

LE RÔLE DE LA BIOMASSE DANS LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

Patrick LEDERMANN

Membre de l'Académie des technologies, président du pôle Énergie

Dominique VIGNON

Membre de l'Académie des technologies

Séance du 12 mars 2025

Résumé

Cette séance thématique est organisée à l'occasion de la finalisation d'un rapport établi conjointement par des membres de l'Académie des technologies et de l'Académie d'agriculture de France, qui analyse les usages potentiels de la biomasse et sa disponibilité pour répondre aux besoins énergétiques.

Le bois (ou plus généralement la biomasse dite solide), par exemple, fait l'objet de nombreux usages entrant en concurrence : c'est à la fois un matériau de construction, sous forme de bois d'œuvre produit par sciage ou de bois d'industrie à travers la production de panneaux de particules, mais c'est aussi une ressource pour la chimie et, bien sûr, une source d'énergie. Dès lors, quel est son usage « optimal » ?

Le biométhane peut lui être produit à partir de la fermentation de matières organiques (méthanisation), par pyrogazéification à partir du bois ou des déchets organiques, soulève une question semblable au bois : faut-il l'injecter dans les réseaux ou le réserver au transport routier et ferroviaire, par exemple ?

Compte tenu de la relative rareté de la biomasse par rapport aux besoins énergétiques attendus, le rapport propose une méthode pour définir un ordre de priorité des différents usages potentiels énergétiques de la biomasse en tenant compte des objectifs du développement durable, et donne de premiers résultats d'application de cette méthode.

Intervenants

Félix BOILÈVE

Équipe permanente de l'Académie des technologies

Guillaume CHANTRE

Directeur général adjoint de l'institut technique FCBA

Denis CLODIC

Académicien, directeur Recherche et Innovation Cryo Pur/FDE

Dominique VIGNON

Académicien

Sommaire

La disponibilité future en biomasse énergie en France : des estimations du potentiel très différentes, une conclusion partagée sur les limites	2
Les disponibilités de bois en France au défi de l'évolution des usages	2
Biométhane, CO₂ biogénique, méthane de synthèse	5
L'optimisation des usages de la biomasse dans le respect des objectifs du développement durable	6
Débats	7

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.



La disponibilité future en biomasse énergie en France : des estimations du potentiel très différentes, une conclusion partagée sur les limites

Félix Boilève

Selon le scénario énergétique proposé par RTE, la consommation globale d'énergie passerait de 1 600 TWh en 2020 à 1 050 TWh en 2050.

Certaines études accordent une place particulièrement importante à la biomasse dans le mix énergétique 2050. Selon la SNBC 2 (Stratégie nationale bas carbone), celle-ci pourrait représenter jusqu'à 430 TWh (le reste étant dévolu à l'électricité). Au contraire, l'étude portée par les trois inspections générales des ministères de l'Économie, de l'Environnement et de l'Agriculture - CGE (Conseil général de l'économie), IGEDD (inspection générale de l'environnement et du développement durable) et CGAER (Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux) - et publiée en 2024, évalue son potentiel à 245 TWh (étude dite « Mission » dans la suite).

Ces divergences s'expliquent par la diversité des hypothèses sur le rendement des cultures ou sur le rendement énergétique de tel ou tel type d'usage, ou encore par le choix des scénarios en termes de développement respectif de la forêt, de l'agriculture ou de l'élevage. En revanche, à l'exception de l'étude Mission, elles s'intéressent très peu à l'enjeu de croissance du puits de carbone.

Le groupe de travail réunissant des membres de l'Académie des technologies et de l'Académie d'agriculture de France, qui prépare un rapport sur ces questions, estime que l'étude Mission est la plus convaincante et que, par conséquent, on peut s'attendre, dès 2030, à une forte tension sur la ressource. Dans la mesure où il est crucial de préserver le puits de carbone que représentent les forêts, dont on peut simplement espérer stabiliser la production, cette croissance devrait se faire essentiellement en développant la biomasse agricole et notamment les cultures intermédiaires à vocation énergétique. Recourir aux importations ne ferait que dégrader la balance commerciale française ; mais il n'est pas certain que la biomasse soit beaucoup plus disponible et durable à l'étranger que dans notre pays.



