ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES
POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

ACADÉMIE d'AGRICULTURE de FRANCE
AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT

Quelles contributions attendre de la biomasse dans la transition énergétique ?

Rapport

Académie des technologies
Le Ponant — Bâtiment A
19, rue Leblanc
75015 PARIS

+33(0)1 53 85 44 44

secretariat@academie-technologies.fr
www.academie-technologies.fr

Académie d'Agriculture de France
18, rue de Bellechasse
75007 PARIS

+33(0)1 47 05 10 37

www.academie-agriculture.fr

© Académie des technologies
ISBN : 979-10-97579-65-4

Couverture : ShDrohnenFly - Adobe stock

ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES
POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

ACADÉMIE d'AGRICULTURE de FRANCE
AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT

QUELLES CONTRIBUTIONS ATTENDRE DE LA BIOMASSE DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?

Rapport

Ce rapport commun est le produit d'un groupe de travail dont la composition complète est précisée en annexe. Il répond à un processus rigoureux au sein des deux académies garantissant son indépendance et son objectivité ; il a été approuvé et voté au sein des deux académies.

Mai 2025

Sommaire

Résumé 6

Summary 12

Introduction 17

Chapitre 1
La disponibilité future en biomasse énergie en France : des estimations du potentiel très différentes ; une conclusion partagée sur ses limites 26

1.1. Les enjeux de la biomasse 27
1.2. Comparaisons de quelques études récentes sur le potentiel en biomasse 36
1.3. Quelques leçons partagées des études sur le potentiel en biomasse 55
1.4. Conclusion du chapitre 1 61

Chapitre 2
Comment optimiser les usages de la biomasse dans le respect des critères du développement durable ? 63

2.1. La méthode : quels critères pour gérer la rareté 64
2.2. Application de la méthode à la biomasse solide 80
2.3. Application de la méthode au biométhane 94
2.4. Conclusion du chapitre 2 102

Conclusion générale 106

Principales recommandations 108

Annexes 110

A. Auteurs du rapport 111
B. Liste des personnes auditionnées 112
C. Principaux sigles 113
D. Les flux actuels du bois récolté en France 115
E. Extrait du bilan de juillet 2024 du SGPE 116
F. La priorité des usages dans la PPE3 en consultation 117
G. La neutralité carbone de la biomasse 119
H. Une méthode « économique » ? 124
I. Évaluation du puits de carbone forestier pour les sols et la biomasse morte 127

Résumé

La biomasse désigne, dans le contexte de l'écologie, les organismes vivants d'un écosystème ; dans celui de la bioénergie, elle désigne la matière organique valorisable sous forme d'énergie. La France a fait de la biomasse une composante essentielle de sa transition énergétique et climatique, dont elle attend deux bénéfices :

– la substitution d'énergies carbonées et notamment de carburants fossiles ;

– l'accroissement des puits de carbone, naturels et technologiques, pour atteindre en 2050 l'objectif « zéro émission nette » fixé par l'Union européenne et par la loi française.

Selon la Stratégie bas carbone 2 (SNBC 2) adoptée en 2021, la biomasse devait en 2050 fournir 430 TWh/an d'énergie primaire (c'est-à-dire utilisable directement comme combustible solide ou après conversion en biogaz ou biocarburant) pour contribuer à une consommation énergétique 2050 de 1150 TWh. Ce potentiel de production a été ramené à 305 TWh/an dans les travaux préparatoires à la SNBC 3 ; cela resterait près de 80 % supérieur à la production actuelle (autour de 150 TWh). Cet objectif reste très ambitieux, voire inaccessible, d'autant que les impacts du changement climatique sur la production de biomasse sont sans doute sous-estimés. Sans réaliser sa propre évaluation du potentiel de production de biomasse en 2050, le présent rapport a pour objectifs de :

– comprendre les ressemblances et différences entre ces études, notamment apprécier si elles ont bien pris en compte les objectifs du développement durable et confirmer le caractère très optimiste des hypothèses de la SNBC 3 (Chapitre 1) ;

– la pression à venir sur la ressource biomasse étant établie, proposer une méthode permettant de hiérarchiser les usages de la biomasse, au regard de critères économiques, environnementaux (contribution au puits de carbone et gestion durable des forêts) et dans la mesure du possible sociaux, et tester cette méthode sur divers exemples significatifs (Chapitre 2).

Ce rapport se concentre sur les enjeux liés à la bioénergie, tout en considérant les enjeux liés au puits de carbone et à la gestion durable des forêts et des sols. En sanctuarisant l'alimentation humaine et animale, il respecte le principe de l'usage en cascade de la biomasse. Les usages énergétiques de la biomasse sont subsidiaires après son utilisation comme matériau ou intrant industriel et lorsqu'il n'y a plus d'autre usage. Ce rapport cherche à s'assurer que les usages prioritaires de la biomasse ne sont pas mis en péril par une exploitation énergétique trop intense.

I - La disponibilité future de biomasse énergie en France : des estimations du potentiel très différentes ; une conclusion partagée sur ses limites

Les études récentes analysées montrent des divergences significatives dans l'évaluation du potentiel énergétique de la biomasse, avec des estimations variant de 245 TWh/an à 430 TWh/an d'énergie primaire en 2050.

Malgré la grande richesse et la qualité des études analysées, leur comparaison reste difficile : un cadre partagé est indispensable pour rendre comparables les études à venir, en homogénéisant les définitions et les unités, en énonçant les hypothèses dans un cadre sémantique et méthodologique partagé, ou encore en se mettant d'accord régulièrement sur les meilleures données à mobiliser.

Notre méta-analyse montre que les écarts finaux entre les études reflètent de fortes divergences à tous les niveaux : données d'entrées (surfaces cultivées, rendements, etc.), rendements agricoles prospectifs, scénarios d'évolution des régimes alimentaires et d'utilisation des terres agricoles libérées, évolution de la forêt dans un contexte de changement climatique, choix des procédés de conversion de la biomasse (solide, liquide ou gazeuse), etc. Si les critères d'exploitation durable de la biomasse paraissent respectés dans

les évaluations les plus basses, les impacts environnementaux des scénarios pourraient être mieux précisés dans la plupart des cas (notamment : impact des cultures intermédiaires sur la ressource en eau et l'apport d'intrants), tout comme le poids donné à l'enjeu du puits de carbone.

Plusieurs conclusions partagées émergent néanmoins :

- la tension entre l'offre et la demande de biomasse sera forte à partir de 2030, rendant indispensable une hiérarchisation des usages donnant la priorité à l'alimentation humaine et animale et prenant en considération la capacité de stockage de carbone aux échelles territoriales, nationales ou à des échelles plus vastes ;

- le potentiel actuel de la biomasse forestière est évalué à environ 100 TWh/an[1] d'énergie, mais son accroissement est limité par la nécessité de la gérer durablement, un équilibre étant à trouver entre puits de carbone à moyen terme et renouvellement de la forêt pour faire face au réchauffement climatique sur plusieurs siècles ;

- le potentiel de croissance est plus significatif du côté de la biomasse agricole, de 30 TWh/an aujourd'hui à potentiellement 150 TWh/an (tous usages confondus, dont biogaz mais sans s'y limiter). Les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) en constituent un levier majeur, mais leur développement est conditionné par des considérations agronomiques et environnementales ;

- les flux de déchets non agricoles ou forestiers représentent des volumes énergétiques modestes, leur intérêt est donc principalement la réduction de l'enfouissement.

1 Sauf exception, l'énergie est exprimée en TWh dans ce rapport. 1 TWh = 3,6 PJ.

Une récente mission interministérielle de l'IGEDD, du CGAAER et du CGE[2] estime un potentiel total d'environ 250 TWh/an, très en deçà des estimations très optimistes de certaines études.

La résilience des écosystèmes confrontée au changement climatique est d'autant plus cruciale qu'ils en subissent de plus en plus fortement les impacts. Les évènements extrêmes déjà observés pourraient générer un effondrement de certains écosystèmes et du puits de carbone associé, remettant en cause la faisabilité de tous les scénarios.

II - COMMENT OPTIMISER LES USAGES DE LA BIOMASSE DANS LE RESPECT DES OBJECTIFS DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ?

Ce rapport propose une méthode permettant d'établir une hiérarchie des usages de la biomasse à l'horizon de quelques décennies, et l'applique à quelques exemples pour évaluer sa pertinence et ses limites.

Une méthode exhaustive doit considérer les trois piliers - économique, environnemental et social - du développement durable. La méthode proposée s'inscrit dans un objectif de sobriété énergétique : réduction de la consommation d'énergie entre 2020 et 2050 de 1670 TWh/an à 1150 TWh/an. Elle vise à maximiser la réduction des émissions nettes de CO_2 à l'horizon 2050 tout en minimisant le coût économique et environnemental de cette décarbonation. Toutefois la trajectoire permettant d'atteindre l'objectif, qui nécessiterait la combinaison des objectifs économiques, environnementaux et sociaux, n'est pas définie dans le cadre de ce rapport.

Une modélisation d'ensemble de la production et des usages de la biomasse serait très complexe. La méthode économique proposée repose sur l'évaluation d'allocations alternatives à un usage envisagé de la biomasse. Plus précisément, pour chaque usage envisagé de chaque type de biomasse, on regarde s'il existe une solution alternative et l'on identifie ses caractéristiques (capacité à décarboner, niveau de maturité technologique, externalités,

2 IGEDD : Inspection générale de l'environnement et du développement durable ; CGE : Conseil général de l'économie ; CGAAER : Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux.

coût, etc.). Si elle existe et qu'elle est en outre acceptable (coûts proches, externalités acceptables, etc.), l'usage n'est pas considéré comme prioritaire pour la ressource rare qu'est la biomasse ; l'alternative est privilégiée. Les autres usages sont comparés deux à deux ; l'allocation de la biomasse doit être faite à l'usage dont la solution alternative de décarbonation aboutit au prix le plus élevé.

Dans la mesure du possible, ce rapport s'appuie sur la prise en compte des coûts d'abattement des différents usages actuels d'énergie fossile, c'est-à-dire des coûts des solutions de décarbonation rapportés aux émissions évitées[3]. Pour de nombreux usages mal documentés, la discussion reste qualitative ; une construction plus systématique de coûts d'abattement pour raffiner l'ordre de mérite proposé fait partie des recommandations.

Avant de mettre en œuvre cette méthode, le rapport évoque les débats existants sur la comptabilisation des émissions de CO_2 de la biomasse forestière, telle qu'adoptée par la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CNUCC), reprise par le GIEC. Il pose la question de la dynamique du carbone entre la biomasse, les sols et l'atmosphère. Dans un contexte où le puits de carbone que constitue la forêt devrait être un contributeur important à la neutralité carbone visée en 2050, brûler en quelques heures de la biomasse lente à se reconstituer n'est pas optimal au-delà des prélèvements requis par son exploitation durable et n'est acceptable que s'il n'y a pas d'autres usages permettant de stocker - même temporairement - le carbone. Cela devrait inciter à maximiser les usages à forte valeur ajoutée des récoltes en bois (matériaux notamment), de telle sorte que l'utilisation en énergie soit réservée au solde ne pouvant être mieux valorisé.

3 Le coût d'abattement d'une tonne de CO_2 (ou coût pour réduire les émissions d'une tonne) correspond au « surcoût » lié à une action de réduction des émissions de CO_2 (par rapport à une action de référence où aucune action particulière ne serait entreprise) ramené aux émissions de CO_2 évitées par cette action (voir Cour des comptes, La politique de développement des énergies renouvelables, 2013, consultable en ligne). Voir aussi : P. Criqui et France Stratégie, « *Les coûts d'abattement. Partie 1 Méthodologie* », 2021, disponible en ligne.

L'application de cette méthode permet ensuite d'établir certaines hiérarchies entre alternatives d'usages. Les trajectoires de changement, notamment au regard des usages pour les particuliers, restent à étudier, l'ordre de mérite proposé étant un objectif de long terme. D'autres considérations restent à prendre en compte, notamment sociales et locales : l'ordre de mérite proposé n'est donc pas à prendre comme définitif, mais comme une base rationnelle pour engager des discussions plus approfondies avec les différentes parties prenantes aux différentes échelles géographiques et en considérant différents horizons temporels.

Sans être une solution miracle pour décarboner nos sociétés et justement parce qu'elle n'en est pas une, la biomasse sera un laboratoire de la capacité de nos sociétés à se coordonner pour réussir les transitions énergétiques et écologiques dans un cadre socialement acceptable. Notre société a la capacité de relever ce défi, et nos Académies espèrent y contribuer avec le présent rapport.

Summary

In the context of ecology, biomass refers to the living organisms of an ecosystem; in the context of bioenergy, it refers to organic matter that can be used as energy. France has made biomass an essential component of its energy and climate transition; the expected benefits are twofold:

- The substitution of carbon-based energies, particularly fossil fuels;
- The increase of the carbon sinks to achieve by 2050 the "net zero emissions" target set by the European Union and the French law.

According to the "Stratégie nationale Bas Carbone 2" (Low Carbon National Strategy 2, SNBC 2) adopted in 2021, biomass was expected to provide 430 TWh/year of primary energy in 2050 (i.e. usable directly as solid fuel or after conversion into biogas or biofuel), contributing to a 2050 energy consumption of 1,150 TWh. This production potential was reduced to 305 TWh/year in the preparatory work for SNBC 3; this remains well above current production (around 150 TWh/year today), and proves to be very ambitious, if ever reachable, as the impacts of climate change on biomass production are likely underestimated. While not providing its own assessment of biomass production potential in 2050, this report aims at:

- Understand the similarities and differences between the published studies, particularly by assessing whether sustainable development objectives have been properly taken into account. This review confirms the highly optimistic nature of the assumptions made in the preparatory work for SNBC 3 (Chapter 1);

– Given the growing pressure on available biomass resources, propose a methodology for prioritizing its uses, based on economic, environmental (contribution to carbon sinks and sustainable forest management), and social development; and test this method on various significant examples (Chapter 2).

This report focuses on issues related to bioenergy, while also addressing issues related to carbon sinks and sustainable forest and soil management. By ring-fencing human and animal food, it respects the principle of cascade use of biomass. Energy uses of biomass are second to its use as a material or industrial input and when there are no other uses. This report seeks to ensure that priority uses of biomass are not jeopardized by overly intensive energy exploitation.

I - Future availability of biomass energy in France: very different estimates of potential; a shared conclusion on its limits

Recent studies by recognized institutions show significant differences in the assessment of biomass's energy potential, with estimates ranging from 245 TWh/year to 430 TWh/year of primary energy in 2050.

Despite the great depth and quality of these studies, their comparison remains difficult: a shared framework is essential to make future studies comparable, by standardizing definitions and units, stating hypotheses within a shared semantic and methodological framework, and agreeing on the best data to mobilize.

Our meta-analysis shows that these studies significantly differ at all levels: input data (cropped areas, actual and prospective yields, etc.), anticipation of diet changes and their consequences on land allocation, forest development in a context of climate change, choice of biomass conversion processes (solid, liquid, or gaseous), etc. While the lowest scenarios seem to meet sustainable development criteria, the environmental impacts of these scenarios should be better analyzed (notably: the impact of cover crops on water resources and fertilizers needs), and their consequences on the carbon sink.

Several shared conclusions nevertheless emerge:

- the tension between biomass supply and demand will be strong from 2030 onward, making it essential to set up a merit order, prioritizing human and animal food and taking into account carbon storage capacity at different geographic scales;

- for forest biomass, the current potential is estimated at around 100 TWh/year of energy, but its growth is limited by the need to manage it sustainably, a balance having to be found between carbon sinks in the medium term and forest renewal to cope with global warming over several centuries;

- the growth potential is more significant for agricultural biomass, from 30 TWh/year today to potentially 150 TWh/year (all uses considered, including but not limited to biogas). Cover crops for energy production represent a major lever, but their development is constrained by agronomic and environmental considerations;

- non-agricultural or non-forestry waste streams represent modest energy volumes; their main interest is therefore to reduce landfilling.

A recent interministerial mission from the IGEDD, the CGAAER, and the CGE[4] estimates a total potential of approximately 250 TWh/year, well below the highly optimistic estimates of some other studies.

The resilience of ecosystems to climate change is all the more crucial as they are increasingly impacted by this change. The extreme events already observed could lead to a collapse of certain ecosystems and the associated carbon sink, calling into question the feasibility of all scenarios.

4 IGEDD: General Inspectorate for the Environment and Sustainable Development; CGAAER: General Council for Food, Agriculture and Rural Areas; CGE: General Council for Economy

II - Optimizing biomass uses while complying with sustainable development objectives ?

This report proposes a methodology for establishing a merit order of biomass uses and a target to be reached in the next few decades; it applies it to a few examples to assess its relevance and limitations.

A comprehensive method must consider the three pillars of sustainable development: economic development, environmental protection, and social well-being. The proposed methodology is aligned with the objective of energy efficiency: reducing energy consumption between 2020 and 2050 from 1,670 TWh/year to 1,150 TWh/year. It aims to maximize the reduction of net CO_2 emissions by 2050 while minimizing the economic and environmental costs of this decarbonization. However, the path to achieving this objective, which will require a combination of economic, environmental, and social criteria, is not defined within the scope of this report.

Since a comprehensive modeling of biomass production and allocation is not feasible, the proposed method relies on the evaluation of alternative allocations for a proposed biomass use. More specifically, for each intended use of each type of biomass, the methodology assesses whether an alternative solution exists and identifies its characteristics (capacity to decarbonize, level of technological maturity, externalities, cost, etc.). If it exists and is also acceptable (similar costs, acceptable externalities, etc.), the use is not considered a priority for the scarce resource that biomass is; the alternative is favored. Other uses are compared two by two; biomass allocation must be made to the use whose alternative decarbonization solution results in the highest price.

Wherever possible, this report is based on taking into account the abatement costs of the various current uses of fossil fuels, i.e., the costs of decarbonization solutions compared to avoided emissions. For poorly documented uses, the discussion remains qualitative and we recommend a more systematic construction of abatement costs to refine the proposed merit order.

Before implementing this methodology, the report introduces existing debates on the accounting of CO_2 emissions from forest biomass, as adopted by the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), and

the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). A specific appendix presents the issue of the carbon dynamics between biomass, soils, and the atmosphere. In a context where the carbon sink is expected to be a significant contributor to achieving neutrality by 2050, burning slow-replenishing biomass in a few hours is not optimal beyond the wood harvest required for sustainable forest management and is only acceptable if there are no other uses that can store carbon even temporarily. This should encourage maximizing high-value uses of timber harvests, particularly its use in the form of materials, so that energy use is reserved for the remainder that cannot be better utilized.

The application of this methodology then makes it possible to establish certain hierarchies between alternative uses. The trajectories of change, particularly with regard to households, remain to be studied, as the proposed merit order is a long-term objective. Other considerations remain to be considered, particularly social and local ones: the proposed merit order should therefore not be considered as final, but as a rational basis for initiating more in-depth discussions with the various stakeholders at different geographical scales and considering different time horizons.

Without being a miracle solution for decarbonizing our economy and because it is not one, biomass remains an important asset and its allocation is a challenge. It will test our capacity to successfully achieve energy and ecological transitions within a socially acceptable framework. Our society has the capacity to meet this challenge, and our Academies hope to contribute to it with this report.

Introduction

LA BIOMASSE ET SES CONDITIONS D'UTILISATION

Quelques rappels généraux sur la biomasse

La biomasse est produite par la photosynthèse, merveilleuse et complexe réaction qui transforme depuis plus de deux milliards d'années l'énergie lumineuse en énergie électrique, puis en énergie chimique et en matière vivante, végétale et animale. En combinant le gaz carbonique de l'atmosphère et l'eau tirée du sol, la photosynthèse produit des molécules hydrocarbonées et de l'oxygène. Le rendement de la photosynthèse est médiocre : moins de 2 % de l'énergie lumineuse est convertie en énergie électrique[5]. Les quantités échangées ou stockées sont grandes, mais limitées. Les terres émergées contiennent environ 550 Gt de carbone sous forme de biomasse dite « vivante », essentiellement dans les plantes terrestres, auxquelles il convient d'ajouter le carbone organique des sols pour 1500 à 2400 Gt selon le GIEC, à comparer aux 750 Gt stockés dans l'atmosphère[6]

5 Govindjee R., "*What is Photosynthesis*?", consultable en ligne. Le rendement de la photosynthèse est influencé par de multiples facteurs ; il peut atteindre 8 % pour la canne à sucre, mais il est généralement beaucoup plus faible.

6 La masse de l'atmosphère, déduite de la pression au sol est de $5{,}148 \times 10^{18}$ kg. La concentration de CO_2 est d'environ 424 ppm. On en déduit la masse de carbone stocké.

qui s'accroissent d'environ 5 Gt/an[7] et aux 14 000 Gt de carbone stocké dans la matière organique fossile.

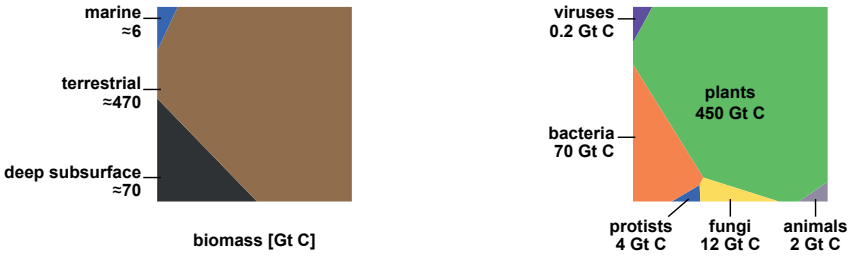


Figure 1: Le stock de biomasse - Bar-On *et al.*, "The biomass distribution on Earth", PNAS, 2018, disponible en ligne.
À gauche, biomasse totale - À droite, biomasse terrestre

La biomasse peut être considérée de plusieurs points de vue : dans le contexte de l'écologie, elle désigne les organismes vivants d'un écosystème ; dans le contexte de la bioénergie, elle désigne la matière d'origine végétale ou animale valorisable sous forme d'énergie et ses produits de transformation récoltables.

En France, le législateur a retenu une approche énergétique de la biomasse : elle est « *constituée* [pour plus de 90 %] *de la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture, de la sylviculture, de la pêche et de l'aquaculture. Elle comprend aussi* [moins de 1 %] *la fraction biodégradable des déchets industriels ainsi que des déchets ménagers lorsqu'ils sont d'origine biologique*[8] ». De même l'Insee considère que « *la biomasse est l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. Elles peuvent être utilisées soit directement (bois énergie) soit après une méthanisation de la matière organique (biogaz) ou de nouvelles transformations physiques ou chimiques. Elles peuvent aussi être utilisées pour le compostage*[9] ». Ce rapport s'intéresse à l'ensemble de

7 Global Carbon Budget 2024 La concentration de CO_2 s'accroit de ~ 2,8 ppm/an
8 Article L 211-2 du code de l'énergie.
9 Définition - Biomasse | Insee

la biomasse utilisée par l'homme (uniquement biomasse terrestre) pour des usages énergétiques de la biomasse.

Pour les comparaisons, les différents types de biomasse sont souvent comptabilisés en millions de tonnes de matière sèche ; la teneur en eau réelle restant un facteur d'erreur caché. La biomasse à usage énergétique peut être utilisée sous forme solide, liquide ou gazeuse, et doit être transformée à ces fins. Après cette transformation la rendant utilisable, et qui requiert généralement de l'énergie (récolte ; transport ; transformations physiques, chimiques ou biotechnologiques), elle est qualifiée d'énergie primaire. Lorsqu'on ne s'intéresse qu'à la biomasse énergétique, et dans ce rapport, on la comptabilise en TWh[10].

La biomasse primaire

La valeur « brute » avant conversion en biomasse liquide ou gazeuse (soit par une combustion parfaite de l'ensemble) n'est pas une référence considérée dans ce rapport ; mieux vaut alors parler en tonnes de matière sèche, car ce n'est pas de l'énergie pour les statisticiens tant que cette biomasse n'est pas transformée dans une forme utilisable.

- Certaines études évoquent cependant le terme de biomasse primaire à son endroit.

- Certaines études qualifient d'« énergie finale » la biomasse après sa conversion sous forme liquide ou gazeuse, et avant ultime transformation (en électricité par exemple). Pour les statisticiens et énergéticiens, c'est de l'énergie primaire.

Dans la suite du rapport, on retient la définition d'énergie primaire dans le sens défini plus haut, et on opère une correction de langage si telle ou telle étude citée adopte une autre dénomination du même concept.

10 1 kWh = 3,6x10^6 J ; 1 TWh = 3,6 PJ

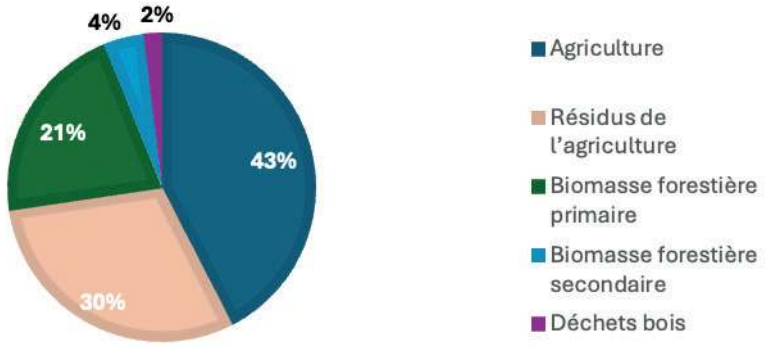


Figure 2 : Les biomasses récoltées en France - total : 278 Mt

La biomasse récoltée en France se répartie selon la figure 2 ci-dessus[11]. La biomasse issue de la filière forestière représente environ 27 % du total (en masse) ; 41 % de cette biomasse est utilisée sous forme de bois (bois d'œuvre (BO), dérivés de bois et intrants pour l'industrie (BI) et 59 % comme source d'énergie (BE)). La réorientation, si elle est possible, de BO vers une filière BI voire BO peut retarder la combustion et donc les émissions de CO_2 dans l'atmosphère. En outre l'élaboration des produits bois génère souvent moins d'émissions de CO_2 que d'autres matériaux à fonction similaire (béton).

11 European Commission: Joint Research Centre, Camia, A., Robert, N., Jonsson, R., Pilli, R. *et al.*, Biomass production, supply, uses and flows in the European Union - First results from an integrated assessment, Publications Office, 2018.

La dynamique de la production et de la collecte de la biomasse, fortement encouragée par les pouvoirs publics, est nettement positive (Figure 3[12]).

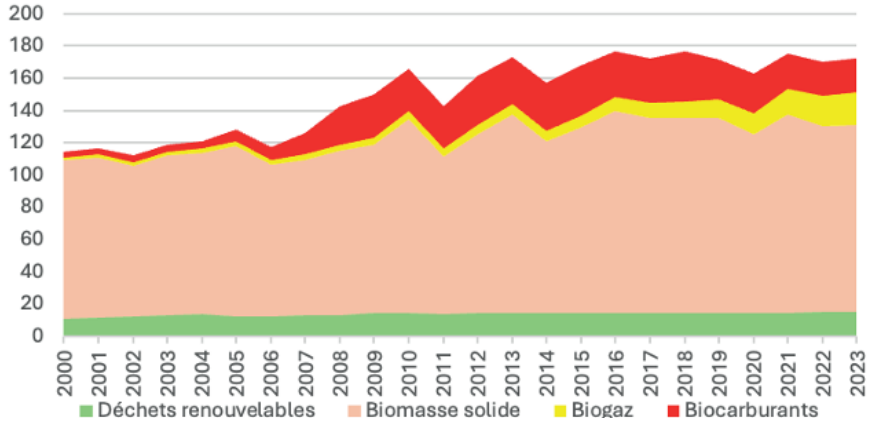


Figure 3 : Dynamique de la biomasse à usage énergétique consommée en France (TWh)

LA BIOMASSE ET LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Si la biomasse a précédé l'homme de plusieurs milliards d'années, celui-ci a su en tirer parti pour se nourrir, se vêtir, s'abriter, et *in fine* occuper la Terre. La prise de conscience depuis une trentaine d'années de l'origine anthropique du changement climatique a conduit à considérer le triple rôle de la biomasse. C'est une « matière première » pour la production d'aliments, matériaux ou produits chimiques ; c'est un puits de carbone quand son stock croît dans les sols et la partie aérienne des forêts ; c'est enfin une ressource énergétique qualifiable de « renouvelable » si on accepte - comme l'Union européenne - que les émissions de CO_2 lors d'un usage énergétique de la biomasse ne sont que la restitution d'un captage antérieur de CO_2 atmosphérique.

La Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (Rio - juin 1992) a énoncé plusieurs principes universels visant à concilier le développement socio-économique et la protection de l'environnement (développement durable) au bénéfice des générations présentes et futures.

12 SDES - Séries longues annuelles du bilan énergétique de la France 2023 - données définitives

Elle a également énoncé des « *principes sur la gestion, la conservation et l'exploitation écologiquement viable de tous les types de forêts* ».

L'Union européenne, tout particulièrement à travers la directive RED III qui concerne « *la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables*[13] », a donné un cadre légal à l'utilisation de la biomasse conforme aux exigences des politiques environnementales ; elle est fondée sur quelques principes :

- « ne pas inciter à l'utilisation de biocarburants et de biogaz produits à partir de cultures destinées à l'alimentation humaine ou animale[14] » ;
- « donner la priorité, chaque fois que c'est possible, à l'usage matériau de la biomasse par rapport à son usage énergétique, de façon à augmenter la quantité de biomasse impliquée dans le système bioéconomique » ;
- assurer la soutenabilité des exploitations agricole et forestière ;
- appliquer le principe de l'utilisation en cascade du bois selon l'ordre : produits à base de bois ; allongement de la durée de vie des produits à base de bois ; bioénergie ; élimination en déchets (cendres).

Par exception au principe de non-incitation à l'utilisation de biocarburants, une taxe incitative relative à l'incorporation de biocarburants oriente les choix d'approvisionnement. En 2023 la France a incorporé un total de 40 TWh (3,5 Mtep) de biocarburants liquides dans les carburants distribués sur le territoire national, soit une hausse de 3,5 % par rapport à 2022 et le plus haut niveau historiquement enregistré. Parmi ces biocarburants, on compte une majorité de substituts au gazole (30 TWh), suivis des substituts essence (10 TWh), ainsi qu'une petite part de biokérosène en substitut au jet fuel (0,5 TWh)[15].

13 Directive RED III (UE) 2023/2413 concernant la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables (18 octobre 2023).

14 Cette intention exprimée n'est pas toujours effective ; par exemple l'utilisation d'essence E10 (10 % d'éthanol) et de diesel B10 (10 % d'esters méthyliques d'acides gras (EMAG)) sont encouragées par la directive RED III et la fiscalité française.

15 IFPEN, Tableau de bord biocarburants 2024

Sans être très précise, l'Union européenne a rappelé dans la directive RED III d'autres principes environnementaux présidant à l'utilisation de la biomasse forestière, notamment la « préservation de la teneur en carbone organique des sols et de la biodiversité conformément aux principes de gestion durable des forêts ». En outre et dans un règlement distinct[16], l'Union européenne a fixé à chaque État membre un objectif d'absorption nette de gaz à effet de serre en 2030 (puits de carbone naturel). Pour la France, l'engagement est de 34 Mt de CO_2, soit un accroissement de 24 % par rapport à la moyenne 2016-2018[17]. Or ce puits, notamment affecté par le changement climatique, est en décroissance régulière ; dans la période 2020-2023, il n'a été que d'environ 19 Mt/an[18] contre plus de 50 Mt/an dans les années 2004-2006.

La France a fait de la biomasse une composante essentielle de sa transition énergétique et climatique qui utilise quatre leviers :

- la réduction de la consommation d'énergie (sobriété et efficacité énergétique) ;
- l'électrification des usages par des moyens décarbonés ;
- la substitution de biomasse à des carburants fossiles ;
- l'accroissement des puits de carbone (naturels et technologiques) pour atteindre l'objectif « zéro émission nette » en 2050 fixé par l'Union européenne et par la loi française.

