

Biomasse et neutralité carbone : méthode d'aide à la décision pour les choix publics et privés

Monique Axelos*, Patrice Geoffron**, Pierre Vaiss***

Mots-clés : biomasse, neutralité carbone, politique publique, prospective énergétique

La SNBC définit de très hautes ambitions concernant les usages de la biomasse afin de «décarboner la production d'énergie» et d'«augmenter les puits de carbone». L'article, élaboré à partir du rapport des travaux [CRE, 2023] menés par le groupe de travail mandaté par le Comité de prospective de la Commission de régulation de l'énergie, analyse la contribution potentielle de la biomasse à la neutralité carbone en France. Son but n'est pas de chercher à établir, in fine, une hiérarchie dans les différents usages, mais d'éclairer ce qui se jouera dans la décennie en cours et les suivantes et de faire déboucher un travail didactique (pour classer les biomasses, leurs usages et leurs effets) sur une méthode d'aide à la décision, pour éclairer les débats et choix publics, aussi bien que privés.

Le Comité de prospective de la Commission de régulation de l'énergie, créé en 2017, rassemble les grands acteurs du secteur de l'énergie, afin d'éclairer le régulateur sur les perspectives, à moyen et long termes, du secteur de l'énergie en France. Plusieurs groupes de travail ont été mis en place dans ce cadre, chargés de rédiger des rapports publics.

Les travaux ont vocation à contribuer aux réflexions sur les voies à suivre pour atteindre la neutralité carbone à horizon 2050, tel que le prévoit la SNBC de la France. Un des enjeux est de clarifier les questions récurrentes autour des usages des biomasses et des cycles du carbone qui en découlent. Et cela en tenant compte des variations du cycle en fonction de la nature de la biomasse, du type de sa valorisation (usages

énergies *versus* usages matériaux, notamment), de l'éventuel changement d'affectation des sols qui en résulte, de la capacité du territoire impliqué à séquestrer du carbone sur le temps court et le temps long, entre autres considérations.

Dès lors, une vision prospective de la contribution de la biomasse à la neutralité carbone requiert nécessairement une approche multicritère selon : la disponibilité (physique et économique) des différents types de biomasses valorisables, les gisements potentiels et le bilan carbone des usages, les critères environnementaux (effet sur la biodiversité, la ressource en eau...), ainsi que la potentielle compétition des usages (alimentaires, autres filières industrielles, etc.).

Eu égard à cette complexité, l'ambition première est de faire œuvre de pédagogie sur la contribution de la biomasse à la neutralité carbone et d'«éclairer» le débat public sur les grands

* INRAE.

** Université Paris-Dauphine PSL.

*** Conseil d'État.

enjeux énergétiques, à destination des décideurs politiques et économiques, des acteurs du monde académique et de la recherche, ainsi naturellement que des citoyens.

1. Biomasse : de quoi parlons-nous ?

1.1. La biomasse : une diversité de matériaux issus du vivant

Dans la législation française, au 3^e alinéa de l'article L. 211-2 du code de l'énergie : «[...] La biomasse est : la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales, de la sylviculture, et des industries connexes, y compris la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets, notamment les déchets industriels ainsi que les déchets ménagers et assimilés lorsqu'ils sont d'origine biologique».

Ces biomasses ont pour caractéristique d'être d'origine biologique et d'être biodégradables à l'échelle humaine. Cette définition renvoie à différents types de biomasses, notamment du fait

de la diversité de leur origine, végétale ou animale et, au stade de déchet, selon qu'elles proviennent d'une filière industrielle ou ménagère. C'est sous le volet «source d'énergie», et en particulier «source non fossile renouvelable d'énergie», que la biomasse est considérée dans la législation française, au même article du code de l'énergie précité : «L'énergie produite à partir de sources renouvelables, ou "énergie renouvelable", est une énergie produite à partir de sources non fossiles renouvelables, à savoir l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique ou photovoltaïque, l'énergie géothermique, l'énergie ambiante, l'énergie marémotrice, houlomotrice et les autres énergies marines, l'énergie hydroélectrique, la biomasse, les gaz de décharge, les gaz des stations d'épuration d'eaux usées et le biogaz. [...] La biomasse est la fraction biodégradable [...]».

Pour autant, la catégorie «biomasse», riche de la diversité de son contenu, ne se réduit pas aux seules sources d'énergie. Certaines biomasses sont utilisées pour d'autres fonctions, naturellement pour l'alimentation, ainsi que la construction.