Les disponibilités de bois en France au défi de l'évolution des usages

Guillaume Chantre

La forêt française s'étend sur 17,5 millions d'hectares, soit près d'un tiers du territoire national, ce qui est considérable. Les prélèvements sont largement inférieurs à la croissance supplémentaire offerte par la forêt chaque année. Compte tenu de cet écart entre disponibilités et prélèvements, notre pays a capitalisé, en un demi-siècle, 1 milliard de m³ sur pied supplémentaires, ce qui porte le total à 2,8 milliards de m³. En revanche, depuis 2018, on observe une baisse de l'accroissement annuel moyen de la forêt française, liée au vieillissement et à la difficulté d'adaptation de la plupart des espèces autochtones au changement climatique ainsi qu'au développement des risques biotiques (attaques d'insectes et de champignons), qui entraînent une mortalité importante.

Cette forêt est composée aux trois quarts de feuillus, dont 15% sont utilisés en matériaux et 85% en énergie. Le quart restant est composé de résineux qui sont utilisés à parts égales entre matériaux et énergie. La faible utilisation des feuillus en matériaux s'explique, notamment par la diversité des espèces (une centaine) des sols et des climats, se traduisant par une grande hétérogénéité des propriétés du matériau bois. Par comparaison, les forêts du nord de l'Europe ne comprennent qu'une dizaine d'espèces, dominées en volume par les résineux (épicéa et pin sylvestre). Cette hétérogénéité rend la récolte des arbres plus complexe et plus coûteuse. De plus, les forêts françaises sont assez peu gérées, à l'exception de la forêt soumise au régime forestier (l'Office national des forêts), et de massifs forestiers privés de dimension significative.

La récolte de bois commercialisé

Après une diminution ponctuelle de 4% pendant la pandémie du Covid, la récolte de bois commercialisé en France a retrouvé son niveau antérieur, soit environ 40 millions de m³ par an. À ce chiffre s'ajoutent environ 10 millions de m³ de bois non commercialisé, c'est-à-dire utilisé en autoconsommation.

Parmi le bois commercialisé, on distingue le bois d'œuvre (BO), issu d'arbres de dimensions suffisantes pour être sciés ; le bois d'industrie (BI), provenant d'arbres d'un diamètre inférieur à 7 centimètres et utilisé pour la fabrication

de panneaux de particules ou la papeterie ; enfin, le bois d'énergie (BE), destiné à être brûlé. Les usages du bois commercialisé se répartissent à parts égales entre le BO d'une part, et le BI et le BE d'autre part.

La récolte de bois d'œuvre a diminué de 7,6% entre 2014 et 2023, alors même que la demande s'accroît. La réglementation environnementale 2020 a imposé une amélioration du bilan carbone dans les cahiers des charges de la construction, ce qui a favorisé le recours au bois - on compense donc par des importations. Les constructions en bois représentent désormais 6,5% du résidentiel (10% de la maison individuelle et 5% du logement collectif) et 17% des bâtiments non résidentiels. Sur la même période (2014-2023), la récolte de bois énergie a elle augmenté de 43%. Le bois énergie est principalement utilisé par les particuliers (55%), sous forme de bûches ou de granulés. Un tiers de la production (34%) est brûlé en chaudières collectives ou industrielles. Le reste (11%) est utilisé en interne pour les besoins de la filière. Enfin, pendant cette même période, la récolte de bois d'industrie est restée constante. En termes d'usage, l'énergie reste donc un débouché majeur pour le bois.

De nouveaux matériaux biosourcés issus du bois

À plus long terme, on peut imaginer l'émergence d'un marché de nouveaux matériaux biosourcés issus du bois.

La cellulose peut être utilisée pour produire des composites légers et résistants, substituables aux composants plastiques ou métalliques, que ce soit dans l'aéronautique, l'automobile ou la construction. Elle peut également répondre aux besoins du quotidien à travers la production de textiles, d'emballages, de traitements de surface fonctionnels (barrières eaux, graisses...).

On voit également émerger des polymères issus du bois, par exemple des fils techniques en cellulose ou en PLA (acide polylactique) et d'autres bioplastiques. Le phénol sert déjà à produire des superplastifiants pour le béton ou encore des dispersants pour les pesticides. Des développements sont en cours pour des résines adhésives et des polymères de type bakélite à partir de lignine.