En 2023, la France métropolitaine a utilisé 172 TWh d'énergie issue de la biomasse[19], près du triple de la production solaire et éolienne. Dans la Stratégie bas carbone 2 (SNBC 2) adoptée en 2021, la biomasse devait en 2050 fournir 430 TWh d'énergie[20]. Cet objectif a été ramené à 305 TWh dans

16 Règlement 2021/0201 (COD) (…) « fixant des objectifs des États membres pour 2030 et l'engagement dans la réalisation collective de la neutralité climatique d'ici à 2035 dans le secteur de l'utilisation des terres, de la foresterie et de l'agriculture ».

17 La moyenne d'accroissement européenne est fixée à 16 %.

18 Émissions de gaz à effet de serre en France : estimation de l'année 2023 avec les données Secten du Citepa.

19 Dont des importations nettes de 25 TWh de biocarburants et 3 TWh de biomasse solide.

20 SNBC 2, p. 30, consultable en ligne .

la SNBC 3[21], soit presque un doublement de la production actuelle. Il reste selon plusieurs études d'organismes publics et parapublics publiées en 2023 et 2024 très ambitieux et son atteinte est problématique. Sans réaliser sa propre évaluation du potentiel de production de biomasse en 2050, le présent rapport a pour ambition de :

- comprendre les ressemblances et différences entre ces études et notamment apprécier si elles ont bien pris en compte les critères du développement durable et confirmer le caractère très optimiste des hypothèses de la SNBC 3 ;

- la pression à venir sur la ressource biomasse étant établie, proposer une méthode permettant de hiérarchiser les usages de la biomasse au regard de critères économiques et environnementaux d'intérêt général et tester cette méthode sur divers exemples significatifs.

Ce rapport - limité à la France métropolitaine - ne traite pas :

- des moyens permettant d'atteindre « *Net zero emission* » en 2050 comme la COP 21 (accord de Paris - 2015) et le projet de *Green deal* européen y invitent, et comme la France y a souscrit ; il note seulement qu'un recours accru à la biomasse ne sera pas suffisant pour y parvenir ;

- du potentiel d'importations de biomasse qui dépendra de l'offre ; celle-ci est vulnérable au changement climatique, et la demande est croissante dans tous les pays du monde. Il ne faut donc pas fonder de grands espoirs sur un accroissement des importations ;

- de la trajectoire permettant d'atteindre une affectation de la biomasse conforme à la hiérarchie établie.

21 La SNBC 3 mise en consultation publique en novembre 2024 ne contient pas ces données 2050 ; elles proviennent des travaux préparatoires partiellement publiés par la Mission de l'IGEDD, du CGE et du CGAAER, « *Évaluation du potentiel de production d'énergies renouvelables à partir de la biomasse agricole et forestière française à l'horizon 2050* », consultable en ligne, dite dans le présent rapport « la Mission ».

Plan du rapport

Le présent rapport est structuré en deux chapitres qui correspondent à sa problématique.

Chapitre 1

Comparaison des principales études récentes sur les ressources françaises de biomasse et leurs perspectives. Toutes ces études concluent qu'il y aura une forte tension sur les ressources en biomasse dès 2030 et jusqu'en 2050 et au-delà.
Les critères d'exploitation durable paraissent respectés dans les hypothèses basses d'évaluation des ressources en biomasse, et les usages non énergétiques de la biomasse (alimentation, matériaux, industrie, chimie, etc.) bénéficient d'une priorité d'usage conforme aux objectifs de durabilité.

Chapitre 2

Une méthode est proposée pour établir une priorité des usages énergétiques. Cette méthode est fondée sur la prise en compte du coût d'abattement[22] des différents usages possibles selon qu'ils ont accès à cette biomasse ou non. Privilégiant les critères économiques et environnementaux (émissions de CO_2, et puits de carbone), elle doit être complétée par la prise en compte du critère de développement social afin de définir les trajectoires d'évolution des usages actuels vers les priorités envisagées. C'est particulièrement vrai lorsque les conclusions impactent les conditions de vie de certains ménages (chauffage individuel notamment).
Les externalités non quantifiables sont évoquées, ainsi que le débat sur la neutralité de la biomasse forestière en cas d'usage énergétique.
La méthode est ensuite déclinée afin de la mettre en pratique, sans vocation conclusive et exhaustive. On en déduit un premier ordre de mérite, à affiner.

Conclusion

- Rappel des recommandations ;
- Suggestions d'approfondissement.

22 Le coût d'abattement d'une tonne de CO_2 (ou coût pour réduire les émissions d'une tonne) correspond au « surcoût » lié à une action de réduction des émissions de CO_2 (par rapport à une action de référence où aucune action particulière ne serait entreprise) ramené aux émissions de CO_2 évitées par cette action (voir Cour des comptes, La politique de développement des énergies renouvelables, 2013, consultable en ligne).

Chapitre 1

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

Après avoir rappelé le rôle clef que la biomasse est appelée à jouer dans le futur neutre en carbone à horizon 2050 vers lequel la France s'est engagée, et après avoir exploré les sources des divergences entre les différentes estimations du potentiel en biomasse, cette partie permet de conclure :

- un déséquilibre ressources/besoins pourrait apparaître dès 2030 pour la biomasse énergie et s'accroître au-delà ;

- pour la biomasse forestière, le potentiel actuel est évalué à environ 100 TWh d'énergie, mais son accroissement est limité par la nécessité de la gérer durablement (un équilibre étant à trouver entre puits de carbone à moyen terme et renouvellement de la forêt pour faire face au réchauffement climatique sur plusieurs siècles) ;

- la biomasse agricole présente le potentiel principal d'accroissement, puisqu'elle pourrait fournir une énergie de 150 TWh (tous usages confondus, dont biogaz mais sans s'y limiter), contre 30 TWh aujourd'hui. Cela suppose notamment le développement des cultures intermédiaires à valorisation énergétique.

1.1. LES ENJEUX DE LA BIOMASSE

1.1.1. LA BIOMASSE AU CŒUR DU FUTUR « ZÉRO CARBONE »

La France s'est engagée, à la suite de la COP de Paris en 2015 et conformément aux obligations européennes du programme *Fit for 55* à atteindre la neutralité carbone à horizon 2050 : cet objectif est désormais inscrit dans la loi[23]. Selon la Stratégie nationale bas carbone 2 (SNBC 2)[24] qui a décliné cet objectif par secteurs, l'atteinte de l'objectif implique de passer de 458 $MtCO_{2eq}$ émises en 2015 au niveau français (hors UTCATFF) à 80 $MtCO_{2eq}$ par an en 2050. La SNBC 3 en consultation finale en mars 2025 a fixé à 270 Mt_{eq} le point de passage en 2030, mais ne se projette pas quantitativement au-delà.

La biomasse est appelée à contribuer fortement à l'objectif de réduction des émissions. Réseau de transport d'électricité (RTE) propose, dans son rapport Futurs énergétiques 2050[25], une vision qui s'appuie sur les objectifs de la SNBC 2 ; elle est résumée par la figure 4 ci-dessous.

23 Article L100-4 – I – 1° du code de l'énergie.

24 Il s'agit d'un texte exigé réglementairement par la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) du 17 août 2015. La SNBC 1 date de 2015. La version actuelle de la SNBC, la SNBC 2, ainsi que les budgets carbone pour les périodes 2019-2923, 2024-2028 et 2029-2033 associés, ont été adoptés par décret le 21 avril 2020. Le document lui-même date de mars 2020. La SNBC2 complète est consultable en ligne. Il existe par ailleurs une Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse de 2018, sur laquelle on ne s'appuiera pas (caractère officiel ou non du document peu clair, non daté, évaluations quantitatives peu lisibles.

25 RTE, « *Futurs énergétiques 2050 : les scénarios de mix de production à l'étude permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050* », février 2022, consultable en ligne.

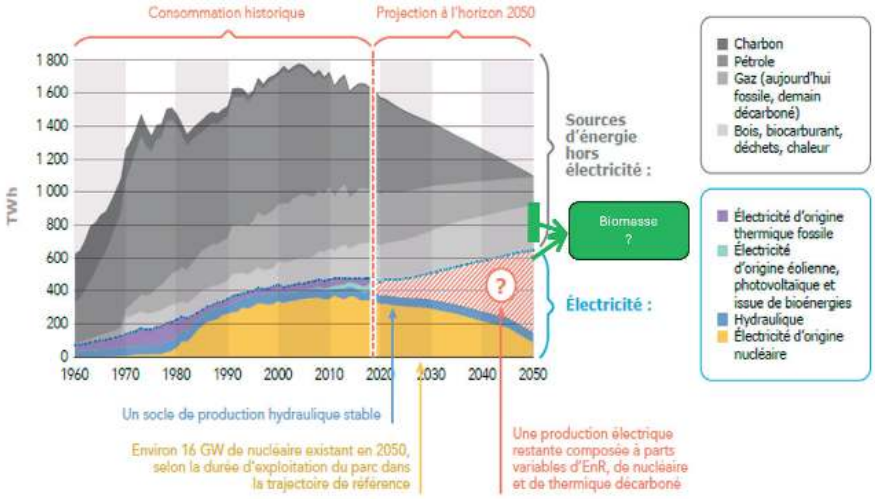


Figure 4 : Scénario énergétique à horizon 2050 proposé par RTE (TWh)

Comme l'indique déjà l'Académie des sciences dans un rapport de 2024 sur la biomasse[26], cette figure appelle au moins trois constats généraux :

- une forte baisse de la consommation d'énergie est nécessaire pour atteindre la neutralité carbone en 2050 ; elle passerait de 1670 TWh en 2020 à 1150 TWh en 2050 ;

- la consommation finale d'électricité sera amenée à augmenter fortement. Si la demande d'électricité en 2050 - un peu plus de 600 TWh/an - retenue par RTE pour l'électricité est sans doute trop basse[27], et même si le scénario exact n'est pas défini (quelles parts respectives du nucléaire et des énergies renouvelables dans la production d'électricité ?), le chemin tracé de l'électrification paraît raisonnable ; en effet de nombreux secteurs disposent maintenant de solutions techniques efficaces et en amélioration continue pour se transformer (par exemple véhicule électrique) ;

26 Académie des sciences, « *Quelles perspectives énergétiques pour la biomasse ?* », janvier 2024, consultable en ligne.

27 Comme l'indique un récent rapport de l'Académie des technologies, « *Perspective de la demande française d'électricité d'ici 2050* », 2021, consultable en ligne. RTE a d'ailleurs revu à la hausse cette estimation.

– restent environ 450 TWh d'énergie finale, hors électricité, aujourd'hui satisfaits par le pétrole et le gaz naturel dont il faudra se passer à horizon 2050. La biomasse énergie intervient à ce niveau.

Si la biomasse n'est pas la seule manière de produire de l'énergie non électrique décarbonée, les autres solutions techniques, en dehors de la géothermie (dont le potentiel pourrait être de 100 TWh par an de gaz économisé d'après le plan gouvernemental), sont peu matures ou ne pourront répondre qu'à une partie des besoins. En particulier, les petits réacteurs nucléaires calogènes ne sont qu'en phase précoce de développement. C'est donc sur la géothermie et sur cette biomasse que repose l'essentiel du bouclage du bilan énergétique futur dans les documents officiels. La SNBC 2 prévoyait ainsi que 430 TWh[28] d'énergie primaire issus de la biomasse seraient consommés à l'horizon 2050[29].

La plupart des études récentes concluent à l'impossibilité de mobiliser ces 430 TWh d'énergie. Si la SNBC 3 ne se projette pas jusqu'en 2050, les simulations réalisées pour sa préparation concluent à une rencontre entre offre et demande qui s'établirait autour de 300 TWh d'énergie issue de la biomasse en 2050, ce qui paraît encore ambitieux.

Le problème est le même au niveau européen, comme le montre une étude de 2021 de *Material Economics*[30], qui estime que l'Union européenne ne pourrait mobiliser à horizon 2050 que 3 000 à 3 600 TWh de biomasse (pour 2 800 TWh aujourd'hui) pour les usages énergétiques et matériaux, face à une demande potentielle de 4 700 TWh.

28 Comme indiqué en introduction, dans la mesure du possible, dès qu'il s'agira d'énergie, on se réfère à des Wh et unités dérivées. On se réfère cependant parfois à des tonnages ; dans ce cas on peut considérer que la combustion d'une tonne de matière sèche fournit environ 4,5 MWh de chaleur, contre 2 MWh pour sa conversion en biométhane ou en carburant liquide. Les conversions entre volume et masse sont plus hétérogènes ; pour le bois, on peut considérer que 1 m^3 de bois frais pèse environ 1t.

29 Voir p. 30 de la SNBC 2.

30 Material Economics, « *EU biomass use in a net-zero economy. A course correction for EU biomasse* », 2021, consultable en ligne.

L'équation est encore plus complexe lorsqu'on ajoute les autres enjeux associés à la biomasse et la diversité de ses usages : puits de carbone ; refuge de biodiversité ; milieu propice à la préservation de la qualité des sols, de l'air et de l'eau ; lieu de loisir), organisation paysagère. Mais aussi les usages alimentaires, matériaux, chimie, prioritaires sur les usages énergétiques.

Ajoutons à ce tableau, comme le souligne l'Académie des sciences[31], que la biomasse présente des limites intrinsèques en tant qu'énergie : densité d'énergie par unité de surface agricole ou forestière faible (en raison du faible rendement énergétique de la photosynthèse) ; bilan énergétique faible ; bilan carbone parfois faible[32]. En revanche, elle en représente une forme stockée et stable.

Le bouclage du futur zéro carbone grâce à la biomasse est sans doute l'un des plus grands défis de la transition environnementale et énergétique à venir, jusqu'à encore récemment mis de côté.

1.1.2. Taxonomie « des » biomasses : de leurs origines à leurs usages

La biomasse est définie réglementairement à l'article L. 211-2 du code de l'énergie (voir Introduction).

La multiplicité des origines et des usages de la biomasse est confirmée par la figure 5 ci-dessous, issue des travaux de l'Ademe[33], qui illustre les flux de biomasse en France métropolitaine en 2018 pour des usages non alimentaires (en millions de tonnes de matière sèche).

31 Académie des sciences, *ibid*.

32 Notamment en cas d'ajouts d'intrants de synthèse et de transport carboné sur de longues distances. Ce sujet donne lieu à une riche littérature notamment pour les biocarburants, voir Mizik T., « *Economic Aspects and Sustainability of Ethanol Production-A Systematic Literature Review* », Energies, 14(19), 2021, consultable en ligne.

33 Ademe, « *Biomasse : enjeu stratégique de la transition écologique. Avis d'experts* », février 2024, consultable en ligne.

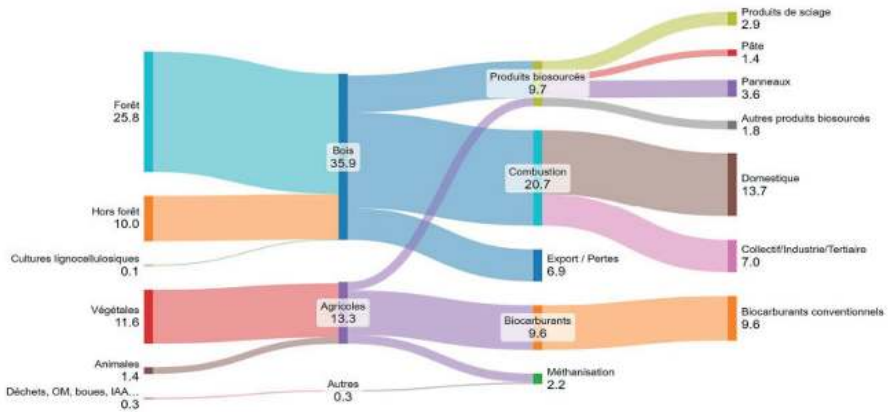


Figure 5 : Les flux de la biomasse non alimentaire en France en 2018 (MtMS)

Outre les ordres de grandeur, on peut retenir que :

- on peut regrouper trois grands types de biomasse selon leur origine, le bois (forêt et hors forêt), la biomasse agricole, les déchets solides municipaux et ceux de transformation alimentaire ;

- au-delà de la multiplicité des usages non énergétiques, on peut distinguer deux grands usages énergétiques de la biomasse : combustion directe domestique ou industrielle pour usage chaleur/cuisson (combustion du bois, biogaz, etc.) et combustion des biocarburants liquides ou gazeux dans un moteur thermique (mobilité, production d'électricité, etc.) ;

- aujourd'hui déjà, les usages non alimentaires de la biomasse sont multiples : le bois peut produits chimiques (amidon, saccharose, huiles en spécialités chimiques pouvant se substituer à des spécialités pétrosourcées), matériaux ;

- les co-produits de la biomasse sont multiples. Ils peuvent donner lieu à une valorisation énergétique s'il n'y a pas de meilleure alternative.

Ce graphique ne représente cependant pas l'ensemble des transformations théoriques de la biomasse : il existe de nombreux autres procédés de conversion. Donnons d'abord quelques exemples moins évidents que ceux déjà matures de la combustion, du biogaz issu de la méthanisation ou des biocarburants de première génération :

- les voies thermochimiques (gazéification (*Technology Readiness Level* [TRL] : 7-8) ou biochimiques (hydrolyse enzymatique et fermentation : TRL 7-8) permettent de transformer le bois ou les résidus agricoles (pailles par exemple) en biocarburants de type diméthylether[34] (TRL 6-7) biodiesel, biokérosène, bionaphta, ou encore des alcools (bioéthanol 7-8, biométhanol 6-7, biobutanol 6-7). Ces produits peuvent alors être mobilisés pour produire des carburants durables pour l'aviation ou du biokérosène ; on parle de biocarburants 2G[35]. Leurs particularités structurales nécessitent des technologies spécifiques dont la plupart sont en cours de développement ; des démonstrateurs sont disponibles pour certaines d'entre elles. Le passage à l'échelle industrielle tarde à venir, mais ils peuvent représenter un changement technologique majeur ;

- la disponibilité d'hydrogène durable offre des perspectives de production de molécules biosourcées (e-biocarburants par exemple), qui sont encore au niveau de la R&D (TRL 7-8) ;

- la pyrogazéification (TRL 6-7) peut transformer des résidus solides (bois, déchets, etc.) en gaz directement utilisable ou injectable dans le réseau de gaz naturel existant[36] ;

- la gazéification hydrothermale (TRL 4-5) transforme de son côté des boues (par exemple issues de stations d'épuration) en gaz également utilisable ou injectable dans le réseau[37] ;

- les algues, macro et micro, représentent les biocarburants de 3G. Leurs procédés de transformation sont similaires à ceux des lipides 1G. L'étape initiale de production (TRL 2-3) fait l'objet de R&D intense, avec des échéances à 15-30 ans.

34 Composé chimique de formule CH_3OCH_3, utilisé comme biocarburant ou solvant, voir par exemple https://encyclopedia.airliquide.com/dimethylether.

35 Pour comprendre le processus, voir le site du ministère de la Transition écologique sur les biocarburants.

36 Pour comprendre le processus, voir le site de NaTran sur la pyrogazéification.

37 Pour comprendre le processus, voir le site de NaTran sur la gazéification hydrothermale.

Le rapport Solagro de 2024 ne propose donc qu'un schéma simplifié[38] dont les multiples voies présentent des niveaux de maturité technologique très différents (Figure 6) :

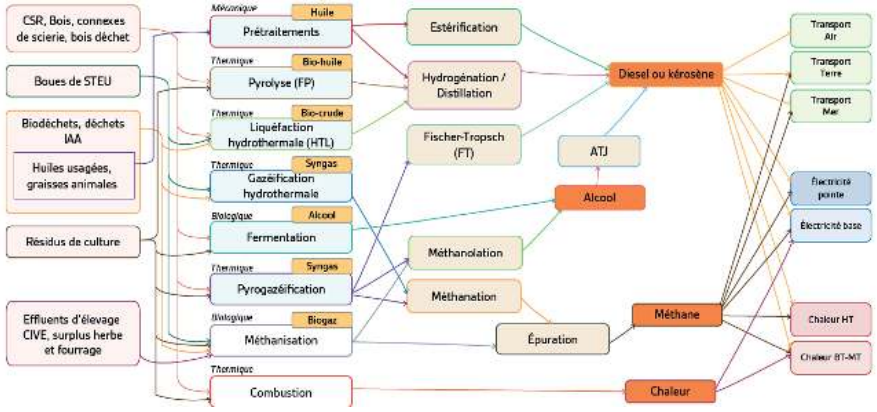


Figure 6 : Filières possibles de conversion de la biomasse pour des usages énergétiques (Solagro 2024)

Notons enfin que l'orientation actuelle est centrée sur la lignocellulose, avec deux sources majeures de biomasse végétale : les biomasses à cycle long et à cycle court. Les principales caractéristiques des premières (issues des forêts et de la sylviculture) sont leur prélèvement sur un puits de carbone, leur renouvellement lent (de 20 ans à plus de 100 ans) et leur dualité d'usage : non-énergétique (matériau-bois et chimie) et énergétique.

Les principales caractéristiques des biomasses végétales à cycle court (agricoles) sont leur renouvellement annuel, et leur finalité énergétique. Elles ne sont pas prélevées sur un stock de carbone mais produites à un rythme annuel avec une finalité énergétique. Certaines d'entre elles (maïs, betterave sucrière, canne à sucre, colza, etc.) ont une dualité d'usage, alimentaire (humaine ou animale) ou énergétique. L'évolution des régimes alimentaires et des systèmes d'élevage laisse entrevoir des disponibilités croissantes pour les finalités énergétiques. Les cultures à valorisation strictement énergétique

38 Solagro, *Quelles biomasses pour la transition énergétique ?*, 2024, consultable en ligne.

(miscanthus, panic érigé), taillis à rotation courte (7-10 ans ; saule, robinier, peuplier, eucalyptus), voire très courte (haute densité de plantation) sont à considérer aussi avec une approche agroécologique.

Une dernière classe, les biomasses non végétales à cycle court, recouvre une grande diversité en nature et en usages. Elles sont composées de déchets verts urbains, de boues de stations d'épuration, de biodéchets provenant des ménages et de la restauration ainsi que de résidus de l'industrie agroalimentaire. Les biodéchets urbains verts proviennent de sources lignocellulosiques (feuilles, résidus d'élagage et de tonte) des collectivités ou des entreprises. Les déchets alimentaires des ménages et des restaurants (composés de restes de cuisine) 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.

1.1.3. Quelques mots des acteurs

Un grand nombre d'acteurs différents participent à l'écosystème de la biomasse énergie. Ceux de la forêt comprennent de l'ordre de 3,5 millions de propriétaires forestiers privés et publics (dont l'État et 15 000 communes forestières[39], l'ONF, des coopératives, scieries et exploitations forestières (environ 3 000), papetiers, panneautiers et bioraffineurs. En parallèle le monde agricole comprend les agriculteurs (111 000 exploitations de grande culture), les éleveurs (145 000 exploitations alimentent des méthaniseurs) les coopératives et les bioraffineurs (15-20 industriels). Ce second groupe se distingue par la valorisation de productions de grande culture qui pour chacune d'entre elles conduisent à d'autres produits que l'énergie, principalement l'alimentation humaine et animale. La conséquence est que la durabilité de ces productions repose sur des stratégies mixtes combinant les objectifs de différentes finalités alimentaires, chimiques et énergétiques.

39 En application du code forestier, toutes les forêts publiques sont gérées par l'ONF.

La méthanisation est assurée par plus de 1700 installations qui produisent et valorisent des gaz renouvelables à fin 2022, dont 514 valorisent en injectant directement sur des réseaux de gaz naturel. L'élaboration d'une politique publique doit intégrer la nécessaire concertation entre tous ces acteurs.

Les technologies citées précédemment sont concentrées dans les portefeuilles d'un nombre limité d'acteurs industriels. La France et l'Union européenne ont un atout avec la propriété intellectuelle détenue par leurs agents économiques qui leur permet des développements complets de procédés[40].

L'organisation des interactions entre ces acteurs dans les filières énergétiques est à concevoir à la bonne échelle territoriale, par la prise en compte des externalités environnementales et sociales des activités et le bouclage des cycles de matières. Au-delà des sols, ces filières bioénergétiques sont structurées par la présence des bioraffineries, similaires aux raffineries de pétrole, mais avec une diversité de biomasses agricole et forestière entrantes et une diversité de produits biosourcés. L'intégration des technologies sur un site industriel réalise un véritable métabolisme industriel.

Un premier défi est la définition de valeurs partagées qui vont orienter les comportements individuels et sociaux, sur un territoire défini comme un espace. L'appropriation collective croise des dimensions technologiques, juridiques, sociales et culturelles.

Un second défi est d'éviter les écueils d'une stratégie trop focalisée sur le local, alors que l'innovation, les normes, la diversification des débouchés et des approvisionnements s'appréhendent à des échelles englobantes nationales et européennes.

En bilan, la question de la hiérarchisation des usages de la biomasse est d'autant plus complexe que cette ressource limitée peut être réclamée par différentes filières au service d'un grand nombre d'usages. Cette complexité est éclairée dans le chapitre 2 de ce rapport.

40 Voir Jahanshahi A., Lopes M., Brandoa M. et De Castro E.A., « *Development of bioenergy technologies : a scientometric analysis* » , *Helyon*, 2023, consultable en ligne.

1.2. COMPARAISONS DE QUELQUES ÉTUDES RÉCENTES SUR LE POTENTIEL EN BIOMASSE

1.2.1. PANORAMA DE QUELQUES ESTIMATIONS

Tableau 1 : Comparaison en TWh du potentiel en biomasse par origine et usage, en énergie après conversion éventuelle en biogaz ou biocarburants, mais avant usage final (le statut des consommations d'énergie pour la récolte, le transport, le rendement final, n'étant pas toujours clair).

	2020	2030	2050							
Par origine (TWh)	**2020 (estimation Mission)**	**Projection 2030 Mission**	**Solagro - Afterres**	**France Stratégie A**	**France Stratégie B**	**Ademe S2**	**Ademe S3**	**SNBC 2**	**SNBC 3 ams Run 2 non public**	**Mission 2050**
Biomasse forestière	93	107	162	137,2	137,2	105	120	142	103	92
Biomasse déchets urbains et autre	9	11	8	16,6	16,6	10	16	21	13	17
Biomasse agricole dont	32	72	170	126,8	151,0	188	264	267	186	136
Cultures pour biocarburants 1G	11	15	14	27,3	27,9	18	28	38	35	30
Agroforesterie	13	14	36	12,4	24,8	30	40	52	32	16
Cultures intermédiaires/Cive /prairies	1	18	57	38,2	58,1	70	78	104	45	42
Effluents d'élevage	1	6	28	26,4	22,2	15	20	35	16	16
Cultures lignocellulosique dont 2G	0	2	0	pas estimé		22	50	0	50	15
Résidus de culture	6	17	34	22	29,8	53	50	45	50	37
Total	134	190	371	283	330	303	382	430	305	245

	2020	2030	2050							
Par usage (TWh)	**2020 (estimation Mission)**	**Projection 2030 Mission**	**Solagro - Afterres**	**France Stratégie A**	**France Stratégie B**	**Ademe S2**	**Ademe S3**	**SNBC 2**	**SNBC 3 ams Run 2 non public**	**Mission 2050**
Biomasse solide	118	134	233	160,3	172,4	141	108	194	110	112
Biogaz	4	38	124	93,5	107,3	111	168	200	88	73
Biomasse liquide dont	11	17	14	27,9	27,9	51	106	38	90	60
Carburants 1G	11	15	14	pas estimé		30	36	35	35	30
Carburants 2G		3	0			30	68	Pas clair	55	37
Total	133	189	371	283	330	303	382	430	305	245

Les deux tableaux ci-dessus présentent une synthèse d'études approfondies[41] du potentiel de biomasse à horizon 2050 et pour la France. Les études présentées ici ne constituent pas une liste exhaustive ; on les a choisies en raison de leur date relativement récente (sauf Solagro qui date de 2016), leur visibilité par les décideurs, l'exhaustivité des biomasses couvertes et l'accès aux hypothèses (même s'il reste parfois insuffisant).

Les estimations globales de ressources varient de 245 TWh/an à 430 TWh/an. Ces écarts sont particulièrement élevés pour la biomasse agricole.

1.2.2. UNE COMPARAISON DIFFICILE - LES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE SONT-ILS RESPECTÉS ?

Avant de chercher à expliquer les écarts entre les études, notons que comparer ces études est un exercice particulièrement délicat, car :

– les valeurs sont parfois affichées sous forme de graphiques, sans accès aux données précises ni aux valeurs non consolidées - c'est le cas notamment de la SNBC 2 ;

41 Les sources de ces études sont :

- Mission du CGE, de l'IGEDD et du CGAAER, « *Évaluation du potentiel de production d'énergies renouvelables à partir de la biomasse agricole et forestière française à l'horizon 2050* », décembre, 2023. L'estimation faite est hors déchets non agricoles ou forestiers ;
- Solagro, « *Scénario Afterres 2050* », 2016, consultable en ligne. Ce rapport mériterait d'être actualisé, et l'a été en 2024, mais sous un format qui ne permet pas la comparaison ;
- France Stratégie, « *Biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ?* », 2021, consultable en ligne. Le scénario A est tendanciel, c.-à-d. se fonde sur des pratiques proches de l'existant. Le scénario B suppose une transition vers l'agroécologie ;
- Ademe, « *Transition (s) 2050, Choisir maintenant pour le climat* » Rapport., 2021, consultable en ligne. Le scénario 2 est appelé « coopérations territoriales » et vise un modèle soutenable basé sur la sobriété, une économie du partage, etc. Le scénario 3 est appelé « technologies vertes » et privilégie les nouvelles technologies sur la sobriété ;
- SNBC 2, déjà citée ;
- SNBC 3 : elle est en cours de consultation et son horizon s'arrête en 2030. Les données dites SNBC 3 AMS (« avec mesures supplémentaires ») run 2 à horizon 2050 sont des estimations produites par le Ministère de la transition écologique et fournies dans le rapport de la Mission.

– les unités, les définitions, et les catégorisations des origines ou des usages des biomasses ne sont pas homogènes entre les études. On trouve par exemple les déchets urbains parfois analysés seuls ou au contraire consolidés avec les autres types de déchets (bois, etc.). Il est par ailleurs parfois difficile d'identifier s'il est question d'énergie primaire ou d'énergie finale, dont les définitions sont rarement données, ou encore de pouvoir calorifique inférieur ou supérieur. Par ailleurs, certaines estimations se concentrent sur la France métropolitaine (France Stratégie, Ademe, Solagro-Afterres 2050), d'autres non (SNBC). Même les méta-analyses, dont la nôtre, qui ne font que recenser les différentes estimations d'autres études présentent des écarts entre elles dans leur lecture des résultats de celles-ci !

La question de la définition de l'énergie (primaire, finale) étant cruciale pour rendre les comparaisons pertinentes, tous les rapports mentionnant des valeurs énergétiques pour la biomasse, et notamment les études sur le potentiel, devraient préciser s'ils parlent d'énergie « brute », primaire ou finale, et donner les définitions de ces termes (Recommandation n° 1)[42].

– les données sources sont soit rarement citées ou peu visibles (cas de la SNBC 2 ou de l'étude Solagro-Afterres 2050), soit citées en bibliographie, mais sans qu'il soit facile de distinguer dans les résultats des études ce qui relève des données sources et ce qui relève des hypothèses ;

– les analyses de cycle de vie ne sont pas précisées : frontières du système considéré, sensibilité, loi de partage pour les procédés à sorties multiples, durée des phénomènes observés pour les processus biologiques longs et variables ; ces lacunes obèrent l'appropriation collective des choix de politiques publiques ;

– les hypothèses elles-mêmes, et notamment les hypothèses de prospective, ne sont pas toujours explicitées (cas évident de la SNBC 2 ; la SNBC 3 en consultation documente mieux ces hypothèses, mais son horizon n'est

42 En particulier, les coefficients de conversion vers le biogaz ou les biocarburants ne sont pas toujours justifiés ; certaines études prennent en compte le rendement des chaudières de combustion, mais pas celui des moteurs.

quantifié que jusqu'à 2030), ou ne sont pas toujours justifiées (par exemple Afterres 2050, p. 57 sur les cultures intermédiaires). Et même quand c'est le cas (Ademe et France Stratégie), s'il est naturel que des hypothèses prospectives différentes conduisent à des résultats différents, les formats très hétérogènes des études rendent les hypothèses difficilement comparables terme à terme[43].