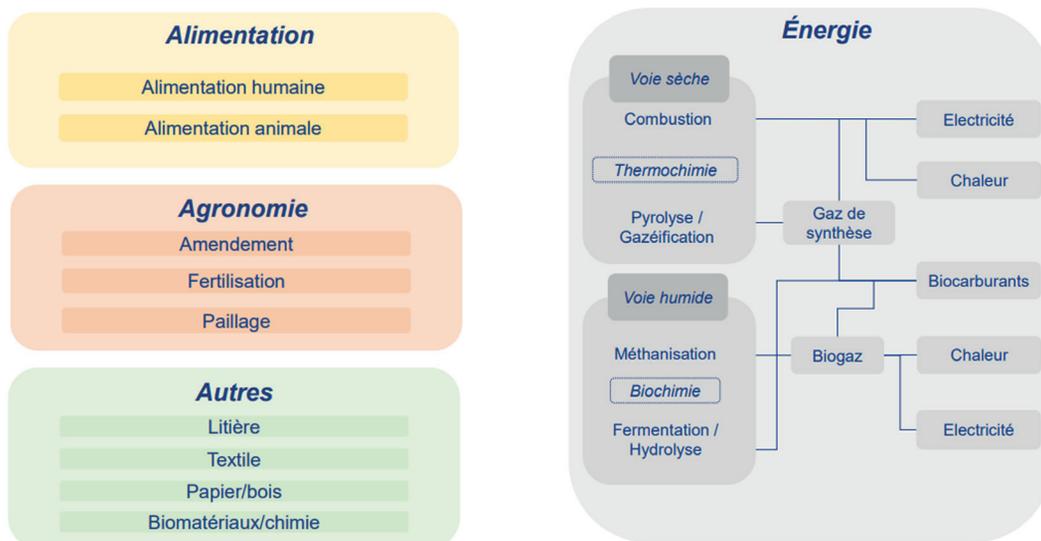


Figure 1. Diversité des débouchés de la biomasse

Source : France Stratégie

Biomasse et neutralité carbone : méthode d'aide à la décision pour les choix publics et privés

1.2. Quelle méthode de comptabilité carbone pour la biomasse ?

De par sa genèse, la biomasse contient du carbone : selon l'usage qui en sera fait, ce carbone reviendra tôt ou tard, en totalité ou en partie, dans l'atmosphère. La spécificité de la biomasse, notamment par comparaison aux matériaux carbonés issus de sources fossiles (charbon, pétrole, gaz), tient au fait que sa source est renouvelable à l'échelle humaine.

Les plantes absorbent du CO₂ lors de leur croissance. Ainsi, du carbone est séquestré dans la biomasse (sous forme de bois, de feuille, etc.) et dans le sol (carbone organique). Les plantes sont récoltées ou meurent naturellement. La majorité du carbone contenu dans ces plantes retourne un jour ou l'autre à l'atmosphère et participe ainsi au cycle du carbone. À l'issue de la récolte, le carbone est rendu à l'atmosphère, soit rapidement et directement (lors d'un brûlage), soit indirectement et plus lentement (par décomposition par exemple), et ce, même s'il est temporairement stocké sous forme de matériau. Selon la forme que prendra le carbone rendu à l'atmosphère (CO₂, méthane, protoxyde d'azote), ce cycle peut cependant avoir une contribution néfaste sur l'effet de serre.

Chaque année, le Citepa réalise l'inventaire national des émissions de gaz à effet de serre qui permet de mesurer l'avancement des engagements d'atténuation du réchauffement. La problématique est appréhendée de la façon suivante : les absorptions naturelles de CO₂ (via la photosynthèse des végétaux) sont prises en compte dans l'inventaire national, au travers de la mesure de la croissance (superficie, volume) des formations végétales. Les émissions de CO₂ issues de la biomasse, même si le carbone est temporairement stocké sous forme de matériaux, sont aussi prises en compte dans l'inventaire national.

Pour la biomasse de cycle long (bois), l'inventaire comptabilise une perte de carbone. Cette émission peut être comptabilisée l'année de la récolte ou bien quelques années plus tard du fait de la prise en compte de la durée de vie

des produits bois. Par ailleurs, la croissance des arbres est aussi comptabilisée dans l'inventaire, tout comme la mortalité des arbres. L'ensemble de ces flux, qu'il s'agisse d'absorptions de CO₂ (gain de carbone dans la biomasse) ou d'émissions de CO₂ (par prélèvement de bois, mortalité, feux de forêt, etc.), sont comptabilisés dans le secteur «Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et forêt». Les émissions de «CO₂ biomasse» sont aussi présentées au niveau du secteur consommateur uniquement pour information et ne doivent pas être sommées aux autres émissions au risque d'aboutir à un double comptage. En revanche, les émissions autres que le CO₂ générées lors du brûlage (CH₄, N₂O, polluants) sont bien comptabilisées dans le secteur consommateur.

Pour la biomasse de cycle court, par exemple les pailles des céréales, les émissions de CO₂ sont supposées compensées par la croissance des plantes à l'échelle de l'année. Si les pailles sont brûlées, le carbone est libéré par la combustion. Si elles ne sont pas brûlées, le carbone est également libéré rapidement après dégradation de la paille ou consommation par les animaux. Dans tous ces cas, il est considéré dans l'inventaire que le bilan annuel entre absorptions et émissions est égal à zéro et ne fait donc pas l'objet d'estimations chiffrées.

2. Typologie des formes de biomasses : caractéristiques, usages, potentiels

2.1. Les biomasses végétales à cycle long

La forêt française constitue une importante source de biomasse. Couvrant 17 millions d'hectares, soit 31 % du territoire, la superficie de la forêt métropolitaine a doublé depuis 1850, continuant à croître à un rythme moyen de 85 000 hectares par an depuis 1985, soit l'équivalent de trois forêts de Fontainebleau chaque année. Les trois quarts des forêts métropolitaines sont détenus par des propriétaires privés ; l'État et les collectivités locales se partagent le quart restant. La forêt privée est très fragmentée : 3,5 millions de propriétaires possèdent en moyenne 2,6 ha, dont les trois quarts moins de 1 ha. Ce morcellement

est le résultat du partage des héritages comme le permet le Code civil napoléonien depuis les origines. La production biologique annuelle en volume des arbres vifs s'élève à un peu plus de 90 millions de mètres cubes en moyenne depuis la fin des années 2000. Un arbre de 5 m³ peut absorber l'équivalent de 5 tonnes de CO₂.

