

Feuille de route ANCRE

« Les enjeux de la contribution de la biomasse à la décarbonation de l'industrie »

Groupes Programmatiques n°1 « Biomasse » et n°2 « Industries et Agriculture »

Décembre 2021

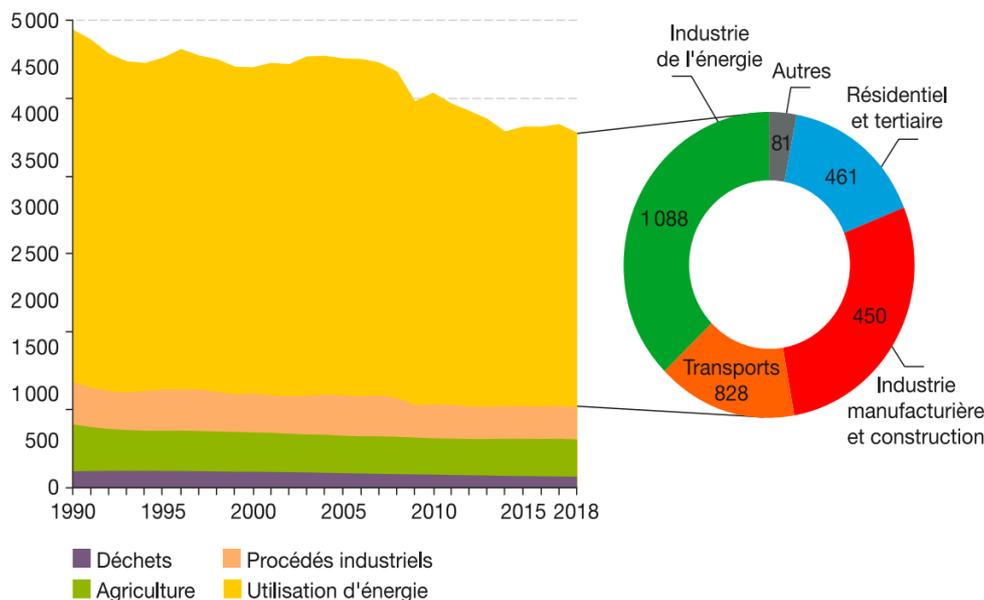
L'urgence climatique engage les instances gouvernementales vers la neutralité carbone dès 2050 ce qui exige la mise en place de mesures drastiques dans les domaines de la production d'électricité, de l'industrie manufacturière, des transports et du bâtiment. Parmi ceux-ci, le secteur industriel est un gros émetteur de Gaz à Effet de Serre dont le CO₂ (Cf. Graphe ci-dessous). La première clé du succès pour atteindre la neutralité est la recherche d'une sobriété accrue alliée à une amélioration de l'efficacité énergétique. Il faut alors perfectionner les technologies, minimiser les impacts environnementaux des procédés et des filières, introduire de nouveaux procédés de rupture grâce à une approche systémique d'écoconception. La seconde clé considère l'introduction accrue d'énergies renouvelables telles que la biomasse, les énergies éolienne, solaire, hydraulique, géothermique ou décarbonée (nucléaire). Ainsi, les combustibles fossiles traditionnels pourront être peu à peu substitués par des combustibles biosourcés, de l'hydrogène ou de l'ammoniac décarbonés, avec pour but de produire la chaleur ou l'électricité nécessaire au fonctionnement des procédés industriels. L'utilisation de ces produits, comme combustibles ou intrants dans les réacteurs devrait permettre une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre (CO₂) mais aussi de polluants (hydrocarbures imbrûlés, monoxyde de carbone, oxydes d'azote...) et de déchets.

Dans cette feuille de route, il est analysé différentes voies de substitution du carbone fossile par des produits biosourcés pour la production de chaleur, directement ou après transformation, ou la fabrication de molécules d'intérêt par des biotechnologies innovantes. L'objectif est d'identifier les enjeux, les verrous et les actions de recherche et d'innovation à soutenir pour décarboner l'industrie grâce à l'emploi de biomasse. Suivre ces voies de décarbonation va exiger le développement de recherches, à tous niveaux de TRL, pour, dans un premier temps, évaluer la ressource en biomasse en prenant en compte la compétition des usages, la logistique d'approvisionnement des sites et, dans un second temps, les voies thermochimiques et biotechnologiques de conversion pour les domaines d'utilisation : chaleur, méthanisation, énergie chimie biosourcée.

La fabrication de biocarburants est une voie spécifique de production d'énergie décarbonée. Par contre, cette filière est très majoritairement dédiée aux transports et de nombreuses feuilles de route lui ont déjà été dédiées ; elle ne sera pas développée dans ce document.

REPARTITION PAR SOURCE DES EMISSIONS DE GES DANS L'UE A 27 ENTRE 1990 ET 2018

En Mt CO₂ éq



Source : AEE, 2020

1 LA RESSOURCE¹ ET LES INTRANTS

La biomasse est une ressource aux multiples usages : écologique, alimentaire, énergétique, industrielle...

Les éléments partagés ci-après sont génériques à la ressource biomasse mais l'ajout ou l'accroissement d'un usage, comme envisagé pour l'industrie, peut déstabiliser les filières de production voire engendrer des tensions économiques, environnementales et sociétales.

1.1 Introduction/ Objectifs

Produire et mobiliser plus de biomasse pour sortir d'une économie basée sur les énergies fossiles génère des bénéfices en termes de réduction des GES mais génère aussi un certain nombre de tensions notamment sur l'usage des terres, sur l'utilisation d'intrants et d'eau pour accroître les rendements, sur la préservation de la biodiversité et sur le maintien des puits de carbone. Déterminer la quantité de ressource réellement disponible en regard des usages et la dynamique de son évolution à l'horizon 2050 sous impact du changement climatique devient primordial.

1.2 Contexte / enjeux

La cible « zéro émissions nettes » en 2050 encore appelé neutralité Carbone 2050 prévue dans l'Accord de Paris implique (i) une baisse drastique de nos émissions d'origine fossile (de 450 à 80 MtCO₂eq pour la France d'ici 2050) qui va de pair avec le développement des énergies

¹ Définition sur la base de l'article L211-2 du code de l'énergie : la biomasse est la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers »

décarbonées et (ii) l'augmentation des puits de carbone pour compenser ce qui ne pourra pas être réduit. Dans les solutions proposées pour la France par la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), l'utilisation de la biomasse est incontournable et fait l'objet d'une Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse (SNMB) dont les aspects opérationnels sont déclinés dans les schémas régionaux biomasse (SRB). Les enjeux sont doubles : accroître la quantité de biomasse accessible sans impact environnemental sur les sols, la biodiversité, les ressources en eau... tout en générant des avantages économiques aux acteurs dans les territoires et en parallèle être en capacité d'accroître les puits naturels de Carbone au travers de cette biomasse.