De plus, ces études n'analysent pas les enjeux de logistique, importants pour une matière première dont la densité énergétique est faible et la production très dispersée. On verra plus loin qu'il s'agit moins d'enjeux environnementaux que de capacité à récolter/coût. Le PCI du bois anhydre est en moyenne un peu inférieur à 5 MWh/t pour les feuillus et de l'ordre de 5,3 MWh/t pour les résineux soit environ la moitié du PCI du fioul.

Enfin, elles sont discrètes sur l'impact environnemental ou social des scénarios considérés, un enjeu pourtant fort[44]. Ces études mentionnent évidemment la prise en considération des conséquences de l'exploitation de la biomasse sur l'eau, la qualité des sols, la biodiversité, etc. ; elles déclarent qu'elles respectent les exigences d'un développement durable. Mais elles le justifient d'autant moins qu'elles ne justifient pas leurs hypothèses prospectives à ce sujet.

C'est la Mission qui démontre le mieux les limites que la prise en compte des exigences environnementales ont induit sur ses évaluations 2050 de la biomasse agricole, notamment concernant les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE). Elle souligne que les CIVE d'été seront très variables d'une année à l'autre, surtout en l'absence d'irrigation ; et un développement poussé des CIVE d'hiver risque de se faire au détriment des cultures alimentaires, du fait de reports de dates de semis. Or c'est

43 Notamment, le fait de parler en origine de la biomasse, dans le Tableau 1, suppose des choix implicites de valorisation de la biomasse énergie. Pour avoir une vision du potentiel sans ces choix, on pourra utilement se reporter au rapport 2024 de Solagro, « *Quelles biomasses pour la transition énergétique ?* », 2024, consultable en ligne, qui ne propose pas d'arbitrage entre usages. Pour cette même raison, il n'est pas comparable aux études étudiées ici.

44 Voir l'analyse d'INRAE sur tous ces impacts : INRAE, « *Impacts environnementaux et enjeux technico-économiques et sociétaux associés à la mobilisation de biomasse agricole et forestière pour la production d'énergie en France à l'horizon 2050. Étude bibliographique* », 2023, consultable en ligne.

essentiellement le développement des CIVE qui fondent les projections les plus optimistes (Solagro, SNBC, France Stratégie B).

S'agissant de l'impact sur le puits de carbone, la Mission est la seule à clairement souligner que les hypothèses généralement retenues pour le potentiel énergétique de la biomasse forestière s'accompagneraient d'une réduction voire annulation de la part vivante du puits de carbone forestier[45]. Les conclusions de la Mission sont donc des hypothèses hautes de disponibilité de bioénergie forestière ; or les projections de la Mission sont les plus basses parmi celles des différentes études comparées.

En résumé, seule la Mission montre assez clairement comment ses projections à l'horizon 2050 prennent en compte les critères de développement durable (même si elle n'explicite pas la prise en compte du développement social).

1.2.3. La biomasse d'origine agricole : une même méthode, des données de départ et des hypothèses divergentes

Dans le cas de la biomasse agricole, on peut résumer la méthodologie d'estimation comme suit[46] :

- les données sources sont (hors effluents d'élevage) les surfaces agricoles par type de culture, les rendements associés et les coefficients énergétiques selon les types de transformation. Ces données peuvent être très détaillées (bio ou non, etc.) ;

45 Mission, p. 37. Il ne s'agit que du carbone qui est séquestré dans la biomasse dite « vivante », et non pas du carbone organique des sols. Voir encadré p. 47

46 Valable au moins pour : France Stratégie, 2021 ; Ademe, 2021, voir p. 588 ; SNBC 2, voir « *Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat* », p. 32 et *a priori* SNBC 3 ; Solagro, 2016, p. 56 ; *Stratégie Nationale de Mobilisation de la Biomasse*, 2018 ; Observatoire national des ressources en biomasse, « *Ressources en biomasse et méthanisation agricole : quelles disponibilités pour quels besoins ?* », 2022, consultable en ligne. Le rapport de France Stratégie explique particulièrement bien cette méthodologie, voir chapitre 2. Autre preuve de la proximité des démarches, le modèle MOSUT de Solagro est utilisé dans l'ensemble des études suivantes : Afterres-Solagro 2050 ; SNBC 2 et 3 ; Ademe ; Mission.

- les surfaces sont multipliées par les rendements agricoles pour donner un « volume total produit » ou « gisement brut » par type de culture ;

- on soustrait de ce volume total produit les volumes qui ne peuvent pas être collectés pour des raisons de gestion durable (par exemple, retour au sol des résidus), ceux qui ne peuvent pas l'être pour d'autres raisons (non accessible physiquement), ainsi que tous les usages actuels ou estimés prioritaires, notamment la biomasse alimentaire - ce qui donne un « volume supplémentaire disponible »[47] ;

- il est ensuite possible de multiplier ce résultat par culture par les coefficients énergétiques en fonction des usages souhaités (méthanisation, combustion, biocarburants) ;

- à cette démarche s'ajoute celle de l'élaboration d'hypothèses prospectives et de scénarios associés, travail qui peut impacter chacune des différentes étapes répertoriées ci-dessus (évolution des surfaces ; nouveaux modes de gestion des cultures par exemple avec l'agroécologie ; innovations technologiques améliorant les rendements ou les transformations énergétiques, etc.[48]).

- les divergences apparaissent à chacune de ces étapes. On peut le constater sur le cas des cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE), particulièrement intéressant à analyser en raison du potentiel d'accroissement qu'elles présentent.

47 Cette méthode a donc pour mérite d'intégrer une hiérarchie des usages définie *a priori* - même si les hypothèses sur les usages alimentaires ou matériaux peuvent évidemment varier. La quantité de biomasse-énergie est alors un résultat, pas une hypothèse d'entrée.

48 En lien avec la SNBC 3, le document INRAE, « *Propositions d'hypothèses pour le scénario AMS de la SNBC 3 pour le secteur Agriculture* », 2023, consultable en ligne, offre une discussion précise des hypothèses prises.

Les CIVE ou cultures intermédiaires à vocation énergétique

Une culture intermédiaire à vocation énergétique (CIVE) est une culture implantée et récoltée entre deux cultures principales dans une rotation culturale. Les CIVE ont un fort pouvoir méthanogène et sont utilisées en tant qu'intrant dans une unité de méthanisation agricole et sont le principal levier pour accroître la quantité de biomasse agricole transformable en biogaz. De nombreuses espèces peuvent être utilisées en tant que CIVE : vesce, avoine, phacélie, pois fourrager, seigle, trèfle, moutarde, etc.

Ces cultures présentent un double avantage : elles jouent un rôle de couvert végétal, ne laissant pas le sol nu pendant l'interculture ; elles permettent aux agriculteurs possédant un méthaniseur de sécuriser leur approvisionnement.

Elles peuvent contribuer à limiter le lessivage des nitrates ; structurer le sol ; lutter contre les adventices (compétition pour les ressources) ; lutter contre certaines maladies de la culture principale.

Elles peuvent présenter divers inconvénients : nécessité d'irrigation (CIVE d'été) ; apports d'engrais azotés ; réduction de la production principale (à usage alimentaire) si on souhaite maximiser la production de la CIVE.

Le tableau ci-dessous, pour quatre études relativement détaillées sur le sujet, recense les données et les hypothèses sélectionnées. Les chiffres déduits par calcul par les auteurs sont indiqués en italique. Les cases « / » signifient que l'information n'est pas fournie, et difficilement retrouvable à partir des éléments fournis.

Tableau 2 : Les CIVE dans différentes études sur le potentiel agricole

		Ademe[49]	France Stratégie[50]	Afterres 2050[51]	Mission[52]
Sources		Bibliographie détaillée, dont études Ademe. Source chiffre par chiffre peu identifiable.	Sources très précises : - Ademe, 2013 (données 2010) ; Ademe et GRDF, 2018	Peu clair.	Sources diverses, dont INRAE, 2024[53].
Prospective	Hypothèse culture été et culture hiver	/	Possible été et hiver, estimation précise selon culture principale	Répartition : ¾ culture d'été, ¼ culture d'hiver	Pas de CIVE d'été
	Surface de culture (Mha)	Scénario 2 : *3,1* Scénario 3 : *2,55* (25% de taux de mobilisation du potentiel)	Scénario A : 6 Scénario B : 12 (dont 7,5 été, 4,5 hiver)	1,5 Mha été, 4,5 Mha hiver (culture sur toutes les terres arables)	2,5 à 2,8
	Seuil de récolte[54] (tMS/ha)	/	4	4	6
	Rendement[55] (tMS/ha)	Scénario 2 : 6 Scénario 3 : 8	3,1 hivers, 1 été, en récolte, avec environ 50% de la production laissée sur place	Répartition probabiliste entre 1,4 et 7.	6
	Irrigation, traitement, fertilisation ?	/	/	Pas d'intervention	Fertilisation en azote potentielle
	Production (MtMS)	Scénario 2 : 19 Scénario 3 : 20,4	Scénario A : 12 Scénario B : 19	18	*15*
	Coefficient de transformation (TWh/MtMS)	Scénario 2 et 3 : *environ 2,4*	*Environ 2,25*	*2,4*	2,8
	Potentiel énergie (TWh Ef)	Scénario 2 : 46,2 Scénario 3 : 49,5	Scénario A : 26,8 Scénario B : 43	43	42

49 Voir p. 374 et suivantes du rapport Ademe.

50 Voir p. 63 et 97 à 99 du rapport France Stratégie. Projection tendancielle à 2030.

51 Voir p. 57 du rapport Solagro, Afterres 2050 version 2016.

52 Voir p. 22 et 23 du rapport de la mission.

53 INRAE, « *Enjeux agronomiques, techniques et économiques d'une mobilisation accrue des différents gisements de biomasse et de leur transformation en bioénergies* », 2024, consultable en ligne.

54 Seuil de rendement en-deçà duquel la production n'est pas récoltée (raisons principalement économiques).

55 La comparaison est compliquée du fait que des plusieurs notions de rendement existent : le « rendement de production » ne correspond par exemple pas au « rendement de récolte », ce dernier tenant compte des cultures peuvent être laissées sur place pour raisons agronomiques ou économiques (voir Seuil de récolte).

Les CIVE sont particulièrement révélatrices des incertitudes d'évaluation, car si les résultats prospectifs se rejoignent (entre 42 et 49,5 TWh en mettant de côté le scénario A de France Stratégie), cette convergence résulte de données et d'hypothèses largement divergentes ! À la lecture du tableau ci-dessus, on peut notamment constater que :

- il importerait que les études ne se contentent pas de lister leurs sources dans une bibliographie générale. Elles devraient préciser, pour chaque donnée, la source choisie et la justifier ;

- l'Ademe et la Mission présentent, dans leurs scénarios prospectifs, des rendements très élevés (entre 6 et 8 tMS/ha), mais « compensent » avec des surfaces cultivées bien moindres que France Stratégie et Afterres 2050 ;

- la possibilité de CIVE d'été ne fait pas consensus ; INRAE considère que leur production sera aléatoire et ne peut être prise en compte. Même en cas d'hypothèse de recours aux CIVE d'été, les surfaces associées divergent fortement - ce qui ne se répercute pas ensuite en raison des différences de rendement. Si les chiffres de production (entre 15 et 20,4 MtMS en mettant de côté le scénario A de France Stratégie) et les coefficients de transformation (entre 2,25 et 2,8 TWh/MtMS) sont assez proches, ces légers écarts auraient pu conduire à des résultats très divergents. Ainsi, en retenant une production de 15 MtMS (estimation Mission, la plus faible), avec le coefficient de transformation de 2,25 (estimation France Stratégie, le plus faible), le potentiel ne serait que de 33,7 TWh. À l'inverse, avec 20,4 MtMS (Ademe 3, le plus élevé) et 2,8 TWh/MtMS (Mission, le plus élevé), le potentiel eût été de 57 TWh !

En outre, l'optimisation ou l'adaptation de systèmes de production existants ou la création de nouveaux systèmes de culture tels que le Miscanthus (roseau de Chine) et le Panic érigé (*switchgrass*) posent des questions multiples à plusieurs échelles d'espace (la parcelle, le paysage, le bassin de production, le transport à longue distance des produits) et de temps (itinéraires techniques au cours d'une année, succession des cultures annuelles, durée des rotations, stockage des produits, renouvellement des cultures pérennes, entretien des installations confinées). Ces questions ne sont pas suffisamment prises en

compte dans les études. Il en est de même des impacts pas toujours bien connus du changement climatique.

Une analyse semblable est généralisable à l'ensemble des biomasses agricoles.

Aujourd'hui, plus de 11 TWh de biomasse récoltée en France est utilisée pour produire des carburants liquides de première génération (1G). Si la fin des moteurs thermiques est effective d'ici 2050, des alternatives à l'utilisation des sols consacrés à cette production seraient possibles. Elles ne sont pas évaluées dans ce rapport.

1.2.4. La forêt : des perspectives révisées à la baisse

On notera en préalable que la surface forestière française est de 17,5 Mha dont 16,6 Mha (95 %) sont disponibles pour la production de bois (IGN). Dans cet ensemble, la forêt privée occupe 13,1 Mha, dont 12,6 Mha disponibles pour la production de bois. Les forêts publiques sont quasiment toutes dotées d'un document de gestion durable et adhèrent à un programme de certification volontaire pour 72 % de leur surface. Quant aux forêts privées, 3,5 Mha font l'objet d'un document de gestion durable (27 % des surfaces) et 2,4 Mha d'une certification de gestion durable (presque exclusivement PEFC[56]).

Les estimations du total de bois récolté aujourd'hui dans les forêts sont issues de l'inventaire forestier national[57] et un peu supérieures, en volume dit « bois fort tige », à 50 Mm^3/an ; elles sont utilisées pour d'autres études, notamment avec une visée prospective comme l'étude récente IGN/FCBA[58] ou une étude

56 PEFC « *the Programme for the Endorsement of Forest Certification* » est un organisme international fédérateur des organismes certificateurs nationaux (en France, PEFC France)

57 Voir le site dédié : Inventaire forestier

58 Solagro-Afterres s'appuie sur le rapport IGN, FCBA, Ademe, « *Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035* », 2016, consultable en ligne. La Mission s'appuie en partie sur la récente étude IGN-FCBA, qui actualise les études précédentes : IGN-FCBA, « *Projections des disponibilités en bois et des stocks et flux de carbone du secteur forestier français* », Rapport d'étude, mai 2024, consultable en ligne.

plus ancienne IGN/INRAE[59]. Les différences portent donc largement sur les hypothèses prospectives.

Les premières hypothèses portent sur **l'accroissement de la récolte totale**. Solagro, dans son scénario Afterres 2050 de 2016, estime la récolte totale potentielle à 91 Mm^3/an en 2050, soit une augmentation de plus de 30 Mm^3/an ; leur rapport de 2024 est plus raisonnable, avec un potentiel d'accroissement de ressource primaire en forêt d'environ 18 MtMS, proche des estimations de la Mission. L'Ademe oscille entre +0 Mm^3 (scénario 1, sylviculture « proche de la nature ») et +20 Mm^3 (scénarios 3 et 4, forêt plus productive), en passant par un intermédiaire à +10 Mm^3 (scénario 2 qui équilibre les enjeux de puits de carbone et pratiques sylvicoles). La Mission estime de son côté que la récolte pourrait croître d'environ 10 Mm^3 voire plus, mais au détriment du puits de carbone pendant une phase transitoire.

Deux contraintes jouent sur les estimations.

Premièrement, la capacité d'organiser la forêt pour accroître les prélèvements, dans un contexte où de larges surfaces privées, importantes au global mais dont la surface par propriété est réduite, restent peu gérées ou non gérées. L'estimation la plus ambitieuse, celle de Solagro, explique ainsi considérer, à rebours d'une étude IGN-FCBA de 2015, que « *l'effort de mobilisation des petites propriétés privées se poursuit : dans l'étude IGN-FCBA, seule la moitié de ces propriétés sont mobilisées et il existe donc d'importantes marges de manœuvre, à condition de mettre en place les organisations nécessaires* » (p. 54) ;

L'amélioration de la desserte forestière peut être un levier d'accroissement de la réserve exploitable. Elle bénéficie d'aides régionalisées, mais il manque de données publiques montrant leur efficacité.

59 L'Ademe utilise l'étude conjointe IGN/FCBA : Roux A., Colin A., Dhôte J.-F., Schmitt B. (coord.) *et al.*, « *Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique : entre séquestration du carbone en forêt et développement de la bioéconomie* », Versailles, éditions Quae, 2020, consultable en ligne.

Deuxièmement, l'évolution du puits de carbone est un enjeu. Une étude IGN-FCBA de 2024[60] montrent ainsi qu'une augmentation de la récolte de +10 Mm^3 pourrait bien conduire, dans certains scénarios climatiques pessimistes (mais pas improbables), à une annulation du puits de carbone (séquestré dans la biomasse vivante, le point étant plus incertain pour le carbone organique des sols (voir encadré ci-dessous)).

Le stockage du carbone dans les forêts

(voir également l'annexe I)

La photosynthèse fixe le CO_2 atmosphérique : près de la moitié du bois sec est constitué de carbone. Un guide méthodologique du GIEC[61] considère trois compartiments de stockage : biomasse vivante aérienne et souterraine (tronc, branches, racines, etc.), biomasse morte (bois mort et litière) et carbone organique des sols (COS). Chaque pays est invité à évaluer les échanges entre ces compartiments et l'atmosphère[62], ainsi que la récolte de produits ligneux. C'est le Citepa en France qui effectue ces évaluations en fonction d'une méthodologie très détaillée[63]. Selon que le stock augmente ou diminue, la forêt est un puits ou une source de carbone.

Le Citepa, par précaution du fait des incertitudes pesant sur les flux de COS et de biomasse morte, ne rapporte que l'accroissement du stock de biomasse vivante au titre de l'évaluation du puits forestier des forêts restant forêts.

60 IGN-FCBA, « *Projections des disponibilités en bois et des stocks et flux de carbone du secteur forestier français, Rapport d'étude* », mai 2024, consultable en ligne

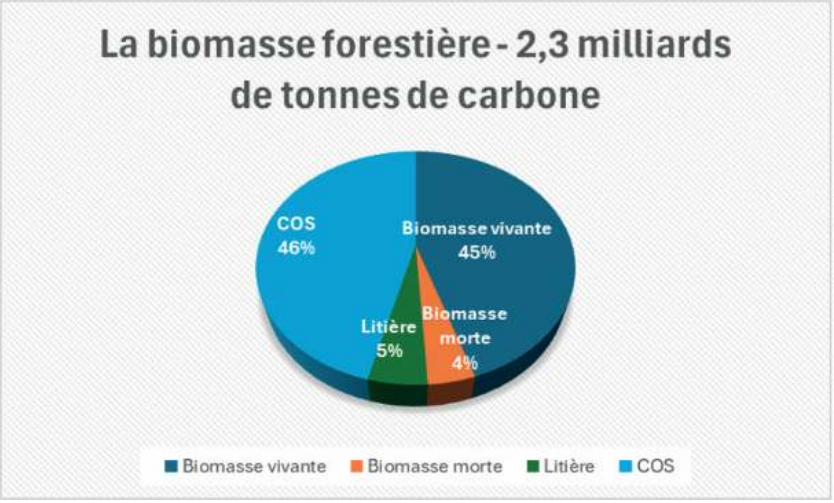
61 GIEC - Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie (UTCATF) 2003

62 Inventaire forestier - IGN memento 2024

63 Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France - Ominea-Citepa - 2024.

Cependant une synthèse scientifique récente estime[64] que, compte-tenu de l'histoire de la forêt française (surexploitation passée ayant conduit à une forte réduction du COS ou boisements récents de sols pauvres en carbone), le carbone organique des sols des forêts françaises croit d'environ 200 kg C/ha/an soit 13 Mt CO_2/an. Cette valeur est sans doute conservative, comme le suggère l'annexe I.

Le carbone stocké dans le bois mort s'oxyde (CO_2) ou retourne progressivement au sol. Son stockage n'est que temporaire mais, dans la dynamique actuelle d'augmentation tendancielle de la mortalité dans les forêts françaises, le bois mort est vraisemblablement aussi un puits de carbone à ne pas négliger.



Les évaluations les plus récentes montrent que la croissance biologique diminue et la mortalité des forêts augmente fortement, dans un contexte de sécheresse récurrente et de coupes sanitaires en hausse. Cette problématique existe aussi pour la biomasse agricole, mais dans des ordres de grandeur largement inférieurs. Or le niveau du puits de carbone (qui actuellement

64 Évaluation du puits de carbone dans les sols forestiers français - INRAE - IGN

stagne autour de 20 $MtCO_{2e}$/an alors qu'il a atteint plus de 50 Mt/an dans un passé récent (Figure 7)) est un enjeu essentiel des politiques publiques.

Les objectifs SNBC pour la période 2022-2030 sont supérieurs en moyenne à 30 $MtCO_2$/an[65] pour atteindre l'engagement français d'un puits de 35 Mt de CO_2 en 2030[66].

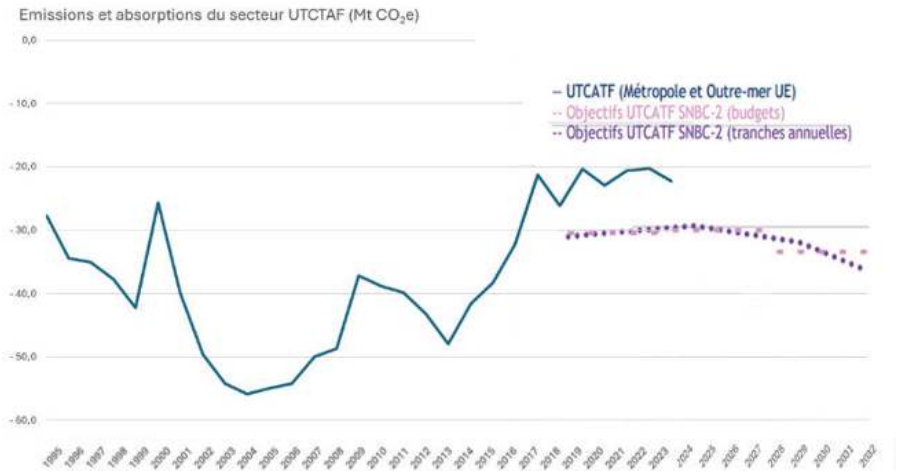


Figure 7 : Évolution du puits carbone français – Données Citepa-Secten 2024

Or c'est la forêt qui constitue l'essentiel du puits français ; son évolution récente est la principale contributrice à sa décroissance comme l'a souligné le Citepa dans son rapport annuel 2024 (Figure 8)[67].

65 L'infographie issue du rapport IGN-FCBA de 2024 permet de le voir facilement : https://www.ign.fr/publications-de-l-ign/institut/domaines-intervention/foret/infographie-projections-2050.pdf. Voir aussi https://lejournal.cnrs.fr/articles/la-foret-au-defi-du-changement-climatique-0. Ce constat est valable au niveau mondial : https://www.lemonde.fr/planete/article/2024/07/30/les-puits-de-carbone-terrestres-se-sont-effondres-en-2023_6261489_3244.html

66 Règlement 2021/0201 de l'Union européenne, cité.

67 Citepa Secten 2024 - Émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques en France 1990-2023

Si l'enjeu « puits de carbone » forestier est essentiel, la maximisation en valeur absolue du puits de carbone forestier jusqu'en 2050, première année du « net zero », qui résulterait des objectifs législatifs, ne peut cependant être un objectif en soi : une gestion durable des forêts, s'inscrivant sur des horizons plus longs, est à penser. C'est en effet le critère de soutenabilité qui doit motiver les politiques publiques. Compter à long terme sur la forêt pour « compenser » les émissions des autres secteurs risque d'induire des stratégies de court-terme critiquables.

Ceci est encore plus vrai en contexte de réchauffement climatique, qui pourrait voir de nombreuses forêts fragilisées et, par là, décapitalisées d'ici 2050 ; des modélisations fines sont indispensables pour anticiper ce changement massif[68].

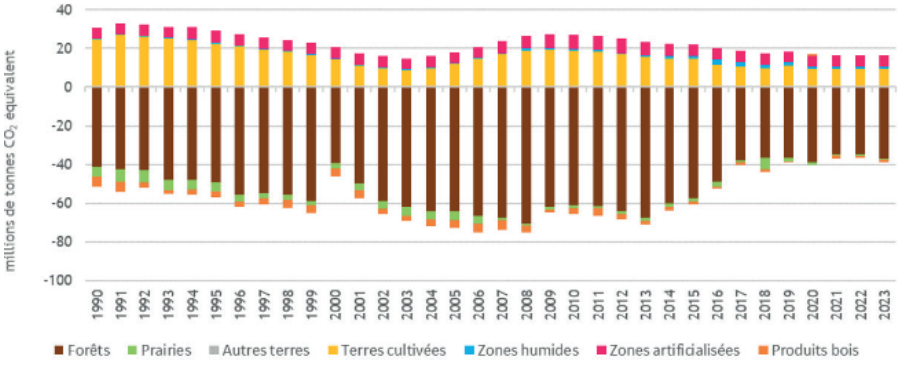


Figure 8 : Répartition des émissions de CO_2 du secteur de l'UTCATF en France (Métropole et Outre-mer UE) – Même source.

Pour conclure, les écarts entre études sur la future récolte de bois résultent certes en partie de scénarios distincts (prélèvements plus ou moins importants, scénarios climatiques plus ou moins sévères, selon des scénarios de gestion plus ou moins ambitieux), mais également de leur date

68 Le problème se pose également pour l'agriculture où les rendements prospectifs sont rendus (encore) plus incertains en contexte de changement climatique. Comme le souligne le rapport Challet F. et Fourny A., « *La biomasse : une énergie intermittente à horizon 2050 ? Mémoire de troisième année du Corps des Mines sur les usages de la biomasse provenant de l'agriculture et de la forêt* », 2023, consultable en ligne.

de rédaction : les études les plus récentes, contraintes par l'évidence de la diminution de la production biologique et de l'augmentation de la mortalité, retiennent que tout scénario de récolte ambitieux aura des conséquences importantes sur le puits carbone ; la forêt ne doit pas être exploitée au-delà de ce que requiert sa régénération.

À côté de la récolte de bois, il faut signaler que l'**usage de ces prélèvements**, entre bois d'œuvre (BO), bois d'industrie (BI) et bois énergie (BE) est un autre facteur de divergence entre études, même s'il est plus marginal en énergie primaire mobilisable - notamment parce que l'exploitation de BO et de BI produit des connexes utilisables en BE : l'arbitrage n'est donc pas à somme nulle (voir en annexe D les flux du bois à date dans un graphique de l'Ademe). Il y a consensus sur le fait qu'il faut privilégier l'usage du bois matériau[69].

1.2.5. Les déchets ni agricoles ni forestiers : des ordres de grandeur faibles

La plupart des chiffres de production de déchets sont directement liés aux estimations agricoles (effluents d'élevage notamment, provenant principalement des ruminants, très sensibles aux schémas d'élevage) et forestières (bois en fin de vie, de toute origine et notamment de la filière bois) discutées ci-dessus. Les déchets non inclus dans ces estimations, comme les déchets alimentaires des ménages ou de la restauration collective, les sous-produits et effluents de l'agroalimentaire, proviennent en général d'autres études *ad hoc* ; on ne les analyse pas ici vu les ordres de grandeur énergétiques faibles qu'ils représentent (environ 10 TWh)[70].

69 Ce qui aura un impact sur le choix des espèces à replanter.

70 Voir Ademe p. 387 à 396, ou France Stratégie p. 85. La diminution des volumes de déchets produits et leur valorisation présente évidemment d'autres intérêts, comme la diminution du stockage en décharge et de l'incinération, non abordés ici. Ils présentent par ailleurs aussi des défis spécifiques (biodéchets pollués par mélange avec l'ensemble des déchets ménagers, etc.). En pratique, il semble y avoir des volumes significatifs de sous-produits de l'industrie du sucre et de l'amidon, mais la règlementation française les limite ; selon certains industriels une meilleure communication entre décideurs et producteurs pourrait permettre de libérer plus de volumes.

1.2.6. LES HYPOTHÈSES RELATIVES AUX ORIGINES DES BIOMASSES

Si les cas analysés ci-dessus se concentrent sur les quantités de biomasses homogènes (CIVE et forêt-bois), les hypothèses - et par là les différences entre études - portent également sur la répartition des biomasses entre sources.

C'est évidemment le cas pour la production agricole : à surface agricole totale donnée, de multiples choix de production peuvent être effectués. Ainsi, dans son scénario B, France Stratégie fait l'hypothèse d'accroître les surfaces consacrées aux cultures oléagineuses et protéagineuses, pour répondre en partie aux nouveaux besoins identifiés pour l'alimentation humaine et à la recherche de souveraineté pour l'alimentation animale ; ces évolutions viendraient compenser l'éventuelle réduction des prairies naturelles liée à l'évolution des cheptels, à l'afforestation et à l'artificialisation des sols. Cependant l'hypothèse de réduction des surfaces de prairies naturelles - puits de carbone très importants - n'est pas évidente.

Ces choix ne sont pas toujours à somme nulle : planter des haies ou des alignements d'arbres le long des parcelles agricoles fait peu diminuer les surfaces cultivées, avec un potentiel non négligeable d'accroissement de production de bois hors forêt à renouvellement rapide ; l'arbitrage porte ici sur le modèle agricole, la présence de haies induisant une perte de revenu actuellement non compensée, du temps de travail supplémentaire pour les agriculteurs et une complication de l'exploitation.

Des arbitrages entre forêt, agriculture ou autres usages des terres expliquent aussi certaines divergences.

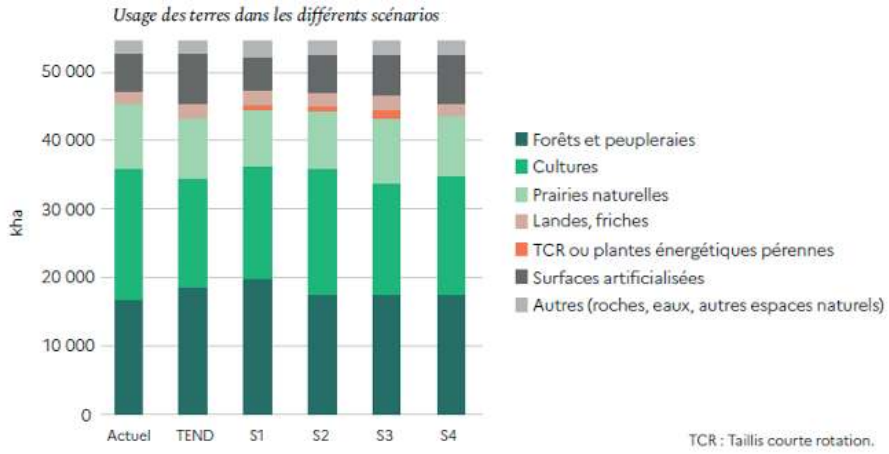


Figure 9 : Usage des terres dans les scénarios de l'Ademe

1.2.7. LES SCÉNARIOS RELATIFS AUX CHOIX DES USAGES

Les biomasses primaires, solides, liquides et gazeuses sont obtenues par transformation de biomasse selon de multiples procédés. Le rendement de conversion varie largement selon la biomasse utilisable obtenue choisie : à partir du bois par exemple, ce rendement est élevé (4,6 kWh/kg pour le bois bûche avec 20 % d'humidité ; il est analogue pour les granulés de bois à 10 % d'humidité dont la combustion est plus propre et l'utilisation plus facile ; mais il est plus bas si l'on vise des carburants liquides de 2e génération ou du biométhane produit par pyrolyse du bois et méthanation (2 MWh/tMS environ). Ces choix exercent une influence importante sur la valeur finale du potentiel énergétique (alors qu'ils n'en ont pas en tonnages d'intrants).

On peut même aller encore plus loin en définissant des sous-scénarios d'efficacité énergétique, à l'instar de ce que propose l'Ademe sur la consommation de bois pour la chaleur des ménages, qui établit un scénario de répartition entre foyers ouverts, poêles, chaudières à bûches, chaudières à granulés, etc.