Trois types de productions de bois doivent être distingués, selon la taille des produits récoltés et selon l'usage qui en résulte : le bois d'œuvre, le bois d'industrie et le bois énergie.

Le bois d'œuvre (BO) présente une qualité suffisante pour être exploité par sciage, tranchage, déroulage ou fendage et autres usages « nobles » de la filière. La qualification se fait à partir de mesures du diamètre de l'arbre et de la longueur de son fût, et de sa qualité intrinsèque (bois sain, sans singularité entravant la transformation) selon les attentes actuelles du marché pour le bois d'œuvre. Après transformation, ces bois servent en charpente, construction, menuiserie, ameublement, caisserie.

En forêt, le bois d'industrie (BI) et le bois énergie (BE) désignent à peu près le même type de ressource que le BO, valorisable pour sa matière (BI) ou pour son pouvoir calorifique à la combustion (BE). Outre leur composante forestière (bois rond, plaquettes forestières), ces ressources sont également composées de produits connexes de scierie et de bois recyclé.

Le bois d'industrie est en général de petite dimension, inutilisable en BO, mais pouvant être valorisé selon d'autres destinations (panneaux de particules, papier et carton, chimie verte, etc.). Le BI est pour l'essentiel constitué soit de ressources issues de l'exploitation sylvicole, ainsi que de petits arbres prélevés dans les coupes d'éclaircies ou d'améliorations de taillis simples et sous futaie (marginale de taillis à courte rotation), soit de produits connexes de scierie (dosses, délignures, plaquettes, sciures).

Le bois énergie est destiné, de façon dominante, à la combustion, permettant de valoriser les coproduits des opérations sylvicoles, des

filières de transformation (produits connexes de scierie, etc.), ainsi que des filières de recyclage des usagés ou rebuts de la construction, de la grande distribution ou de l'industrie (charpentes, palettes, etc.).

Les produits bois (BO et BI) ne contribuent plus à l'absorption du CO₂ atmosphérique. D'un autre côté, ces produits, en tant que matériaux, n'émettent pas non plus de CO₂ dans l'atmosphère, tant qu'ils ne sont pas consommés soit par accident (incendie) soit par valorisation en fin de cycle de vie (production d'énergie). BO et BI font l'objet d'une attention particulière dans les scénarios en vue de la neutralité carbone eu égard à leur contribution à l'effet de stockage (les produits bois stockent en leur sein du carbone issu de l'atmosphère) et à l'effet de substitution (les produits bois nécessitent moins d'émissions de CO₂ que d'autres matériaux à fonction similaire).

Il ressort des observations précédentes que, pour optimiser la valeur ajoutée du matériau selon ses usages, le bois d'œuvre est le premier niveau d'utilisation en termes économiques, de recherche de la neutralité carbone et de développement durable. Autant que possible, il conviendrait ainsi d'exploiter en premier lieu le bois pour ses atouts comme matériau, avant une éventuelle valorisation énergétique en fin de vie, en prenant en considération l'intérêt d'un usage en cascade. Mais, par ailleurs, la nécessité de privilégier certains usages pourrait s'imposer : dans la SNBC, une part croissante de la récolte est dédiée aux usages dits « longs », au détriment des usages « courts » que sont notamment l'emballage et le papier.

Les recensements forestiers révèlent, depuis les années 2010, deux tendances de fond dues au changement climatique : une moindre croissance des arbres, et une plus forte mortalité¹. Le réchauffement modifie le cycle de développement des arbres, se traduisant par un allongement de la saison de végétation (implique une exposition au gel et aux attaques parasites), une chute de productivité (notamment pour des essences telles que le chêne vert et le pin d'Alep), un changement de la distribution des espèces et de leur

Biomasse et neutralité carbone : méthode d'aide à la décision pour les choix publics et privés

répartition géographique (une progression vers le nord des essences méditerranéennes), une recrudescence des insectes ravageurs, des maladies et des champignons (ayant pour conséquences un affaiblissement de l'arbre, une limitation de la croissance, et une mortalité accrue). Le bilan de ces effets combinés est une forte réduction du rôle de puits des forêts : estimé à environ -50 Mt CO₂ dans les années 2000, ce puits s'est considérablement réduit en 2020 pour atteindre -14 Mt CO₂.

2.2. Les biomasses végétales à cycle court

Ces biomasses végétales sont les produits des cultures dont le renouvellement après récolte est de moins d'une année. Il s'agit de biomasses issues de l'agriculture ou des prairies. La surface agricole française est estimée à 28,6 millions d'hectares en 2019, soit 48 % du territoire métropolitain. Cette surface se divise entre terres arables (18 Mha), cultures permanentes (1 Mha) et surfaces toujours en herbes (10 Mha).

Le principal usage de ces cultures est l'alimentation humaine et animale. Ces cultures remplissent également d'autres fonctions : agronomiques (retour au sol), énergétiques (chaleur, biogaz, électricité), chimiques (molécules, carburant, etc.) ou biomatériaux (bâtiment, textile, industrie). Ces usages sont la plupart du temps combinés pour une biomasse végétale donnée : par exemple, les résidus de cultures annuelles comme les pailles sont utilisés pour les besoins animaux (litières, alimentation), tout en assurant un retour au sol lors de la récolte (utilisation agronomique) ; ainsi que, dans certains cas, pour permettre un usage à des fins énergétiques (par combustion et pour la production de biogaz). Un autre exemple de ressources à usages multiples relève des cultures annuelles (blé, maïs, colza, etc.) : leur usage principal est alimentaire, mais elles contribuent aussi à la production de biocarburants, de biogaz et de matériaux biosourcés.