1.3 État de l'art et verrous

De nombreux rapports récents pointent les effets négatifs d'une utilisation non raisonnée sur le long terme de la biomasse et des tensions que cela peut générer tant environnementale, sociale qu'économique. Ces rapports mettent en avant la nécessité d'améliorer les métriques pour quantifier mais aussi qualifier les biomasses en fonction des usages, des cascades d'usages et pour quantifier les impacts de cette mobilisation. Cette quantification ne doit pas être uniquement physique mais intégrer aussi les dimensions économiques pour traduire une réelle accessibilité. La détermination de seuils de prélèvement en fonction des spécificités des territoires ainsi que le bouclage du cycle du carbone, en lien avec celui de l'azote, du phosphore et de l'eau, restent mal connus avec des effets de long terme sur la production ultérieure de biomasse. Enfin les modèles existants de mobilisation potentielle de biomasse n'intègrent pas ou peu l'impact du changement climatique et les modifications des pratiques agricoles qui évoluent en parallèle. Les dynamiques différentes qui sont à l'œuvre complexifient encore la donne.

1.4 Les actions de R&I à soutenir pour lever ces verrous

- Accroître les quantités de biomasse agricole et forestière en tenant compte du changement climatique au travers par exemple du développement de nouvelles variétés résistante à la sécheresse (génétique – étude de la photosynthèse à différentes échelles)
- Développer le bio-contrôle – réduire les intrants chimiques et développer les intrants organiques en lien avec la bioconversion (eg., nouvelles pratiques d'épandage et de traitement des digestats issus de méthanisation).
- Quantifier et qualifier :
 - Développer des approches géo-localisées de la biomasse sur les territoires,
 - Accroître les données sur les résidus agricoles et forestiers mais aussi sur le potentiel des résidus de l'agroalimentaire et déchets urbains,
 - Qualifier la biomasse en fonction des usages pour prendre en compte son caractère saisonnier, diversifié et sa périssabilité,
 - Quantifier le lien usages versus besoins dans l'industrie.
- Étude des impacts :
 - Etudier l'impact de nouvelles pratiques agricoles comme le développement des cultures intermédiaires multiservice pour l'énergie (CISME),
 - Développer des indicateurs d'impact environnemental du prélèvement de la biomasse (exportation de carbone).
- Développer des approches d'évaluation et d'optimisation multicritères,
- Développer des modèles bioéconomiques territoriaux qui intègrent les différentes dimensions (ressources – flux internes/externes – débouchés locaux et globaux),
- Valoriser les coproduits pour la décarbonation dans une logique de cascade de valeurs – pose la question des relations inter-filières et du développement des écosystèmes industriels,

- Déterminer les caractéristiques physiques et chimiques des biomasses nouvelles et leur variabilité afin de valider ou d'adapter leurs utilisations potentielles en énergies et par quelles voies.
- Développer la culture des algues et de tout autre micro-organisme autotrophe (se développant sur CO₂). Le développement de la culture des algues peut être associée à la valorisation du CO₂ ou des effluents issus du traitement des eaux ou des digestats de méthanisation, à la production de protéines ou de biocarburants de 3^{ème} génération. Le verrou à lever est la culture à grande échelle à coût compétitif.
- Prendre en compte les aspects sociétaux de cette utilisation accrue de la biomasse (impact sur la création d'emploi local et sur la réduction de la désertification rural, impact sur l'augmentation du transport routier...)

1.5 Synthèse, recommandations et conclusions

- Quantifier et géo-localiser (données satellite) avec possibilité de modéliser les évolutions physiologiques pour anticiper sur les rendements ou la quantité des résidus prélevables,
- Adapter les espèces agricoles et forestières à l'impact du changement climatique,
- Développer des critères de durabilité robustes sur ces prélèvements de biomasse y compris marine pour anticiper les impacts de cette utilisation massive de biomasse,
- Tester et valider de nouvelles pratiques agricoles et forestières permettant un prélèvement durable de biomasse et adaptées aux territoires dans ses dimensions pédoclimatiques et économiques).

1.6 Acteurs en présence :

- ONRB – ONF- FranceAgrimer – IGN - les laboratoires de recherche CNRS- INRAE – IFPEN – CNES – universités et écoles d'ingénieurs comme AgroParisTech et INSA
- FCBA

2 LES ENJEUX DE R&I POUR LA LOGISTIQUE

2.1 Introduction / Objectifs

Le développement des filières utilisant la biomasse agricole est une opportunité de diversification et de revenu complémentaire pour les agriculteurs. Par ailleurs, l'utilisation d'autres types de biomasses (déchets organiques municipaux, déchets spécifiques industriels, déchets forestiers...) est une forme d'économie circulaire ayant aussi des impacts économiques et environnementaux. L'objectif est ici d'identifier les enjeux et les verrous concernant les chaînes d'approvisionnement en biomasse utilisée pour la décarbonation de l'industrie (combustible pour la production de chaleur, méthanisation intégrée au site industriel, intrant pour les procédés chimiques et biochimiques...).

2.2 Contexte / enjeux

En dehors de l'alimentation humaine ou animale, ou de la production de biocarburants pour la mobilité, la biomasse peut aussi être utilisée pour contribuer à la décarbonation de l'industrie. Si l'on peut penser à priori qu'une grande partie des problématiques liées à la logistique d'approvisionnement sont les mêmes quelles que soient la biomasse et son utilisation, l'usage à des fins industrielles revêt probablement des spécificités qu'il convient d'identifier.

En effet, ces nouveaux usages peuvent représenter une forte demande en biomasse, très localisée, et peuvent imposer, pour rentabiliser les investissements, un approvisionnement sûr, constant en volume et en qualité.

Or, lorsque l'on parle de biomasse, on parle de ressources très diverses, peu génériques, aux propriétés hétérogènes, localisées territorialement et souvent soumises à la saisonnalité. Cette biomasse à usage industriel peut être des cultures dédiées, des coproduits, des sous-produits de culture ou d'exploitation du bois, ou la part organique de déchets municipaux ou industriels.

Ainsi, la problématique d'approvisionnement peut être différente selon les catégories de biomasse. On peut différencier les problématiques des biomasses agricoles de celles des déchets ménagers et industriels qui sont potentiellement beaucoup plus disséminés sur le territoire et ne font pas appel aux mêmes chaînes logistiques ni même aux mêmes coûts de collecte et de transport.