La chimie du bois permet aussi de produire des commodités telles que des solvants et produits de base (sucres, acide acétique, acide formique...), des tensioactifs, des additifs et agents rhéologiques (vernis, peintures...), des agents de purification (charbons actifs), mais également des spécialités (pharmacie, cosmétique, conservateurs, etc.).

Compte tenu de ces différentes perspectives, le FCBA estime que, d'ici 2040, la croissance de la demande en bois correspondant au verdissement de l'industrie pourrait représenter de 4,5 à 8,4 millions de tonnes supplémentaires, soit l'équivalent de ce qui est consommé par la papeterie actuellement.

Quels ajustements entre l'offre et la demande?

L'ajustement peut se faire spontanément par le changement d'usage des bois ronds. Si l'on prend l'exemple des Landes de Gascogne, à la suite des deux tempêtes de l'hiver 1990, les plantations de variétés génétiquement améliorées laissent espérer un doublement de la production de bois d'œuvre à l'horizon 2040. L'utilisation du bois dépend cependant essentiellement de la demande. Même du bois d'œuvre peut finir en bois énergie si le marché n'est pas prêt à le payer plus cher que du bois énergie.

L'économie circulaire, qui est une nécessité pour améliorer le bilan carbone, constitue également une variable d'ajustement de l'offre et de la demande, à travers le réemploi ou le recyclage du bois dans l'ameublement et, plus, récemment dans la construction ou dans l'emballage. Le gisement total actuel est de 8,7 millions de tonnes par an. Le gisement collecté est de 7,4 millions de tonnes. La part valorisée de ce gisement (dont un tiers est exporté), représente 5,8 millions de tonnes, dont 2,6 millions de tonnes en énergie et 3,2 millions de tonnes en recyclage (essentiellement sous forme de panneaux).

La croissance de la demande entraîne un recours croissant à l'importation, ce qui aggrave le déficit de la balance commerciale. Le montant des exportations s'élève à 12,8 milliards d'euros, contre 24,2 milliards d'euros pour les importations, notamment de panneaux, de sièges et de produits techniques.

Les effets du climat sur le bilan carbone

Avec l'aide de l'IGN (Institut national de l'information Géographique et forestière), l'institut technique FCBA a simulé les effets du climat et des choix de gestion sur le bilan carbone. Dans le scénario le plus optimiste, les effets restent limités, le stockage dans la biomasse et les produits, additionnés aux effets de substitution (matière et énergie) continuant d'absorber autant de CO₂ qu'actuellement, soit 69 millions de tonnes. Ce phénomène de stockage dans la biomasse représente plus de la moitié du bilan carbone de la filière forêt-bois, le comprenant aussi le stockage de CO₂ dans le bois mort et dans les produits bois, la substitution d'énergie et la substitution de matériaux. Dans un deuxième scénario, caractérisé par des crises qui se succèdent par vagues, la forêt connaît une plus grande mortalité. Le carbone est transféré vers du bois mort, c'est-à-dire non pérenne, et le bilan n'est plus que de 58 millions de tonnes d'émissions de CO₂ évitées. Dans le scénario le plus pessimiste, la biomasse absorbe peu de CO₂ et le bois mort représente près de la moitié du stockage de CO₂. Le bilan n'est plus que de 38 millions de tonnes d'émissions de CO₂ évitées et, en dehors du bois mort, repose essentiellement sur la filière bois.

Une autre approche consiste à augmenter la récolte de bois pour accroître le remplacement des matériaux émissifs. Mécaniquement, le stockage de carbone dans la biomasse diminue et celui lié aux produits en bois augmente. Avec une augmentation de 20% de la récolte, ce qui suppose d'augmenter la gestion en forêt privée avec un effet économique très favorable, le bilan carbone passe de 61 à 50 millions de tonnes d'émissions de CO₂ évitées, en ménageant la capacité d'augmenter fortement l'effet décarbonant de la filière à plus long terme du fait du rajeunissement de la ressource.

