456–460. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.10.034>
- Rabou, L.P.; Van der Drift, A.; Van Dijk, H.A.; Van der Meijden, C.M.; Vreugdenhil, B.J., 2016: MILENA indirect gasification, OLGA tar removal, and ECN process for methanation. In: Schildhauer, T.J.; Biollaz, S.M. (eds.), *Synthetic natural gas from coal, dry biomass, and Power-to-Gas applications*, pp. 231–248. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119191339.ch9>
- Raven, P. et al., 2021: Letter regarding the use of forest bioenergy. Hundreds of scientists affirm that trees are more valuable alive than dead – both for climate and for biodiversity. Woodwell Climate Research Center. <https://www.woodwellclimate.org/letter-regarding-use-of-forests-for-bioenergy/>
- Riediker, M., 2021: Holz in einer zukünftigen Schweizer Bioökonomie. Holz – zentrale Ressource in einer zukünftigen Bioökonomie. Montagskolloquium, 1. Februar 2021, ETH Zürich. [https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/usys/ites/ites-dam/MoKo/2021/01FEB\\_01\\_Riediker\\_Holz.pdf](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/usys/ites/ites-dam/MoKo/2021/01FEB_01_Riediker_Holz.pdf)
- Rigling, A.; Schaffer, H.P. (Eds.), 2015: Rapport forestier 2015. État et utilisation de la forêt suisse. Office fédéral de l'environnement (OFEV). <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/forets/publications-etudes/publications/rapport-forestier-2015.html>
- Ropp, J.; Stäger, T.; Röthlisberger, R.; Roth, S.; Bourgeois J.-P., 2019: XyloClean (Post-traitement de fumées de générateurs de chaleur domestiques à bois). Rapport final. Office fédéral de l'environnement (OFEV). [https://heig-vd.ch/docs/default-source/doc-institut-igt/ofev-ref-1011-07300\\_rapportfinal\\_xyloclean\\_ii\\_v2.pdf?sfvrsn=b6be48e5\\_0](https://heig-vd.ch/docs/default-source/doc-institut-igt/ofev-ref-1011-07300_rapportfinal_xyloclean_ii_v2.pdf?sfvrsn=b6be48e5_0)
- Rozmysłowicz, B.; Yeap, J.H.; Elkhairy, A.M.I.; Talebi A.M.; Shahab, R.L.; Questell-Santiago, Y.M.; Xiros, C.; Le Monnier, B.P.; Studer, M.H.; Luterbacher, J.S., 2019: Catalytic valorization of the acetate fraction of biomass to aromatics and its integration into the carboxylate platform. *Green Chemistry* 21, 10: 2801–2809. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/GC/C9GC00513G>
- Schildhauer, T.J.; Biollaz, S.M.A., 2015: Reactors for catalytic methanation in the conversion of biomass to Synthetic Natural Gas (SNG). *Chimia* 69, 10: 603–607. <https://doi.org/10.2533/chimia.2015.603>
- Schildhauer, T.J., 2016: Methanation for SNG production – Chemical reaction engineering aspects, In: Schildhauer, T.J.; Biollaz, S.M.A. (Eds.), *Synthetic natural gas from coal, dry biomass, and Power-to-Gas applications*, pp. 77–159. Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119191339.ch4>
- Schildhauer, T.J., 2018: Biosynthetic natural gas (Bio-SNG), In: Meyers, R.A. (Eds), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, pp. 1065–1080. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3\\_256](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_256)
- Schildhauer, T.; Kroon, P.; Höftberger, E.; Moiola, E.; Reichert, G.; Kupelwieser, F., 2021: Technologies for Flexible Bioenergy, IEA Bioenergy: Task 44. <https://task44.ieabioenergy.com/publications/technologies-for-flexible-bioenergy-2021>
- Schmid, M.; Stucki, R.; Griffin, T., 2014: Biomasse-WKK mit 60 kW Heisslufturbine. In: Tagungsband 18. Status-Seminar, Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt, ETH Zürich. <https://task44.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/12/2021/08/IEA-Task-44-report-Technologies-for-Flexible-Bioenergy.pdf>
- Schnorf, V.; Trutnevyte, E.; Bowman, G.; Burg, V., 2021: Analysing costs, energy and CO<sub>2</sub> emissions of the main forest wood and manure transport chains in Switzerland. *Journal of Cleaner Production* 293: 125971. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125971>
- Scholz, D.; Xie, J.; Kröcher, O.; Vogel, F., 2019: Mechanochemistry-assisted hydrolysis of softwood over stable sulfonated carbon catalysts in a semi-batch process. *RSC Advances* 9, 57: 33525–33538.