Les cultures dédiées à l'usage énergétique

En 2018, la production totale de cultures (maïs, blé, colza, tournesol et betterave) s'élevait à 94 700 kilotonnes de matière sèche (ktMS) pour une surface développée d'environ 9,3 Mha. Sur ce total, près de 9 700 ktMS seraient mobilisées sur une surface brute de 1,5 Mha, correspondant à une surface nette de 1 Mha en prenant en compte la part énergétique des coproduits valorisés en alimentation animale. Le développement des usages énergétiques et celui des usages matériaux, encore marginal, peuvent venir concurrencer les usages alimentaires. La production de biocarburants 1G (bioéthanol, biodiesel) est le principal débouché de l'usage énergétique des cultures annuelles. Par ailleurs, des cultures lignocellulosiques ont pour but principal la valorisation énergétique : miscanthus, switchgrass, taillis à courte rotation (7 à 10 ans) ou très courte rotation (3 à 5 ans) comme les saules, robiniers, peupliers. L'usage matériaux pourrait aussi augmenter dans les années à venir, notamment si les débouchés en matières composites se développent. Le déploiement des cultures pérennes à des fins énergétiques peut cependant soulever des interrogations sur la concurrence avec l'usage alimentaire des sols agricoles. Il peut également constituer une opportunité pour valoriser les friches industrielles ou les sols impropres à la production alimentaire.

Les résidus de cultures annuelles

Ces résidus sont constitués de pailles de céréales, d'oléagineux ou de protéagineux, de menue paille (composée de débris formés lors de la récolte et de graines d'adventives présentes dans le champ), de cannes de maïs et de fanes de betteraves. Ces résidus peuvent être broyés et laissés aux sols, ou collectés pour répondre aux besoins de l'élevage (à des fins de litière animale ou plus occasionnellement comme alimentation). La disponibilité de cette ressource est très variable, tant quantitativement que qualitativement, en raison des variations de rendement

d'une année sur l'autre, ce qui entraîne des incertitudes sur les volumes estimés.

Les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE)

Implantées entre deux cultures principales, ces productions peuvent assurer différentes fonctions agronomiques et environnementales, en plus d'une vocation énergétique : piégeage de l'azote résiduel, limitation des adventices, lutte contre l'érosion, amélioration de la biodiversité et de la structure des sols. Outre ces services écosystémiques, la mise en place de cultures intermédiaires représente une source de biomasse additionnelle valorisable énergétiquement (majoritairement par méthanisation) et produisant de surcroît du digestat, assurant un retour au sol du carbone notamment. Il en existe deux grands types : les cultures d'automne/hiver (ray-grass, triticale, seigle, avoine, etc.) prolongeant une plantation de printemps, et les cultures d'été récoltées en octobre (sorgho, avoine, pois, tournesol, maïs, etc.).

Les enjeux relatifs aux usages énergétiques de ces biomasses

La biomasse agricole est composée de ressources variées, présentes sous la forme de gisements diffus sur l'ensemble du territoire et se caractérisant par son caractère saisonnier et périssable. Sa mobilisation apparaît complexe sur de grandes distances à un coût réduit sans compromettre sa qualité et son bilan carbone. Son usage local est donc plus pertinent, mais nécessite un changement de structuration des infrastructures, afin de réaliser un maillage territorial. Jusqu'alors, la mobilisation de la biomasse agricole à des fins énergétiques était encore limitée du fait de la compétitivité des énergies carbonées, ce qui ne sera plus forcément le cas à l'avenir, du fait de la crise énergétique et des ambitions françaises et européennes en matière de neutralité carbone. La viabilité économique des filières de valorisation dépend en grande partie des soutiens publics car la valorisation énergétique de la biomasse agricole représente des coûts d'investissements élevés pour de nombreuses exploitations agricoles et

une rentabilité économique encore incertaine sur le long terme.

2.3. Les biomasses non végétales

Les biomasses non végétales ne sont pas prélevées sur un puits de carbone, de sorte que leur récolte n'impacte pas la capacité d'absorption de CO₂ atmosphérique; toutefois, leur usage énergétique est, comme toute ressource constituée de carbone, émettrice de CO₂. Cette grande catégorie concerne les résidus d'élevage, ainsi que les déchets et résidus d'activités humaines : déchets verts urbains, boues de stations d'épuration, biodéchets provenant des ménages et de la restauration, résidus de l'industrie agroalimentaire... Les biodéchets urbains verts proviennent de sources lignocellulosiques (feuilles, résidus d'élagage et de tonte). Les déchets alimentaires des ménages et des restaurants constituent une ressource de biomasse potentiellement importante qui est actuellement peu valorisée. Les résidus de l'industrie agroalimentaire sont principalement utilisés dans l'alimentation animale ou dans la production de matériaux biosourcés et de biocarburants. Le coût de leur valorisation doit être comparé à celui de leur élimination (souvent inférieur), pouvant expliquer un usage limité.