Une troisième approche consiste à faire évoluer les usages du bois pour favoriser ceux qui permettent de stocker le carbone sur le temps long (comme la fabrication de panneaux, et de manière générale tout usage de type matériau biosourcé) au détriment de la production d'énergie. Au prix d'investissements significatifs dans la filière bois et de transformations majeures dans les choix des consommateurs, on pourrait espérer, pour un même volume de bois récolté, accroître de 20% le bilan carbone.

Le scénario de convergence de la filière bois

Selon le scénario de convergence élaboré par Carbone 4 et adopté par la filière bois, la récolte annuelle passerait de 53 millions de m³ en 2019 à 63 millions de m³ en 2050, avec, approximativement, 30 millions de m³ de bois d'œuvre au lieu de 20 et inversement, 30 millions de m³ de BI-BE au lieu de 20. Dans cette configuration, le volume des importations serait réduit à presque rien.

En revanche, il faut souligner qu'une demande en biocarburant liquide à hauteur de 21 millions de m³ entraverait toute possibilité de bouclage bois-biomasse pour les autres marchés et compromettrait l'atteinte des objectifs de séquestration du CO₂ par la forêt et les produits bois.

Des freins structurels et conjoncturels à l'augmentation de la récolte

Si, techniquement, il semble possible d'accroître la récolte jusqu'à 20%, cela paraît plus difficile opérationnellement, en raison de nombreux freins structurels et conjoncturels.

Environ 40% de la surface forestière française sont toujours gérés en taillis (ce qui signifie que, chaque année, on coupe le petit bois qui a poussé sur les souches). Ils n'ont en effet pas été convertis à la culture en futaie, contrairement aux forêts gérées par l'ONF. Or, ces taillis souffrent du changement climatique, ne sont pas orientés vers la production de gros bois destiné au matériau.

Par ailleurs, une part non négligeable de la forêt française est située dans des zones montagneuses, difficiles d'accès.

Autre difficulté, plus de la moitié des surfaces forestières privées (qui représentent 75% de la forêt française) ne font pas l'objet d'un DGD (document de gestion durable). L'adaptation au changement climatique par la diversité génétique et par de nouveaux modes de gestion est beaucoup plus répandue dans l'agriculture que dans la sylviculture, car les horizons de temps sont beaucoup plus longs dans le cas de la forêt.

On constate aussi une baisse d'attractivité des métiers de la gestion des forêts et de la récolte du bois.

Enfin, la société civile porte un regard critique sur la présence de l'homme en forêt. Désormais, 80% de la population vit dans les zones urbaines et beaucoup de nos concitoyens critiquent une vision « utilitariste » d'espaces naturels jugés sensibles. Cela peut aller jusqu'à la dégradation volontaire des machines d'abattage ou d'attaques systématiques des gestionnaires de forêts sur les réseaux sociaux. Nos concitoyens approuvent l'objectif de développer les usages du bois, mais ne veulent pas voir de tronçonneuses dans les forêts situées près de chez eux... On peut objecter à cela qu'il n'existe pas de forêt primaire en France et que la trace de l'homme y est visible partout. La seule forêt primaire européenne se trouve à Bialowieza, à la frontière entre la Pologne et le Bélarus. Nous devons accepter que l'homme intervienne en forêt comme offreur de solutions pour répondre à la diversité des attentes, et pas seulement comme perturbateur d'écosystèmes.

Le besoin d'analyses multifactorielles et territorialisées

En conclusion, il n'existe pas de solution simple et unique pour gérer les forêts françaises de façon optimale, mais on aurait tort de penser qu'il suffirait de les abandonner aux seuls mécanismes de marché ou à l'inverse aux seules règles de la « libre évolution » d'écosystèmes aujourd'hui vulnérables. On peut identifier plusieurs critères d'orientation stratégique qui peuvent apparaître antinomiques et créent la complexité du problème : la création de valeur économique, les emplois, la souveraineté nationale et les chaînes de valeur territoriales, l'acceptabilité sociale et la préservation des paysages, le stockage du carbone, la biodiversité. Les arbitrages doivent intégrer la diversité de ces attentes, toutes légitimes, et donc être concertés entre toutes les parties prenantes : producteurs, transformateurs et acheteurs de bois, mais aussi ONGE, élus, voire simples promeneurs...