Dans tous les cas, les chaînes logistiques sont complexes, de la collecte jusqu'à l'utilisation en passant par le conditionnement, parfois le séchage, le stockage, la manutention et l'acheminement. Elles sont aussi coûteuses, le coût du transport représentant entre 50 à 70% du prix total d'approvisionnement. Elles sont spécifiques car dédiées à l'usage prévu de la biomasse.



A noter que des étapes de prétraitement peuvent aussi être positionnées à différents stades de cette chaîne.

Les enjeux pour une chaîne de logistique sont :

- La préservation de la qualité attendue à l'entrée du site industriel

Le cahier des charges du produit attendu en entrée du site industriel est un élément primordial de la chaîne d'approvisionnement. Par conséquent, toutes les étapes de cette chaîne doivent veiller à ne pas dégrader une ou plusieurs des propriétés attendues ou bien, dans certains cas, à les produire.

- La réduction des coûts

Il s'agit bien évidemment d'un enjeu majeur. L'étude des composantes de ces coûts montre que le transport en représente la plus grande part. Des étapes complémentaires de séchage ou de prétraitement en amont des étapes de transports peuvent parfois être pertinentes pour en réduire les coûts. Mais chacune des phases de cette chaîne d'approvisionnement doit être étudiée à la fois dans ses modalités pratiques et organisationnelles ainsi que du point de vue technologique.

- La réduction de l'impact environnemental

Comme souvent lorsqu'il s'agit d'améliorer la pression sur l'environnement d'une activité, la réduction de l'impact environnemental des chaînes d'approvisionnement en biomasse pour l'industrie passe par la sobriété (moins usage d'énergie surtout fossile), l'efficacité énergétique (meilleur usage de cette énergie) et l'utilisation d'énergie moins carbonée. C'est en s'appuyant sur ces 3 piliers à toutes les étapes de la chaîne mais aussi par une approche systémique que les gains les plus significatifs seront obtenus. Un des enjeux est aussi l'analyse de cycle de vie complète allant de l'approvisionnement jusqu'à la production et l'usage et la fin de vie du produit final pour vérifier que le basculement à la biomasse pour une entreprise, que

ce soit comme intrant ou comme énergie, est bien favorable du point environnemental et n'entraîne pas d'effets néfastes.

- L'approche systémique

Si la recherche d'optimisation de chacun des maillons de la chaîne et de leurs interfaces est un des enjeux, la somme des optimums de chacun de ces éléments, n'est pas forcément l'optimum global. Une étude systémique multicritère est donc nécessaire en prenant en compte les aspects techniques, économiques, géographiques, environnementaux, humains et sociétaux.

De plus, la répliquabilité de ces chaînes d'approvisionnement doit aussi être étudiée, afin de rechercher le plus possible de standardisation, au moins pour une même filière.

- L'implication de l'ensemble des parties prenantes

Une filière d'approvisionnement en biomasse fait intervenir un grand nombre d'acteurs, soit directement (producteurs de biomasse ou de déchets organiques, équipementiers, transporteurs, industriels consommateurs...), soit indirectement (collectivités locales, ministères, agences de financement, riverains, organismes normatifs et réglementaires...). La mise en place réussie d'une telle filière passe donc par la réunion et l'écoute de tous ces acteurs, de leurs besoins, de leurs enjeux, de leurs limites...

L'implication des riverains et le soutien des acteurs locaux sont essentiels afin de faciliter l'implémentation de filières et leur acceptation. C'est par exemple le cas pour les déchets ménagers et industriels où, pour en augmenter les volumes, l'implication des Pouvoirs Publics doit viser à inciter au tri et à la collecte de la part des ménages et des industriels.

Par ailleurs, des systèmes de contractualisation entre fournisseurs et utilisateurs permettant d'assurer des volumes et prix stables sur des périodes définies sont à faciliter.

2.3 Actions de R&I à soutenir pour répondre à ces enjeux

Pour répondre à l'ensemble de ces enjeux il apparaît souhaitable de soutenir des actions de R&I visant au développement :

- D'équipements de collecte et de conditionnement innovants et efficaces, si possible intégrés à la phase de récolte,
- De procédés ou technologies de densification et de prétraitement,
- De systèmes de stockage, de manutention et de distribution,
- D'outils d'optimisation multicritère et systémique de la chaîne logistique et du transport (réduction des distances, volume et masse transporté, retour à vide, élimination des ruptures de charge...),
- De méthodologies et d'outils d'aide à la structuration et à la mise en œuvre de filière d'approvisionnement visant aussi à sa sécurisation pour l'utilisateur final (i.e. l'industriel).

2.4 Synthèse, recommandation et conclusion

L'extension de l'usage de biomasse, comme apport énergétique renouvelable ou comme intrant carboné en remplacement de carbone fossile est une approche pertinente pour contribuer à réduire l'empreinte de l'industrie sur le changement climatique. Toutefois, l'industrie requiert un approvisionnement de qualité constante, de coût maîtrisé et parfois en grande quantité et ce tout au long de l'année. Ceci impose que l'ensemble de la chaîne logistique soit optimisé tant du point de vue économique, énergétique qu'environnemental.

2.5 Acteurs en présence

- ONF – INRAE - Réseau Mixte Technologique (RMT) Biomasse et Territoire – Arvalis Institut du Végétal - Autres Instituts techniques : Terres Inovia (filère des huiles et protéines végétales et de la filière chanvre).
- Association Générale des Producteurs de Blé et autres céréales (AGPM, AGPB) - Groupes de l'agro-industrie - Coopératives agricoles - Chambres d'agriculture (APCA, chambres régionales, chambres départementales) - Coopératives forestières, Fransylva (fédération des syndicats de forestiers privés de France) - FBCA - Pole IAR Industrie Agro Ressources - Groupes de collecte/traitement des déchets (Suez, Véolia...).