La valorisation énergétique des résidus d'élevage

Les déchets et coproduits organiques des exploitations d'élevage forment du fumier (100 millions de tonnes) ou du lisier (200 millions). Le niveau actuel de mobilisation énergétique des effluents d'élevage est très faible : la grande majorité de cette ressource est épandue sur les sols et seul un faible pourcentage est valorisé en méthanisation. Selon l'ADEME, le potentiel à horizon 2050 est évalué de 10 à 20 TWh dans des scénarios «agroécologiques» avec une part importante du cheptel bovin «à l'herbe» (scénarios S1 de l'ADEME et «agroécologie» de France Stratégie) et jusqu'à 20 à 24 TWh dans des scénarios plus tendanciels de maintien des pratiques actuelles d'élevage intensif (scénario tendanciel et S4 de l'ADEME). La valorisation énergétique de ces biomasses peut prendre plusieurs formes :

Biomasse et neutralité carbone : méthode d'aide à la décision pour les choix publics et privés

à partir du méthane issu de leur fermentation, il est possible de produire de la chaleur, de l'électricité (cogénération) ou du biogaz injecté dans le réseau.

La valorisation énergétique des déchets issus des activités industrielles, domestiques, municipales

À la différence des biomasses relevant de résidus d'élevage, celles issues de la dépollution sont exclusivement valorisées aujourd'hui sous forme de production de chaleur. La valorisation économique de ces déchets consiste également à éviter l'enfouissement, dont les coûts sont élevés et en hausse. Les combustibles solides de récupération (CSR) sont produits à partir d'une large gamme de déchets municipaux ou industriels : pneus, plastiques, résidus de broyage automobile, bois et déchets de bois, papiers, cartons et boues de papeterie, boues d'épuration des eaux, textiles, déchets ménagers. Ils proviennent notamment des refus de tri (collecte sélective), des encombrants de déchèterie. Tous ces déchets ne sont pas nécessairement de la biomasse, mais celle-ci y contribue. Leur pouvoir calorifique, variable selon leur composition et leur qualité, est de l'ordre de 10 à 25 MJ/kg. En France, près de 50 % des CSR produits sont utilisés dans les cimenteries (production de chaleur). La mobilisation des CSR sera favorisée par les objectifs de réduction de 50 % des mises en décharge d'ici 2025. La pyrogazéification est un autre procédé de valorisation des CSR et des déchets-bois (d'ameublement notamment). Elle consiste à les traiter à haute température pour produire un gaz. Après purification et traitement, le gaz résultant, composé essentiellement de méthane, peut être injecté dans les réseaux et utilisé directement pour couvrir tous les usages, sans changement de procédé pour les utilisateurs finaux.

2.4. Les principaux enjeux liés aux mobilisations des biomasses

La question posée ici est celle des conditions à réunir pour mobiliser davantage de biomasse. Les illustrations présentées dans cette partie permettent de relever que les dispositifs

de mobilisation de biomasse en France se sont construits sur la base d'intrants très divers, ce qui a conduit à des conceptions très hétérogènes. Les dispositifs actuels reposent ainsi sur des solutions émergentes localement, selon une grande diversité de configurations : ressources et valorisations locales, économie circulaire (optimisation des coûts de collecte, d'acheminement, de distribution, etc.), diversité de taille des unités en fonction des équilibres territoriaux. Il apparaît que toutes les situations rencontrées révèlent des situations ancrées dans les territoires de manière chaque fois très spécifique, prenant en compte de multiples facteurs et interactions (enjeux sociaux, acteurs économiques).

Les mécanismes de coproduction

Il y a lieu de faire une distinction entre les biomasses dont la production poursuit une finalité énergétique bas carbone, et celles pour lesquelles cette finalité est incidente d'une production principale. Dans le premier cas, on peut notamment identifier les cultures lignocellulosiques (triticale-sorgho, taillis à croissance rapide) produites en vue de la production de biocarburants avancés, les CIVE en vue de la méthanisation, ou encore la sylviculture pour la production principale de bois d'œuvre (ce qui concourt à l'objectif de stockage du CO₂ dans les matériaux de construction). Pour ces types de biomasses, augmenter la mobilisation suppose de développer les filières de production. Le point d'attention concerne entre autres la compétition avec d'autres finalités (alimentaires notamment) et la protection des écosystèmes face à l'augmentation de surface ou de rendements. Dans le second cas, on peut identifier par exemple le fumier issu d'élevage, les résidus des cultures annuelles, les résidus sylvicoles, les déchets urbains, etc., issus d'une autre production principale. Augmenter la mobilisation suppose donc d'agir également au niveau de l'activité de production dont elles sont issues, ce qui requiert de modifier des équilibres économiques complexes.

Les procédés de maximisation de la valorisation du carbone

L'utilisation énergétique des biomasses émet du CO₂ biogénique. La valorisation maximale vise à obtenir que ce CO₂ ne s'échappe pas dans l'atmosphère (par méthanation par exemple, avec des coûts supplémentaires associés à la production d'hydrogène). Des synergies peuvent être recherchées, notamment entre la filière pyrogazéification et la filière méthanation ou bien entre la méthanisation et la méthanation. Cela rejoint la problématique de la localisation des installations : le couplage méthanisation-méthanation trouve son intérêt en permettant de produire l'hydrogène nécessaire, ou alors de disposer d'une infrastructure de transport, permettant d'avoir accès à une grande quantité d'hydrogène à proximité. L'idée est de combiner ces actions sur ces mêmes sites et auprès des mêmes acteurs.