Biométhane, CO₂ biogénique, méthane de synthèse

Denis Clodic

Du biogaz au biométhane

Le biogaz est produit par fermentation de matières organiques. Sa composition typique, en volume, est de 60% de méthane et de 40% de CO₂. Pour pouvoir être injecté dans le réseau public de gaz naturel, le biogaz doit être transformé en biométhane, ce qui signifie que sa teneur en CO₂ doit être abaissée à 2%.

Quatre pays concentrent 65% de la production de biométhane en Europe : l'Allemagne, la Grande-Bretagne, la France et le Danemark.

En France, le biogaz a d'abord été utilisé en cogénération, de sorte que les unités étaient de toute petite taille et la production très morcelée. L'injection dans le réseau a débuté en 2012 et, depuis 2020, elle se développe rapidement. Elle ne représentait cependant que 9,1 TWh PCS (pouvoir calorifique supérieur) en 2023. Alors qu'en France, tout est fait pour faciliter l'injection dans le réseau, d'autres pays européens, comme la Suède, la Finlande ou la Norvège, dont l'habitat est peu dense et qui possèdent peu de réseaux de gaz, encouragent surtout la production de BioCNG (Compressed Natural Gas) et de BioGNL (gaz naturel liquéfié). Ce dernier est utilisé, en particulier, comme carburant pour les ferries.

Les intrants

Les pays ayant été les premiers à produire du biogaz (Allemagne et Royaume-Uni) sont aussi les moins vertueux en matière d'intrants. Ils recourent essentiellement à l'ensilage de maïs.

La France, qui s'est lancée dix ans plus tard dans la production de biogaz, mobilise surtout des résidus agricoles, en particulier issus de l'élevage. La valorisation des boues d'épuration reste encore marginale, alors qu'en Suisse, par exemple, elle représente la moitié des intrants.

D'après une étude du consortium *Gas for Climate* de 2022, on devrait assister, d'ici 2030, à la systématisation de l'exploitation du fumier, des déchets de culture, des déchets organiques urbains, mais aussi à un accroissement très significatif des cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) telles que le miscanthus, le pois,

le sorgho fourrager ou le trèfle. Il faut cependant souligner que ces prévisions n'intègrent pas d'analyse des coûts d'accès et ne tiennent pas compte de la probable réduction des subventions.

Accroître la ressource en Europe

Pour accroître la ressource, l'Union européenne préconise de mobiliser les terres non agricoles, cette expression recouvrant les terres « non utilisées » (au moins cinq ans de non-exploitation pour la production de nourriture), les « terres abandonnées », les terres « sévèrement dégradées » et les « terres marginales ». Ce dernier concept, qui désigne « les terres pour lesquelles la valeur de la récolte est inférieure à la location pour accès », n'est pas très clair. Il faudra veiller à l'application qui lui sera donnée.

Les rejets de CO₂ et de méthane

L'accroissement de la production de biométhane en Europe s'accompagnera d'une augmentation non négligeable des rejets de CO₂. En effet, compte tenu de la masse molaire du CO₂ par rapport à celle du CH₄, la production d'une tonne de biométhane à partir de biogaz composé à 60% de méthane et à 40% de CO₂ entraîne le rejet de deux tonnes de CO₂.

En 2024, ces émissions étaient de 1,42 millions de tonnes pour l'Europe EU27+ (incluant le Royaume-Uni). Ce CO₂ biogénique peut toutefois être purifié et stocké géologiquement, ou encore utilisé comme composant pour des e-carburants.

À ces rejets de CO₂ s'ajoute un taux de 1% de méthane dans les événements, ce qui représente, toujours pour l'Europe EU27+, l'émission de 645 000 tonnes à 1,44 millions de tonnes d'équivalent CO₂, selon l'intervalle d'intégration du CH₄ retenu (à 20 ans ou à 100 ans).

Les gazéifications

La gazéification est un processus de transformation de matières carbonées solides en gaz. La pyrogazéification permet de transformer du bois et des déchets présentant une humidité inférieure à 20% en syngas, grâce à un traitement à haute température (supérieure à 500°C) et sans oxygène. La gazéification hydrothermale est un procédé de conversion thermo-chimique à haute pression (210 à 350 bars) et haute température (360 à 700°C) adapté à des déchets organiques humides ou liquéfiés (boues de stations d'épuration, digestat de méthaniseur...).