1.2.8. En guise de première conclusion sur l'évaluation quantitative de la ressource en biomasse

En conclusion de cette partie 1.2, on peut d'abord rappeler la grande richesse et la grande qualité des études analysées. Certaines mettent à disposition du public leurs sources, leurs données et leurs conclusions. On notera aussi que la plupart de ces études proposent plusieurs scénarios, ayant compris que l'utilité de ces estimations réside moins dans l'obtention d'une seule valeur définitive que dans leur éclairage du choix politique en montrant les bénéfices ou les risques de telle ou telle option. À ce titre, l'étude FCBA-IGN de 2024 déjà citée est exemplaire, avec ses trente-six scénarios d'offre (variation autour du climat, de la gestion de la ressource, et du renouvellement), multipliables par dix scénarios d'usages du bois !

Un cadre partagé, au moins entre les entités publiques, est indispensable pour rendre comparables les études à venir, en homogénéisant les définitions et les unités, en énonçant les hypothèses dans un cadre sémantique et méthodologique commun, ou encore en se mettant d'accord régulièrement sur les meilleures sources à mobiliser (Recommandation n° 2). Le Groupement d'Intérêt scientifique (GIS) biomasse, annoncé lors du Salon de l'agriculture 2024[71], semble aller en ce sens.

Pour aller plus loin, il faut produire un véritable modèle qui permettra de jouer sur un grand nombre de paramètres, contrairement au tableur Mosut actuellement utilisé par les pouvoirs publics. Il faudrait réaliser un « jumeau numérique » de la production et consommation de la biomasse (données d'entrée, hypothèses sur les origines et les usages, mais aussi décisions de politiques publiques incitatives ou régaliennes, réchauffement climatique, etc.) pour ne pas se contenter d'élaborer de temps en temps quelques scénarios,

71 https://agriculture.gouv.fr/sia2024-lancement-dun-groupement-dinteret-scientifique-gis-en-faveur-de-la-biomasse

mais être capable d'actualiser en permanence les estimations et de tester de nouvelles options dès que nécessaire ou souhaité (Recommandation n° 3[72]).

Enfin, les impacts du réchauffement climatique mériteraient une approche méthodologique à part entière, moins simpliste que les travaux actuels. Mais ceci reste une gageure.

1.3. Quelques leçons partagées des études sur le potentiel en biomasse

Malgré leurs différences, les études d'estimation de la biomasse partagent quelques conclusions.

1.3.1. Une grande conclusion partagée : la difficulté de mobilisation de la biomasse

L'estimation de la demande future de biomasse est un exercice aussi périlleux que l'estimation du potentiel de production. L'évaluation des usages futurs suppose d'établir un certain nombre d'hypothèses sur l'évolution des modes de vie et de consommation[73] ; par exemple, pour le bois, le FCBA[74] estime que la demande en bois-énergie va croître de 15 % d'ici 2050, ou encore de 33 % pour la construction/rénovation, tandis que la pâte à papier devrait être stable. La production de biocarburants 1G pourrait également par exemple être techniquement accrue en Europe, sous condition de révisions réglementaires ; mais elles ne sont pas à l'ordre du jour.

72 Qui rejoint une recommandation de la Mission : « *Développer, pour une prochaine SNBC, un modèle de simulation de la production de biomasse française internalisant les conditions climatiques et agronomiques et une part de la variabilité géographique* », p. 22. Un tel modèle, forcément simpliste vu la complexité des facteurs, devrait pouvoir aller au-delà de 2050, afin de prendre en compte les enjeux de long terme (il ne sert à rien de maintenir le puits de carbone forestier en 2050 si cela conduit à la mort en 2060 ou 2075 de vastes espaces forestiers).

73 Hypothèses qui ne sont pas indépendantes des hypothèses sur l'offre (plus on a d'électricité nucléaire ou de géothermie, plus on peut limiter sa consommation en biomasse par exemple).

74 Auditionné dans le cadre de ce travail.

Surtout, en dehors des usages déjà ancrés, des usages plus récents, voire complètement nouveaux, et potentiellement vertueux, sont anticipés. En se limitant au secteur du bois, on peut citer : les biocarburants 2G déjà mentionnés ; des produits chimiques biosourcés (solvants, tensioactifs, additifs, etc.) à tonnages limités, mais forte valeur ajoutée ; ou encore des matériaux biosourcés innovants, parmi lesquels : les adhésifs et résines (+0,7 à 1,5 Mt/an), les produits chimiques dérivés de la lignine (+2 à 4 Mt/an) les hydrogels et biogels (+0,15 à +0,3 Mt/an), ou encore les polymères biosourcés et les bioplastiques (+0,6 Mt/an)[75]. Cette perspective recoupe celles déjà actives pour les dérivés de l'amidon, du saccharose et des lipides. Le secteur forestier peut permettre la production d'une gamme de matériaux biosourcés innovants avec les fibres et composites (entre +1 et 2 Mt/an en France estimées d'après le FCBA).

Les études qui estiment à l'horizon 2030 ou 2050 l'ensemble des modes de consommation sont plus rares que les évaluations de l'offre[76].

Les travaux de l'Ademe par construction égalisent la demande et l'offre, en jouant sur le niveau global de consommation énergétique et les alternatives à la biomasse. On ne peut donc rien en déduire sur la demande de manière intrinsèque, sinon que même dans les scénarios à fort potentiel (un peu moins de 400 TWh), les auteurs des scénarios ont jugé qu'il n'y avait pas de problème d'offre.

La SNBC 3 dont une version a été mise en consultation en 2024 se limite à l'horizon 2030. Mais dans les travaux préparatoires, la demande était estimée autour **350 TWh**[77] pour la consommation énergétique de biomasse en 2050 ; le bouclage n'était donc pas atteint, puisque le potentiel estimé par la SNBC 3 dans ses travaux préparatoires est de 305 TWh en 2050.

Même avec cette nouvelle valeur de 350 TWh, sans doute optimiste si l'on considère les enjeux de bouclage énergétique global, seuls le scénario 3 de

75 Chiffres transmis par le FCBA.

76 Alors même que l'intérêt d'étudier le potentiel d'offre en biomasse prend toute sa valeur s'il peut être comparé à la demande prospective.

77 p. 37 du rapport de la Mission. Biomasse à usage énergétique. Les ministères n'ont pas donné directement accès à ces données.

l'Ademe et le scénario Afterres 2050 permettraient d'équilibrer l'offre et la demande ; mais ces scénarios sont très, voire déraisonnablement optimistes[78].

Ce constat d'un difficile bouclage des scénarios pour la ressource en biomasse est même vrai dès 2030, comme le montre l'analyse de juillet 2024 du Secrétariat général à la planification écologique (SGPE), reproduite en annexe E et particulièrement fiable vu l'horizon de temps qui permet de limiter l'incertitude liée aux scénarios. En 2030, l'écart serait de 7 TWh pour la biomasse liquide, de 9 TWh pour la biomasse solide, et de 11 TWh pour la biomasse gazeuse, à importations stables[79]. La SNBC 3 mise en consultation insiste pertinemment sur ce point.

Si au niveau local, la production pourra parfois satisfaire la demande (cas notamment de certaines coopératives agricoles[80]), dans un contexte d'objectif à zéro émission nette, le constat est bien celui d'un marché tendanciellement favorable aux offreurs (orientant les prix à la hausse) à horizon 2050 dans le périmètre français. Ce constat ne prend pas en compte les possibilités d'importations, discutées plus bas, et reste bien sûr soumis à de nombreuses incertitudes (concurrence du bois énergie par d'autres énergies ; ressource temporairement excédentaire du fait d'aléas climatique, etc.).

78 Par exemple, dans son scénario 3, l'Ademe doit faire l'hypothèse que « la politique agricole se tourne vers la production d'énergie, pour le biométhane comme pour les bio-carburants » (p. 394) ; d'un très important développement de l'agroforesterie ; d'une priorité donnée à la valorisation énergétique des déchets sur la valorisation matière (p. 496) ; d'une amélioration importante des rendements des procédés industriels pour la production de biocarburants (p. 497) ; et d'une électrification particulièrement importante pour limiter la demande en biomasse énergie (p. 463).

79 La SNBC 3 mise en consultation est plus optimiste, sans qu'on dispose d'explications sur l'écart entre SGPE de juillet 2024 et SNBC 3 de novembre 2024. On retient les chiffres de juillet 2024 du SGPE, moins soumis à la contrainte du bouclage général.

80 Par exemple la coopérative Dijon Céréales et Nature Energy ont inauguré à Cérilly, en Côte-d'Or, l'unité de méthanisation territoriale Secalia, la plus grande de France avec une capacité de production de 230 GWh par an de biogaz.

1.3.2. Des sources homogènes pour le potentiel de croissance de biomasse

Si le flux à date de la biomasse forestière est important pour, son potentiel de croissance est faible (voire nul ou négatif pour certaines études à horizon 2050) par rapport à la situation actuelle. En 2019/2020, on en a consommé entre 88[81] et 93[82] TWh d'énergie alors que les projections à l'horizon 2050 s'établissent entre 85 TWh (soit une baisse) et 105 TWh[83]. Soit une croissance au mieux d'une dizaine de TWh, particulièrement incertaine en contexte de changement climatique. Cela ne signifie toutefois pas que la filière-bois soit condamnée à stagner, vu les défis de renouvellement et de gestion qu'elle va rencontrer dans un environnement climatique incertain ainsi que les enjeux d'optimisation carbone de l'ensemble de la filière (orientation matériaux et chimie notamment). Un défi sera donc d'éviter une augmentation des importations (voir ci-après).

Le potentiel de croissance réside en majeure partie dans la biomasse agricole. D'environ 30 TWh aujourd'hui, sa production pourrait atteindre 150 TWh. Le potentiel est particulièrement intéressant pour les CIVE : la production très marginale aujourd'hui pourrait être légèrement supérieure à 40 TWh en 2050. Si les impacts des CIVE semblent globalement positifs (avec une nuance pour le cycle de l'eau), leur déploiement aux niveaux de production envisagés nécessitera une certaine vigilance. En particulier INRAE conclut « *qu'on observe l'utilisation d'intrants pour la fertilisation, la protection phytosanitaire, ainsi que l'allongement des périodes de culture (des CIVE). De nombreuses interrogations se portent actuellement sur les effets agroenvironnementaux de l'insertion des CIVE dans les systèmes de culture*[84] ».

81 Chiffre SGPE dans son bilan sur la biomasse de juillet 2024, voir Annexe E.

82 Chiffre de la Mission.

83 Voir Tableau 1 p. 36, en conservant les hypothèses raisonnables.

84 INRAE, « *Impacts environnementaux et enjeux technico-économiques et sociétaux associés à la mobilisation de biomasse agricole et forestière pour la production d'énergie en France à l'horizon 2050. Étude bibliographique* », 2023, consultable en ligne. Sur les CIVE, voir sous-partie 1.7.1. INRAE considère que, sous réserve d'études additionnelles, les CIVE accroîtraient un peu le stockage de carbone dans les sols.

On peut noter par ailleurs le débat sur le potentiel des cultures lignocellulosiques pérennes, qui pour certains permettraient de faire usage de terres en déprise (friches industrielles, espaces proches des infrastructures de transport, etc.), quand d'autres y voient un risque de captation des terres. En outre les considérations économiques ne conduisent pas à valoriser certaines productions pour un usage énergétique : le miscanthus, par exemple, est acheté pour faire des litières de haute qualité à un prix plus élevé que pour l'énergie. Les estimations recensées ici vont de 0 TWh de potentiel, à 50 TWh. La Mission les estime à 15 TWh.

La figure 10 ci-dessous, sans être une prévision, illustre une évolution possible d'ici 2050, à partir des projections qui paraissent les plus raisonnables[85] (en TWh, énergie primaire, par usage).

85 À regarder en ordre de grandeur.

Pour 2019 et 2030, on utilise les chiffres du SGPE dans son bilan de juillet 2024, voir Annexe E. Pour 2050 et les besoins 2050, on s'appuie sur les valeurs de la Mission, auxquels on ajoute 10 TWh en potentiel biogaz pour les déchets non agricoles et forestiers. Pour 2050, une valeur supplémentaire dite optimiste est précisée. Le besoin 2035 vient des estimations des travaux de la SNBC 3 (disponible dans le rapport Mission).

On remarquera qu'on utilise dans la partie 1.2.1 les projections de la Mission pour l'horizon 2030, qui donnent leur détail par origine, contrairement à celles du SGPE. L'écart est relativement important pour la période 2019/2020, il se réduit fortement pour 2030. Pour rappel, le SGPE ne propose pas d'estimation à horizon 2050.

On notera que la Mission propose d'augmenter la production de biocarburants 1G. Ce rapport ne discute pas ce point et ne valide pas par conséquent cette orientation, ce qui pourrait diminuer encore l'ordre de grandeur de 15 TWh. On reste dans la zone d'incertitude, d'autant qu'on pourrait penser que les surfaces non consacrées aux produits agricoles pour biocarburants 1G pourraient être mobilisées par exemple pour de l'alimentation avec CIVE, ce qui limiterait l'écart.

Si le SGPE semble parler en Ef et la Mission en Ep, il nous semble bien que les calculs soient faits avec le même référentiel (voir plus haut sur le problème de définition Ep et Ef).

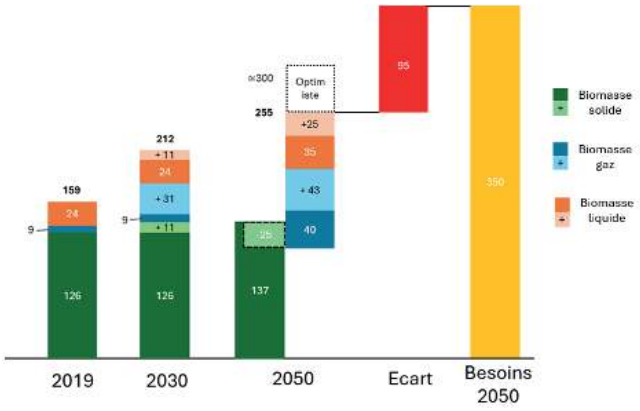


Figure 10 : Potentiels en biomasse identifiés comme raisonnables par les Académies, et comparaison aux besoins estimés ; le déficit en 2050 est en rouge. Les importations ne sont pas prises en compte. La baisse en 2050 est due à la baisse de potentiel forestier entre 2050 et 2030. Les accroissements ou diminutions sont en clair (+ ou -).

1.3.3. QUEL POTENTIEL ET QUELS RISQUES POUR LES IMPORTATIONS ?

En dehors d'une action plus volontariste des pouvoirs publics, et outre une régulation par des prix (qui croîtront), les importations contribueront à l'équilibre entre offre et demande de biomasse en France. À date, le SGPE les estime à environ 18 TWh par an (12 TWh pour la biomasse liquide, 6 TWh pour la biomasse solide), mais le scénario de référence ci-dessus requiert des importations plus élevées.

S'il est difficile d'établir le potentiel des importations, il ne pourra pas s'agir d'une solution de facilité pour rétablir l'équilibre offre/demande[86] : les rares études européennes concluent à un déficit de biomasse à l'échelle européenne, sans même prendre en compte les coûts de la logistique de la biomasse solide à longue distance (le biogaz disposant lui des mêmes chaînes de transport que le gaz naturel : gazoducs ou transport longue distance sous forme liquéfiée).

86 Sans même parler des enjeux, pourtant majeurs, de balance commerciale. On pourrait toutefois envisager, de manière favorable sur cette balance, importer de la biomasse brute à faible valeur ajoutée, pour la transformer en produits à forte valeur ajoutée exportables, par exemple les biocarburants d'aviation ; un tel scénario reste très hypothétique à date.

Quid du niveau mondial, avec des acteurs comme les États-Unis ou le Brésil qui se positionnent notamment sur les biocarburants et les pellets de bois ? Si plusieurs études se veulent rassurantes sur le potentiel mondial en biomasse[87] une étude de 2010 montrait que les estimations mondiales sont elles aussi fortement divergentes[88]. Par ailleurs, il faut distinguer le potentiel maximal théorique, du potentiel répondant à des critères suffisants de soutenabilité, c'est-à-dire qui réponde aux critères de RED III (voir Introduction). Il faut étudier plus finement le potentiel réel des importations, et en analyser les impacts industriels et économiques : il ne s'agit évidemment pas de préconiser un recours massif aux importations (Recommandation n° 4).

1.4. CONCLUSION DU CHAPITRE 1

Depuis la SNBC 2 qui faisait de la biomasse un terme de bouclage avec une estimation supérieure à 400 TWh (énergie primaire), de nombreuses études ont été faites qui convergent toutes vers la conclusion qu'une telle production de biomasse sur le territoire français est inaccessible. Le respect des critères d'exploitation durable conduit à retenir les hypothèses basses des études faites, la mieux justifiée et documentée étant celle de la Mission (170 à 250 TWh d'énergie) : l'estimation de la biomasse disponible étant alors inférieure aux besoins du bouclage énergétique des travaux préparatoires de la SNBC 3.

Cependant ce n'est pas l'objet de ce rapport de proposer des hypothèses de bouclage énergétique des décennies à venir ; un mix de solutions entre production plus importante d'électricité sur le territoire national par des moyens décarbonés et importations d'hydrogène ou de molécules hydrogénées (ammoniac, éthanol, etc.) sera requis.

87 - S. Ladanai et J. Vinterbäck, « *Global Potential of Sustainable Biomass for Energy* », LU, Institutionen för energi och teknik 2009, disponible en ligne.
- World Bioenergy Association, « *Global Biomasse Potentiel Towards 2035* », 2016, disponible en ligne.
- M. Black et G.M. Richter, « *Mapping out global biomass projections, technological developments and policy innovations* », ecosystem services for poverty alleviation, International Institute for Environment and Development (IIED) 2010, disponible en ligne.

88 D. Thrän *et al.*, « Global biomass potentials - Resources, drivers and scenario results », *Energy for Sustainable Development*, Volume 14, Issue 3, September 2010, Pages 200-205, disponible en ligne.

En revanche, la tension à venir sur la demande de biomasse est plus importante encore que ne l'estiment les auteurs de la plupart des études citées ; et donc la définition d'un ordre de priorité des usages de la biomasse respectueux des objectifs de développement durable est une contribution majeure aux politiques publiques. La définition de cet ordre de priorité est l'objet de la deuxième partie de ce rapport.

Chapitre 2

Comment optimiser les usages de la biomasse dans le respect des critères du développement durable ?

La première partie de ce rapport, à l'instar des études qui y sont analysées, montre que la biomasse française sera insuffisante pour satisfaire les besoins de la transition énergétique. Certains avis consacrés à identifier des solutions à ce déficit, comme celui du Conseil économique, social et environnemental[89], ou de la Commission de régulation de l'énergie[90] estiment qu'il faut mettre en place une « gouvernance » de la biomasse, déclinée au niveau territorial. Si les « cellules régionales biomasse » pourront effectivement s'avérer pertinentes pour raffiner les orientations nationales aux enjeux des territoires en tenant compte de leur richesse et typologie en biomasse, cette recommandation ne nous semble pas suffisante. Il apparaît en effet opportun de :

- établir une méthode ou des règles pour identifier des objectifs raisonnables d'allocation de la biomasse. C'est l'objet de ce chapitre 2, et le premier objectif de ce rapport, quitte à accepter d'être simple, mais opératoire afin d'identifier les usages les plus importants de la biomasse ; une telle méthode serait, dans tous les cas, nécessaire pour que des cellules régionales puissent travailler de façon cohérente et efficace ;

- proposer des mécanismes d'allocation visant à atteindre au mieux la décarbonation tout en laissant aux acteurs économiques la liberté nécessaire à leurs décisions d'investissement, sauf à considérer la gouvernance comme un Gosplan qui distribuerait des tickets de

89 Conseil économique, social et environnemental (CESE), « *Quels besoins de gouvernance pour les différents usages de la biomasse ?* » - Rapporteurs : Claire Tutenuit et Pascal Férey - avis, mai 2023, consultable en ligne.

90 Commission de régulation de l'énergie, « *La biomasse et la neutralité carbone* », co-présidents : Monique Axelos et Patrice Geoffron, mars 2023, consultable en ligne.

rationnement sur la base d'objectifs *a priori*. Ce point sera abordé plus marginalement en conclusion de ce chapitre 2.

2.1. LA MÉTHODE : QUELS CRITÈRES POUR GÉRER LA RARETÉ

2.1.1. DE LA NÉCESSITÉ D'UNE MÉTHODE

L'allocation des terres à telle ou telle production de biomasse ; l'allocation de la biomasse produite entre les différents usages possibles ; la séquestration de la biomasse : voilà quelques questions posées par la recherche d'un ordre de mérite de la biomasse.

La rareté est inhérente à l'économie de marché qui fournit des règles d'allocation de biens en fonction de leur utilité et leur coût. L'application directe des méthodes des économistes à la production et aux usages de la biomasse n'est cependant pas aisément possible pour plusieurs raisons :

- la biomasse est soumise à des règles d'usage qui ne peuvent toutes être reflétées dans un signal-prix. En effet la production (ou non-production) de biomasse entraîne des conséquences autres que la seule masse de matière finale. La hiérarchie des usages (alimentation humaine, animale, etc.), le maintien de la qualité des sols, la nécessaire gestion durable de la forêt, la protection de la biodiversité, etc., doivent également guider la gestion des ressources en terres, en eau, et la production de la biomasse. Et les principes de l'utilisation en cascade et de l'économie circulaire doivent orienter son utilisation ;

- en particulier, la biomasse est un produit à double usage. Elle est d'une part utile par elle-même (nourriture, matériau, matière première ou molécule, énergie) ; d'autre part son processus de production (capture directe du CO_2 dans l'air) est indispensable pour fermer le cycle du carbone. Parmi les études passées en revue, seule la Mission prend ce critère sérieusement en compte, qui se révèle assez fortement limitant ;

– la biomasse est un système complexe où se confrontent des concurrences :

  • concurrence pour accéder à la ressource foncière agricole ou forestière ;
  • concurrence pour accéder à la biomasse produite.

– enfin, la biomasse est soumise aux aléas climatiques susceptibles de créer des chocs d'offre et de fortes variations de prix sur des marchés caractérisés par une demande inélastique.

La solution de tels problèmes de concurrence passe normalement par la construction d'un modèle de simulation et la définition de règles d'optimisation. Mais l'économie de la biomasse, intégrée dans un système d'économie circulaire, est le lieu de multiples interactions et rétroactions entre les acteurs qui la produisent ou l'utilisent. La simulation de ce système est très complexe et dépasse les ambitions de ce rapport ; en revanche certaines des études précitées sont partiellement issues de modélisations qui assurent leur cohérence.

Pour rappel, la première partie de ce rapport a établi que les scénarios bas de croissance et utilisations non énergétiques de la biomasse respectent les critères du développement durable. La suite de ce rapport se consacre uniquement à l'organisation des usages de la biomasse « énergie » ; ils doivent rester résiduels pour respecter les principes de l'utilisation en cascade et prendre en compte l'objectif de maximiser le bilan carbone (dans le cadre d'une gestion durable des forêts).

La définition des trajectoires permettant d'atteindre les objectifs nécessite la prise en compte de considérations sociales ; ces trajectoires ne sont pas définies dans ce rapport.

2.1.2. UNE MÉTHODE FONDÉE SUR LA COMPARAISON D'ALLOCATIONS ALTERNATIVES

La méthode proposée est la suivante :

– on considère que l'objectif général est de maximiser la réduction des émissions nettes de CO_{2eq} à horizon 2050, en minimisant le coût de cette

décarbonation. Le premier objectif, s'il est intrinsèquement politique, a le mérite d'être partagé par un accord international engageant[91] (COP21 à Paris en 2015) et d'être inscrit dans les lois européenne et française[92]. Le second, celui du coût, est évident dans une optique d'optimisation de l'allocation des ressources pour décarboner[93], mais aussi en raison des enjeux de développement social. L'objectif de décarbonation, dans cette méthode, est intangible ; le critère du coût n'affecte pas cet objectif, mais seulement le chemin pour y parvenir ;

– une modélisation d'ensemble n'étant pas accessible, la méthode proposée repose sur l'évaluation d'allocations alternatives à un usage envisagé de la biomasse. Plus précisément, pour chaque usage envisagé de la biomasse, on regarde s'il existe une technologie (ou plus généralement une solution) alternative présentant les caractéristiques suivantes :

  - sa capacité à décarboner (condition nécessaire, toute alternative non « décarbonante » étant disqualifiée) ;
  - son niveau de maturité ;
  - son coût ;
  - ses autres caractéristiques (externalités négatives, acceptabilité, etc.).

– si cette alternative est équivalente ou proche en termes de coût et de potentiel de décarbonation, voire plus intéressante, et que ses externalités diverses ne la disqualifient pas, on la privilégie pour alléger la pression sur

91 Loi n° 2016-786 du 15 juin 2016 autorisant la ratification de l'accord de Paris adopté le 12 décembre 2015

92 Article L100-4 - I - 1e du code de l'énergie, par lequel la France s'oblige à atteindre zéro émission nette en 2050 avec une diminution de ses émissions d'un facteur six entre 2012 et 2050. Les émissions françaises de CO_2 ayant été de 483 Mt de CO_2 en 2012 (Citepa-Secten - émissions-par-substance_Secten-GES_2024-d), cela implique un puits de carbone de 80,5 Mt en 2050.

93 D'autant que le soutien au développement des énergies renouvelables et notamment à la production de biogaz par méthanisation coûte cher aux finances publiques, comme le souligne un récent rapport de la Cour des comptes, « comptes, « *Le soutien au développement du biogaz* », Rapport public thématique, mars 2025, disponible en ligne. Cependant, la méthode proposée dans le présent rapport ne fournit pas de guide pour définir le niveau et les caractéristiques de soutien aux producteurs ; nos recommandations agissent indirectement sur la capacité de soutien en minimisant l'impact général de la décarbonation.

la ressource en biomasse - cela sera largement utilisé dans nos exemples d'application de la méthode ;

- sinon, on compare ensuite les usages potentiels de la biomasse deux à deux ; l'allocation de la biomasse doit être faite à l'usage dont la solution alternative de décarbonation aboutit au coût de décarbonation le plus élevé. Cela est essentiellement vrai si les écarts sont importants ; si les écarts sont faibles, il serait théoriquement possible de calculer un optimum d'allocation. Si ce calcul n'est pas présenté, la méthode ne permet pas de conclure ; et il est alors nécessaire de considérer toutes les externalités. (En pratique, cela reste à date difficile à faire par manque de données) ;

- les usages qui ne bénéficient *a priori* pas d'alternative de décarbonation (ou dont celle-ci n'est pas mature à horizon raisonnable) sont *a priori* privilégiés. La discussion se fait par comparaison au cas par cas selon les critères mentionnés plus haut (externalités, acceptabilité, etc.) ;

- enfin, une analyse des ordres de grandeur permet de vérifier si l'allocation est cohérente avec le potentiel identifié en chapitre 1.

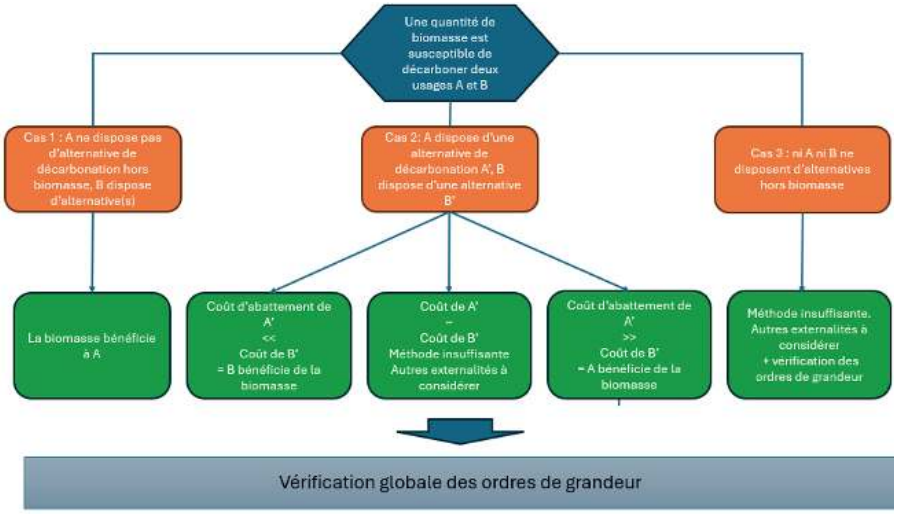


Figure 11 : Logigramme de la méthode proposée (hors situation d'alternative équivalente à privilégier sans comparaison deux à deux). « Coût » signifie coût d'abattement.

On retrouve le fait que la biomasse est, du point de vue adopté dans ce rapport, un produit « à double usage » auquel on doit attribuer deux utilités : son usage direct qui est reflété par son prix de marché par unité d'énergie ; et l'impact de son utilisation sur le stock net de carbone. Afin de les consolider dans un critère quantitatif unique, on peut s'appuyer notamment sur la notion de coût d'abattement, récemment travaillée par Patrick Criqui et France Stratégie[94], et qui correspond au coût des solutions rapporté aux émissions évitées.

Un exemple de calcul d'un coût d'abattement : les carburants de synthèse pour l'aviation.

L'exemple est tiré du rapport de l'Académie des technologies « La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables », 2023, p. 81 et suivantes. Pour une présentation plus complète du détail méthodologique, voir les travaux de P. Criqui et France Stratégie précités.

On définit d'abord la solution de référence à comparer, et ses caractéristiques. Pour l'aviation, il s'agit du kérosène fossile, dont on définit le prix de référence à 1€/l, soit 1200 €/tep, et des émissions associées à 3,45 kgCO_2/l.

Les mêmes chiffres doivent être produits pour l'alternative, ici les carburants de synthèse. On se place à un horizon de 2040 et au-delà en faisant l'hypothèse d'une maturité technologique aboutie pour les technologies mises en œuvre. Ceci concerne notamment l'électrolyse qui doit atteindre un très haut niveau de performance. Pour une empreinte carbone de l'électricité à 20 gCO_2/kWh, les émissions associées sont de 0,371 kgCO_2/l. Le coût de la solution est estimé entre

94 P. Criqui et France Stratégie, « *Les coûts d'abattement. Partie 1 Méthodologie* », 2021, disponible en ligne.

1,55 €/l et 2,5 €/l par l'Académie des technologies. En prenant la valeur de 1,7 €/l, le coût d'abattement est calculé par la formule :

$$CA(eSAF) = \frac{1.7\ € - 1.0\ €}{3.45\ kgCO_2 - 0.371\ kgCO_2} = 227\ €/tCO_2$$

Vu l'incertitude sur les hypothèses, il peut être intéressant de représenter les coûts d'abattement sous forme de tableau comme suit :

Coût fossile référence :		1.00 €/litre			
Coût d'abattement direct €/tCO_2		empreinte carbone électricité			
		10 gCO_2/kWh	20 gCO_2/kWh	50 gCO_2/kWh	100 gCO_2/kWh
Coût e-SAF	1.55 €/litre	168	178	218	344
	1.70 €/litre	214	227	277	438
	2.00 €/litre	306	324	396	626
	2.50 €/litre	459	487	594	939

Des valeurs d'actualisation peuvent par ailleurs être proposées dans le cas d'une décision publique, ce qui tend à réduire ces coûts d'abattement (voir volet méthodologique, p. 23 et suivantes du rapport Criqui/France Stratégie)[95].

Dans la vision de France Stratégie, il s'agit d'abord de comparer le coût d'abattement à la valeur de l'action pour le climat (valeur du carbone à fixer pour orienter les investissements vers le rythme de décarbonation souhaité, voir la figure 12 ci-dessous), afin d'établir l'efficacité socioéconomique d'une action. Dans la méthode proposée, il s'agit avant tout de comparer des coûts d'abattement entre eux, afin de voir si une solution est moins coûteuse qu'une autre pour assurer la décarbonation. Si un coût d'abattement reste au-dessus de la valeur d'action pour le climat de France Stratégie, cela

95 On remarquera aussi que le coût d'abattement, s'il permet de comparer plusieurs facteurs à travers un seul paramètre, écrase en retour une partie de la richesse contenue dans le signal-prix, puisqu'un prix élevé (pour l'usager), mais avec un potentiel de décarbonation très important peut quand même conduire à un coût d'abattement raisonnable.

supposerait *a priori* de ne « rien » faire ; mais il faut évidemment en avoir une vision dynamique, puisque cette valeur d'action pour le climat croît avec le temps.