Retour sur les objectifs de la SNBC 2

La SNBC prévoit un besoin énergétique final d'environ 1 060 TWh en 2050. Sur ce total, 110 TWh seraient fournis par des combustibles solides utilisant 110 TWh de ressources en biomasse brute (comme le bois). À cela s'ajoutent 100 TWh d'énergie qui seraient couverts par des combustibles liquides (biocarburants) utilisant 140 TWh de biomasse brute. Enfin, 160 TWh_{pes} seraient fournis par des combustibles gazeux utilisant 200 TWh de biomasse brute. Ainsi, environ 450 TWh_{pes} de ressources de biomasse brute devraient être mobilisés à des fins énergétiques d'ici à 2050, contre environ 180 TWh en 2016. Toujours selon le cadre estimé par la SNBC, près de 250 TWh de biomasse agricole, 100 TWh de biomasse forestière et 100 TWh de déchets, effluents d'élevage et autres résidus devront être utilisés à des fins énergétiques. Ces chiffres supposent un niveau de mobilisation élevé, ainsi qu'une valorisation optimale des ressources. La plupart des études prospectives estiment que l'atteinte de cet objectif présente des défis et incertitudes.

3. Propositions de critères de hiérarchisation des activités

3.1. Les activités à hiérarchiser

Nous privilégions la notion d'«activité» à celle couramment utilisée d'«usage». Dès lors que la réflexion proposée ne se borne pas à la seule question de l'utilisation ou la mobilisation des ressources, mais prend également en compte les activités relatives à leur préservation et leur reconstitution, il apparaît préférable de retenir la notion d'«activité». De quelles activités parlons-nous? Nous entendons par «activité» les actions humaines en prise directement avec les biomasses à leur état brut (par exemple replantation forestière, changement des pratiques agricoles, etc.) et conduisant à les valoriser (que cette valorisation soit de nature énergétique ou autre). Les activités retenues sont ainsi celles situées en amont de la chaîne de transformation et d'usages (ceux-ci pouvant être, *in fine*, par exemple la production d'électricité ou de biogaz pour le secteur du transport, ou la production de matériaux pour le secteur du bâtiment, etc.). Nous en retenons 14 qui nous paraissent constituer les principales et qui sont ici organisées selon les grandes caractéristiques des biomasses concernées.

Activités de valorisation des biomasses végétales à cycle long

- A1 – Replantation de forêts.
- A2 – Gestion sylvicole prenant en compte l'adaptation au changement climatique (diversification des essences forestières, etc.).
- A3 – Gestion sylvicole préservant les sols et écosystèmes (techniques de récolte «douces», maintien au sol des résidus de sylviculture, etc.).
- A4 – Utilisation du bois pour le matériau construction-ameublement-isolation.
- A5 – Utilisation du bois pour l'énergie par combustion (pour chauffage résidentiel, chaudières CSR, fours industrie, etc.).

Biomasse et neutralité carbone : méthode d'aide à la décision pour les choix publics et privés

- A6 – Utilisation des résidus de bois pour les biocarburants 2G.

Activités de valorisation des biomasses végétales à cycle court

- A7 – Maintien au sol des résidus végétaux de culture pour contribuer au maintien de CO₂ dans les sols.
- A8 – Utilisation des résidus de cultures pour des biocarburants (2G) ou pour la méthanisation.
- A9 – Culture de plantes (oléagineuses, etc.) dédiées aux biocarburants (1G).
- A10 – Culture de plantes (miscanthus, etc.) dédiées aux biocarburants (2G).
- A11 – Cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) pour les installations de méthanisation et conséquence sur les rotations.

Activités de valorisation des biomasses non végétales

- A12 – Utilisation des résidus d'élevage en méthanisation.
- A13 – Alimentation des installations de production de biogaz (méthanisation, pyrogazéification, gazéification hydrothermale) avec des déchets (liquides/solides) issus de collectivités/industries/ménages.
- A14 – Implantation d'installations de traitement des déchets ménagers et industriels.

3.2. Critères de hiérarchisation envisageables

Nous pouvons confronter les diverses activités présentées dans le paragraphe précédent à quatre principaux critères : deux selon leur concours à l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone, et deux transversaux, relatifs à la pertinence de ces activités compte tenu de leur équilibre coût-bénéfice-risque, ainsi que de leur comptabilité

avec d'autres enjeux environnementaux, sociaux, économiques et politiques.

Critère 1 (C1) : concours à l'absorption du CO₂ atmosphérique

Ce critère permet de confronter les activités selon qu'elles contribuent ou non à préserver les écosystèmes végétaux (forêts, prairies, cultures, sols) et ainsi à protéger le puits de carbone. Ce critère concerne spécifiquement les activités en rapport avec les biomasses végétales (à cycles longs ou courts) : activités qui contribuent à la reconstitution de la biomasse végétale (replantation forestière, mise en cultures de terres nues, etc.); activités qui exploitent ou mobilisent la biomasse végétale (récolte raisonnée de biomasse végétale, gestion durable des forêts, des cultures et des prairies...).

Critère 2 (C2) : concours à la réduction des émissions de CO₂ dans l'atmosphère

Ce critère permet de distinguer les activités selon leur contribution à réduire les émissions de CO₂, notamment en concourant à l'effet de substitution-énergie ou bien à l'effet de substitution-produits. L'effet de substitution-produits repose sur le principe de réduire les émissions de CO₂ par le recours à un procédé utilisant de la biomasse plutôt qu'un matériau (béton, acier, plâtre, aluminium, etc.) davantage émetteur de CO₂. L'effet de substitution-énergie repose sur le principe de réduire les émissions de CO₂ par une valorisation en substitution à des sources d'énergies fossiles.