Selon un rapport de GRDF de 2024, la gazéification pourrait, en 2040, permettre de produire 100 bcm (*billion cubic meters*) de gaz, soit l'équivalent de 960 TWh.

Ce chiffre paraît optimiste en ce qui concerne la pyrogazéification, car les syngas qui en résultent ne comportent que 10% de méthane.

La gazéification hydrothermale, en revanche, permet d'obtenir entre 60 et 70% de méthane, et le développement de cette technologie en est déjà au TRL 9 (*Technology Readiness Level*). D'ores et déjà, l'entreprise néerlandaise SCW produit 1,5 TWh par an à partir de boues d'épuration. En France, un premier pilote va être testé en 2025.

Méthanation

La méthanation biologique est un procédé industriel visant, à l'aide d'archées (micro-organismes unicellulaires procaryotes, distincts des bactéries), à produire du méthane (CH_4) à partir d'hydrogène (H_2) et de dioxyde de carbone (CO_2). Cette technologie en est encore au stade des démonstrateurs.

C'est également le cas de la méthanation catalytique. Avec un coût de l'électricité de 60€ par MWh, l'électrolyse permet de produire du e-méthane à 192 euros le MWh, contre 145 euros pour le méthane obtenu par gazéification hydrothermale et 45 euros pour le méthane fossile.

E-méthane

Les RFNBO (*Renewable Fuels non biological origin*) sont des carburants produits avec de l'hydrogène lui-même issu d'une électrolyse alimentée par des énergies renouvelables. Ils comprennent l'e-méthane, mais aussi l'e-kérosène, l'e-ammoniac, l'e-méthanol, etc. Jusqu'en 2036, la production de ces carburants pourra inclure du carbone capté lors de la production d'énergie. Le délai ira même jusqu'en 2041 en ce qui concerne les émissions de la sidérurgie, de la cimenterie et de la chimie. Cette technologie pourrait également mobiliser la DAC (*direct air capture*), c'est-à-dire l'extraction du dioxyde de carbone de l'air.

Usages du méthane bas carbone

Dans la plupart des pays européens, l'intégralité du biométhane produit est destinée aux réseaux. Sa substitution au gaz naturel est la seule solution pour assurer la survie de ces derniers, d'où leur mobilisation.

Seuls les pays scandinaves ont développé l'usage du bio GNL liquide ou gazeux hors réseaux. Au niveau mondial, seulement 7% du biométhane gazeux sont destinés au transport, et 11% à l'industrie, le reste est soit cogénéré soit injecté dans les réseaux.

Une grande incertitude pèse sur le type de carburant qui sera utilisé, à l'avenir, pour les poids lourds. Selon l'ACEA (Association des constructeurs européens d'automobiles), 96,5% des poids lourds vendus actuellement sont équipés de moteurs diesel. Beaucoup de constructeurs misent sur le biodiesel mais certains commencent également à produire des poids lourds électriques, y compris pour le long cours.

L'incertitude prévaut en ce qui concerne la marine marchande. À l'heure actuelle, les motoristes maritimes conçoivent des moteurs aptes à brûler tous les types de carburants.



L'optimisation des usages de la biomasse dans le respect des objectifs du développement durable

Dominique Vignon

Comme l'a montré Félix Boilève, les ressources en biomasse sont limitées et leur potentiel d'accroissement est sans doute inférieur aux attentes des planificateurs. En partant de ce constat, nous avons réfléchi, avec l'Académie d'agriculture de France, à une optimisation des usages de la biomasse, en tenant compte, avant tout, des objectifs du développement durable.

Objectifs du développement durable et gestion durable des forêts

Parmi les 17 objectifs du développement durable, plusieurs concernent la biomasse, en particulier le n°12 (*consommation et production responsables*), le n°13 (*mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques*) et le n°7 (*énergie propre et d'un coût abordable*).

Parmi les différentes études que nous avons analysées, celle de la Mission CGE/IGEDD/CGAAER est la seule à affirmer qu'elle a pris en compte les objectifs du développement durable.