3 LES TYPES D'UTILISATION

3.1 La chaleur

3.1.1 Introduction / Objectifs

La production de chaleur est la demande énergétique principale de l'industrie. La biomasse constitue une ressource énergétique durable dont la combustion directe peut être réalisée dans des chaudières, des fours à grille ou encore des lits fluidisés. Ce sont des technologies largement utilisées, mûres mais pas forcément développées dans l'industrie. Des normes ont été mises en place pour inciter à améliorer leur efficacité. Par exemple, le label Flamme verte propose une classification des chaudières de chauffage à combustibles biomasse de puissance utile inférieure ou égale à 70 kW, selon des seuils de performance (rendement énergétique, émissions de monoxyde de carbone et de particules fines) qui évoluent d'année en année pour inciter les fabricants à améliorer continuellement leurs installations. Une normalisation existe également sur les combustibles issus de la biomasse pour garantir leur qualité. Une normalisation existe aussi pour les chaudières jusqu'à 500 kW, puis il y a la réglementation ICPE pour celles de plus de 2 MW, mais rien n'existe pour les chaudières entre 0,5 et 2 MW. La biomasse peut également être utilisée pour produire simultanément de la chaleur et de l'électricité, avec des systèmes de cogénération à différentes échelles de puissance. Développer la production de chaleur à partir de biomasse est un enjeu énergétique et environnemental important.

3.1.2 Contexte / enjeux

Bien que la biomasse soit une ressource disponible sur tout le territoire, la production de chaleur par cette filière n'est pas suffisamment développée au niveau industriel. Plusieurs raisons peuvent être évoquées, comme le coût, la production, le stockage du combustible, la sécurité et la flexibilité du procédé. Ces différents aspects peuvent ainsi freiner le développement de la biomasse, surtout si les domaines industriels sont énergivores, comme par exemple la cimenterie, la métallurgie, le verre, la plasturgie, ou encore l'agroalimentaire. Les enjeux sont nombreux : tenir compte du niveau de puissance (faible ou moyenne) selon l'utilisation et la taille de l'installation (exemples : agroalimentaire vs four industriel ou cimenterie), comprendre les processus physicochimiques sur les installations de faibles et moyennes puissances (inférieures à 2 MW) avant de développer de grosses installations où il est plus simple de mettre au point des systèmes de dépollution.

3.1.3 État de l'art / verrous

Selon le type de foyer utilisé, la combustion de biomasse solide induit la production de dioxyde de carbone et de polluants, principalement des particules fines et ultrafines (particules de suie, cendres volantes), du monoxyde de carbone, des hydrocarbures aromatiques polycycliques

(HAP) et des oxydes d'azote. Les combustibles issus de la biomasse peuvent se présenter sous forme de bûches, de plaquettes, de bois densifiés (granulés, briquettes), de sciure ou de poudre, qui proviennent de bois d'essences diverses ou de plantes herbacées (paille, miscanthus). Les quantités de polluants émis varient notamment en fonction de la composition de la biomasse employée. Par exemple, les émissions d'oxydes d'azote sont plus élevées avec des pellets de foin qu'avec des pellets de bois. Le contrôle des émissions polluantes selon la nature et la composition de la biomasse est alors nécessaire, en particulier les émissions de cendres volantes avec la présence de minéraux, de cendres fixes et fondantes qui entraînent un encrassement des chambres de combustion avec la formation de mâchefer, les particules de suie, les composés cancérigènes réglementés et non encore réglementés, les composés organiques volatils (COV) et les dioxines.

Par ailleurs, dû à la difficulté des installations fonctionnant avec de la biomasse à suivre la dynamique de la demande, il convient de réfléchir à la flexibilité du procédé et de la ressource, avec par exemple l'utilisation de mélanges de biomasses (bois vierges ou recyclés, issus des déchetteries). La biomasse peut également être utilisée pour fabriquer un gaz de synthèse à utiliser dans des brûleurs (voir partie suivante sur les procédés thermochimiques).

3.1.4 Actions de R&I à soutenir pour lever ces verrous

Pour l'étude de la combustion de biomasse, plusieurs approches peuvent être adoptées :

- Des études expérimentales d'installations, incluant les performances énergétiques, la mesure des émissions polluantes, avec des combustibles biomasses de divers formats et essences.
- La modélisation de la combustion avec le couplage de modèles CFD et cinétiques.

Ainsi de nouvelles méthodes expérimentales, de modèles et d'outils doivent être développées pour :

- La mesure et le traitement de polluants, comme par exemple les dioxines. De nouvelles techniques de dépoussiérage et dépollution doivent être proposées,
- Le captage du CO₂ issu de la combustion biomasse pour créer des puits de carbone,
- La valorisation des cendres et particules de suie avec l'aspect sécurité inhérent,
- Le contrôle et la stabilité de la flamme, comme par exemple lors de la combustion des gaz issus des procédés thermochimiques,
- Le suivi de l'installation.

3.1.5 Synthèse, recommandations et conclusions

L'utilisation de la biomasse pour la production de chaleur est un enjeu environnemental et énergétique et doit être déployée à plusieurs échelles (faible et moyenne puissance) au niveau industriel. Cependant, il convient de maîtriser le coût, la production, le stockage du combustible, la sécurité et la flexibilité du procédé. Les actions de recherche à mener concernent les mesures et traitements de polluants avec de nouvelles méthodes expérimentales, le développement de modèles couplés aux mesures. Ces études doivent porter sur divers polluants (particules fines (particules de suie, cendres volantes et fixes), monoxyde de carbone, HAP, oxydes d'azote, dioxines, COV, aldéhydes) et diverses biomasses d'essences différentes.

3.1.6 Acteurs en présence

- Acteurs académiques identifiés dans le GDR Thermobio (liste non exhaustive sur : <https://thermobio.cnrs.fr/les-equipes/>)

- Acteurs industriels identifiés dans le CIBE, l'ATEE, voire dans le [club Pyrogazéification](#).

3.2 La méthanisation

3.2.1 Introduction / Objectifs

La méthanisation est utilisée depuis des décennies en tant que procédé de dépollution et traitement des déchets. Elle conduit à la production d'un biogaz, composé essentiellement de dioxyde de carbone et méthane et d'un digestat utilisé principalement en tant que fertilisant ou amendement organique. Cependant, une adaptation spécifique des conditions opératoires permet d'inhiber la production de méthane et les produits sont alors l'hydrogène et le dioxyde de carbone et des métabolites solubles tels que les acides organiques (acides gras volatils AGV, acide lactique...) et des solvants (éthanol...). Ce procédé également basé sur l'utilisation de consortia microbiens, est alors nommé fermentation sombre ou fermentation acidogène. L'utilisation de ces procédés dans l'industrie pourrait permettre la substitution de carbone fossile par du carbone renouvelable et donc une réduction des émissions de carbone.

3.2.2 Contexte / enjeux

L'enjeu consiste à proposer des voies d'intégration de la méthanisation dans les filières industrielles. Notamment, l'industrie peut fournir de nouveaux intrants pour la méthanisation permettant ainsi leur valorisation. Une autre voie est l'utilisation par les procédés industriels de molécules plateformes produites par de nouveaux types de procédés tels que la fermentation sombre ou les procédés électromicrobiens. L'intégration (flux d'énergie/chaleur et matières) de la méthanisation avec les procédés industriels constitue également un enjeu.