- Scholz, D.; Kröcher, O.; Vogel, F., 2018: Deactivation and regeneration of sulfonated carbon catalysts in hydrothermal reaction environments, *ChemSusChem* 11, 2189–2201.
- Schulze, E.D.; Rock, J.; Kroiher, F.; Egenolf, V.; Wellbrock, N.; Irlinger, R.; Bolte, A.; Spellmann, H., 2021: Speicherung von Kohlenstoff im Ökosystem und Substitution fossiler Brennstoffe Klimaschutz mit Wald. *Biologie in unserer Zeit* 51, 1: 46–54. <https://www.biuz.de/index.php/biuz/article/view/4103>
- Schumacher, F.; Nussbaumer, T.; Good, J., 2020: System integration and dimensioning of heat storage tanks in heating plants with automated wood furnaces. 6th Central European Biomass Conference, 22–24. Januar 2020, Graz.
- Segreto, M.; Principe, L.; Desormeaux, A.; Torre, M.; Tomassetti, L.; Tratzi, P.; Paolini, V.; Petracchini, F., 2020: Trends in social acceptance of renewable energy across Europe—A literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17: 9161. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249161>
- Shahab, R.L.; Brethauer, S.; Davey, M.P.; Smith, A.G.; Vignolini, S.; Luterbacher, J.S.; Studer, M.H., 2020: A heterogeneous microbial consortium producing short-chain fatty acids from lignocellulose. *Science* 369, 6507: eabb1214. <https://doi.org/10.1126/science.abb1214>
- Shuai, L.; Amiri, M.T.; Questell-Santiago, Y.M.; Héroguel, F.; Li, Y.; Kim, H.; Meilan, R.; Chapple, C.; Ralph, J.; Luterbacher, J.S., 2016: Formaldehyde stabilization facilitates lignin monomer production during biomass depolymerization. *Science* 354, 6310: 329–333. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7810>
- Stadelmann-Steffen, I., 2017: Social acceptance of energy investments. SCCER School 17–20. Oktober 2017, Engelberg. [http://www.sccer-soe.ethz.ch/export/sites/sccersoe/news/galleries/dwn\\_sccerschool2017/T-13\\_SCCER-School\\_Stadelmann.pdf\\_2063069299.pdf](http://www.sccer-soe.ethz.ch/export/sites/sccersoe/news/galleries/dwn_sccerschool2017/T-13_SCCER-School_Stadelmann.pdf_2063069299.pdf)
- Sterman, J.; Moomaw, W.; Rooney-Varga, J.-N.; Siegel, L., 2022: Does wood bioenergy help or harm the climate? *Bulletin of the Atomic Scientists* 78, 3: 128–138. DOI: 10.1080/00963402.2022.2062933
- Steubing, B., 2013: Die Ökobilanz der energetischen Holzverwertung: Faktoren für einen hohen ökologischen Nutzen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 164, 12: 408–419. <https://doi.org/10.3188/szf.2013.0408>

- Studer, M.; Poldervaart, P., 2017: Neue Wege zur holz-basierten Bioraffinerie, Thematische Synthese im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP66 «Ressource Holz», Schweizerischer Nationalfonds. [http://www.nfp66.ch/SiteCollectionDocuments/NFP66\\_Teilsynthese\\_2\\_Bioraffinerie\\_DE.pdf](http://www.nfp66.ch/SiteCollectionDocuments/NFP66_Teilsynthese_2_Bioraffinerie_DE.pdf)
- Suter, F.; Steubing, B.; Hellweg, S., 2017: Life cycle impacts and benefits of wood along the value chain: The Case of Switzerland. *Journal of Industrial Ecology* 21: 874–886. <https://doi.org/10.1111/jiec.12486>
- Teske, S.L., 2014: Integrating rate-based models into a multi-objective process design & optimisation framework using surrogate models. Dissertation EPF Lausanne, Thesis 6302. <https://infoscience.epfl.ch/record/201637>
- Thees, O.; Burg, V.; Erni, M.; Bowman, G.; Lemm, R., 2017: Biomassepotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung. Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET. WSL Berichte 57. WSL. <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A13277/datastream/PDF/view>
- Thees, O.; Erni, M.; Lemm, R.; Stadelmann, G.; Zenner, E.K., 2020: Future potentials of sustainable wood fuel from forests in Switzerland. *Biomass and Bioenergy* 141: 105647. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105647>