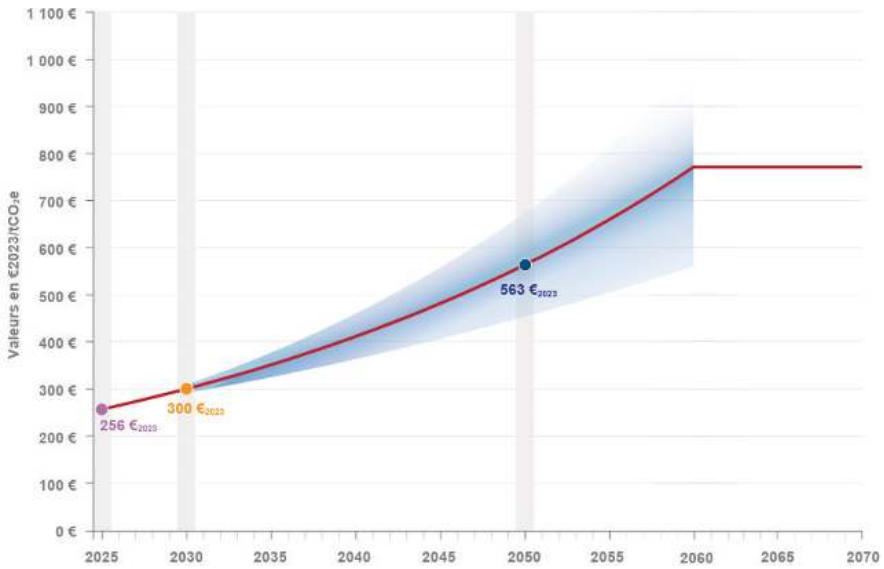


Figure 12 : Trajectoire pour la valeur carbone - France Stratégie, « *La nouvelle trajectoire de la valeur de l'action pour le climat* », 2025, consultable en ligne.

Les exemples suivants s'appuient sur des données identifiées dans la littérature, avec deux conséquences. D'une part, la plupart des données restent à construire pour affiner l'approche, et l'application de la méthode proposée reste donc parfois « qualitative » même si dans de nombreux cas, la solution est évidente : une alternative l'emporte nettement sur l'autre. D'autre part, la complexité de la notion de coût d'abattement et les différentes manières de le calculer conduisent à devoir prendre les comparaisons entre différents travaux de la littérature avec précaution. Si la méthode de ce rapport basée sur l'absence d'alternatives est utilisée par d'autres parties prenantes et notamment les pouvoirs publics, une construction systématique de coûts d'abattement dans une perspective de comparaison des usages de la biomasse serait particulièrement utile (Recommandation n° 5). Ceci est d'autant plus vrai que le coût d'abattement est une grandeur dynamique du système et non intrinsèque, au sens où elle peut évoluer en fonction des

développements technologiques, eux-mêmes liés aux signaux réglementaires et de marché. Il faut aussi tenir compte des incertitudes quand on compare les coûts d'abattement de technologies de maturités technologiques différentes.

C'est pour cela qu'on ne trouvera pas d'« affrontement deux à deux » dans la partie suivante, alors que c'est au cœur de la méthode théorique : il faudra le faire une fois toutes les données construites.

Cette méthode a en outre l'intérêt d'être proche de considérations « économiques » comme il est discuté en annexe H, ce qui aidera à garantir son efficacité pratique. Elle a également celui de prendre en compte le bilan carbone complet (qui est inclut au dénominateur dans les coûts d'abattement).

L'enjeu de la logistique étant important dans le cadre de l'énergie peu dense qu'est la biomasse, les coûts d'abattement à construire devraient les intégrer, ce qui garantira une comparaison des usages à la fois sur les enjeux économiques (coût de cette logistique), mais également de décarbonation. Toutefois, d'un point de vue environnemental, sur l'exemple déjà cité des biocarburants et hors transport « très longue distance » (importation mondiale), nos échanges avec les industriels montrent que la part « transport biomasse » contribue pour environ 5 % des émissions du carburant fossile substitué ; la publication de l'Ademe « *Analyse du cycle de vie du bois énergie collectif et industriel* » confirme dans le cas de la combustion que les enjeux « gestion sylvicole » et « exploitation des chaufferies » pèsent plus dans les analyses de cycle de vie que la part « transport »[96]. L'impact de la logistique sera plus important pour les questions de coût.

La SNBC 3 en consultation met en œuvre implicitement, mais partiellement, cette méthode : on le constate en annexe F qui reproduit le tableau des priorités (dans la dernière version de la PPE3 en consultation) ; l'absence d'alternative est régulièrement justifiée pour bien classer tel ou tel usage. Cependant, outre que le travail n'a pas été fait de manière systématique et quantifiée (contrairement à ce qu'esquisse notre méthode), d'autres arguments viennent s'y mêler : si ces arguments peuvent être légitimes (sobriété demandée à l'aérien par exemple), le mélange de critères peu élaborés rend difficile la

96 Ademe, « *Analyse du cycle de vie du bois énergie collectif et industriel* », 2022, disponible en ligne.

compréhension de leur classement. La rationalité commande de mobiliser la méthode basée sur l'évaluation des alternatives, avant de raffiner avec d'autres paramètres, dont certains pourront évidemment (mais explicitement) être « politiques » dans les travaux des agences institutionnelles. Bien sûr, si la comparaison des alternatives n'est pas discriminante, ces autres paramètres peuvent prévaloir.

2.1.3. Quelles sont les émissions de CO_2 par combustion de la biomasse forestière ?

Un préalable à la mise en œuvre de cette méthode est de connaître le bilan carbone de la biomasse. On considère en général qu'il est nul pour les combustibles solides de récupération (lorsqu'aucun recyclage n'est plus possible) et plus généralement les déchets, résidus de bois, etc., qui n'auraient d'autres alternatives à la combustion que le pourrissement, avec émission de CO_2. Il en est de même pour la biomasse à renouvellement rapide (biomasse agricole, taillis à courte rotation par exemple).

La directive RED III considère que la totalité de la biomasse forestière est durable ; ce point fait l'objet d'un débat, qui n'est pas nouveau, mais a regagné en intensité ces dernières années.

La comptabilisation des flux de carbone de la combustion de la biomasse est imposée par le GIEC, à la suite du protocole de Kyoto[97] :

« *Les émissions de dioxyde de carbone (CO_2) provenant de la combustion de biomasse ou de produits à base de biomasse sont prises en compte dans les émissions de CO_2 du secteur AFOLU [*Agriculture, Foresteries and Other Land Uses*] par le biais des variations estimées des stocks de carbone provenant de la récolte de biomasse, même dans les cas où les émissions ont lieu physiquement dans d'autres secteurs (par exemple, l'énergie)]. Cette approche d'estimation et de déclaration de toutes les émissions de CO_2 provenant de la biomasse ou des produits à base de biomasse dans le secteur AFOLU a été introduite dans les premières lignes directrices du GIEC pour les émissions*

97 IPPC - « Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories », consultable en ligne.

nationales de gaz à effet de serre (GIEC 1995), reflétant les liens étroits entre les données [d'utilisation et] de récolte de biomasse, et pour la raison pragmatique d'éviter les doubles comptes. »

Cette règle comptable a l'immense mérite d'être simple et de pouvoir être appliquée uniformément à tous les pays ayant ratifié l'*United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC). Elle conduit l'Union européenne dans le règlement RED III à considérer que la biomasse est une énergie renouvelable si sa production respecte les critères du développement durable puisque par convention ses émissions y sont égales à ses absorptions. En France, des évaluations du bilan carbone de la filière forêt-bois française sont régulièrement faites par le Citepa avec la contribution de l'IGN[98] dans le respect de cette règle.

Cependant, il s'agit là d'une convention comptable pour établir a posteriori un bilan des émissions et absorptions de gaz à effet de serre dans l'économie considérée dans son ensemble. En revanche, au niveau sectoriel, elle ne dit rien de la meilleure utilisation possible du bois prélevé puisqu'elle considère son carbone reparti vers l'atmosphère dès son prélèvement, ce qui n'est manifestement pas le cas dans la réalité. D'où la nécessité de faire une évaluation ad hoc dans les cas considérés. Pour certains, cette convention n'est complètement justifiée que dans une hypothèse de renouvellement rapide de la biomasse (agriculture, taillis à rotation courte, etc.)[99] ou dans une hypothèse de stabilité des forêts. Alors que le SGPE prévoit une « forte mobilisation de la biomasse forestière » (voir Annexe E), cette position est mise en doute par de nombreuses organisations françaises, européennes ou internationales. L'annexe G aborde ce point plus en détail.

98 IGN-FCBA, « *Projections des disponibilités en bois et des stocks et flux de carbone du secteur forestier français, Rapport d'étude* », mai 2024, consultable en ligne, p. 49, et voir l'indicateur 1.4 de gestion durable des forêts françaises.

99 Cour des Comptes, « *Le soutien au développement du biogaz* », *Rapport public thématique* », mars 2025, disponible en ligne, p. 41 confirme le bilan carbone globalement positif du biométhane, avec des points de vigilance (fuites de méthane notamment, qui doivent rester très faibles).

2.1.4. Une conséquence sur la filière forestière

La discussion de la sous-partie précédente peut être reprise sous un autre prisme : la neutralité carbone du bois énergie est en général justifiée par le respect du principe de l'exploitation en cascade du bois défini dans la directive RED III (voir introduction générale). Cependant le résultat de son application dépend largement de la filière régionale de valorisation du bois. Le critère de la Directive est en effet : « *Lorsque plus aucune utilisation de la biomasse ligneuse n'est économiquement viable ou appropriée sur le plan environnemental, la valorisation énergétique aide à réduire la production d'énergie à partir de sources non renouvelables* ». Cette règle est logique ; s'il n'y a pas de meilleur usage, l'utiliser en bois énergie représente une bonne option.

Dès lors que les filières permettant un stockage long du carbone du bois récolté sont insuffisantes, l'utilisation de la ressource en bois énergie est acceptable ; mais la priorité devrait être l'accroissement des usages du bois qui stockent le carbone avant de le brûler. Si ces usages n'augmentent pas, la part de bois valorisables en stockage long du carbone va encore se réduire par rapport à la part directement brûlée.

Depuis 2010, la consommation de bois énergie en France a doublé alors que la production de bois d'œuvre tend à baisser. La récolte de bois est principalement utilisée en énergie (86 %) pour les feuillus[100]. Pour les résineux, les usages matériaux et énergie sont du même ordre de grandeur. Le faible usage des feuillus en matériaux résulte de la conjonction d'une production parfois de mauvaise qualité en forêt privée, et de performances insuffisantes de la filière de transformation.

Les pouvoirs publics doivent favoriser le développement d'une industrie du bois matériau, ainsi que la captation pérenne de carbone biosourcé par l'industrie, afin d'accompagner l'accroissement des usages vertueux du bois, tout en captant un maximum de plus-value en France (Recommandation n° 6), et retarder les émissions de CO_2 résultant de sa combustion. Alors que la

100 IGN-FCBA, « *Projections des disponibilités en bois et des stocks et flux de carbone du secteur forestier français, Rapport d'étude* », mai 2024, consultable en ligne, p. 30.

France consacre des milliards d'euros à la promotion des énergies solaires et éoliennes, dont les composants sont largement importés, elle ne se fixe aucun objectif ambitieux pour le développement d'une industrie nationale du bois construction ni pour le soutien à son développement. Il faudra néanmoins veiller à ce que tout redéploiement des aides vers d'autres utilisations du bois que la chaleur puisse assurer l'équilibre du modèle économique de la sylviculture et de son caractère durable.

La filière bois française se développe avec l'appui de la troisième surface forestière européenne qui couvre plus de 30 % du territoire.

Mais, malgré ses atouts, elle **n'a pas réussi à engendrer une dynamique de croissance forte : les échanges extérieurs sont profondément déséquilibrés et le secteur pâtit d'un déficit commercial chronique (6 milliards d'euros)**. Ce déficit est principalement porté par l'ameublement (meubles en bois) et les articles en papier-carton. La filière, qui continue à faire face à d'importantes difficultés (concurrence internationale, crise du bâtiment…), doit progresser plus avant dans sa structuration pour contribuer notamment à la transition écologique du secteur de la construction et à la lutte contre le changement climatique.

Le secteur de la construction doit notamment être encouragé à construire avec du bois. La récente RE 2020 (RE pour réglementation environnementale qui remplace la réglementation thermique RT 2012) en imposant un critère d'émissions globales des constructions sur l'ensemble du cycle de vie va encourager à la décarbonation de la construction. Elle est entrée en vigueur en 2022 et il est trop tôt pour en mesurer les effets. D'autant que les freins sont multiples : formation des architectes et des entreprises ; qualification des procédés constructifs ; assurances, etc. On peut en outre se demander si les paramètres retenus sont suffisamment incitatifs. Un retour sur les conséquences de cette RE 2020 devra être fait régulièrement.

Ces considérations renforcent d'ailleurs la pertinence de la méthode présentée ci-après : l'objectif n'est pas tant d'utiliser au maximum les ressources disponibles en biomasse bois, comme cela est sous-jacent à la plupart des études et à la SNBC, que d'améliorer la contribution de la

filière forêt-bois à la réduction des émissions nettes de dioxyde de carbone en utilisant tous les leviers possibles, depuis la photosynthèse qui fixe du carbone atmosphérique jusqu'à la substitution de bois à des matériaux mobilisant les énergies fossiles, sans oublier la séquestration en matériau. Le principe de l'utilisation en cascade ne suffit pas, car il est largement respecté en France par insuffisance de l'industrie du bois ; ce qui conduit à ce que ⅔ du bois récolté[101] (et beaucoup plus pour les feuillus) parte directement en énergie, alors même qu'il pourrait être valorisé en matériaux ou en matière première pour l'industrie… Avec un effet pervers des politiques publiques actuelles : l'incitation à produire plus de bois énergie risque de décourager les industriels qui voudraient lancer des usages plus vertueux du bois.

2.1.5. POURQUOI NE PAS TENIR COMPTE DU RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE WDE LA BIOMASSE UTILISÉE

Certains économistes de l'énergie attachent de l'importance au rendement énergétique de la biomasse récoltée. Ils définissent le *Energy Return on Investment* (EROI) comme le rapport entre le contenu énergétique de la biomasse utilisable rapporté à l'énergie requise pour en disposer (transport, séchage, transformation, etc.) Le calcul du EROI soulève différents problèmes méthodologiques notamment sur[102] :

- la prise en compte des coproduits ; si une biomasse forestière est récoltée avec la finalité « bois d'œuvre », faut-il imputer au bois énergie ou au bois industrie résiduel une quote-part de l'énergie nécessaire à la récolte et au transport ? Ces co-produits qui sont généralement fatals n'ont généralement pas d'autre usage que la combustion.

- si l'apport d'énergie est nécessaire dans le process, faut-il distinguer selon que cette énergie est un apport externe ou est issue de la biomasse transformée ?

101 Mission, p. 25.

102 Voir l'entrée Wikipedia « Energy return on investment » pour une présentation des principaux problèmes méthodologiques.

– plus généralement, une difficulté cachée est l'attribution des coûts (énergie, engrais) et des impacts (CO_2) entre les différentes sorties (alimentaire, chimique et énergétique), en particulier lorsque la sortie alimentaire est prioritaire et intangible.

Une récente publication donne un intéressant éclairage sur ces problèmes de méthode[103]. À titre d'illustration, les auteurs de cette étude estiment quelques EROI ci-après :

Tableau 3 : Quelques ordres de grandeur de EROI - Il s'agit de ratio sans unité.

Copeaux de bois	170
Granulés issus de bois secondaires (produits de scierie)	4 à 6
Carburants liquides produits par gazéification de bois tendres et méthanation sans apport d'hydrogène (source conifères)	15
Carburants liquides produits par gazéification de bois tendres et méthanation avec apport d'hydrogène (source conifères)	5

Mais ces évaluations sont très discutables : le EROI des copeaux de bois apparaît élevé ; mais cela résulte très largement des imputations de l'énergie requise (collecte du bois, transport, etc., entre coproduits). Et les copeaux ne permettent pas de faire rouler les voitures ni voler les avions.

Certains auteurs estiment qu'un process de transformation est inacceptable si le EROI est inférieur à ~5[104], en se fondant sur la quantité de ressources primaires requises pour obtenir un produit valorisable.

Compte tenu des nombreuses difficultés de méthodologie et d'obtention de données fiables, le présent rapport ne retient pas le EROI comme élément déterminant d'un ordre de mérite.

103 Colla *et al.*, « *Estimating the energy return on investment of forestry biomass : Impacts of feedstock, production techniques and post-processing* », Global Change Biology Bionenergy, 2024, consultable en ligne.

104 E. Mearns, « *ERoEI for beginners* », 2016, consultable en ligne.

2.1.6. LES CRITÈRES NON OU DIFFICILEMENT MONÉTISABLES

Les conséquences sur l'environnement de l'exploitation de la biomasse ne se limitent pas au stock de carbone. Elles concernent la biodiversité, le maintien de la qualité des sols, la ressource en eau, la qualité paysagère, etc.

Dans le cas du bois, se rajoutent les questions des émissions de particules fines (voir tribune de médecins[105] ou encore actions de la puissance publique et de collectivités territoriales (vallée de l'Arve[106]; Lyon[107]; Grenoble[108]) et des émissions de composés organovolatils (COVNM)[109].

Le bois bûche est responsable d'environ ⅔ des particules fines PF2.5 en France et sa contribution à cette pollution est significativement supérieure à celle des moteurs Diesel. Les émissions de COVNM pour le chauffage des bâtiments résidentiels représentent ~15 % du total national tous secteurs confondus (Citepa, Secten 2024); elles proviennent majoritairement de l'usage du bois et sont environ trois fois supérieures à celles du secteur des transports (Figure 13).

En France, le label Flamme verte, promu par les pouvoirs publics, encourage la réduction des émissions de particules fines et de COVNM; il permet de mieux informer les consommateurs. Les normes d'émissions des poêles à bûches sont sensiblement plus élevées que celles des poêles à granulés; ils bénéficient cependant des mêmes aides publiques, alors que les premiers, tout en respectant les normes qui leurs sont applicables sont significativement plus polluants que les seconds au regard de différents critères (émissions

105 « *Un collectif de médecins appelle à cesser de subventionner le chauffage au bois* », Transitions & Energie, octobre 2024, consultable en ligne.

106 Actions-de-l-Etat/Prevenir-le-risque-et-se-proteger/Air/PPA-de-la-vallee-de-l-Arve/

107 Encadrement du chauffage au bois | DREAL Auvergne-Rhône-Alpes qui interdit les poêles antérieurs à 2002 et les foyers ouverts même d'agrément

108 Interdiction des cheminées à foyer ouvert dans l'agglomération grenobloise.

109 Citepa, « *Rapport Secten* », 2024, consultable en ligne.

de particules fines, de composés organo-volatils, etc.)[110]. La Commission européenne a entrepris de réglementer sur ce sujet[111]; mais ses propositions sont loin de faire consensus. La combustion directe du bois bûche est en effet particulièrement bon marché. *A minima*, la combustion en foyer ouvert devrait être réservée à des usages très occasionnels et d'agrément du fait de son très faible rendement et de son haut niveau de pollution[112].

Les fuites de méthane consécutives à la production de biomasse méthanisable participent au réchauffement climatique[113], même si les fuites les plus importantes semblent liées au gaz fossile[114].

La consommation d'eau est également un paramètre sensible et non monétisable. Maintenir un niveau à peu près régulier de CIVE d'été dans une tendance générale au réchauffement climatique requiert le recours à l'irrigation pour ces productions[115]; ce qui rend non justifiable leur prise en compte pour les quantités substantielles nécessaires dans les perspectives de production élevée de biométhane proposée par l'Ademe ou la SNBC 3.

Ces critères, utilisés partiellement dans la méthode, ne sont pas aisés à intégrer, et doivent être traités à l'aide de considérations qualitatives basées sur des sources scientifiques et institutionnelles fiables et récentes.

110 Selon le label Flamme Verte, le plafond des émissions « particules fines + COVNM » est trois fois plus élevé pour les poêles à bûches que pour les poêles à granulés. Cependant, pour des appareils de même puissance et tout en restant dans les limites, les appareils du même fournisseur peuvent présenter des écarts plus importants. Par exemple pour PF + COVNM : 1) Godin 9 kW « County Buches » vs Talisman Granulés » : Facteur 6 ; 2) TurboFonte 9 kW VOR R 9 kW vs. Rio Acier Facteur 7 ; etc. Toutes données sur le site Le label Flamme Verte.

111 Voir l'article « *L'interdiction controversée des poêles à bois est reportée* », Euractiv, février 2025

112 Au sein du secteur résidentiel, les particules totales en suspension (TSP) proviennent principalement des inserts bûches (à 46 %), des poêles à bûches (à 23 %), mais également encore des foyers ouverts à hauteur de 18 %.

113 Voir « *Méthanisations : au-delà des controverses, quelles perspectives ?* », Rapport d'information n° 872 (2020-2021) de M. Daniel Salmon, consultable en ligne.

114 Voir cet article sur le site de l'ONU. Affirmation valable en mettant de côté les enjeux liés à l'élevage.

115 Challet F. et Fourny A., « *La biomasse : une énergie intermittente à horizon 2050 ?* » Mémoire de troisième année du Corps des Mines sur les usages de la biomasse provenant de l'agriculture et de la forêt, 2023, consultable en ligne.

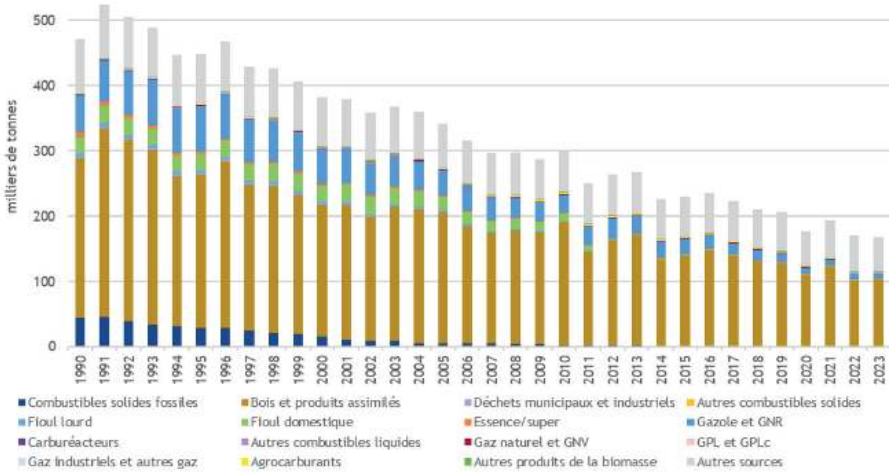


Figure 13 : Les particules fines 2.5 ; environ 60 % proviennent du bois. France (source Citepa Rapport annuel 2024)

2.2. APPLICATION DE LA MÉTHODE À LA BIOMASSE SOLIDE

Le problème posé est le suivant : on dispose de biomasse « solide » - plus précisément, lignocellulosique, issue des forêts, de l'agroforesterie, voire de certains résidus de culture propices à la combustion, faut-il l'utiliser pour du chauffage individuel, la production de biocarburants d'aviation, celle de la chaleur industrielle, de la chaleur collective via des réseaux de chaleur, ou de l'électricité ?

Selon la méthode proposée, on commence par considérer les alternatives décarbonées pour chacun de ces secteurs. Pour rappel (partie 2.1.3), l'hypothèse de décarbonation parfaite resterait à affiner, autant pour la biomasse que pour certaines alternatives. Autre rappel : le travail qui suit utilise des données parcellaires. Son amélioration suppose un travail quantitatif préalable (voir Recommandation n° 5). Une revue bibliographique plus systématique serait également utile. Les conclusions principales ci-après apparaissent cependant robustes.

Les usages de la biomasse solide pour produire du biogaz (pyrogazéification, par exemple, ou méthanisation pour certains résidus de culture) rejoignent l'analyse biogaz, et seront donc analysés dans la section 2.3.

2.2.1. Existence d'alternatives

2.2.1.1. Alternatives décarbonées à la chaudière bois pour un particulier[116]

Il existe une solution alternative (pompe à chaleur avec isolation) dont le coût d'abattement est proche (220 €/tCO_{2e}) de celui de la biomasse solide (chaudière à granulés avec isolation - entre 170 et 210 €/tCO_{2eq})[117].

Par ailleurs, les coûts actualisés (*Levelised costs*) de la chaleur produite par la biomasse en granulés et par une pompe à chaleur sont du même ordre de grandeur : 125 à 163 € TTC/MWh pour la chaudière à granulés, contre 117 à 147 € TTC/MWh pour la PAC air/eau, et 187 à 221 € TTC/MWh pour la PAC air/air (estimation Ademe)[118].

Enfin les conséquences environnementales de l'usage des PAC et la sobriété énergétique qu'elles permettent (coefficient de performance atteignant 4) sont des externalités positives significatives à prendre en compte. Cependant des politiques d'accompagnement devront être mises en place.

2.2.1.2. Alternatives aux biocarburants 2G pour l'aviation

Les technologies de production de biocarburants 2G pour l'aviation (ou bioSAF)[119] à partir de biomasse cellulosique ont des TRL (*Technology*

116 On prend le cas de la chaudière à granulés. Les chiffres sont issus du « *Baromètre de la décarbonation. Comment décarboner en profondeur et sans tarder le bâtiment, les transports et l'industrie ?* » Carbone 4, 2018, consultable en ligne, p. 3.

117 Idem. La régionalisation de ces données ne devrait pas changer profondément les ordres de grandeur. La méthodologie de l'étude n'est pas explicitée, mais on peut penser que la perte de rendement à charge partielle des chaudières à biomasse, qui était sous-estimée à la date de l'étude, n'est pas prise en compte.

118 Ademe, « *Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France* », 2022, consultable en ligne, p. 13.

119 On n'aborde pas le transport terrestre, dont la décarbonation passe très majoritairement par les véhicules à batterie, sauf exception quelques cas comme les engins lourds de chantier (la priorité non nulle mise sur ce secteur au-delà des engins lourds par la SNBC 3 et la PPE3 semble surprenante, voir Annexe F. Il existe d'ailleurs au moins une excellente alternative à l'ensemble des transports terrestres : le fret ferroviaire, oublié des politiques publiques françaises). Le maritime est abordé plus loin.

Readiness Level) élevés, qu'il s'agisse de la voie Fischer-Tropsch[120] ou d'Alcool-to-Jet[121], ou même d'utilisation de déchets alimentaires ; l'étape à venir en France, déjà lancée, est celle de l'industrialisation[122]. Dans le monde, après une décennie de démarrage difficile, les premiers développements se concrétisent[123].

Une technologie alternative pour les biocarburants aériens 2G est envisageable avec les e-fuels (ou e-SAF pour « *sustainable aviation fuels* », synthèse directe de CO_2 biogénique ou capté dans l'air, et d'hydrogène), à des coûts d'abattement plus élevés, mais proches en ordre de grandeur : on a vu dans la partie 2.1.2 que le coût d'abattement des e-fuels se situerait autour de 300 €/tCO_2 ; la production de e-biocarburants à partir de biomasse avec addition d'hydrogène utilisant une base technologique proche de celle des carburants de synthèse, les bioSAF resteront moins chers grâce à l'apport de biomasse[124].

120 Mobilisée par exemple dans le projet BioTJet d'Elyse Energy (https://elyse.energy/nos-projets/biotjet), qui vise à s'implanter sur le bassin de Lacq (https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/implantation-lusine-biotjet-lacq-biotfuelr-prend-son-envol)

121 Via des technologies comme Futurol qui permettent de produire du bioéthanol et du biométhane. Le projet Nacre porté par Axens, également sur le bassin de Lacq a pour ambition de développer la première bioraffinerie lignocellulosique en France (https://www.arthez-de-bearn.fr/fileadmin/commune_arthez-de-bearn/uploads/1_accueil/1_actualites/20240719_NACRE_Declaration_intention.pdf, consulté le 19/12/2024).

122 Outre les deux projets BioTJet et Futurol cités ci-dessus, on peut citer le projet Ryam à Tartas, qui produira du bioéthanol cellulosique qui devrait servir à l'automobile et à l'aviation : (https://www.usinenouvelle.com/article/a-tartas-la-bioraffinerie-de-ryam-se-prepare-a-la-fabrication-de-bioethanol-cellulosique.N2131341, consulté le 19/12/2024), ou le projet de la société Haffner Energy dans la Marne pour la production de « kérosène vert » via un procédé de thermolyse (https://www.haffner-energy.com/wp-content/uploads/saf-zero-cp-final-fr.pdf, consulté le 19/12/2024)

123 Voir l'article très construit sur l'éthanol cellulosique du « *Chemical & engineering news* » https://cen.acs.org/business/specialty-chemicals/ethanol-fuel-low-carbon-future/101/i6 - 12/02/2023 - consulté le 19/12/2024.
Voir aussi l'état des projets en 2023, Académie des technologies, « *Proposition d'une "feuille de route 2035" pour le développement des e-carburants* », novembre 2023, consultable en ligne.

124 Peu de littérature précise à ce sujet. Voir notamment Académie des technologies, « *La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables* », 2023, consultable en ligne, p. viii et 82, ou les travaux sur le biodiesel 2G (Fischer-Tropsch) issu du travail de France stratégie, « *Les coûts d'abattement. Partie 2 - Transports* », 2021, consultable en ligne, p. 65 : les biodiesels 2G (plutôt pour véhicules donc) sont estimés entre 300 (avec coûts actuels) et moins de 200 (avec baisse des coûts) €/tCO_2.

Cependant, les e-fuels nécessitent encore un progrès de certaines technologies (capture CO_2, électrolyse haute température), et ne pourront pas être déployés à l'échelle industrielle avant 2035. Sur le plan technologique, les voies e-SAF et e-bioSAF (c'est-à-dire bioSAF avec apport d'hydrogène) présentent des synergies importantes vis-à-vis de l'intégration système des réacteurs Fischer-Tropsch, des unités de distillation et de craquage des hydrocarbures et, enfin, de la puissance élevée d'électrolyseurs. Le passage par la biomasse pour accompagner la maturation des carburants de synthèse e-SAF serait une bonne solution. En revanche, à partir de 2035 - c'est-à-dire une fois les e-fuels développés -, une limitation à l'utilisation de la biomasse pour produire des bioSAF ou e-bioSAF sera pertinente.

Une étude plus fine des coûts d'abattement des différentes modalités de production de biocarburants 2G (via Fischer-Tropsch et Alcohol-to-jet notamment, voir la figure 6) serait utile, mais ne changerait pas l'évidence : il n'y a pas d'alternatives au recours à la biomasse solide pour atteindre à l'horizon 2035 les exigences d'incorporation de kérosène décarboné fixées par l'Union européenne. Nos Académies restent agnostiques sur la meilleure solution technologique, considérant que la diversité des technologies reste à ce stade une opportunité, et que la France dispose de vrais atouts dans ce domaine.

L'application stricte de notre méthode doit ensuite conduire à comparer les usages e-fuels aux alternatives d'autres usages, ce qui sera discuté dans la section 2.2.3. (par manque de données).

Il est par ailleurs évident, et cela vaut pour l'ensemble des secteurs, mais en particulier pour l'aviation, que la sobriété reste la première nécessité[125].

2.2.1.3. Alternatives à la biomasse solide pour la chaleur basse température dans l'industrie

Le bois énergie n'est que très marginalement utilisé pour générer de la chaleur haute température, notamment parce que sa capacité à fournir

125 Voir Académie des technologies, « *Matières à penser sur la sobriété. Synthèse du séminaire 2022 de l'Académie des technologies* », 2023, consultable en ligne.

de la chaleur à une température supérieure à 1000 °C est limitée[126]. Le gaz naturel (et donc potentiellement le biogaz, voir ci-après) offre une alternative généralement plus intéressante et moins chère, qui vaut également pour les usages à moyenne température.