3.2.3 État de l'art et verrous / acteurs en présence

La méthanisation est un procédé considéré mature pour la production de biogaz valorisé, en électricité et chaleur ou biométhane (injection dans les réseaux de gaz ou biocarburant). Elle est actuellement en fort développement dans le secteur agricole mais est peu intégrée dans l'industrie, excepté pour le traitement d'effluents. Les verrous concernent les problèmes de rentabilité hors subvention, en particulier pour les petites installations (down-scaling) dédiées à la production de biogaz. Les procédés visant la production d'hydrogène et de molécules plateforme ne sont pas matures ; des verrous subsistent quant à l'orientation des voies métabolites pour l'obtention de produits ciblés, le scale-up et la séparation, purification et valorisation des produits. Il est également nécessaire de développer de nouveaux procédés couplés à la méthanisation ouvrant des débouchés complémentaires au biogaz (H₂, AGV- acides gras volatils en relation avec la chimie biosourcée) pour créer de nouvelles chaînes de valeur en vue de mieux valoriser le carbone.

3.2.4 Actions de R&I à soutenir pour lever ces verrous

- Optimiser la production par méthanisation, fermentation ou procédés électromicrobiens de molécules plateforme pour l'industrie : CH₄, H₂, AGV. Etudier la densification et décomplexification des déchets par ces procédés,
- Valoriser ces molécules produites par méthanisation et fermentation (CH₄, H₂, AGV et autres acides), en lien avec les thèmes de la chimie verte et des biotechnologies,
- Séparation / purification des AGV,

- Prétraitements pour homogénéiser les déchets et consortia microbiens pour optimiser le procédé,
- Ingénierie microbienne et pilotage des consortia,
- Valorisation du CO₂, notamment par méthanation, ou tout autre procédé basé sur des systèmes microbiens autotrophes,
- Optimisation de la production en fonction du volume des déchets à traiter y compris la micro-méthanisation,
- Développement d'outils numériques (gestion de données, modélisation, capteurs « low cost »),
- Intégration de la méthanisation dans l'industrie et les écosystèmes industriels : flux de matière et de chaleur.

3.2.5 Synthèse, recommandations et conclusions

L'intégration de la méthanisation dans les procédés industriels présente un potentiel de réduction des émissions de carbone par une meilleure gestion et valorisation des déchets ou coproduits. Les actions de recherche à mener concernent les procédés de micro-méthanisation, les consortia microbiens, les prétraitements, le développement d'outils numériques, le développement de nouveaux procédés couplés à la méthanisation pour la production de molécules plateforme et leur valorisation ainsi que la valorisation du CO₂.

3.2.6 Acteurs en présence

Les acteurs en présence sont listés sur le site du Club Biogaz de l'ATEE <https://atee.fr/energies-renouvelables/club-biogaz/> ou (annuaire_biogaz_2019_web.pdf (atee.fr)).

3.3 Les voies thermochimiques

3.3.1 Introduction/ Objectifs

La valorisation énergétique de la biomasse est actuellement réalisée par combustion pour la production de chaleur et/ou d'électricité. Pour améliorer la valorisation de cette ressource - tant sur le plan économique qu'environnemental - il semble possible de développer dans l'industrie française des **procédés thermochimiques alternatifs à la combustion**.

3.3.2 Contexte / enjeux

Les procédés thermochimiques (gazéification/pyrolyse/liquéfaction) pourraient produire non seulement de la chaleur, mais aussi :

- De l'électricité
- Des molécules plateformes (H₂, CH₄, solvants, additifs, intermédiaires, monomères, ...),
- Du charbon, utilisable ou stockable (créant ainsi un puits de carbone).

L'enjeu principal est d'améliorer la sélectivité des réacteurs et la performance des traitements aval pour rendre ces technologies viables économiquement avec un minimum de subventions, tout en veillant à ce que leurs impacts environnementaux soient les plus faibles (inférieurs ou égaux à ceux de la combustion de biomasse en chaudière).

3.3.3 État de l'art et verrous

- La gazéification

La biomasse peut être transformée en gaz de synthèse (mélange H₂, CO, CO₂, CH₄...) par gazéification conventionnelle ou supercritique. Ce syngaz peut être valorisé sur place pour produire de la chaleur (combustion dans des brûleurs), de la cogénération (chaleur + électricité) et/ou des molécules valorisables par l'industriel (H₂ pour usage chimique/métallurgique, CH₄ après méthanation, méthanol, DME, hydrocarbures liquides). Cela implique la purification et la transformation du gaz de synthèse, ce qui fait appel à des technologies nombreuses : lavage du gaz, reformage, séparation des gaz, Fischer-Tropsch... Leur enchaînement s'avère coûteux en particulier à des échelles modestes (moins de 20 MW), tandis que de grandes unités (supérieures à 100 MW) impliquent de transporter de grandes quantités de biomasse sur de longues distances. Le gaz de synthèse peut alternativement être brûlé dans un moteur ou une turbine pour produire de l'électricité. Cette application semble aujourd'hui assez coûteuse vis-à-vis des autres modes de production électrique renouvelable et en comparaison avec le procédé de référence pour la biomasse (combustion + cycle vapeur). Toutefois, sur le niveau de puissance compris entre 1 et 5 MWe, soit 3 à 15 MW total, la gazéification présente un rendement électrique élevé de plus de 30% alors que celui de la combustion + cycle vapeur chute. Ce procédé apparaît donc pertinent pour la cogénération dans cette gamme de puissance.

- La liquéfaction

La biomasse peut être transformée par pyrolyse, solvolysse ou liquéfaction hydrothermale en bio-huile pour être ensuite valorisée en molécules ou fractions d'intérêt. Ces bio-huiles ont une bonne densité énergétique ce qui permet de facilement les transporter vers des procédés centralisés. Leur « *upgrading* » peut alors faire intervenir une étape catalytique (craquage ou hydrotraitement). Lors de ces transformations, les catalyseurs hétérogènes jouent un rôle majeur. Outre les bio-carburants, d'autres produits chimiques peuvent être obtenus (ex : composés phénoliques avec des résidus de lignine papetière). L'obtention de fractions de façon sélective et la caractérisation des charges sont des verrous.