Ces objectifs ne doivent pas être confondus avec le concept de « gestion durable des forêts », qui date du sommet de la Terre de Rio en 1992 et consiste, principalement, à organiser la croissance de la forêt et à ne pas l'exploiter au-delà des disponibilités générées par cette croissance. Au terme de nos travaux, nous estimons que le rapport de la Mission tient également compte de l'exigence de gestion durable des forêts.

Pour respecter l'objectif de zéro émission nette en 2050, la France doit réduire ses émissions de 550 millions de tonnes de CO₂, dans les années 1990, à 80 ou 85 millions de tonnes en 2050. Cet objectif supposerait que nous disposions, à cette date, d'un puits de carbone équivalent à ces émissions. Or, ce ne sera manifestement pas le cas. Nous devons donc réduire encore davantage nos émissions.

La méthode d'optimisation des usages de la biomasse

Une modélisation intégrale du système de la biomasse dans la durée étant impossible, la méthode la plus simple consiste à simuler la confrontation « deux à deux » entre usagers potentiels de la même biomasse. Ainsi, pour une quantité de biomasse donnée, il s'agit d'étudier quel serait le coût de la tonne de CO₂ évitée si cette biomasse était affectée à un usage A ou à un usage B.

On peut distinguer quelques cas de figure.

Premier cas de figure : A ne dispose pas d'alternative de décarbonation, B dispose d'une alternative à caractéristiques acceptables (coût, etc.). La biomasse bénéficie à A. En pratique, le rapport des Académies ne se livre pas à des comparaisons 2 à 2, mais se contente d'« exclure » les usages qui ont une telle alternative (voir exemple ci-dessous).

Deuxième cas : A et B disposent d'une alternative A' et B'. Selon le coût d'abatement de A' et de B' (au sens de France stratégie), ce sera A ou B qui bénéficiera de la biomasse. Dans le cas où le coût est le même ou proche, d'autres externalités devront être prises en compte (pollution, acceptabilité, etc.).

Troisième cas : ni A, ni B ne disposent d'alternatives. D'autres externalités devront alors être prises en compte, et les ordres de grandeur devront être vérifiés.

Un exemple d'application de la méthode

Faut-il remplacer une chaudière à gaz par une chaudière à granulés ou par une pompe à chaleur ? L'analyse des deux options montre que les coûts d'abatement des émissions de CO₂ sont similaires. Dans ce cas, on optera pour la pompe à chaleur, qui ne consomme pas du bois.

Conclusions et limites

À l'issue de notre travail, nous sommes parvenus à quelques conclusions qui nous semblent robustes. Pour le biogaz, la priorité devrait être accordée à des usages pour lesquels il est particulièrement difficile de réduire les émissions, comme la chaleur haute température pour l'industrie, la propulsion marine, le transport routier et ferroviaire, ou encore l'électricité de pointe. En revanche, les particuliers devraient recourir à l'électricité (via PAC) plutôt qu'au gaz pour cuisiner ou se chauffer. Pour la biomasse solide, il faut privilégier les carburants d'aviation et limiter le chauffage au bois par les réseaux de chaleur et chez les particuliers.

L'approche que nous avons adoptée se heurte toutefois à plusieurs limites. Les TRL des technologies alternatives peuvent être différents, les coûts d'abatement ne sont pas toujours connus, le marché n'est pas efficient, la méthode permet d'établir un cap mais pas des trajectoires. Celles-ci doivent tenir compte des problématiques régionales et des considérations sociétales. Par exemple, on ne peut pas imposer aux 4 millions de foyers français équipés de poêles d'y renoncer du jour au lendemain. On peut toutefois définir un objectif l'horizon 2050, par exemple, et prévoir des dispositifs d'incitation.



L'équité sociale

L'un des angles morts de votre rapport me paraît être ce qui concerne le deuxième pilier du développement durable, à savoir l'équité sociale. Dans les mesures que vous proposez, qui gagne et qui perd ? Par exemple, si les communes forestières, dans lesquelles la plupart des habitants n'ont pas un niveau de vie très élevé, décident de supprimer l'affouage, c'est-à-dire le droit des administrés à prélever du bois dans la forêt communale pour leurs propres besoins, afin de vendre le bois en question au plus offrant, ce sera sans doute plus pertinent sur le plan économique, mais profondément injuste. Dans le rapport de l'Académie, le critère social devrait avoir le même poids que les critères environnemental et économique.