- Thürig, E.; Kaufmann, E., 2008: Waldbewirtschaftung zur Senkenerhöhung? Mögliche Konfliktfelder und Synergien. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 159, 9: 281–287. doi: 10.3188/szf.2008.0281
- Thürig, E.; Kaufmann, E., 2010: Increasing carbon sinks through forest management: a model-based comparison for Switzerland with its Eastern Plateau and Eastern Alps. *European Journal of Forest Research* 129, 4: 563–572. <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0354-7>
- Tobler, M.; Jutz, M., 2020: Projekt HARVE, Holzaschen in der Schweiz, Aufkommen, Verwertung und Entsorgung von Holzaschen aus Anlagen grösser als 50 kW. Schlussbericht. [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/fachinfo-daten/201210\\_HARVE\\_Schlussbericht\\_fachlich\\_def.pdf.download.pdf/201210\\_HARVE\\_Schlussbericht\\_fachlich\\_def.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/fachinfo-daten/201210_HARVE_Schlussbericht_fachlich_def.pdf.download.pdf/201210_HARVE_Schlussbericht_fachlich_def.pdf)
- Tock, L.; Maréchal, F., 2012: H<sub>2</sub> processes with CO<sub>2</sub> mitigation: Thermo-economic modeling and process integration. *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 16: 11785–11795. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.05.046>
- Transport & Environment, 2021: Unlocking electric trucking in the EU: recharging along highways – campaigning for cleaner transport in Europe. Transport & Environment (transportenvironment.org). [https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/202102\\_pathways\\_report\\_final.pdf](https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/202102_pathways_report_final.pdf)
- Vadenbo, C.; Tonini, D.; Burg, V.; Fruergaard Astrup, T.; Thees, O.; Hellweg, S., 2018: Environmental optimization of biomass use for energy under alternative future energy scenarios for Switzerland. *Biomass and Bioenergy* 119: 462–472. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.001>
- van Dyk, S.; Su, J.; Mcmillan, J.D.; Saddler, J., 2019: Potential synergies of drop-in biofuel production with further co-processing at oil refineries. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 13, 3: 760–775. <https://doi.org/10.1002/bbb.1974>
- Werner, F.; Taverna, R.; Hofer, P.; Thürig, E.; Kaufmann, E., 2010: National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Environmental Science and Policy* 13, 1: 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.10.004>
- Winkler, D.; Engelbrecht, G.; Griffin, T.; Haymoz, R.; Marella, A.; Weiss, D.A., 2018: Characterization, testing and modelling of a variety of pulverized biomass fuels burnt in an air staged, swirl stabilized burner, European Biomass Conference and Expo, Paper 2AO.2.3, Copenhagen. DOI: 10.5071/26thEUBCE2018-2AO.2.3
- Wüest, J.; Lohberger, N.; Griffin, T.; Wildhaber, E., 2019: Field particle emission measurement on domestic wood firing systems retrofitted with electrostatic particle precipitators. 27th European Biomass Conference and Exhibition, 27–30 Mai 2019, Lissabon. <https://doi.org/10.5071/27THEUBCE2019-2AO.2.4>
- Wüstenhagen, R.; Wolsink, M.; Bürer, M.J., 2007: Social acceptance of renewable energy innovation. An introduction to the concept. *Energy Policy* 35, 5: 2683–2691. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.001>
- Zotter, P.; Richard, S.; Egli, M.; Rothen, B.; Nussbaumer, T., 2019: A simple method to determine cytotoxicity of water-soluble organic compounds and solid particles from biomass combustion in lung cells in vitro. *Environmental Science & Technology* 53, 7: 3959–3968. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03101>