- Valorisation des co-produits

Quel que soit le choix envisagé (liquéfaction ou gazéification), il existe très souvent deux co-produits valorisables : d'une part, de la chaleur excédentaire de niveau thermique variable, d'autre part, un résidu solide contenant la partie minérale de la biomasse (cendres) et du carbone (en plus ou moins grande proportion selon les procédés). La viabilité économique des procédés thermochimiques dépend en partie de la possibilité de valoriser correctement cette chaleur et ce résidu solide (cendres ou charbon). Note : lorsque le solide est le produit principal recherché, on parle de carbonisation ou de torréfaction.

3.3.4 Actions de R&I à soutenir pour lever ces verrous

- Gazéification

Développer les traitements du gaz de synthèse (primaire et secondaire) pour les rendre moins coûteux et plus fiables. Découvrir des technologies de rupture pour la purification et la valorisation des gaz de synthèse. Étudier plus finement la valorisation du syngaz en tant que combustible de substitution dans les brûleurs de gaz naturel (cf. travaux du groupe combustion). Optimiser les réacteurs et leur donner de la flexibilité vis-à-vis de la qualité des intrants et des taux de charge. Développer les technologies de méthanation ou de séparation (H₂ par exemple) pour favoriser les utilisations variables du syngaz.

- Liquéfaction

Développer des catalyseurs performants, sélectifs et stables (ex : limiter la formation de résidus solides sur les catalyseurs). Améliorer la caractérisation des charges complexes (bio-huiles ou mélanges), et la séparation des composés d'intérêt (membranes, techniques couplées d'analyse...).

- Résidu solide

Caractériser les fonctions d'usage des cendres et des charbons pour mieux identifier leur potentiel : charbons à usage métallurgique, charbon actifs, bio-chars (amendement agricole et stockage de carbone dans les sols) Découvrir et développer de nouveaux usages du charbon et des cendres (Matériaux ? Stockage de carbone en dehors des sols agricoles ?)

3.3.5 Synthèse, recommandations et conclusions

Les technologies proposées sont déjà à l'étude ou même mature (gazéification, pyrolyse) mais doivent être améliorées sur le plan énergétique et sur l'économie du carbone. De plus, tous les effluents et coproduits doivent être valorisés et notamment les résidus solides. Les recommandations portent sur une meilleure compréhension des procédés et des produits potentiellement valorisables en développant des traitements plus économes, de nouvelles méthodes analytiques, des méthodes de purifications et de séparation et des catalyseurs plus performants et sélectifs.

3.3.6. Acteurs en présence

- Acteurs académiques identifiés dans le GDR Thermobio (liste non exhaustive sur : <https://thermobio.cnrs.fr/les-equipes/>)
- Acteurs industriels identifiés dans le [club Pyrogazéification](#).

3.4 Les voies biotechnologiques

3.4.1 Introduction/ Objectifs

Les biotechnologies explorent les capacités des microorganismes et des enzymes pour produire des molécules aux usages très variés : énergie, chimie verte, matériaux, alimentation, santé... Avec la possibilité de convertir des ressources renouvelables et/ou des déchets en produits d'intérêt, les enjeux des voies biotechnologiques s'inscrivent pleinement dans les challenges majeurs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, recyclage des déchets, gestion optimisée de l'eau, besoins prioritaires en alimentation et santé. Des voies alternatives aux filières exploitant les ressources fossiles s'ouvrent en exploitant le potentiel microbien et sa diversité pour permettre la création de nouveaux produits biosourcés et biodégradables : le monde du vivant ouvre la gamme des molécules que l'on peut produire en répondant à de nouveaux besoins des consommateurs dans le respect de gestion locales de ressources renouvelables avec des propriétés de biodégradabilité.

3.4.2 Contexte et enjeux

Les biotechnologies jouent un rôle majeur dans la transition vers une industrie décarbonée, biosourcée, locale et responsable, avec des avancées importantes sur ces 50 dernières années, en termes scientifiques et technologiques mais également de performances économiques, environnementales et sociétales. De nouveaux secteurs industriels ont été ouverts qui, à l'échelle européenne, représentent aujourd'hui 500 000 emplois directs et 4 fois plus d'emplois indirects (<https://www.europabio.org/>) ; la croissance de ces activités devrait permettre

d'atteindre 900.000 à 1.500.000 d'emplois directs en 2030 avec une contribution de 57,5 à 99,5 milliards €.

3.4.3 Etat de l'art et verrous

Comme cela est récemment reporté dans la littérature par les grands acteurs internationaux, il est désormais indispensable d'adopter une vision systémique, avec une réflexion d'ingénierie inversée pour traiter les verrous scientifiques et technologiques, selon de nouvelles approches où la multidisciplinarité et l'interdisciplinarité prennent toute leur place.

La diversité naturelle des catalyseurs biologiques (microorganismes, enzymes) et les capacités actuelles d'ingénierie à très haut débit offrent des opportunités importantes d'innovation ; toutefois la sélection et/ou la construction de biocatalyseurs performants et robustes pour convertir une grande diversité de ressources - dont le CO₂ - nécessitent des efforts de recherche adoptant une vision systémique et intégrée des contraintes de toutes les étapes amont et aval de la bioconversion : l'intensification des performances génère des environnements très spécifiques pour les biocatalyseurs avec des inhibitions/limitations nutritionnelles, des contraintes physiques (mélange/énergie/cisaillement...), qu'il convient de prendre en compte dans une démarche itérative.

L'intensification des performances des procédés, avec l'avantage de disposer d'équipements matures jusqu'au stade industriel, révèle également des défis technologiques et scientifiques dans la conception de configurations innovantes combinant de façon optimisée les dynamiques de transferts (matière, quantité de mouvement et chaleur) et les cinétiques biocatalytiques en conditions de très hautes concentrations (cellules et produits).

Les molécules visant des marchés à forts potentiels (biopolymères, biomatériaux, biostructurants, hydrogels, filmogènes, émulsifiants, ...) et des marchés émergents sont des domaines d'étude applicatifs privilégiés dans une synergie à la fois en termes de propriétés d'usage mais également de viabilité économique et environnementale.