Le bois énergie peut être mobilisé pour des usages basse température (<150 °C). Or, il existe des alternatives, dont des pompes à chaleur, qui permettent de monter la température jusqu'à 150 °C et qui peuvent convenir aux industries basse température comme l'agroalimentaire, l'industrie papetière ou certaines chimies. D'après Carbone 4[127], les coûts d'abattement de la pompe à chaleur pour l'industrie sont même négatifs, ce qui en fait des dispositifs particulièrement intéressants.

Si on considère les exemples cités par l'Ademe[128] d'activités industrielles qui ont été décarbonées par l'utilisation de biomasse solide, on constate que les projets :

- sont essentiellement dans l'agroalimentaire ou le papier/carton/bois, avec une valorisation *in situ* de produits connexes ;

- pour les autres secteurs (automobile, aéronautique, etc.), il s'agit surtout de décarboner le chauffage des bâtiments ou la production d'eau chaude sanitaire, pour lesquelles il existe également des alternatives via les pompes à chaleur collectives (sans même parler d'isolation, qui ne semble pas avoir été associée systématiquement aux projets).

On conclut d'après notre méthode que dans ces cas (hors filière papier/carton/bois qui mériterait un travail spécifique), la biomasse ne devrait pas

126 Julio Friedman, Zhiyuan Fan et Ke Tang, « *Low-carbon heat solutions for heavy industry : sources, options, and costs today* » Chromalox ; octobre 2019, consultable en ligne, p.14.

127 Carbone 4, « *Baromètre de la décarbonation. Comment décarboner en profondeur et sans tarder le bâtiment, les transports et l'industrie ?* », 2018, consultable en ligne, p.13. La référence est une chaufferie au gaz, dont les coûts sont cependant comparables avec ceux de la biomasse solide d'après l'Ademe, « *Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France* », 2022, consultable en ligne, p.20. Voir aussi l'article récent (janvier 2025) de Carbone 4 sur les usages de la chaleur : https://www.carbone4.com/faq-chaleur-decarbonation.

128 Ademe, « *54 exemples d'installation biomasse en entreprise, production de chaleur biomasse* », 2018, consultable en ligne.

être utilisée pour la production de chaleur industrielle basse température, sauf exception dûment justifiée (et dans ce cas, privilégier des unités en cogénération électricité/chaleur, afin de minimiser l'énergie primaire consommée).

2.2.1.4. Alternatives à la biomasse solide pour la production de chaleur collective et tertiaire via des réseaux de chaleur

Il existe plusieurs alternatives décarbonées aux usages de la biomasse solide pour la production de chaleur collective et tertiaire via des réseaux de chaleur :

- la géothermie déjà mature, mais peu développée, dont la géothermie à recharge active intersaisonnière[129]. La géothermie standard présente d'ailleurs des LCOE du même ordre que ceux de la biomasse solide[130]. Les gisements identifiés par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) sont d'environ 100 TWh annuels, et de 25 TWh pour la métropole du Grand Paris, soit la moitié de ses besoins en chauffage, en eau chaude sanitaire et en climatisation[131] ; il s'agit cependant de ressources et non de réserves au sens minier ;

- les pompes à chaleur (avec ou sans géothermie) ;

- la chaleur fatale industrielle ;

- le solaire thermique, qui semble néanmoins présenter des coûts supérieurs aux autres alternatives[132] ;

- les petits réacteurs nucléaires calogènes, dont le TRL est plus bas que les solutions précédentes.

129 Voir le rapport de l'Académie des technologies, « *Le stockage intersaisonnier de chaleur : un atout pour le climat et la souveraineté* », décembre 2023, consultable en ligne.

130 Ademe, « *Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France* », 2022, consultable en ligne, p. 17.

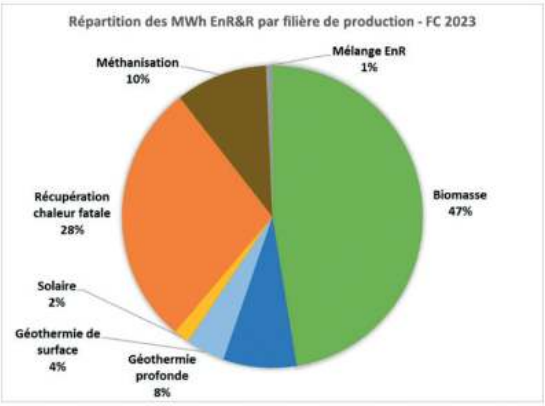
131 Rappelé dans le cahier d'acteur de l'Académie des technologies, « *Sobriété énergétique ou technologies nouvelles ?* », novembre 2022, consultable en ligne.

132 Ademe, « *Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France* », 2022, consultable en ligne, p. 17.

L'existence d'alternatives matures suggère donc d'éviter de mobiliser la biomasse solide pour alimenter les réseaux de chaleur. Ce point mériterait d'être précisé avec un calcul précis des coûts d'abattement, dont on ne dispose pas[133].

Le fonds chaleur : des transformations à envisager

Géré par l'Ademe, le Fonds chaleur participe au développement de la production de chaleur, dans une optique de mobilisation des sources renouvelables locales. Il ne finance pas les particuliers, mais les industriels, les entreprises ou les collectivités. La biomasse y est mobilisée au titre de plusieurs des « filières » du Fonds : réseaux de chaleur, biomasse solide pour les entreprises et les industriels, ou méthanisation.



133 Carbone 4, « *Baromètre de la décarbonation. Comment décarboner en profondeur et sans tarder le bâtiment, les transports et l'industrie ?* », 2018, consultable en ligne, p. 3. Le coût d'abattement est estimé à 120 euros/tCO_{2eq}, contre le double pour les pompes à chaleur ou la chaudière bois individuelle ; le mix énergétique du réseau n'est toutefois pas précisé.

Le bilan 2023 permet d'ailleurs de voir que la biomasse y représente une majorité (en comptant la méthanisation) des MWh soutenus par le Fonds (601 M€ engagés en 2023)[134]. En lien avec les éléments précédents, ce Fonds chaleur mérite d'être repensé pour :

- favoriser les solutions type géothermie, alternatives vertueuses à la biomasse (*a minima* dans un mix géothermie/chaufferie biomasse). L'Ademe le formule déjà dans son bilan 2023 : « L'accélération des projets de géothermie profonde et de surface est un axe prioritaire pour 2024 avec le lancement d'un plan d'actions qui regroupe vingt-sept actions prioritaires en France métropolitaine et d'outre-mer » ;

- ne pas soutenir (ou pas uniquement) les usages « chaleur » de la biomasse énergie, mais également les autres usages dont il aura été montré (via notre méthode) qu'ils peuvent prétendre à l'accès à la ressource (par exemple biocarburants). À ce titre, un Fonds « biomasse énergie » ferait sens, dédié à optimiser l'usage de la biomasse énergie, tout en faisant attention à la soutenabilité à long terme de la ressource et du modèle économique des sylviculteurs.

2.2.1.5. Alternatives à la biomasse solide pour la production d'électricité

Il n'est pas pertinent de construire ou transformer d'anciennes centrales à charbon en centrales électriques à biomasse solide, et encore moins d'en construire de nouvelles. Si l'on suit la méthode proposée, la raison en est simple : il existe évidemment de nombreuses alternatives pour la production d'électricité.

L'exemple récent des déboires de la reconversion de la centrale de Gardanne vient conforter cette analyse : importations massives de bois du Brésil malgré les engagements initiaux[135], approvisionnements insuffisants malgré les importations (850 000 tonnes par an initialement, revu à 450 000 tonnes

134 https://www.ademe.fr/presse/communique-national/bilan-2023-du-fonds-chaleur/

135 Voir l'article de MarsActu en date du 10 octobre 2023.

récemment[136]), sans mentionner les risques de pollution locale en particules fines et les transports massifs du combustible bois. L'étude d'impact de son approvisionnement par du bois d'origine française a été jugée insuffisante par le Conseil d'État[137].

Une idée serait de réserver la biomasse à la production d'électricité de pointe. Les alternatives envisageables sont les suivantes, discutées de manière qualitative en l'absence de données chiffrées suffisamment fiables identifiées :

- des technologies de stockage hydrauliques : elles sont déjà socles pour la production électrique de pointe en France, et représentent donc à ce titre une alternative crédible. Toutefois, l'urgence semble être la modernisation et l'accroissement de capacité par rehaussement de barrages existants, tandis que la possibilité de construire de nouvelles infrastructures en France reste très limitée ;

- batteries de stockage : les technologies se développent, mais le déploiement à l'échelle industrielle sera pour 2030/2035 au mieux et elles ne pourront économiquement faire mieux qu'assurer un lissage des variations diurnes-nocturnes ;

- centrales à gaz et système de captage de carbone : la solution pourrait s'avérer efficace et peu coûteuse, mais n'est pas encore prête industriellement ;

- centrales à gaz utilisées avec du biogaz (voir plus loin).

Les enjeux de production d'électricité de pointe, dans un contexte plus général de production électrique en transformation majeure avec l'arrivée des énergies renouvelables intermittentes, mériteraient un rapport spécifique. L'utilisation de biomasse solide pour la production d'électricité de pointe pourrait contribuer marginalement au mix des solutions mentionnées plus

136 Selon les informations d'Actu-Environnement en date du 26/11/2024, article en ligne consulté le 19/12/2024.

137 Décision n° 450135 - Conseil d'État du 27/03/2025

haut, d'autant que c'est une solution déjà mature. Toutefois, les enjeux de gestion durable et l'existence d'alternatives, notamment l'hydraulique et les centrales à biogaz également déjà matures, ou encore les faibles rendements (25 % sans cogénération), doivent conduire à une extrême prudence dans le déploiement d'une telle solution. La puissance de tels projets doit rester limitée (pour éviter de consommer trop de biomasse localement), et pourrait être discutée dans des zones spécifiques (outre-mer par ex.).

L'Académie des technologies et l'Académie d'agriculture recommandent d'éviter, sauf exception, le déploiement de telles unités, qui sont aujourd'hui marginales (moins de 10 % de l'utilisation chaleur de la biomasse)[138] et doivent le rester. La directive RED III interdit d'ailleurs d'aider des installations exclusivement électriques, sauf exception (notamment régions ultrapériphériques).

2.2.2. Vérification des ordres de grandeur

En toute rigueur, la méthode proposée plus haut impliquerait de comparer les coûts d'abattement des différents usages sans alternative équivalente (essentiellement les e-fuels et les usages industriels donc) vus plus haut et de prendre en compte leurs différences ; on ne le fait pas par manque de données, et on passe directement aux ordres de grandeur, avant de revenir à ce point en section 2.2.3.

Concernant les biocarburants pour l'aviation, un rapport précédent de l'Académie des technologies[139] estimait qu'en prélevant environ 10 % de la ressource en biomasse française, une production de e-bioSAF d'environ 1,8 million de tonnes serait possible, soit l'équivalent de 22 TWh de biokérosène, répondant aux exigences de décarbonation de la Commission européenne à horizon 2035 (avec une production minoritaire via la voie oléochimique dont le potentiel restera très limité). Ce chiffre actualisé avec

138 Voir les statistiques 2022 du ministère de la Transition écologique en ligne.

139 Académie des technologies, « *La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables* », 2023, consultable en ligne, p. 8 et Académie des technologies, « *Proposition d'une "feuille de route 2035" pour le développement des e-carburants* », novembre 2023, consultable en ligne, voir Annexe I.

les données issues du chapitre 1 donne un ordre de grandeur semblable ; ce prélèvement pourrait monter jusqu'à 15/20 % si l'on regarde la seule biomasse lignocellulosique mobilisable pour la combustion ou les biocarburants 2G[140]. Ce n'est qu'un ordre de grandeur (vu l'incertitude très forte sur le sujet)[141].

L'industrie aéronautique (et maritime, voir la partie 3) demandera sans doute une part plus importante de la ressource pour poursuivre sa décarbonation après 2035, si les biocarburants restent moins coûteux que les e-fuels. Si la méthode justifie de leur réserver une part de la biomasse, dans une optique de passage aux e-fuels à partir de 2035, une vigilance sera de mise pour s'assurer que ces bornes ne sont pas dépassées. Cette vigilance devra être particulièrement forte dans les zones réputées pour le fort potentiel en biomasse, et où les producteurs de biocarburants pourraient vouloir concentrer leurs installations (forêt des Landes par exemple). L'apport d'hydrogène, inclus dans nos estimations, pourra éviter de devoir mobiliser encore plus de biomasse.

La SNBC 3, en consultation au premier trimestre 2025, distingue pour l'industrie plusieurs segments d'utilisation énergétique de biomasse solide :

- 15 TWh de « biomasse solide » (2022) : le détail n'est pas explicité, mais on peut supposer qu'il s'agit de « combustion » et donc de chaleur ;

- 20 TWh de « chaleur vendue » (2022) dont il n'est pas précisé l'origine ; on peut supposer qu'elle pourrait être produite en partie par de la biomasse solide.

Pour rappel, le potentiel en biomasse lignocellulosique pour l'énergie est d'environ 130 TWh (voir Chapitre 1).

Compte tenu des éléments précédents qui montrent qu'il n'existe que très peu de cas où l'utilisation du bois énergie n'a pas d'alternative pour

140 22 TWh de besoin/(85+16+15+31/2) TWh de potentiel = environ 17 %. Le potentiel au dénominateur est tiré du Tableau 1, en considérant que la moitié des résidus de culture ne sont pas méthanisés.

141 Ces chiffres incluent un apport d'hydrogène ; il serait doublé sans. Le débat bioSAF vs e-bioSAF mériterait des développements dédiés.

la production de chaleur industrielle basse température, il apparaît qu'une quantité suffisante de biomasse solide serait disponible pour ces usages - en mettant de côté du raisonnement les usages actuels. C'est moins clair en maintenant les usages chaleur à leur niveau actuel.

Les autres usages de la biomasse solide (chaleur pour les particuliers, chaleur pour tertiaire et résidentiel collectif, électricité, même en cogénération) disposent d'alternatives crédibles.

Selon ces ordres de grandeur, et en cas de diminution des usages actuels avec alternative, il resterait même de la marge pour des usages de la biomasse solide et pour une gestion optimisée de la forêt :

- il convient de favoriser les enjeux de gestion durable des forêts et matériaux. Le biochar représente également une alternative intéressante, et fait l'objet d'un travail en cours de l'Académie des technologies. Une étude de Carbon Gap[142] estime qu'un prélèvement d'environ 2 Mt sur la biomasse forestière est envisageable, qui pourrait être augmenté en limitant les usages combustion ;

- l'historique des projets récents recourant à la biomasse solide (chaufferies biomasse notamment) va continuer à avoir un impact pour les dix à vingt prochaines années, et donc contraindre la trajectoire : il ne s'agit pas d'interdire aux chaufferies biomasse construites ces dernières années de fonctionner.

Ces considérations à l'échelle nationale devront être complétées par des analyses régionales et locales. La vérification des ordres de grandeur des possibles transformations de la biomasse solide en biogaz, aujourd'hui très peu déployées, reste à faire.

142 Carbon Gap, « *Potentiel de déploiement des méthodes d'élimination du dioxyde de carbone atmosphérique en France* », 2024, consultable en ligne, tableau p. 51.

2.2.3. PRINCIPALES CONCLUSIONS

En raison de l'existence d'alternatives acceptables, sauf exception dûment justifiée, il faut maintenir dans les ordres de grandeur actuels les usages suivants de la biomasse solide :

- les chaufferies pour alimenter des réseaux de chaleur urbains (la caractérisation des alternatives dans ce rapport mériterait d'être affinée néanmoins) ;

- l'électricité sauf, et avec une extrême prudence, celle de pointe.

Compte tenu de l'existence d'autres usages plus pertinents de la biomasse solide, le chauffage au bois des particuliers ne devrait être soutenu financièrement que dans le cadre de logements bénéficiant d'une isolation raisonnable. Au vu de leur rendement médiocre et de leur pollution élevée (particules fines et COV), le remplacement des foyers ouverts par des poêles Flamme verte reste pertinent. Et bien sûr, il n'est pas question de mettre en cause par une politique nationale des pratiques locales comme l'affouage[143]. En revanche, le soutien national et systématique aux chaufferies biomasse et aux chaudières à granulés est à revoir.

Au contraire :

- l'aviation doit pouvoir prétendre à une part raisonnable de la biomasse solide (jusqu'à 15 %). Cependant, tout soutien public en ce sens devrait n'être destiné qu'à des projets permettant à l'industrie des carburants durables de monter en compétences en vue d'un déploiement des e-SAF sans recours à la biomasse à l'horizon 2035. D'ici là les projet bioSAF pourront comporter l'incorporation d'hydrogène (e-bioSAF) pour préparer la technologie des e-SAF ;

143 Faculté donnée à un conseil municipal de réserver une partie des bois de la forêt communale à l'usage domestique des habitants. L'affouage est encadré par les articles L.243-1 à 3 et R.243-1 à 3 du Code forestier.

– les usages industriels capables de démontrer une absence d'alternatives à la biomasse solide doivent être privilégiés, d'autant qu'ils devraient rester marginaux (hors secteur bois/papier).

Notre méthode ne permet pas de discriminer entre ces deux types d'usages, ainsi qu'au sein de ces usages (Fischer-Tropsch ou Alcohol-to-Jet ; process industriel précis). L'analyse des ordres de grandeur montre qu'ils ne devraient pas être incompatibles, mais une construction plus fine des coûts d'abattement reste à produire pour pouvoir appliquer la méthode (voir Recommandation n° 5).

L'ouverture de nouveaux marchés à la biomasse solide (bioSAF, et industrie dans une moindre mesure) ne doit pas être verrouillée par des contrats à long terme pour sa conversion en granulés : la puissance publique doit y veiller.

Par rapport à l'ordre de mérite de la PPE3 en consultation, on peut noter que :

– on retrouve bien l'industrie pour la chaleur haute température dans les « usages à considérer en priorité » - même si concernant la biomasse solide ces usages sont marginaux -, et le classement non prioritaire de la production d'électricité ;

– en revanche, la PPE3 classe au même niveau le « trafic aérien (domestique et international) » et le « résidentiel et tertiaire - biomasse solide pour chauffage et ECS performants » dans les « usages à développer raisonnablement et sous conditions ». Or, d'après notre analyse, et sans préjuger des enjeux d'acceptabilité, la biomasse solide pour le résidentiel et le tertiaire, même via des appareils performants, devrait voir son importance se réduire à horizon 2050 ;

– les « réseaux de chaleur » sont bien classés dans la SNBC 3 au prétexte qu'il n'existerait pas d'alternatives pour décarboner le mix de chaleur. Cette conclusion est discutable.

2.3. Application de la méthode au biométhane

On se pose maintenant la question : on dispose de biométhane ; faut-il l'utiliser pour chauffer les particuliers, pour la propulsion maritime, la production de chaleur industrielle, ou encore d'électricité de pointe ?

Le biométhane peut être produit à partir de biomasse méthanisable, mais également par d'autres procédés comme la pyrogazéification suivie de méthanation (voir la figure 6) : toutefois, ces procédés sont moins matures industriellement. Ce rapport n'établit pas de hiérarchie de l'usage de la biomasse lignocellulosique entre chauffage, carburants liquides et méthanation, car les coûts de celle-ci sont encore un peu incertains. Cela reste un point fondamental qu'il faudra traiter, car cela signifie, si ces procédés s'industrialisent, qu'il faudra arbitrer, pour la biomasse lignocellulosique, entre les usages discutés dans la partie précédente, et un usage biogaz.

2.3.1. Existence d'alternatives

2.3.1.1. Alternatives à la chaudière biogaz pour un particulier

Il existe une solution alternative (pompe à chaleur avec isolation) dont le coût d'abattement est proche (220 €/tCO_{2eq}) de celui du biogaz en injection (chaudière à gaz avec isolation - entre 220 et 282 €/tCO_{2eq})[144].

En outre, les LCOE estimés par l'Ademe sur la base du gaz naturel sont du même ordre de grandeur : 104 à 188 € TTC/MWh pour la chaudière à gaz, contre 117 à 147 € TTC/MWh pour la PAC air/eau, et légèrement plus pour

144 Carbone 4, « *Développer la filière méthanisation en France. Quelle stratégie de développement pour optimiser les bénéfices économiques, sociaux et environnementaux ?* », 2015, consultable en ligne. Les chiffres datent, une actualisation serait nécessaire. On considère l'option « territoriale » la plus adaptée à la situation générale (les déchets donnent un coût d'abattement intéressant, mais on a vu en partie 1 que les ordres de grandeur sont réduits). Les chiffres Carbone 4 ne semblent pas considérer le rendement de la chaudière, très élevé pour une chaudière à condensation, mais qui peut vite baisser à 75 % pour des modèles plus anciens ou mal entretenus.

la PAC air/air avec 187 à 221 € TTC/MWh[145]. Cela signifie, vu les différences de prix entre gaz naturel et biogaz, que les LCOE à partir du biogaz seront supérieurs à ceux de l'alternative.

Cela suggère, conformément à notre méthode, de détourner les particuliers du chauffage au biogaz, même performant. Comme pour les chaudières individuelles à biomasse solide, il faudra des politiques d'accompagnement particulières pour les ménages modestes, avec un rythme de transition à définir, non discutés ici.

Un travail proche pourrait être mené pour les usages « cuisson » et « eau chaude sanitaire » du biogaz. Toutefois, si le réseau de biogaz ne peut être maintenu, il apparaît peu pertinent de maintenir des usages des ménages (cuisson, eau chaude sanitaire) au biogaz, d'autant que des doutes sur les effets du gaz en matière de qualité de l'air intérieur ont été émis récemment[146].

2.3.1.2. Alternatives à l'usage de bioGNV pour le maritime

Le maritime peut se décarboner à l'aide de biogaz naturel pour véhicules (bioGNV), ou des biofuels proches de ceux de l'aviation[147]. Le bioGNV est une solution intéressante, en ce qu'elle permet une transition par des navires au GNV (moins émetteur que le fioul lourd) avant décarbonation du carburant sans changer les navires eux-mêmes, dont les durées de vie sont de plusieurs décennies[148].

145 Ademe, « *Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France* », 2022, consultable en ligne, p. 13. Si ces coûts d'abattement issus de l'Ademe pouvaient être affinés, voire régionalisés, cela ne devrait pas transformer radicalement les ordres de grandeur.

146 À la suite d'une étude conjointe de l'ONG Clasp et de l'Alliance européenne pour la santé publique, voir https://respire-asso.org/la-pollution-issue-de-la-cuisson-au-gaz/

147 Comme le montre la figure 6, les biofuels hors GNV sont envisageables par méthanisation puis méthanolation (voie Alcohol-to-Jet). Cette voie semblant plus incertaine encore que la voie « biomasse solide » discutée précédemment, on ne la considère pas ici. Le rapport Solagro, « *Quelles biomasses pour la transition énergétique ?* », 2024, consultable en ligne, p. 21, indique que le TRL de la méthanolation est très bas. De même, les carburants d'aviation ne sont pas évoqués dans cette partie.

148 Et parce qu'elle est *a priori* « neutre » en carbone si elle vient de biomasse à courte durée de vie, quand des questions se posent pour les biocarburants 2G à partir de biomasse solide (voir Annexe G).

Plusieurs alternatives existent[149] :

- les e-fuels, selon le même principe que pour l'aviation. Il s'agit de la meilleure solution à partir de 2035, les biocarburants pouvant assurer la transition (sans changement de navire entre bio et e-carburants) ;

- l'hydrogène et l'ammoniac, qui sont décarbonés uniquement si leurs modes de production le sont. Ces technologies rejoignent la famille des e-fuels dans leur temporalité, et ne seront pas matures industriellement avant 2035 ;

- le transport électrique sera réservé à des navires de petite taille et sur de courtes distances ;

- la propulsion nucléaire, mature industriellement puisqu'utilisée par les navires militaires, ne paraît pas envisageable pour des raisons de réglementation (les mêmes règles de sûreté devraient s'appliquer dans tous les ports que le navire est susceptible de fréquenter, et sous un contrôle unique) et de sécurité alors que la sûreté dans le domaine du nucléaire civil relève du domaine régalien de chaque État ;

- les solutions véliques sont intéressantes, mais ne sont pas une alternative au sens où elles peuvent permettre une sobriété de 10 à 15 % (ce qui reste à démontrer), sans suffire à une décarbonation totale.

Comme pour l'aérien, l'absence d'alternative crédible avant 2035 suggère de mobiliser de la biomasse convertie en biogaz comme transition pour une montée en compétence vers les e-fuels, et notamment le bioGNV à base de biomasse méthanisable. Cela est d'autant plus justifié qu'une première phase de la décarbonation du transport maritime sera d'utiliser des propulsions au gaz naturel au fur et à mesure que les navires au fuel lourd atteindront leur fin de vie.

149 On s'appuie sur Carbone 4 et Bertin Energie Environnement, « *Le secteur maritime navigue-t-il vers la décarbonation ? Un état des lieux* », juillet 2019, consultable en ligne.

2.3.1.3. Alternatives au biogaz pour la chaleur haute température dans l'industrie

De nombreux procédés industriels mobilisent de la chaleur haute température grâce au gaz naturel. Sous réserve des quantités à mobiliser qu'on analysera dans la partie suivante et de coûts maîtrisés, la transition vers le biogaz est particulièrement propice en ce qu'elle évite de modifier l'appareil industriel (uniquement dans ce cas). D'autres alternatives existent, mais elles présentent toutes un certain nombre de limites :

– la combustion de l'hydrogène. Aujourd'hui largement produit par la technologie de reformage du méthane (*Steam Methane Reforming*) fortement carbonée. Outre les solutions de CCUS en appui du procédé SMR, l'hydrogène décarboné pourrait être produit par électrolyse de l'eau via une électricité décarbonée[150]. C'est là une bonne solution, mature ou presque, pour de nombreuses industries, par exemple celle de l'acier ; toutefois, son coût encore élevé, incluant la transformation de l'appareil industriel, contribue à retarder les transitions vers ce vecteur énergétique. On peut ainsi citer ArcelorMittal à Dunkerque, site responsable de 3 % des émissions françaises à lui tout seul, et dont la transformation est basée sur une réduction directe du minerai via l'hydrogène pour ne plus recourir au charbon ; ce projet est retardé[151]. Par ailleurs, l'usage de l'hydrogène ne pourrait décarboner que l'énergie requise pour la production de ciment (⅓ des émissions de la production de ciment) ; mais la production du clinker requiert la décarbonation du calcaire ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$) et donc la production de CO_2 que l'hydrogène ne peut éviter (⅔ des émissions) ;

150 La plasmalyse et l'hydrogène naturel sont deux autres solutions à étudier, mais peu matures. Il faut absolument étudier le potentiel de l'hydrogène naturel, comme cela est stipulé dans l'avis de l'Académie des technologies, « *Accélérer la caractérisation de la ressource et l'exploration de l'hydrogène naturel en France* », juin 2024, consultable en ligne.

151 Voir cet article des Echos du 23/11/2024, https://www.lesechos.fr/industrie-services/industrie-lourde/arcelormittal-retarde-son-projet-dacier-decarbone-a-dunkerque-2133495, consulté le 20/12/2024

- l'électricité permet également d'atteindre des températures très élevées (plus de 1800 °C avec des innovations récentes[152]), et la France avec son énergie nucléaire décarbonée doit en profiter[153];

- l'énergie nucléaire calogène via de petits réacteurs nucléaires, solution intéressante qui est proche de la maturité, mais serait limitée à des températures moyennes (moins de 800 °C)[154], ce qui est insuffisant pour le verre, l'acier ou le ciment;

- le solaire thermique, dont certaines technologies peuvent atteindre 1200 °C[155].

Lorsque des installations industrielles utilisent aujourd'hui du gaz pour produire la chaleur haute température satisfaisant leurs besoins, une bonne solution serait de les alimenter en biogaz; là encore, une construction plus systématique des coûts d'abattement est nécessaire. Une autre solution intéressante en l'absence d'accès au biogaz pourrait être globalement une solution avec combustible fossile (typiquement le gaz naturel) accompagné de captage du carbone[156]; cette option va faire l'objet d'un rapport à venir de l'Académie des technologies. L'électrification, dès que possible, doit également être privilégiée. Une construction plus systématiques des coûts d'abattement est nécessaire pour discriminer entre ces usages industriels.

152 Julio Friedman, Zhiyuan Fan et Ke Tang, «*Low-carbon heat solutions for heavy industry : sources, options, and costs today*», Center on Global Energy Policy at Columbia University 2019, consultable en ligne, p. 22.

153 *Ibid.*, p. 52

154 *Ibid.*, p. 26

155 *Ibid.*, p. 28

156 Julio Friedman, Zhiyuan Fan et Ke Tang, «*Low-carbon heat solutions for heavy industry : sources, options, and costs today*», Center on Global Energy Policy at Columbia University 2019, consultable en ligne, p. 8.

2.3.1.4. Alternatives à la production électrique de pointe par cogénération

Nous avons vu dans la section 2.2.1.5 qu'il existe plusieurs alternatives, dont l'hydroélectricité, pour la production électrique de pointe[157]. Dans la mesure du possible, il convient de les privilégier et de les déployer. Toutefois, les centrales à gaz constituent aujourd'hui un dispositif important en France pour la production d'électricité de pointe. Les investissements sont réalisés et ce dispositif pourrait être décarboné via le biogaz. À ce titre, sans augmenter la puissance installée, il sera intéressant de conserver les centrales à gaz françaises en les alimentant en biogaz, celles-ci ayant notamment des mérites relatifs par rapport à la production électrique par biomasse solide :

- pas de conversion nécessaire, sinon la maintenance en état des installations ;
- des émissions de CO_2 inférieures, au regard de la combustion directe (16 kgC/GJ pour le gaz contre environ 30 pour le bois)[158] ;
- des pollutions atmosphériques moindres que les centrales à biomasse solide.

2.3.2. Vérification des ordres de grandeur

En toute rigueur, la méthode proposée plus haut impliquerait de comparer les coûts d'abattement des différentes alternatives vues plus haut et qui ne sont pas parfaitement équivalentes ou déjà matures (bioGNV, chaleur haute température dans l'industrie sans alternative, production électrique de pointe) ; on ne le fait pas par manque de données, et on passe directement aux ordres de grandeur, avant de revenir à ce point en section 2.3.3.

157 Comme pour la biomasse solide, vu le spectre important d'alternatives, il n'est pas pertinent de mobiliser le biogaz pour de la production électrique de masse. La Cour des comptes, dans son rapport « *Le soutien au développement du biogaz* », Rapport public thématique, mars 2025, disponible en ligne, émet par ailleurs des doutes sur l'intérêt de la cogénération pour les méthaniseurs, notamment agricoles (p.132 et suivantes).

158 Chiffres issus de Citepa, « La biomasse énergie est-elle neutre en carbone ? », 2020, consultable en ligne.

Concernant les soutes maritimes internationales au périmètre français, en l'absence d'alternatives et dans l'optique de respecter les réglementations européennes, on peut estimer leur besoin à horizon 2035 entre 3 TWh et 6 TWh équivalent[159]. Ce qui représente, si l'on considère que seul le bioGNV est mobilisé, entre 3 et 6 % du potentiel total en biomasse méthanisable selon les hypothèses considérées (3 ou 6 TWh, 73 à 100 TWh de potentiel).

Concernant l'industrie, la SNBC 3 en consultation estime :

- la consommation énergétique en gaz naturel et renouvelable en 2025 autour de 105 TWh, et autour de 95 TWh en 2030 ;

- La consommation non énergétique de gaz naturel et de biocarburants autour de 14/15 TWh en 2030…

Soit plus que l'ensemble de la ressource de biogaz (2050) estimée ! Des gains d'efficacité énergétique ou matière à horizon 2050 peuvent être envisagés. Mais avec des objectifs de réindustrialisation et des efforts passés importants de l'industrie, les ordres de grandeur devraient rester les mêmes. C'est principalement le recours aux alternatives discutées plus haut, en particulier l'électrification des process dès que possible et la capture du CO_2 dans les fumées industrielles qui permettraient de baisser la demande en biogaz pour l'industrie.

Enfin, la production annuelle d'électricité via du gaz naturel est aujourd'hui 30 TWh[160] ce qui requerrait 60 TWh de biogaz (énergie primaire).