Critère 3 (C3) : l'équilibre coût/bénéfice/risque

Ce critère permet d'évaluer les activités en fonction de leur viabilité économique, de leur maturité, des cobénéfices qui peuvent y être associés et de leur sensibilité aux chocs (exemple : fluctuations du marché des autres ressources énergétiques). Il s'agit d'apprécier pour chacune des activités retenues les perspectives de retour sur investissement sur l'ensemble des opérations concernées : la récolte ou collecte, son

BIOMASSE

Critères principaux retenus	C1 Contribution absorption CO ₂	C2 Contribution réduction émissions CO ₂	C3 Coûts/bénéfice/risque	C4 Connexité autres objectifs et enjeux
Activités retenues				
Activités de valorisation des biomasses végétales à cycle long				
A1 - Replantation de forêts				
A2 - Gestion sylvicole prenant en compte l'adaptation au changement climatique				
A3 - Gestion sylvicole préservant les sols et écosystèmes				
A4 - Utilisation du bois pour le matériau construction - ameublement - isolation				
A5 - Utilisation du bois pour l'énergie par combustion				
A6 - Utilisation des résidus de bois pour les biocarburants 2G				
Activités de valorisation des biomasses végétales à cycle court				
A7 - Maintien au sol (ou enfouissage) des résidus végétaux de culture				
A8 - Utilisation des résidus de cultures pour des biocarburants (2G)				
A9 - Culture de plantes (oléagineuses) dédiées aux biocarburants (1G)				
A10 - Culture de plantes (miscanthus) dédiées aux biocarburants (2G)				
A11 - Culture de plantes dédiées (CIVE) pour les installations de méthanisation				
Activités de valorisation des biomasses non-végétales				
A12 - Utilisation des résidus d'élevage en méthanisation				
A13 - Alimentation des installations de méthanisation avec des déchets (liquides/solides) issus de collectivités/ménagers				
A14 - Implantation d'installations de traitement des déchets ménagers et industriels				

Tableau 1

Source : [CRE, 2023]

Biomasse et neutralité carbone : méthode d'aide à la décision pour les choix publics et privés

extraction, son acheminement jusqu'à son site de transformation ou d'usage, sa transformation et sa mise à disposition de l'utilisateur. L'optimisation de ces activités (collecte, transport, transformation, etc.) et des dépenses d'énergie associées constitue un critère favorable à la réduction des émissions de CO₂, et il en est de même de leur viabilité économique. Cela comprend également, le cas échéant, les coûts relatifs à l'innovation, au déploiement du procédé, à sa généralisation et son industrialisation.

Critère 4 (C4) : compatibilité avec d'autres objectifs de politique publique

Ce dernier critère permet d'évaluer la compatibilité et les synergies avec d'autres objectifs et enjeux nationaux ou globaux : il s'agit d'apprécier leur faisabilité et degré de réalisme eu égard à leur connexité avec d'autres considérations politiques comme la sécurité d'approvisionnement énergétique ou des objectifs environnementaux de protection des milieux naturels. Cela renvoie notamment à l'exigence de maintien de la biodiversité, de préservation de la qualité de l'eau et de l'air. Au-delà des seules dimensions énergétiques ou environnementales, d'autres objectifs de politiques publiques tels que le maintien de l'emploi et l'activité économique font également partie des objectifs à prendre en compte afin de déterminer l'équilibre des critères.

3.3. Une aide à la décision basée sur un croisement «activités & critères»

Les différents critères proposés ci-dessus peuvent être différemment pondérés, selon les priorités déterminées par le décideur public. Un décideur pourra, dans une optique de réduction des émissions de CO₂ durant cette décennie (au regard du rehaussement des ambitions européennes), choisir de mettre l'accent sur des critères C2 de type «potentiel de réduction d'émission par substitution-matériau ou substitution-énergie», ou des critères C3 de type «viabilité économique de la mobilisation de biomasse» et «synergie avec d'autres bénéfices associés», tout en posant des jalons pour le long terme en vue de la contribution à la neutralité carbone à

l'horizon 2050 (en mettant l'accent, par exemple sur des critères C1 de type «développement des puits carbone et préservation des puits lors de la collecte»)².

4. Éléments de conclusion

En matière de mobilisation et d'usage des biomasses, nous avons souhaité proposer un ensemble d'outils permettant à chaque décideur de lister les actions *a priori* «sans regret», à moyen terme. Au-delà de cette contribution que nous espérons utile, extraire des conclusions d'un exercice aussi complexe que l'examen de l'«ensemble des usages» de l'«ensemble des ressources de biomasse» n'est pas aisé. Nous souhaitons toutefois partager quelques convictions formées au travers des échanges au sein de notre groupe de travail.

La SNBC définit de très hautes ambitions concernant les usages de la biomasse afin de «décarboner la production d'énergie» et d'augmenter les puits de carbone». En cohérence, il nous paraît important de veiller aux activités présentant le plus fort levier pour l'atteinte de ces objectifs, soit :

- la préservation et le développement des puits naturels notamment pour la biomasse à cycle long de reconstitution;
- la «substitution énergie» dans le respect de critères de durabilité et de réduction effective des émissions de GES par rapport à l'utilisation d'énergie fossile pour la même efficacité, ce qui oriente notamment vers le recours à des biomasses végétales à cycle court ou issues du recyclage dans le cas de biomasses végétales à cycle long, ou vers des biomasses non végétales, en coactivité ou usage en cascade;
- enfin, la «substitution matériau» à usage long, domaine prometteur pour constituer des puits de carbone, objet à la fois de développements et d'expérimentations nombreuses.