3.4.4 Actions R&I à soutenir pour lever ces verrous

Les fronts de sciences sur lesquels il convient de focaliser les efforts consistent en :

- Rendre compatibles les ressources aux processus de conversion biologiques en intégrant leur caractère hétérogène en termes de compositions, états physiques pour contrôler les rendements de la filière (génie nutritionnel, prétraitements, ...)
- Élaborer des biocatalyseurs très performants en termes de rendement, avec une diversité étendue des substrats qu'ils sont capables de convertir, en élargissant le panel des molécules produites et en progressant dans leur robustesse et leur stabilité.
- Explorer des couplages de procédés intensifs pour accroître les performances actuelles (rendement, titres, productivité) avec des configurations innovantes, économes en énergie et en eau, utilisant des solvants verts.
- Intégrer la Modélisation et de l'Intelligence Artificielle pour des apports dans la compréhension, la conception et l'optimisation des biocatalyseurs, des bioprocédés, de nouveaux produits et des filières, en incluant une dimension technico-économique, environnementale et territoriale pour une gestion optimisée des données.

3.4.5 Synthèse, recommandations et conclusion

Les biotechnologies, basées sur la conversion de biomasses renouvelables par des processus biologiques, physiques et chimiques, impliquant des systèmes (bio)catalytiques naturels ou synthétiques, sont des briques essentielles pour une transformation durable de l'industrie.

Réussir la transition de produits fossiles vers des produits biotechnologiques biosourcés nécessite de renforcer les efforts de recherche pour concevoir de nouveaux biocatalyseurs, enzymes et micro-organismes, en utilisant des approches de biologie synthétique et à très haut débit, fondées sur une compréhension prédictive des fonctions biologiques adaptées à l'environnement de production industrielle. Le succès dépendra également de notre capacité à investir en recherche et développement de nouveaux systèmes/procédés de production intensifs garantissant une transposition industrielle réaliste avec des filières économiquement et environnementalement pertinente.

3.4.6 Acteurs en présence

- Acteurs académiques : CNRS, CEA, INRAE, IFPEN, Universités, UMR, UMS/Démonstrateurs, réseaux internationaux (GDRI, IBISBA, LIA...)
- Acteurs industriels membres du Pôle IAR

4 LA CHIMIE BIOSOURCEE

4.1 Introduction - Contexte

Depuis plus de 100 ans, la chimie puise ses ressources en carbone dans le pétrole, le gaz et le charbon pour produire la myriade de produits nécessaires au développement de notre société. Avec l'augmentation exponentielle de la population mondiale et les préoccupations environnementales croissantes associées, la chimie se doit de résoudre une équation très complexe : comment produire plus et mieux à partir de moins ?

4.2 Contexte et enjeux

L'industrie chimique fait face à deux grands défis que sont (1) la substitution des ressources fossiles par des ressources renouvelables (biomasse, carbone recyclé) et (2) le développement de réactions/procédés toujours plus performants et plus respectueux de l'environnement (économie d'atomes, d'énergie, sécurité, etc.).

La biomasse représente un immense réservoir de carbone renouvelable à partir duquel il est théoriquement possible de synthétiser une multitude de produits d'intérêt, et par la même de contribuer à la décarbonation globale des procédés associés. Une part très importante des travaux académiques et industriels, durant les 25 dernières années, a porté sur la transformation des plateformes chimiques (monosaccharides, acides gras, terpènes ...) en monomères et intermédiaires de synthèse. Ces synthèses consistent en l'obtention de néo-intermédiaires ou à la « copie » des intermédiaires issus du carbone fossile pour synthétiser *in-fine* les produits de commodité (filiale dite du « *drop in* »). Compte tenu notamment des volumes mis en jeu, cette filiale présente l'avantage de ne pas perturber les procédés aval mais fait face aux procédés de production éprouvés de la filiale issue du carbone fossile, rendant le plus souvent ces produits peu concurrentiels économiquement pour les utilisateurs finaux.

Une approche originale consiste à tirer profit de la fonctionnalité et de la diversité chimique présente dans la biomasse, et de permettre ainsi d'accéder à de nouvelles propriétés et donc potentiellement de nouvelles applications/marchés (filiale « *emerging* »). Cette stratégie, particulièrement développée dans plusieurs laboratoires académiques en France a permis d'accéder à des composés possédant des performances uniques (*par ex*, agents épaississants, monomères, tensioactifs, solvants, etc...) de par leur nature et leurs propriétés techniques, qu'il est quasiment impossible d'obtenir à partir de carbone fossile, sauf moyennant des procédés de transformation déraisonnables à mettre en œuvre.

4.2.1 Identifier les impacts attendus

Cette feuille de route concerne plus particulièrement la synthèse de produits chimiques de spécialité à partir de biomasse, tout en explorant les possibilités de valorisation des coproduits d'intérêt applicatif technique moindre vers la filière bio-carburants, toujours dans un concept de zéro déchet. Les molécules de spécialité trouvent un large éventail d'applications dans notre vie quotidienne, (cosmétique, détergence, revêtements de bois, agriculture, peintures, etc.). Eu égard aux préoccupations environnementales grandissantes, ainsi qu'aux différentes législations bannissant de plus en plus les produits pétrosourcés dans certains domaines d'application, la demande de la société pour des molécules biosourcées est de plus en plus forte. Afin d'accélérer la mise sur le marché de ces molécules, un compromis sera systématiquement recherché entre performance, profit et bénéfice environnemental/sociétal. Pour cette raison, les travaux de recherches doivent être réalisés en étroite concertation avec l'industrie chimique (cf. rubrique innovation) afin de couvrir des projets à des TRL de 1 à 5-6. Ce rapprochement public-privé doit également permettre de prendre en compte les législations de type « *Chine* » ou « *Reach* » qui, d'un côté permettent d'assurer la mise sur le marché de produits toujours plus sûrs et plus respectueux de l'environnement, mais d'un autre côté qui complexifient également les procédures de mise sur le marché.

Impact recherché : performance, profit et gain environnemental et sociétal

4.2.2 Quelles sont les questions ?

Contrairement au carbone fossile majoritairement composé d'hydrocarbures, la biomasse est constituée d'un ensemble de (macro)molécules très fonctionnalisées et riches en oxygène. Les grands enjeux sont le contrôle de la sélectivité des réactions de manière à minimiser la production de coproduits, d'augmenter la productivité des réacteurs, de réduire les coûts de purification, etc... Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire d'explorer de nouvelles technologies, en rupture par rapport à l'existant. Ainsi, les points clés qu'il est nécessaire d'aborder concernent la conception de nouveaux catalyseurs (plus tolérants à l'eau, aux impuretés de différentes natures, substitution des métaux nobles, résistance aux différences de *pH*, etc...) et leur couplage avec les enzymes (catalyse hybride) et/ou des technologies alternatives d'activation telles que les ultrasons, le plasma atmosphérique, le broyage, les champs électriques, la lumière, la pression, etc., sans oublier l'électrochimie. Ce couplage de la catalyse à d'autres technologies (concept de catalyse assistée) doit permettre d'activer la biomasse à plus basse température (étape limitante des catalyseurs actuels) et de contrôler ainsi plus finement la sélectivité des réactions mises en jeu tout en limitant les demandes énergétiques. Les principales questions scientifiques abordées seront la compréhension des mécanismes réactionnels mis en jeu, et notamment la caractérisation des interactions entre la biomasse, les catalyseurs et les technologies d'activation alternatives. Par ailleurs, l'aspect procédé doit être pris en considération sur la globalité de la transformation incluant la possibilité de limiter les dépenses énergétiques via l'intensification des réactions (catalyse en flux en phase liquide) sans oublier les difficultés de séparation qui peuvent être limitées grâce notamment à des transformations très sélectives. Les mesures de l'impact environnemental sont des outils majeurs en soutien à l'aide à la décision.