Félix Boilève : Notre méthode ne prend effectivement pas en compte le critère social au même niveau que l'approche technico-économique. La raison principale en est que la littérature regorge de *merit orders* qui combinent et mélangent tous les critères et à partir desquels il est impossible de mener une discussion claire. Nous avons préféré nous concentrer sur les critères environnementaux et économiques, tout en sachant que les critères sociaux sont évidemment fondamentaux. Ces critères étaient difficiles à intégrer dans notre méthodologie de manière *a priori* ; nous sommes preneurs de toute idée.

Notre méthode, il faut insister dessus, ne s'oppose pas par principe à la prise en considération de ces enjeux. Par exemple, nous distinguons l'affouage, qu'il semble effectivement peu pertinent d'interdire, et les politiques d'incitation à l'équipement en chaudières à granulés, qui se traduisent, d'ores et déjà, par une pression pour accroître l'exploitation de la ressource forestière et risquent d'avoir un impact négatif non négligeable sur le puits de carbone. Autant mieux subventionner les pompes à chaleur, et arrêter de subventionner les poêles !

Les biocarburants pour l'aéronautique

Vous n'avez pas beaucoup parlé des biocarburants pour l'aéronautique. Quelle part de la biomasse pensez-vous pertinent de leur réserver ?

Patrick Ledermann : L'Académie des technologies a publié, il y a quelque temps, un rapport préconisant d'allouer, pendant quelques années, environ 15% du potentiel lignocellulosique à la production de biocarburants pour l'aéronautique. Il faudra ensuite (à partir de 2035) recourir au e-kérosène, c'est-à-dire à un carburant de synthèse à base de CO₂ et d'hydrogène, qui coûtera beaucoup plus cher.

Industrie du bois et chimie du bois

La conclusion que je retiens de votre exposé est la nécessité de développer une industrie nationale de transformation du bois et une chimie du bois qui permettront de stocker du carbone durablement, sans conséquence environnementale ou sociale négative.

Dominique Vignon : Les perspectives de développement de la chimie du bois restent, malgré tout, assez faibles. Elles représentent, tout au plus, une quinzaine de millions de tonnes. Par ailleurs, les différents usages se feront toujours concurrence. Si l'on affecte une partie de la biomasse aux applications chimiques, elle ne sera pas disponible pour les poêles des particuliers.

La méthode et ses résultats

Votre méthode, qui permet de classer certains usages comme éligibles à la biomasse et d'autres comme inéligibles, est très convaincante. Peut-être faudrait-il la compléter en insistant sur les conséquences des différents choix envisagés, sans quoi elle risque de paraître un peu technocratique. Par ailleurs, en se situant essentiellement sur le plan micro-économique, elle ne permet pas de se rendre compte si l'addition de tous les choix que vous préconisez permettrait réellement d'atteindre l'objectif fixé pour 2050. Peut-être faudrait-il adopter également une approche macro-économique.

Dominique Vignon : Je conteste l'idée que notre approche soit de type micro, car elle ne part pas des acteurs individuels mais des grandes filières, et celles-ci relèvent du macro et non du micro.

Par ailleurs, nous n'avons pas la prétention de produire un *merit order* que les pouvoirs publics seraient censés mettre en œuvre tel quel. Nous cherchons à stimuler le recours à cette méthode en montrant, par quelques exemples, qu'elle fonctionne. Il est vrai que le fait de présenter des conclusions quantitatives peut conduire les lecteurs à croire qu'il s'agit d'une proposition de *merit order*, mais il s'agit d'une proposition de méthode.

Mots-clés : biomasse, biométhane, bois, décarbonation, forêt, gazéification, mix énergétique, objectifs du développement durable.

Citation : Patrick Ledermann, Dominique Vignon, Félix Boilève, Guillaume Chantre & Denis Clodic. (2025). *Le rôle de la biomasse dans la transition écologique et énergétique*. Les séances thématiques de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions de l'Académie des technologies sur notre site academie-technologies.fr

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44

Production du comité des travaux.

Directeur de la publication : Patrick Pélata

Rédacteur en chef de la série : Béatrice Lathuile

Auteur : Élisabeth Bourguinat

n° ISSN : 2826-6196