159 Ces calculs sont tirés du rapport de l'Académie des technologies, « *Proposition d'une "feuille de route 2035" pour le développement des e-carburants* », novembre 2023, consultable en ligne p. 3 et Annexe I ; le potentiel à 6 TWh vient des chiffres de la SNBC 3 en consultation à 2030, extrapolé à 2035. Les réglementations européennes en question sont RefuelEUmaritime et ReFuelEUaviation.

160 RTE, Bilan électrique 2023

En ordre de grandeur, la totalité du potentiel de production de biogaz serait consommé par ces usages qui ne disposent guère d'alternatives. Trois pistes principales sont à envisager :

- une réduction des vitesses et une moindre croissance des transports maritimes ; plus d'efficacité énergétique dans l'industrie ;
- des alternatives au gaz dans l'industrie, à étudier spécifiquement (électrification et hydrogène, ou CCS) ;
- une limitation de l'usage du biogaz à la seule électricité de pointe.

Une vérification des ordres de grandeur des possibles transformations de la biomasse solide en biogaz, par méthanation, aujourd'hui très peu déployée, reste à faire.

2.3.3. Principales conclusions

Les grandes priorités d'usage du biogaz sont claires : les carburants maritimes, l'industrie (chaleur process), et l'équilibre du réseau électrique. Par rapport à l'ordre de mérite de la PPE3 en consultation (voir Annexe F) :

- le niveau d'études présenté ne permet pas de distinguer à l'horizon 2035 les mérites respectifs des biocarburants d'aviation et maritime, et de la chaleur haute température dans l'industrie, alors que la PPE3 en consultation propose une hiérarchie sans justifier ses propositions ;
- la PPE3 considère la production d'électricité de pointe comme étant à modérer, là où nous distinguons cette production selon qu'elle provient de la biomasse solide (et dans ce cas, elle est effectivement à modérer et même très fortement) ou du biogaz (et dans ce cas, elle est une alternative très pertinente pour les installations existantes) ;
- le nouveau classement de la PPE3 ne se positionne pas clairement sur l'utilisation du biogaz pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, alors que la méthode proposée dans ce rapport conduit à réduire ces usages, substituables par de l'électricité.

2.4. Conclusion du chapitre 2

On rappelle que ce rapport a comme objectif l'établissement d'un cadre et d'une méthode permettant d'établir un ordre de mérite des usages de la biomasse à un horizon de quelques décennies. Le cadre est constitué des trois piliers du développement durable ; il implique à ce titre les préalables de :

- sobriété énergétique ;
- utilisation en cascade des ressources, et priorité aux usages non énergétiques de la biomasse ;
- gestion durable de l'agriculture et des forêts (respect de la qualité des sols, de la biodiversité, de la ressource en eau ; maintien et si possible accroissement du puits de carbone.

La hiérarchie des usages esquissée ci-après reprend le cadre de la PPE3. Elle n'est proposée que pour rendre concrète l'application de la méthode, ainsi que ses limites à ce stade. Elle suggère un cap, mais pas une trajectoire. Les résultats obtenus ont vocation à être discutés et complétés, par des analyses plus fines, fondées sur des coûts d'abattement plus homogènes, et prenant en compte les externalités non discutées (voir Recommandation n° 5). Cependant, vu les différences quantitatives ou qualitatives constatées entre certains usages possibles, l'ordre de mérite paraît suffisamment solide pour être présenté. Il devra être affiné en particulier pour l'industrie, et il conviendra d'ajouter quelques usages non considérés ici (notamment autoconsommation de la filière bois).

Les trajectoires pour aller vers cette hiérarchie n'ont pas été évaluées par le groupe de travail ; elle est évidemment fondamentale pour rendre acceptables socialement les politiques publiques, notamment pour les plus précaires. L'application de notre méthode suggère que l'utilisation de la biomasse ou du gaz pour de la chaleur, ainsi que les réglementations thermiques successives (récemment entre RT 2012 et RE 2020, la dernière incluant un objectif de minimisation des émissions de CO_2 sur le cycle de vie), nécessitent des évolutions d'orientation ; des politiques d'accompagnement des parties prenantes seront nécessaires (Recommandation n°7).

USAGES ÉNERGÉTIQUES À CONSIDÉRER EN PRIORITÉ	
INDUSTRIE - CHALEUR HAUTE TEMPÉRATURE	Biogaz en remplacement du gaz dans les installations existantes Électrification dès que possible, notamment pour nouvelles installations Ne vaut que pour les usages process, et pas chaleur ou ECS des installations
SOUTES MARITIMES	Biogaz (bioGNV)
PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ DE POINTE POUR LES INSTALLATIONS EXISTANTES	Biogaz dans les installations existantes
USAGES ÉNERGÉTIQUES À DÉVELOPPER RAISONNABLEMENT ET SOUS CONDITIONS	
TRAFIC AÉRIEN (DOMESTIQUE ET INTERNATIONAL)	BioSAF et e-BioSAF utilisant environ 20 % de la ressource biomasse possible Transition vers les carburants de synthèse (e-SAF)
INDUSTRIE - AUTRES USAGES	À approfondir Biogaz dans les installations existantes Électrification des autres usages
USAGES ÉNERGÉTIQUES DONT LE DÉVELOPPEMENT EST À MODÉRER OU ARRÊTER	
PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN BASE (OU EN POINTE POUR DE NOUVELLES INSTALLATIONS A BIOMASSE SOLIDE)	À ARRÊTER
RÉSEAUX DE CHALEUR	Maintien au niveau actuel de l'usage de la biomasse. Privilégier géothermie ; électrification (PAC) ; nucléaire (SMR caloporteur) si développé
CHAUFFAGE RÉSIDENTIEL - BIOMASSE SOLIDE OU BIOGAZ	À titre de transition pour la biomasse solide, remplacement des foyers ouverts et des poêles anciens par des poêles performants. À terme, électrification.
CHAUFFAGE ET FROID TERTIAIRE	Géothermie ; électrification (PAC)
RÉSIDENTIEL ET TERTIAIRE - CUISSON ET ECS	Électrification

USAGES NON ÉTUDIÉS DANS CE RAPPORT	
CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES DE L'AGRICULTURE, ET DE LA FILIÈRE FORÊT-BOIS	Non étudié Accès au biofuel coproduit avec le bioSAF (?)
ENGINS LOURDS DE CHANTIER	Non étudié Accès au biofuel coproduit avec le bioSAF (?)
TRANSPORTS - VÉHICULES LÉGERS	Carburants 1G pour accompagner la demande du parc, non étudié. Électrification autant que possible.
TRANSPORTS - PL, BUS ET CARS, ET TRANSPORT FLUVIAL ET FERROVIAIRE	
CORSE ET TERRITOIRES ULTRAMARINS	Non étudié dans ce rapport

Ces propositions diffèrent à plusieurs égards des priorités présentées par la PPE3 en consultation qu'on reproduit en annexe F.

Enfin, une question importante doit être évoquée : quand des sols agricoles se libèrent, faut-il les utiliser pour faire pousser des CIVE (biogaz), de la biomasse à croissance rapide, boiser (optique récolte accrue ou optique puits de carbone ?), ou installer des panneaux photovoltaïques ? La méthode proposée pourrait permettre, moyennant quelques raffinements, d'y répondre. En première approche, à considérer comme une ouverture sur ce sujet, voici quelques considérations :

- Il existe peu d'alternatives à l'accroissement du puits de carbone autre que l'afforestation[161]. Elle peut s'avérer adaptée sur des territoires où l'exploitation agricole est difficile ;

- la biomasse lignocellulosique à croissance rapide (taillis par exemple) n'est *a priori* pas à privilégier : elle permet de produire de la biomasse solide, mais pour des usages qui disposent de nombreuses alternatives crédibles. De telles cultures peuvent cependant s'avérer intéressantes sur des zones difficilement exploitables et pour le secteur de l'aviation ;

- la culture de CIVE, sur des zones particulièrement propices à l'agriculture, et nécessitant peu d'intrants, est une bonne solution pour accroître la production de biogaz. L'atteinte du potentiel estimé par les études

161 Plantation d'arbres sur des espaces non couverts par des forêts dans un passé récent.

considérées dans ce rapport nécessitera plus généralement de faire pousser des CIVE dès que possible sur un maximum de surface agricole - avec les enjeux de minimisation des intrants associés et de l'irrigation associés ;

– l'installation de panneaux photovoltaïques est beaucoup plus efficace d'un point de vue énergétique (facteur 100[162]) que la production d'énergie via la photosynthèse. Toutefois, ces panneaux permettront de produire une ressource - l'électricité - pour laquelle de nombreuses autres alternatives existent (dont la même production sur des zones déjà artificialisées), et sans valeur ajoutée particulière (cette ressource reste intermittente) ; alors que l'accroissement du puits de carbone ou la production de biogaz permet d'apporter une valeur ajoutée. Cependant agriculture et production par panneaux photovoltaïques ne sont pas incompatibles, et des projets démonstrateurs de l'« agrivoltaïsme » se montent[163] : la loi relative à l'accélération des énergies renouvelables du 10 mars 2023 et le décret n° 2024-318 du 8 avril 2024 relatif au développement de l'agrivoltaïsme et aux conditions d'implantation des installations photovoltaïques sur des terrains agricoles, naturels ou forestiers. encadrent la pratique. Un suivi pour notamment apprécier les baisses de rendement agricole sera nécessaire.

Établir un ordre de priorité des usages ne dit rien des mécanismes via lesquels la biomasse pourra bel et bien être allouée selon cet ordre. Si cette question n'est pas au cœur du présent rapport, les Académies des technologies et de l'agriculture considèrent que, sur le marché imparfait de la biomasse (en raison de signaux de long terme insuffisamment lisibles), des mécanismes de correction du marché devraient être envisagés et pourraient s'avérer suffisants. Ce point est discuté en annexe H.

162 Nolan J. K. *et al.*, « *Spatial energy density of large-scale electricity generation from power sources worldwide* », Scientific Reports n° 12, 2022, consultable en ligne, voir la figure 14.

163 Connaissance des énergies - Agrivoltaïsme en France : définition, décret de 2024, rentabilité

Conclusion générale

Les travaux de l'Académie des technologies et de l'Académie d'agriculture de France confirment voire même amplifient l'appréciation d'un potentiel de contribution de la biomasse à la transition énergétique sensiblement plus faible que les attentes des politiques publiques.

La biomasse, issue de la photosynthèse, assure en permanence et à moindre coût la capture du CO_2 atmosphérique ; c'est un puits de carbone naturel mais qui décroît alors que l'objectif de zéro émission nette en 2050 requiert dans les scénarios gouvernementaux sa croissance. Mais la biomasse est surtout un couteau suisse dont les valorisations potentielles sont multiples, la plus brutale étant sa combustion à l'issue de la récolte.

L'agriculture et l'élevage présentent des potentiels limités d'accroissement de leur stockage de carbone dans les sols ; ils doivent être évidemment mobilisés avec en tant que de besoin une rémunération des agriculteurs pour ce service. Il est par ailleurs possible d'accroître certaines productions annuelles ou à rotation courte (et donc neutres en carbone) valorisables en biogaz ou carburants liquides ; une attention particulière devra cependant être apportée aux externalités (consommation d'eau, fertilisants, conséquences sur la biodiversité, etc.).

La forêt est le plus grand puits de carbone naturel français ; de multiples propositions sont régulièrement faites pour améliorer, si c'est possible, l'efficacité de sa gestion. Le bon sens impose que les produits issus de la forêt immobilisent le carbone le plus longtemps possible tout en évitant les émissions fossiles de produits auxquels le bois peut se substituer. Cela peut se faire en mieux valorisant le bois matériau et le bois industrie dans des utilisations de longue durée, la combustion ne devant être que l'utilisation ultime du bois en l'absence de solutions alternatives pour son utilisation. Cela implique comme cela est souvent exprimé mais peu suivi d'effets de

consacrer un effort important et opiniâtre pour remettre les filières de la transformation du bois au meilleur niveau international pour valoriser la production française.

Les acteurs publics de la transition énergétique ont des attentes excessives vis-à-vis de la biomasse à usage énergétique ; une régulation des usages sera nécessaire. Les recommandations ci-après de ce rapport visent à établir les objectifs à atteindre ; les trajectoires permettant d'atteindre ces objectifs, qui dépendent largement de considérations sociales, n'ont pas été définies.

La tentation est grande de résoudre un problème de régulation par une ou des agences de régulation. Si cela peut être souhaitable, il faut avant toute chose cependant définir de grandes orientations politiques pour l'utilisation de la biomasse ; ce rapport veut y contribuer. La biomasse présente de très nombreuses spécificités propres aux régions et aux territoires ; cependant la régulation de la biomasse ne saurait être intégralement décentralisée. Si en effet sa production est locale, son affectation à des fins énergétiques relève d'une Politique nationale de l'énergie et de l'environnement.

L'ordre de mérite proposée ici est un objectif à long terme ; les trajectoires permettant d'y parvenir devront être discutées aux divers niveaux géographiques et aux divers horizons temporels.

La biomasse et ses nombreuses utilisations constituent des filières d'avenir, de haut niveau technologique, créatrices d'emplois très qualifiés et vertueuses pour la planète. L'agriculture, l'élevage et la forêt appartiennent au patrimoine national et constituent une ressource, matérielle et immatérielle non délocalisable. La France est héritière d'une longue tradition agricole et forestière ; elle doit en faire un atout de sa transition énergétique et écologique dans une perspective de long terme, et au service de toutes et tous.

Principales recommandations

Recommandation n° 1 : La question de la définition de l'énergie (primaire, finale) étant cruciale pour rendre les comparaisons pertinentes, tous les rapports mentionnant des valeurs énergétiques pour la biomasse, et notamment les études sur le potentiel, doivent préciser s'ils parlent d'énergie « brute », primaire ou finale, et préciser les définitions.

Recommandation n° 2 : Un cadre partagé, au moins entre les entités publiques, est indispensable pour rendre comparables les études à venir, en homogénéisant les définitions et les unités, en énonçant les hypothèses dans un cadre sémantique et méthodologique commun, ou encore en se mettant d'accord régulièrement sur les meilleures sources à mobiliser.

Recommandation n° 3 : Pour aller plus loin, il faut produire un véritable modèle qui permettra de jouer sur un grand nombre de paramètres, contrairement au tableur Mosut actuellement utilisé par les pouvoirs publics. Il faudrait réaliser un « jumeau numérique » de la production et consommation de la biomasse (données d'entrée, hypothèses sur les origines et les usages, mais aussi décisions de politiques publiques incitatives ou régaliennes, réchauffement climatique, etc.) pour ne pas se contenter d'élaborer de temps en temps quelques scénarios, mais être capable d'actualiser en permanence les estimations et de tester de nouvelles options dès que nécessaire ou souhaité.

Recommandation n° 4 : Il faut étudier plus finement le potentiel réel des importations, et en analyser les impacts industriels et économiques : il ne s'agit évidemment pas de préconiser un recours massif aux importations.

Recommandation n° 5 : Si la méthode de ce rapport basée sur l'absence d'alternatives est utilisée par d'autres parties prenantes, notamment les pouvoirs publics, une construction systématique de coûts d'abattement

dans une perspective de comparaison des usages de la biomasse serait particulièrement utile.

Recommandation n° 6 : Les pouvoirs publics doivent favoriser le développement d'une industrie du bois matériau, ainsi que la captation pérenne de carbone biosourcé par l'industrie, afin d'accompagner l'accroissement des usages vertueux du bois en retardant les émissions de CO_2 résultant de sa combustion, tout en captant un maximum de valeur ajoutée en France.

Recommandation n° 7 : L'application de notre méthode suggère que l'utilisation de la biomasse ou du gaz pour de la chaleur, ainsi que les réglementations thermiques successives (récemment entre RT 2012 et RE 2020, la dernière incluant un objectif de minimisation des émissions de CO_2 sur le cycle de vie), nécessitent des évolutions d'orientation ; des politiques d'accompagnement des parties prenantes seront nécessaires.

Annexes

A. Auteurs du rapport

- Dominique VIGNON - Académie des technologies (coordinateur)
  Lien d'intérêt : Associé au projet Calogena*
  (microréacteur nucléaire de production de chaleur Basse température)
- Sylvie ALEXANDRE - Académie d'agriculture
  Pas de lien d'intérêt
- Paul COLONNA - Académie d'agriculture
  Pas de lien d'intérêt
- Marc FLORETTE - Académie des technologies
  Pas de lien d'intérêt
- André-Jean GUÉRIN - Académie d'agriculture
  Pas de lien d'intérêt
- Bruno JARRY - Académie des technologies
  Pas de lien d'intérêt
- Patrick LEDERMANN - Académie des technologies
  Pas de lien d'intérêt
- Hélène OLIVIER-BOURBIGOU - Académie des technologies
  Pas de lien d'intérêt
- Jean-Luc PEYRON - Académie d'agriculture
  Pas de lien d'intérêt
- Avec l'appui de Félix BOILÈVE, de l'équipe permanente de l'Académie des technologies (rédacteur principal). *Pas de lien d'intérêt*

Les auteurs tiennent à remercier les relecteurs pour leurs remarques : Stéphane ANDRIEUX, Monique AXELOS, Bernard ESTÈVE, Thierry WEILL et Gérard PAYEN.

> ** Un lien d'intérêt est un lien actuel ou passé susceptible d'influencer les argumentations et les positions du contributeur à un rapport ou avis. C'est l'auteur, sous sa seule responsabilité, qui déclare l'absence de lien d'intérêt ou au contraire qui révèle son existence ; un contributeur peut avoir plusieurs liens d'intérêt.*

B. Liste des personnes auditionnées

- Monique AXELOS, directrice scientifique pour l'alimentation et la bioéconomie (Inrae) et membre de l'Académie des technologies
- Emmanuel CAUSE (Conseil général de l'économie)
- Angélique CHANAL, Head of R&D Biofuels program (TotalEnergies)
- Guillaume CHANTRE, directeur général adjoint (FCBA)
- Benoît DECOURT, associé produits, durabilité et affaires publiques (Elyse Energie)
- Pascal DUPUIS (Conseil général de l'économie)
- Marc FONTECAVE, président du comité de prospective en énergie (Académie des sciences)
- Faustine GAYMARD, directrice de programme (SGPE)
- Michael HECQUET, Advanced fuels R&D program (TotalEnergies)
- Dominique HÉLÈNE, Carbone Solutions Director chez Suez - Association technique énergie environnement (ATEE)
- Andreas KLEINSCHMIT, Expert indépendant forêt
- Abril LANSOY, Head of Upstream Bio Feedstock's activities (TotalEnergies)
- Gilles LÉNON (Centre technique du papier)
- Sergio MASTROIANNI (Syensqo)
- Jérôme MOUSSET, directeur Bioéconomie et énergies renouvelables (Ademe)
- Chourouk NAIT-SAIDI, délégué générale du Club pyrogazéification (Association technique énergie environnement - ATEE)
- Christophe RUPP-DAHLEM, directeur des affaires publiques (Roquette)
- Bertrand SERVOIS, président (Union de coopération forestière française)
- Nicolas TONNET, chef de service adjoint chaleur renouvelable, cellule bois biosourcés biocarburants (Ademe)
- Jean-Christophe VIGUIE, directeur général (Nacre)

C. Principaux sigles

Ademe : Agence de la transition écologique

Carburants ou biocarburants 2G : biocarburants dits de « 2e génération », c'est-à-dire produits sans recourir à la part alimentaire de la biomasse

Citepa : Association à but non lucratif engagée qui produit des données fiables sur les polluants atmosphériques et les gaz à effet de serre en France

CNUCC : Convention cadre des Nations unies pour le changement climatique adoptée lors du sommet de la terre (Rio, 1992)

GNV (bio-) : Gaz naturel pour véhicules

CIVE : Cultures intermédiaires à vocation énergétique

EROI : *Energy Return on Investment*

FCBA : l'Institut technologique FCBA est un centre technique industriel français, chargé des secteurs de la forêt, de la cellulose, du bois-construction et de l'ameublement. Le FCBA résulte de la fusion de l'AFOCEL (Association forêt-cellulose) et du CTBA (Centre technique du bois et de l'ameublement).

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

LCOE : *Levelised cost of energy* ; coût actualisé de l'énergie

PAC : Pompe à chaleur

RED : *Renewable Energy Directive* (directive européenne)

Reforestation : plantation d'arbres dans des zones précédemment boisées mais dégradées ou déforestées

PCI : Pouvoir calorifique inférieur

RED : *Renewable Energy Directive* (directive européenne)

RTE : Réseau de transport d'électricité

SAF (bio) : *Sustainable Aviation Fuel*

SGPE : Secrétariat général pour la planification écologique

SNBC : Stratégie nationale bas carbone. Version 2 ou version 3.

TRL : *Technology Readiness Level*

TWh : mille milliards (1 000 000 000 000) de Wh. 1 TWh = 3,6 PJ.

D. Les flux actuels du bois récolté en France

Extrait de : Ademe, *Le bois énergie, Les avis de l'Ademe*, novembre 2023, https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/6653-avis-de-l-ademe-le-bois-energie.html

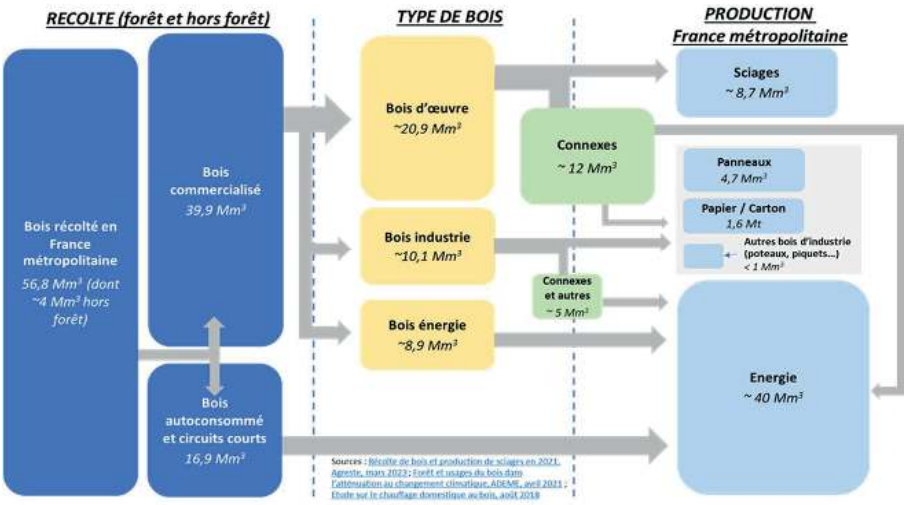


Figure 14 : Récolte, flux de bois et productions en France métropolitaine en 2021 (les flux d'import, d'export et de recyclage ne sont pas représentés).

E. Extrait du bilan de juillet 2024 du SGPE

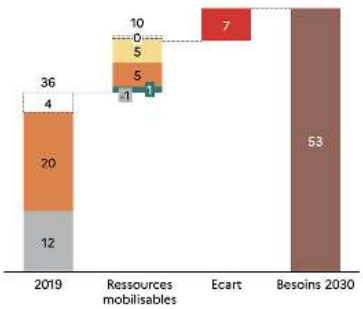
La présentation complète est disponible sur : https://www.info.gouv.fr/upload/media/content/0001/10/00d496ed6c39499c18e94e799f0803c87649b3f5.pdf

Des ressources en bioénergies contraintes, sous toutes leurs formes

Biomasse liquide : forte hausse, alors que >50% de notre conso est importée

Besoins pour le transport routier (37TWh en 2030), les soutes internationales (~4TWh), la bio-chimie (+2TWh), l'agriculture (5TWh), Outre-Mer (5TWh)

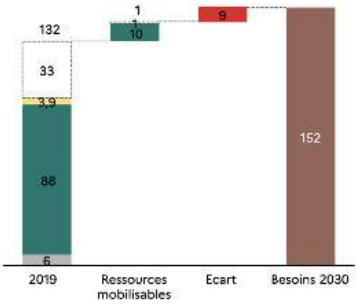
Ressources en bio-énergie (liquide), en TWh Ef :



Biomasse solide : forte sollicitation de la biomasse forestière à prévoir

Besoins : pour l'industrie (38TWh en 2030), la décarbonation des réseaux de chaleur (34TWh), la production d'élec. (+20TWh), le résidentiel (57TWh, -24%)

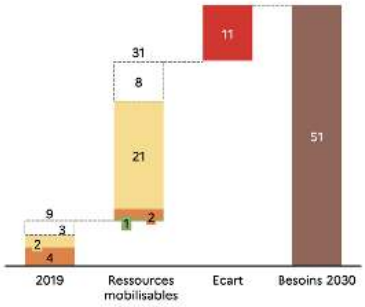
Ressources en bio-énergie solide, en TWh Ef :

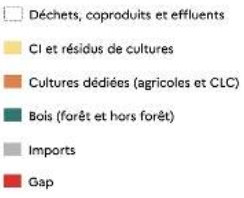


Biomasse gazeuse: enjeu de satisfaire les besoins via les effluents et les CIVE

Pour la chaleur haute intensité dans l'industrie (13TWh), le bâtiment (22TWh), les réseaux de chaleurs (4TWh), la production d'électricité (9TWh)

Ressources en biogaz, biométhane, en TWh Ef :





Source :, Sorties ENERDATA « Bouclage Biomasse » run2 (pour les ressources mobilisables en TWh), Sorties ENERDATA bilans énergie corrigées pour l'industrie des besoins exprimés dans les FDR 50 sites (pour les besoins 2030 en TWh)

F. La priorité des usages dans la PPE3 en consultation

Consultation du 07/03/2025 au 05/04/2025

USAGES DE LA BIOMASSE	EXPLICATION
USAGES NON-ÉNERGÉTIQUES, PRIORITAIRES SUR LES USAGES ÉNERGÉTIQUES	
ALIMENTATION HUMAINE	Enjeu de souveraineté alimentaire.
ALIMENTATION ANIMALE	Enjeu d'autonomie protéique - à hauteur des besoins d'une consommation inférieure de protéines animales cohérente avec le scénario global de transition des régimes alimentaires.
FERTILITÉ DES SOLS (RETOUR AU SOL DES RÉSIDUS ET COUVERTS)	A hauteur des besoins pour conserver le rendement et la santé des écosystèmes.
PUITS DE CARBONE ET USAGES MATIERE	Afin de favoriser le stockage de carbone (forêts, sols, haies...) à hauteur des besoins nécessaires pour respecter les objectifs climatiques fixés par la SNBC, et dans l'optique de développer les usages matières de la biomasse (produits bois, matériaux et fibres biosourcés, chimie), en privilégiant d'abord l'augmentation de la durée de vie des produits biosourcés, le réemploi et le recyclage.
USAGES ÉNERGÉTIQUES À CONSIDÉRER EN PRIORITÉ	
INDUSTRIE – CHALEUR HAUTE TEMPERATURE ET NON-ÉNERGÉTIQUES	Pas d'alternatives décarbonées.
RÉSEAUX DE CHALEUR	Sous réserve de considérer en priorité la récupération de chaleur fatale et les technologies alternatives à la biomasse (géothermie, solaire thermique...)
CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES DE L'AGRICULTURE, ET DE LA FILIÈRE FORÊT-BOIS	Notamment pour la machinerie agricole. Possibilités de circuits courts et valorisation de la production énergétique de l'agriculture (également possibilité d'envisager davantage d'électrification). Filière forêt-bois : autoconsommation de ressources propres et production énergétique valorisable sur site, en équilibre avec d'autres usages non énergétiques de ces ressources.
ENGINS LOURDS DE CHANTIER	Peu d'alternatives décarbonées.

USAGES DE LA BIOMASSE	EXPLICATION
USAGES ÉNERGÉTIQUES À DÉVELOPPER RAISONNABLEMENT ET SOUS CONDITIONS	
TRAFIC AÉRIEN (DOMESTIQUE ET INTERNATIONAL)	Possibilité de réduire le trafic au travers du signal prix, des reports modaux et de la sobriété. Limitation de la biomasse allouée à ce secteur, qui devra financer davantage de e-fuel.
SOUTES MARITIMES	Possibilité d'utiliser des e-fuels (e-méthane, e-méthanol, e-ammoniac, hydrogène et e-diesel issu de la production de e-kerosène). Dépend du niveau de trafic maritime, avec d'une part une volonté de re-soutage en France, et de l'autre une baisse des importations de marchandises en lien avec la réindustrialisation.
TRANSPORTS – PL, BUS ET CARS, ET TRANSPORT FLUVIAL ET FERROVIAIRE	Développement des biocarburants via des taux d'incorporation maîtrisés, et en maintenant une priorité donnée à l'électrification d'une part des usages. Possibilité de recourir à d'autres sources (notamment H2 et GNL) pour des usages spécifiques.
TRANSPORT – VÉHICULES LÉGERS	Via des taux d'incorporation maîtrisés et dans une perspective transitoire, et en maintenant une priorité donnée à l'électrification progressive du parc.
INDUSTRIE – AUTRES USAGES	Usages présentant des alternatives de décarbonation viables (PAC, électrification, RCU[74], géothermie...).
RÉSIDENTIEL ET TERTIAIRE – BIOMASSE SOLIDE POUR CHAUFFAGE ET ECS PERFORMANTS	Possibilité de prioriser l'usage de la biomasse solide sur les appareils performants (après 2005) et très performants (après 2015) en incitant le remplacement des appareils non performants, sous réserve de la possibilité d'électrifier davantage le chauffage résidentiel et tertiaire via les pompes à chaleur. Prioriser les appareils qui remplacent des équipements fossiles (fioul/GPL) en zone rurale, en identifiant au préalable les alternatives possibles.
OUTRE-MER (MAYOTTE, GUYANE, CORSE)	Co-génération à partir de biomasse locale ou importée sous condition de durabilité de la production. Possibilité de développer davantage les EnR électriques. Rappel : Les zones non-interconnectées disposent de PPE dédiées.
USAGES ÉNERGÉTIQUES DONT LE DÉVELOPPEMENT EST À MODÉRER	
PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ	Privilégier d'autres solutions techniques en particulier pour la production de base.
RÉSIDENTIEL ET TERTIAIRE – CHAUFFAGE ET ECS NON PERFORMANTS	Réduire l'usage des appareils peu performants (installés avant 2005) consommant de la biomasse solide.
RÉSIDENTIEL ET TERTIAIRE – CUISSON	Alternative électrique (induction notamment) plus efficace et moins dangereuse.

G. La neutralité carbone de la biomasse

C'est le stock de CO_2 dans l'atmosphère qui conduit principalement la cinétique du changement climatique. Il croît régulièrement (Figure 15) du fait d'un déséquilibre entre les émissions et absorptions de CO_2. Ce déséquilibre est lui-même la conséquence de la combustion de combustibles fossiles.

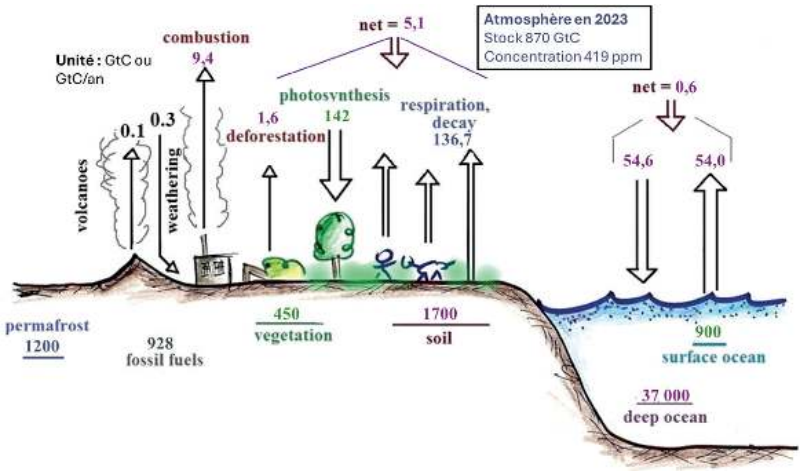


Figure 15 : Données de la Figure 5.12 du rapport AR5-WG1 du GIEC (2021). L'enjeu est d'accélérer les flux CO_2 atmosphérique vers le carbone de la biomasse terrestre (photosynthèse) mobilisable en énergie, sans affecter le stock de carbone organique du sol, et ainsi contribuer à minimiser les impacts environnementaux dont le flux occasionné par le changement d'usages des sols, l'extraction du carbone fossile et à moyen terme le déstockage du permafrost. Cette représentation simplifiée ignore le méthane et le carbone stocké dans les usages à moyen terme (chimie, matériaux).