Concernant les «puits de carbone», il est fondamental de prendre en compte les perturbations de l'écosystème forestier sous l'impact du

changement climatique qui se traduit par une réduction de sa capacité de stockage du carbone (sécheresse, incendies, attaque de parasites, constat qui, malheureusement, n'est pas circonscrit à la France). Dès lors, il nous paraît évident que le principe d'une neutralité appliqué au cas des émissions de CO₂ biogénique n'est pas à prendre pour acquis. D'où l'importance que nous souhaitons mettre, en conclusion, sur les efforts de maintien et de reconstitution des puits et sur l'impérative réduction des émissions de CO₂ (y compris celui biogénique), dès lors que l'atteinte de la neutralité, en mobilisant ce levier, est rendue plus incertaine.

Concernant les usages énergétiques des biomasses passées en revue, et malgré les limites soulignées (notamment, le traditionnel point de tension entre «*food*», «*feed*» et «*fuel*» qui trouve plus encore d'acuité depuis le début du conflit en Ukraine), il importe de rappeler qu'il n'est pas identifié à ce jour d'énergies alternatives sans impact sur le cycle du CO₂ et l'environnement. Dès lors, la vigilance doit porter sur les conditions d'un usage soutenable de la biomasse en matière énergétique et cela d'autant plus que la directive RED II fonde les politiques publiques européennes, en particulier pour la décarbonation de la mobilité lourde et des autres segments «*hard to abate*» (difficile à réduire), sur cet usage accru. Autrement dit, il importe de définir un «*ordre des mérites*» dans les usages énergétiques de la biomasse et de les privilégier dans les domaines où ils présentent un intérêt différenciant en matière de décarbonation.

L'une des principales questions est de savoir comment valoriser en coactivité ce qui peut l'être et pour quels usages énergétiques prioritaires en tenant compte des différents horizons temporels. Le défi est que les politiques publiques à horizon 2050 doivent également être cohérentes avec les objectifs de décarbonation à l'horizon plus court de 2030 pour lequel l'Europe s'est engagée à atteindre une réduction des émissions de CO₂ de 55 %. Cet objectif passe, en particulier, par une hausse de la part des différentes énergies renouvelables dans les secteurs difficiles à décarboner (industrie, mobilité, chauffage) et par un objectif

de production de 35 Mm³ de biogaz (doublé dans le cadre du plan REPowerEU, élaboré par la Commission pour réduire la dépendance aux importations de gaz russe). Une mobilisation accrue, pour la production d'énergie, de la biomasse disponible, respectant la priorité aux usages alimentation et aux matériaux à longue durée de vie, ainsi que les critères de durabilité, fait donc partie des solutions à mettre en œuvre tout de suite, mais sans obérer leur potentiel futur comme puits de carbone pour compenser les émissions de GES non réductibles.

La crise actuelle a mis en lumière notamment des questions de sécurité d'approvisionnement, de diversification des sources de production d'énergie (et d'approvisionnement), de résilience du système énergétique. Dans ce contexte, la biomasse peut jouer un rôle significatif y compris dans sa dimension énergétique. En particulier, les événements récents montrent l'intérêt de préserver sur le long terme un mix énergétique diversifié et équilibré, intégré dans l'économie territoriale, sans opposer les énergies entre elles.

NOTES

1. Ces phénomènes, mal estimés au moment de la SNBC 2, sont en cours de corrections dans l'élaboration de la SNBC 3 (correctifs relatifs à la mortalité et à la croissance) : il est ainsi observé un puits moins dynamique que ce qui avait été espéré.

2. Le rapport débouche, en annexe, sur une grille d'analyse des «*activités & critères*», qui permettent d'organiser la réflexion et la délibération.

RÉFÉRENCE

CRE, 2023. La biomasse et la neutralité carbone, <https://www.cre.fr/Actualites/comite-de-prospective-fin-de-la-saison-4-et-lancement-du-nouveau-format>.

Biomasse et neutralité carbone : méthode d'aide à la décision pour les choix publics et privés

BIOGRAPHIES

MONIQUE AXELOS est directrice scientifique pour l'alimentation et la bioéconomie à INRAE. Au niveau européen, elle coordonne le groupe de travail stratégique «Systèmes alimentaires» du Standing Committee on Agriculture Research (SCAR). Elle est membre du conseil scientifique de la CRE. Entre 2008 et 2016, elle a dirigé le département scientifique d'INRAE : Science et ingénierie des produits issus de l'agriculture. Elle est titulaire d'un doctorat en physique et a mené ses recherches à l'interface entre physique de la matière molle et biologie.

PATRICE GEOFFRON est professeur à l'Université Paris-Dauphine, dont il a été président intérimaire (2020) et vice-président international. Il a également dirigé, à sa création, le Laboratoire d'Économie de Dauphine (LEDa). Il pilote actuellement l'équipe énergie-climat de Dauphine qui anime plusieurs chaires de recherche (Économie du Climat, Économie du Gaz, Marchés européens de l'Électricité). Entre autres responsabilités, il est membre du conseil scientifique du CEA et de la CRE, ainsi que du Cercle des Économistes.

PIERRE VAISS est agronome et sociologue de formation. Ingénieur en chef des ponts, des eaux et des forêts, il est actuellement maître des requêtes en service extraordinaire au Conseil d'État. Après avoir conduit des recherches entre 2003 et 2007 sur les politiques publiques de protection des forêts contre les incendies en France, il a exercé plusieurs fonctions de cadre supérieur de l'État, notamment au sein du ministère en charge de l'Environnement ainsi qu'au ministère de l'Intérieur.