Production attendue : conception de nouveaux catalyseurs, émergence de nouvelles technologies d'activation, nouveaux réacteurs et procédés, ACV

4.3 Actions de R&I à soutenir pour répondre à ces enjeux

- Contrôler la sélectivité des réactions de manière à minimiser la production de coproduits
- Augmenter la productivité des réacteurs afin de réduire les coûts de purification,

- Concevoir de nouveaux catalyseurs (plus tolérants à l'eau, aux impuretés de différentes natures, substitution des métaux nobles, résistance aux différences de pH, etc...) et leur couplage avec les enzymes (catalyse hybride)
- Développer des technologies alternatives d'activation tels que les ultrasons, le plasma atmosphérique, le broyage, les champs électriques, la lumière, la pression, l'électrochimie.
- Comprendre les mécanismes réactionnels mis en jeu, et notamment la caractérisation des interactions entre la biomasse, les catalyseurs et les technologies d'activation alternatives.
- Développer des technologies de rupture pour les procédés de séparation (solvants verts dont supercritique, DES, liquides ioniques, ...)
- Modéliser, intensifier, simuler, perfectionner les ACV

4.4 Acteurs en présence

- Fédération de recherche CNRS INCREASE, GDR BIOMIM, GDR Dumbio, plateforme Realcat...
- Pôle IAR

5 SYNTHÈSE ET CONCLUSION

5.1 La disponibilité en biomasse

La biomasse possède un potentiel de réduction significative des émissions de GES dans les domaines des transports, de la production d'électricité, du bâtiment et de l'industrie. Par contre, la biomasse est déjà fortement sollicitée et il va falloir veiller à ne pas aggraver les tensions sur l'usage des terres, sans accroître l'utilisation d'intrants, souvent carbonés, et d'eau, et en préservant la biodiversité, l'adaptation aux changements climatiques l'introduction des nouvelles pratiques agricoles.

Pour cela des recherches et des modèles doivent être développées préalablement pour développer de nouvelles variétés de plantes mieux adaptées à l'évolution du climat, évaluer la ressource terrestre et marine, anticiper les rendements, définir les seuils de prélèvement acceptables en fonction de la spécificité des territoires, valider des pratiques agricole et forestière durables en préservant les intérêts sociétaux, économiques et environnementaux.

Avant d'affecter la biomasse d'un usage alimentaire vers la fabrication de matériaux ou la production d'énergie décarbonée et renouvelable, l'étape d'évaluation de sa disponibilité semble donc primordiale.

5.2 L'usage et la valorisation de la biomasse

L'utilisation de biomasse est une voie à soutenir et à intensifier pour contribuer à la décarbonation de l'industrie pour la production de chaleur en substitution à des combustibles fossiles ou grâce aux molécules qu'elle contient ou que l'on peut produire grâce à elles. Toutefois cela ne peut se faire sans prêter un grand intérêt aux problématiques de production existantes ou capables d'être améliorées si la demande augmente. Approvisionner les industriels de façon régulière, en quantité et en qualité, à un prix acceptable et sans impact négatif sur l'environnement est aussi un enjeu.

Si la production de chaleur par combustion de biomasse est une voie déjà mature pour des installations de petite taille (individuelles) ou de très grandes tailles (chaufferies de réseau urbain), le déploiement pour le secteur industriel requiert des unités de puissance moyenne

inférieure à 1 MW. La variabilité de la ressource, la mesure et la réduction des émissions de polluants sont des enjeux essentiels.

L'intégration de méthaniseur au sein des procédés industriels, notamment chimiques, est un axe à étudier et à soutenir. A partir de déchets ou de coproduits, il est en effet possible de produire grâce à cette technique, d'une part du biogaz dont le potentiel énergétique ou chimique peut directement être utilisé, ou d'autre part des molécules d'intérêt comme des acides gras volatils. Des travaux sur les technologies de séparation et purification restent toutefois nécessaires.

La conversion thermochimique de la biomasse, par pyrolyse, gazéification ou liquéfaction présente aussi un intérêt pour la décarbonation de l'industrie. Elle permet la production de gaz de synthèse, de liquides riches en molécules d'intérêt et de charbon. Accroître l'efficacité énergétique, économique et environnementale de ces procédés passe par l'amélioration des réacteurs, des catalyseurs et des techniques séparatives.

Enfin l'industrie chimique, qui utilise encore significativement des intrants issus du pétrole ou du gaz, peut puiser dans la ressource biomasse des éléments lui permettant de produire de façon décarbonée à la fois les molécules plateformes ou des intermédiaires « conventionnels » mais aussi des molécules nouvelles, dont les propriétés pourraient trouver des nouvelles applications et marchés. Là encore, l'amélioration de l'efficacité des réacteurs de transformation de la matière, des techniques analytiques et séparatives est un enjeu important.

Il semble également pertinent de créer de la transversalité entre ces usages et les acteurs afin de développer des utilisations en cascade. Par exemple, les valorisations chimiques ne concernent qu'une petite partie de la biomasse et les sous-produits issus de ces unités peuvent ensuite être valorisés en énergie par différentes voies selon la nature et les caractéristiques de ces résidus.

Les enjeux identifiés sont importants et nombreux mais des verrous théoriques et technologiques subsistent et freinent encore l'utilisation massive de la biomasse pour réduire l'empreinte carbone de l'industrie. Une large communauté d'acteurs académiques s'est déjà engagée dans ces voies et est prête à accroître ses efforts pour relever l'ensemble de ces défis en partenariat avec les acteurs économiques.

Cette feuille de route est le fruit d'une collaboration entre chercheurs, enseignants-chercheurs et ingénieurs du CNRS, des Universités, d'INRAE et de l'IFPEN. Nous les en remercions.