Ce stock (caractérisé par la concentration du CO_2 dans l'air) est une donnée qui résulte d'émissions (anthropiques ou non) et de captures passées ; pour atteindre 1,5 °C ou 2 °C en 2050, l'humanité dispose d'un crédit carbone maximum pour des émissions anthropiques nouvelles pour atteindre, en 2050 si possible, la neutralité carbone (zéro émission nette). Ce crédit est indépendant de la trajectoire qui a conduit à la concentration actuelle de CO_2 : ce sont les émissions à venir qui commandent la dynamique, sans aucune considération des émissions passées et notamment des stockages antérieurs par la biomasse.

Si la biomasse utilisée est rapidement renouvelable, on peut négliger le décalage entre émissions de la biomasse et renouvellement. Si le cycle est long, ce n'est pas possible. L'Ademe l'admet depuis longtemps : « *Il y a un délai temporel, un "temps de retour carbone", nécessaire avant l'obtention de bénéfices en termes de gaz à effet de serre évités* »[164].

Cette question de temporalité est accentuée si l'on vise à accroître les prélèvements forestiers : dans l'hypothèse où la gestion est durable, cet accroissement réduit le puits forestier, comme le rappelle la Mission. Elle indique que des récoltes de 63 Mt/an de bois en 2050 (l'hypothèse haute de la Mission) ont comme « *corollaire [que] la neutralité en 2050 ne pourra pas reposer sur un puits de carbone forestier significatif* (…) » (p. 25). Or la France n'atteindra pas la neutralité carbone en 2050 sans augmentation significative du puits naturel : la gestion durable de la biomasse ne doit pas seulement maintenir le puits carbone, mais si possible l'accroître.

Le *Joint Research Center* de l'Union européenne fait la même analyse, ayant considéré dès 2014 que « *the assumption of biogenic carbon neutrality is not valid under policy relevant time horizons (in particular for dedicated harvest of stemwood for bioenergy only) if carbon stock changes in the forest are not accounted for* »[165] et en 2024, sur la base d'une simulation à l'échelle de l'Union européenne que « *the forest carbon sink will deteriorate rapidly due to increased wood consumption*[166] ».

On peut également citer une étude du Citepa : « *La combustion de biomasse émet du CO_2. On ne devrait parler de neutralité carbone que si dans le même temps cette activité générait, par nature, à l'échelle de l'année, un captage équivalent de CO_2. Dans bien des cas, ce n'est pas le cas. Cette hypothèse de neutralité est certes acceptable pour la biomasse de cycle court, elle est*

164 Voir par exemple Ademe, « *Forêt et atténuation du changement climatique* », Les Avis de l'Ademe, juin 2015, consultables en ligne.

165 European Commission, Joint Research Centre, Agostini A., Giuntoli J., et Boulamanti A., « *Carbon accounting of forest bioenergy. Conclusions and recommendations from a critical literature review* », JRC Scientific and policy reports, 2014, consultable en ligne.

166 European Commission, Joint Research Centre, Rougieux P., Pilli R., Blujdea V., Mansuy N., Mubareka S. B., « *Simulating future wood consumption and the impacts on Europe's forest sink to 2070* », 2024, consultable en ligne.

beaucoup moins évidente pour le bois (cycles longs). En effet les stocks de bois présents dans les arbres des forêts sont le résultat d'années, voire de siècles, de croissance des arbres. Couper ces arbres est en revanche très rapide. Il peut donc y avoir un déséquilibre fort entre croissance et prélèvement »[167].

D'autres études vont dans le même sens[168]. On citera plus particulièrement l'Académie européenne des sciences qui relève de sérieuses incohérences entre les données scientifiques et l'exploitation énergétique de la forêt[169]. Selon INRAE dans son importante étude les impacts environnementaux de la mobilisation de la biomasse agricole et forestière (2023) « *l'utilisation du bois comme matière première pour la production d'énergie entraîne une diminution des stocks forestiers de carbone et donc une réduction nette du carbone séquestré par les forêts, tout en libérant du* CO_2 *du fait de la combustion du bois. Plusieurs études scientifiques conduites à différentes échelles (nationale et mondiale, de quelques décennies à 100 ans) montrent que l'utilisation du bois forestier, en particulier pour le bois énergie, n'est pas neutre en carbone (Ahamer, 2022), et qu'une augmentation des prélèvements de bois en forêt, même en dessous du seuil d'accroissement, réduirait de façon significative le puits de carbone forestier à l'horizon 2050 et même au-delà* » (Valade *et al.*, 2018 ; Roux *et al.*, 2020 ; Soimakallio *et al.*, 2022) ».

L'établissement d'une évaluation précise de l'impact de la combustion de la biomasse, en relation avec sa reconstitution, nécessite une modélisation complète du cycle de la biomasse forestière. Cette évaluation, nécessairement complexe, a été réalisée par trois Instituts allemands à la demande de l'Agence allemande de l'environnement (Umweltbundesamt - UBA), avec

167 Citepa, « *La biomasse énergie est-elle neutre en carbone ?* », 2020, consultable en ligne.

168 Fehrenbach H. *et al.*, « *The Missing Limb: Including Impacts of Biomass Extraction on Forest Carbon Stocks in Greenhouse Gas Balances of Wood Use* », Forests, 2022, https://www.mdpi.com/1999-4907/13/3/365 ;

Soimakallio S. *et al.*, « *Closing an open balance: The impact of increased tree harvest on forest carbon* », Global Change Biology Bioenergy, 2022, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcbb.12981

Soimakallio S. *et al.*, « *Why burning primary woody biomass is worse than fossil fuels for climate* », Öko Institut - 2022

169 Norton *et al.*, 2019 - Serious mismatches continue between science and policy in forest bioenergy - Académie européenne des sciences - https://doi.org/10.1111/gcbb.12643

l'objectif de compter à l'échelle nationale les effets de la consommation de chaque type de produit bois, selon son cycle de vie (stockage, recyclage, combustion, etc.)[170].

L'UBA, sous l'autorité du ministère allemand de l'Environnement, sans remettre en cause la convention UNFCC pour établir les statistiques d'émission et absorption de CO_{2e} considère nécessaire de tenir compte de ces effets dans la définition des politiques publiques et dans l'évaluation et la prise en compte des émissions des particuliers et des entreprises. Elle propose dans un calculateur mis à la disposition du public de tenir compte :

- des émissions de CO_2 directement dues à la combustion ;
- des émissions dues à la dynamique générale des forêts. Si le puits de carbone est stable, cette valeur est nulle. Si le puits augmente, elle est négative. Mais si les prélèvements s'accroissent, la modélisation de la dynamique forestière conclut qu'elle est positive. En pratique, l'Agence n'a pas ajouté ce facteur, compte tenu d'incertitudes sur sa valeur exacte ; mais avec des scénarios de prélèvement renforcé, l'Agence montre que cette valeur sera positive.

En ne considérant que les émissions directes et dans le contexte allemand, les émissions du bois seraient supérieures à celles du gaz naturel du fait de la faible densité énergétique du bois. Cette conclusion donne lieu à une vive polémique en Allemagne ; et ce mode de calcul a ses contradicteurs[171].

170 Agence allemande de l'environnement sur le fondement d'une étude confiée à trois Instituts allemands spécialisés en matière environnementale (Öko-Institut e.V ; INFRO - Informationssysteme für Rohstoffe ; ifeu - Institut für Energie - und Umweltforschung)

« *Auswirkungen der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken (BioSINK)* », 2024 - consultable en ligne,

et même auteur, « *Ansatz zur Neubewertung von CO_2-Emissionen aus der Holzverbrennung. Ergebnisse des Forschungsprojekts BioSINK als Grundlage für die Erweiterung der Bilanzierung von Holz im CO_2-Rechner* », octobre 2024, consultable en ligne.

171 Voir par exemple Berechnung der CO_2 - Emissionen aus dem Heizen mit Holz (Umweltbundesamt).

Ces différents points de vue convergents sont cependant réfutés par de nombreux spécialistes de la forêt. Ils font valoir notamment que :

- il n'y a pas lieu de considérer le temps mis par telle source de biomasse forestière coupée et éventuellement brûlée à se reconstituer. C'est en effet la moyenne du stock de carbone dans un massif forestier voire dans les forêts d'un pays ou d'un territoire qu'il faut prendre en considération ; ce qui est coupé ici se reconstitue là : seule la moyenne est importante. Et une gestion durable de la forêt assurant qu'en moyenne on ne prélève pas plus que la croissance est neutre en carbone.

- le puits de carbone forestier n'est pas limité au carbone séquestré dans la biomasse vivante ; il faut aussi considérer la biomasse séquestrée dans les bois morts, la litière et les sols. Les quantités sont difficiles à appréhender mais cette quantité séquestrée est vraisemblablement croissante et des pratiques de gestion appropriées peuvent y contribuer (maintien d'un couvert forestier, reboisement, etc.). Voir Annexe I.

On notera en conclusion que la directive européenne RED III, sur le fondement de la convention statistique de comptabilisation des émissions de la biomasse dans le secteur « Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie » et comme étant égale à la quantité de CO_2 qui sera émise par la biomasse récoltée (sans considération de temporalité) considère que celle-ci est durable. Elle n'est pas cohérente avec le Règlement européen 2021/0201 (COD) qui fixe aux États membres des objectifs de croissance du puits carbone naturel ; et elle est contredite par son organisme de recherche, le JRC. La Commission après avoir évoqué la présentation d'une directive visant à interdire la vente de poêles à bois à partir de 2027 a remisé ce projet face à de très larges et fortes oppositions des États membres : le débat va se poursuivre.

H. Une méthode « économique » ?

Établir un ordre de priorité des usages ne dit rien des mécanismes via lesquels la biomasse pourra bel et bien être allouée selon cet ordre. Si cette problématique n'est pas au cœur du présent rapport, les Académies des technologies et de l'agriculture considèrent que des mécanismes de correction du marché devraient être envisagés et pourraient s'avérer suffisants.

Un premier mécanisme pourrait être basé sur l'attribution de quotas. Les quotas fonctionnent pour certains secteurs précis, quand ceux-ci sont bien connus, pilotables et dans des temporalités courtes : c'est par exemple le cas des quotas de pêche, pour lesquels la ressource est plutôt bien estimée (même si des controverses demeurent) ; il suffit d'agir sur un seul secteur (les bateaux de pêche) pour piloter la mesure et les effets peuvent être mesurés à moyen voire court terme. Dans le cas de la biomasse, aucun de ces critères n'est rempli : la ressource est difficilement estimable, encore plus aux horizons de temps considérés pour lesquels de nombreux scénarios sont envisageables, sans compter les aléas du réchauffement climatique.

On peut alors plutôt se fonder sur des instruments plus économiques, proches par exemple du marché des émissions de CO_2.

Dans l'hypothèse de deux usages A et B en concurrence pour accéder à la même biomasse ou à une biomasse équivalente, et si A dispose d'une solution alternative très coûteuse, tandis que B dispose de multiples alternatives de coûts peu supérieures à l'usage de la biomasse, alors A sera prêt à payer la biomasse beaucoup plus cher que B. Une modélisation montre alors que, s'il a la capacité de le faire, il prendra la quasi-totalité de la ressource « naturellement », et ce d'autant plus fortement que sa technologie alternative sera chère ; dit autrement, le marché fera que le secteur dont la technologie alternative est chère s'emparera de la biomasse.

Sur un exemple : le secteur de l'aviation sera prêt à payer la biomasse plus cher que les particuliers, et l'obtiendra donc, parce qu'il n'a pas d'alternative à la décarbonation. Or, c'est bien là un des résultats de la méthode proposée : si l'on compare par exemple l'aviation (ou l'industrie pour la haute température)

et le chauffage pour les particuliers, il s'agit de privilégier le premier, justement parce qu'il ne dispose pas d'alternative.

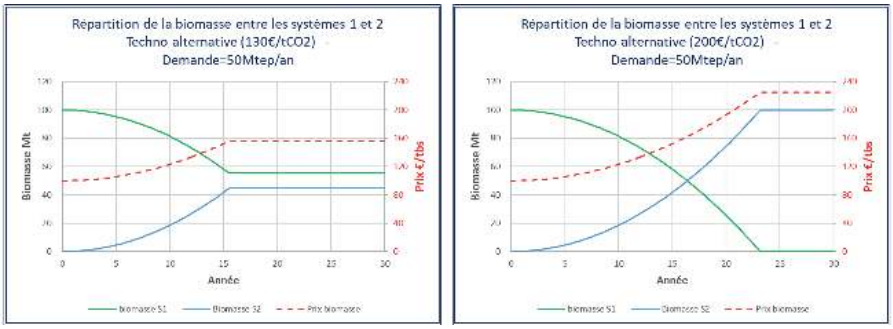


Figure 16 : Modélisation de la concurrence pour la biomasse entre deux secteurs. À gauche, le secteur 2 dispose d'une technologie alternative peu chère ; à droite, chère. Source : Académie des technologies (Daniel Iracane)

C'est d'ailleurs en partie ce qui devrait se jouer dans les années à venir. Cependant le risque de défaillance du marché, s'agissant de signaux de long terme, justifie une intervention de type « économique » de la part des pouvoirs publics, afin de rendre visibles à court terme ces signaux de long terme. Dit autrement, le « marché » corrigé de ces défaillances permettra assez naturellement d'éliminer les secteurs qui ne doivent pas prétendre à la biomasse. À l'inverse, ces interventions permettront à la puissance publique, au cas où l'équilibre se distord avec un secteur qui commence à accaparer une part trop importante de biomasse, d'envoyer des signaux inverses.

La méthode esquissée nécessite que les opérateurs de marché (ou le régulateur qui attribuerait des quantités de biomasse) connaissent les coûts et prix futurs des énergies (inclus notamment dans les coûts d'abattement). Or l'énergie et l'agriculture sont des secteurs à cycle très long. Les industriels ne peuvent engager des investissements sur des signaux prix donnés par le marché de court terme. Ce problème n'est pas spécifique à l'optimisation des usages de la biomasse ; il est par exemple au cœur des difficultés de définition d'un « *market design* » pertinent pour l'électricité. Les solutions doivent se trouver dans la mise en place de « *power purchase agreements* » dans un cadre plus flexible que ce qu'autorise la Commission européenne.

La question n'étant pas spécifique aux allocations de biomasse, on propose de ne pas aller au-delà dans le cadre de ce rapport.

Certains secteurs devront néanmoins se partager la ressource limitée de biomasse, et dans ce cadre même un marché « parfait » (car corrigé de ses défaillances) ne suffira pas. Ce sera le cas de l'industrie pour la chaleur haute température ou l'aviation, sans qu'on sache vraiment qui sera prêt à payer plus, et l'ampleur ou la temporalité des alternatives envisageables. D'autres mécanismes économiques sont à concevoir, mais cela dépasse le cadre de ce rapport.

I. Évaluation du puits de carbone forestier pour les sols et la biomasse morte

Une contribution forestière plurielle à la lutte contre l'effet de serre

Le secteur forestier est très attendu en matière d'atténuation du changement climatique à toutes les échelles des politiques publiques (accord de Paris, politiques énergie-climat de l'Union européenne et de la France). Son réservoir de carbone constitue un enjeu énorme par son ampleur et ses possibilités d'augmentation (donc de puits), ou de réduction (donc de source) sous l'effet des changements d'occupation des sols, de la gestion forestière, des conditions de croissance et autres perturbations. Ce réservoir est cependant pluriel et nécessite de ce fait diverses méthodes d'évaluation et des actions raisonnées et articulées à la recherche de compromis.

Les lignes directrices du GIEC distinguent la biomasse vivante aérienne, la biomasse vivante souterraine, le bois mort, la litière, le carbone organique du sol, les produits ligneux récoltés (Citepa, 2024. Rapport OMINEA - 21e édition). Y sont éventuellement ajoutées les émissions évitées par effet de substitution lié à l'utilisation du bois comme matériau ou énergie (IGN, indicateurs de gestion durable des forêts françaises) car, si cet évitement est implicitement pris en compte dans la comptabilité des gaz à effet de serre au titre d'autres secteurs industriels ou énergétiques, elles n'apparaissent pas explicitement et ne sont pas imputées au secteur forestier dont la politique en dépend pourtant (Gabriella Cevallos, Julia Grimault, Valentin Bellassen. *Relocaliser la filière bois française : une bonne idée pour le climat*. [Rapport de recherche]. 2019).

Des données et méthodes d'évaluation encore imparfaites

L'analyse de la contribution du secteur forestier à la lutte contre l'effet de serre repose ainsi sur de multiples données et méthodes qui ne permettent pas toujours d'évaluer pleinement la variation des réservoirs au cours du temps, objectif préalable à toute action destinée à améliorer la situation des puits correspondants. Cette variation des réservoirs peut être appréhendée soit par la différence entre les niveaux de stocks à deux moments différents, soit par la somme algébrique des flux en entrée (gains) et sortie (pertes). Pour certains réservoirs (biomasse vivante par exemple), on est capable d'estimer au cours du temps aussi bien l'évolution des stocks que celle des

flux : le choix peut être fait de l'une ou l'autre méthode selon le détail souhaité et la précision des résultats. Dans d'autres cas comme les produits ligneux récoltés, certains flux sont mieux connus que les stocks et servent de base à une estimation (Citepa, 2024. Rapport OMINEA utilisant des études de Carbone 4 et de FCBA). Pour le bois mort, la litière et la matière organique des sols, les estimations se fondent sur les stocks mais dépendent du nombre de mesures effectuées au cours du temps. Lorsqu'une seule mesure est connue (exemple des données du réseau RMQS de mesure de la qualité des sols) ou que la période de temps entre deux mesures n'est pas suffisante pour mettre en évidence une évolution significative (exemple, jusqu'à une période récente, des données IGN sur le bois mort), alors la variation de stock ne peut être évaluée que dans le cas d'un changement d'occupation des sols ; on suppose pour cela que celui-ci fait passer, plus ou moins progressivement, du niveau moyen de stock de l'occupation initiale vers celui de l'occupation finale. Lorsque deux mesures sont connues et suffisamment espacées dans le temps (cas de la litière et de la matière organique des sols du réseau national RENECOFOR de suivi à long terme des écosystèmes forestiers), alors on peut en déduire la variation de stock (Jonard *et al.*, 2017 : *Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon*. Science of the Total Environment 574. pp. 616-628). Lorsque plus de deux mesures sont connues, on peut mieux apprécier l'évolution, concave ou convexe, à long terme.

Le cas des sols forestiers

Actuellement, dans son évaluation des émissions ou absorptions pour le secteur des terres (UTCATF), le Citepa n'utilise qu'une mesure de stock pour la matière organique du sol et la litière : il ne comptabilise donc que l'effet des changements d'utilisation des sols à l'exclusion du puits des « forêts restant forêts ». Il ne prend pas en compte l'étude mettant en évidence un puits significatif de carbone dans la centaine de placettes du réseau RENECOFOR au motif que ce dernier, implanté exclusivement dans des forêts publiques, n'est pas représentatif de la forêt française ; il ne l'utilise qu'en tant qu'hypothèse conservatrice pour justifier que les sols forestiers ne sont pas des sources.

En revanche, dans ses indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines (indicateur 1.4), l'IGN s'appuie sur les données du réseau RENECOFOR sous l'hypothèse que le puits qu'elles montrent constitue une

sous-estimation du puits de l'ensemble des sols forestiers français. En effet, le puits de carbone des sols forestiers tend à décroître avec l'ancienneté des forêts et l'âge des peuplements qui sont en moyenne supérieurs en forêts publiques par rapport aux forêts privées (Jonard *et al.*, 2019). Sous cette hypothèse, le stock de carbone a été évalué en moyenne dans le sol minéral, la litière et l'humus à 90 tC/ha qui, après extrapolation à l'ensemble des forêts françaises, donne une estimation de 1,4 GtC (gigatonnes de carbone), soit une valeur équivalente, voire légèrement supérieure, au réservoir de la biomasse vivante aérienne et souterraine (1,3 GtC). Le puits dans les sols, l'humus et la litière a quant à lui été évalué en moyenne entre 1995 et 2010 à 1,3 tCO_2/ha/an, à comparer aux 3 à 4 tCO_2/ha/an séquestrées de façon nette dans la biomasse vivante aérienne et souterraine entre 2010 et 2015[172].

Les données relatives aux sols peuvent sembler relativement anciennes (elles sont très coûteuses) mais concernent un réservoir doué d'une grande inertie à la hausse. L'absence de nouvelle mesure récente crée cependant une incertitude sur l'évolution du puits dont on s'attend à ce qu'il s'amenuise progressivement. C'est ainsi qu'une synthèse scientifique récente suggère de ne pas retenir un puits de 1,3 tCO_2/ha/an (ou 0,35 tC/ha/an) comme mentionné ci-dessus, mais plutôt de 0,73 tCO_2/ha/an (soit 0,2 tC/ha/an, selon Augusto *et al.*, 2024 : Évaluation du puits de carbone dans les sols forestiers français. IGN).

Les données relatives à la biomasse vivante sont plus récentes que celles relatives aux sols mais soumises à de fortes variations à l'occasion des crises (tempêtes, sécheresses, bio-agressions, incendies…). Les dernières estimations (Citepa, 2024) montrent ainsi une forte diminution du puits de carbone dans la biomasse vivante, ce qui en illustre la vulnérabilité face à des crises qu'on attend de plus en plus nombreuses, intenses ou étendues dans le futur du fait du changement climatique. Par ailleurs, la théorie des ressources naturelles renouvelables suggère de faire tendre le stock des ressources en bois vers un équilibre pour lequel les prélèvements égalent la croissance nette (déduction faite de la mortalité naturelle), ce qui revient à annuler le puits dans le réservoir de la biomasse vivante. Ces considérations

172 On utilise ici la convention selon laquelle les stocks de carbone sont évalués en masse de carbone et les flux en masse de dioxyde de carbone.

confèrent ainsi un intérêt supplémentaire au puits observé dans les sols et donc à l'amélioration de son évaluation.

Le cas du bois mort

Le bois mort résulte en forêt de la compétition entre arbres, des rémanents associés à la récolte de produits forestiers et, de plus en plus, des perturbations auxquelles sont soumises les forêts. Il comprend la tige, les branches et les racines des arbres morts ou renversés (chablis), les souches et les racines des arbres coupés et récoltés, ainsi que les pièces de bois tombées au sol ou restées sur coupe. Contrairement aux modes simplifiés de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre, le carbone contenu dans le bois mort ne repart pas immédiatement vers l'atmosphère, mais très progressivement. Il constitue donc un stock tampon dont la prise en compte pleine et entière atténue, du point de vue de l'effet de serre, la brutalité des crises et allonge la durée de résidence du carbone dans le bois.

L'inventaire forestier national évalue, depuis l'origine et l'achèvement en 1981 de la première couverture complète de la France, la mortalité naturelle des arbres selon des méthodes qui ont cependant beaucoup évolué et sont surtout devenues plus fiables. Par ailleurs, le volume des arbres morts debout au cours des cinq dernières années, les seuls inventoriés à l'origine, ne constituent qu'une fraction du bois mort. Depuis 2008, les mesures de terrain ont été étendues aux arbres morts sur pied depuis plus de 5 ans, aux chablis depuis moins de 5 ans et au bois mort au sol : le volume de bois mort inventorié a ainsi été multiplié 5 à 10 selon les lieux et les années, même si les volumes pris en compte ne sont pas complètement comparables et additifs (mesure à partir d'un diamètre de 7,5 cm pour les arbres debout et de 2,5 cm pour les bois au sol).

Durant les décennies 1980 et 1990, le volume des arbres morts depuis moins de 5 ans tendait à augmenter. Depuis 2008 et un inventaire plus complet, le volume de bois mort est d'abord resté relativement constant avant de croître au rythme de 1,4 % par an en moyenne et de 4 % pour les arbres morts sur pied depuis moins de 5 ans (IGN, 2024. Memento). Le puits de carbone dans le bois mort, qui était estimé nul jusqu'à très récemment (indicateurs IGN pour 2020), devient donc significatif, digne d'être estimé et de l'ordre de 0,4 tCO_2/ha/an entre 2013 et 2023. Il faut en chercher la raison dans le fait

que le réservoir correspondant augmente, certes progressivement, avec la densité et l'âge des arbres en forêt, mais surtout par à-coups à la faveur des crises qui se succèdent (sécheresses de 1990/91 et 2003, tempêtes de 1999 et 2009, sécheresse et crise sanitaire depuis 2015…).

Finalement, quel bilan carbone pour le secteur forestier français ?

Le Citepa a publié en 2024 un bilan net pour le sous-secteur forêt sur la période 1990-2022 dans son rapport Secten sur les « Émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques 1990-2023 » (p. 518). Le puits y est représenté conventionnellement en valeur négative. Il porte essentiellement sur la biomasse vivante métropolitaine grâce à une contribution forte des données d'inventaire forestier de l'IGN. Il a cru de 1990 à 2008 hormis l'impact des tempêtes de 1999, puis stagné à la suite de la tempête de 2009 pour décroître très significativement ensuite et retrouver pratiquement son niveau de 1990, aux alentours de 20 $MtCO_{2e}$/an, soit 1,2 tCO_{2e}/ha/an.

Dans ses indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines (indicateur 1.4 en ligne), l'IGN estime le bilan des forêts en moyenne annuelle et de façon détaillée mais sur des périodes variables selon les cas :

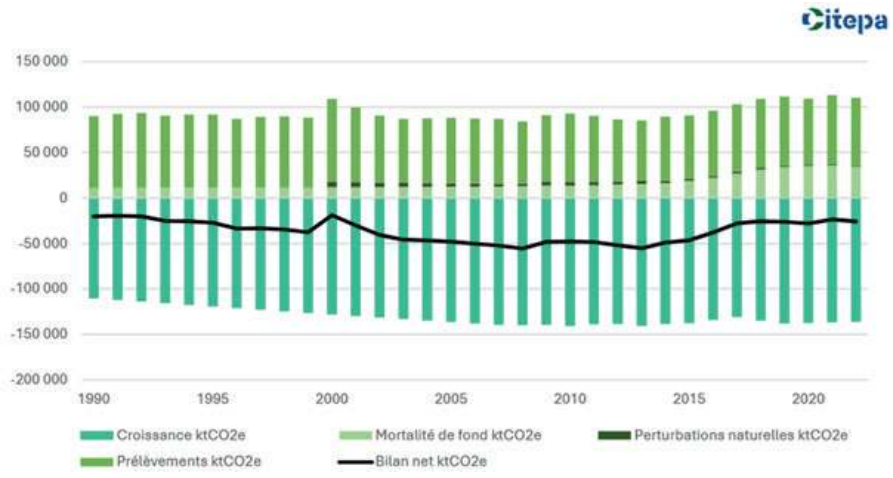


Figure 17 : Bilan net pour le secteur forêt de l'UTCATF, métropole uniquement, en $ktCO_{2e}$

- pour la biomasse vivante, le puits est de 14 $MtCO_2$/an sur 1981/1991, 51 $MtCO_2$/an sur 1991/2010, 63 $MtCO_2$/an sur 2010/2015 et tombe à 30 $MtCO_2$/an sur 2015/2019, soit une évolution proche de celle fournie par le Citepa qui indique même, comme nous l'avons vu, une diminution plus récente vers 20 $MtCO_2$/an ;

- pour le bois mort, le puits passe de 0 à 10 $MtCO_2$/an entre la période 2010/2015 et la période 2015/2019 ;

- pour les sols et la litière, le puits est estimé à 20 $MtCO_2$/an sur la période 1995/2010, la seule pour laquelle des données permettent d'estimer une variation ; la synthèse scientifique récente citée plus haut (Augusto *et al.*, 2024) donnerait quant à elle, à dire d'expert et pour la période actuelle, une valeur plus conservatrice de 13 $MtCO_2$/an ;

- pour les produits en bois (dits aussi produits ligneux récoltés), le puits est faible et décroissant de l'ordre de 2 $MtCO_2$/an sur la période 2010/2015 à 1 $MtCO_2$/an sur la période 2015/2019 ;

- les émissions évitées par substitution de bois matériau sont estimées à 14 $MtCO_2$/an aussi bien vers 2015 que vers 2019 ; celles évitées par substitution de bois énergie sont en légère augmentation de 18 $MtCO_2$/an en 2015 à 19 $MtCO_2$/an en 2019.

Finalement, on comprend mieux l'intérêt de considérer aussi bien les sols que le bois mort dans l'analyse du bilan carbone du secteur forestier français. Vers 2010/2015, ceux-ci représentaient moins de 20 % du bilan forestier dans le cadre « Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie » (UTCATF), donc hors émissions évitées ; le puits dans le bois mort apparaissait (conjoncturellement) négligeable, tandis que le puits dans les sols était négligé au bénéfice d'une rigueur soutenue par le fait qu'il ne semblait alors pas indispensable de prendre en compte ce compartiment. Aujourd'hui, il en va tout autrement : après les crises sanitaires que nous avons connues et dont on s'attend à ce qu'elles se reproduisent, le puits de carbone dans le bois mort n'est plus du tout négligeable et vient « tamponner » l'effet des crises sur le puits dans la biomasse vivante ; en attendant une nouvelle couverture représentative des forêts par le réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS), le puits dans les sols est quant à lui toujours très significatif et

la somme de ces deux puits (bois mort et sols) s'avère maintenant du même ordre que le puits dans la biomasse vivante. L'ampleur de la contribution du secteur forestier à l'atténuation du changement climatique tient donc aujourd'hui encore à la biomasse vivante mais aussi beaucoup aux sols et à la biomasse morte, d'une part (cadre UTCATF), aux émissions évitées par effet de substitution lié à l'utilisation du bois comme matériau ou énergie, d'autre part. Le jugement que l'on peut porter sur la fraction du puits forestier dû à l'accroissement de la biomasse vivante est ambivalent : (i) son importance passée était due en partie à l'accroissement continu des surfaces forestières mais surtout à un défaut d'exploitation de nombreuses forêts que les politiques publiques ont visé et visent toujours à pallier ; (ii) sa diminution récente traduit la vulnérabilité des forêts au changement climatique. Dans les deux cas, il s'agit non pas de poursuivre l'accumulation de bois en forêt qui ne ferait que renforcer le défaut d'exploitation et la vulnérabilité des forêts françaises, mais de rendre ces dernières saines, stables et adaptées aux conditions futures, ce qui passe par une gestion raisonnée favorisant le bois d'œuvre.

La biomasse, issue de la photosynthèse, est une ressource essentielle pour atteindre la neutralité carbone en 2050, autant parce qu'elle peut se substituer aux énergies fossiles que par sa capacité à séquestrer du carbone.

Les usages énergétiques de la biomasse resteront limités. Ils ne doivent être mobilisés qu'après satisfaction des besoins alimentaires et matériaux. Si les estimations du potentiel énergétique de la biomasse en 2050 varient fortement selon les études, la prise en compte des différentes contraintes (notamment séquestration du carbone) conduit à retenir l'hypothèse la plus basse autour de 250 TWh/an. La biomasse agricole offre le potentiel le plus important.

Nous définissons une méthode pour hiérarchiser les usages selon leur capacité à réduire les émissions de CO_2 à moindre coût. Une construction plus systématique des coûts d'abattement reste à produire. Ressortent comme prioritaires les procédés industriels (biogaz), l'électricité de pointe (biogaz), les soutes maritimes (bioGNV), ou le transport aérien (comme transition vers les e-fuels). Une réflexion est à mener sur les autres usages, comme le chauffage résidentiel.

Académie des technologies
Le Ponant – Bâtiment A
19, rue Leblanc
75015 PARIS
+33(0)1 53 85 44 44
secretariat@academie-technologies.fr
www.academie-technologies.fr

Académie d'Agriculture de France
18, rue de Bellechasse
75007 PARIS
+33(0)1 47 05 10 37
www.academie-agriculture.fr

ISBN : 979-10-97579-65-4