



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

décembre 2023

Évaluation du potentiel de production d'énergies renouvelables à partir de la biomasse agricole et forestière française à l'horizon 2050

Emmanuel Clause – CGE
Pascal Dupuis – CGE
Philippe Follenfant - IGEDD
Philippe Guignard – IGEDD
Michel Hermeline – CGAAER
Françoise Lavarde – CGAAER
Michel Rostagnat – IGEDD

Rapport n° 014972-01



Rapport n° 23054



Rapport n°
2023/05/CGE/SG



**Les auteurs attestent qu'aucun des éléments de leurs activités
passées ou présentes n'a affecté leur impartialité dans la rédaction
de ce rapport**

Statut de communication	
☐	Préparatoire à une décision administrative
☐	Non communicable
☐	Communicable (données confidentielles occultées)
☒	Communicable

Sommaire

Sommaire	3
Résumé.....	6
Liste des recommandations	8
Introduction.....	9
1 Des connaissances insuffisamment partagées et la difficulté d'un langage commun	10
1.1 Les rendements de conversion de la biomasse en énergie dépendent des procédés utilisés.....	10
1.1.1 La combustion directe.....	10
1.1.2 La production de carburants liquides.....	11
1.1.3 La production de gaz combustibles et de biométhane	12
1.1.4 Les comparaisons sont toutefois assez simples.....	13
1.2 L'absence d'approches et d'unités de calcul harmonisées, des discours difficilement comparables	15
2 Une offre contrainte et limitée de la biomasse à usage énergétique	17
2.1 La spécificité des productions agricoles et forestières	17
2.1.1 La contribution aux « puits de carbone »	17
2.1.2 Des aménités au carrefour de multiples enjeux	17
2.1.3 Des évolutions lentes	18
2.1.4 Les usages de la biomasse sont concurrents.....	18
2.2 Une connaissance éclatée des ressources en biomasse	18
2.3 Des simulations multiples	19
2.3.1 La simulation des ressources de biomasse potentiellement disponibles pour l'énergie n'est pas un processus simple.....	19
2.3.2 Les approches, privées et publiques, conduisent à des projections très différentes	20
2.3.3 Des prévisions fondées sur un modèle internalisant les contraintes et les variables sont nécessaires.....	21
2.4 Les ressources de biomasse à usage énergétique en France	22
2.4.1 Les productions agricoles actuelles.....	22
2.4.2 Quelques ressources agricoles supplémentaires peuvent être développées, essentiellement pour la production de biométhane	22
2.4.3 Pour la biomasse ligneuse, un choix cornélien entre augmentations de la récolte ou du puits de carbone	24
2.4.4 Les déchets, une ressource limitée	26

2.5 Le potentiel énergétique espéré en 2050 est significatif mais inférieur aux besoins.....	27
2.6 Des points de vigilance.....	27
2.6.1 La volatilité des prix	27
2.6.2 La disponibilité de la main d'œuvre	27
2.6.3 L'absence de filières de valorisation et de références techniques de terrain	28
2.6.4 La surface agricole utile limitée.....	28
2.6.5 La nécessité d'incitations et d'orientations économiques fortes	28
3 La demande en énergie issue de la biomasse sera difficile à maîtriser	29
3.1 Les objectifs climatiques de la France contraignent très fortement les trajectoires	29
3.2 Les variations de la demande toutes énergies ont un impact important sur la demande de biomasse.	30
3.3 La consommation de biomasse dans le scénario AMS 2 est encore accrue	32
3.4 Les projections de demande sont très sensibles aux hypothèses	33
3.4.1 L'industrie exprime une demande forte de biomasse	34
3.4.2 L'intérêt des stress-tests	35
3.4.3 Des points de vigilance	36
4 L'offre ne peut raisonnablement pas répondre à la demande	37
5 Rapprocher l'offre et la demande – propositions pour la gouvernance	39
5.1 Se donner des instruments de connaissance et de pilotage	39
5.1.1 Mettre en place un observatoire national de l'offre et de la demande	39
5.1.2 Faire établir et suivre des plans d'approvisionnement formalisés pour les plus gros consommateurs.....	39
5.2 Améliorer la connaissance et les prévisions.....	40
5.2.1 Nécessité d'une meilleure compréhension et d'une approche cohérente de la question au sein des administrations	40
5.2.2 Mieux modéliser l'offre et les usages potentiels et futurs de la biomasse	41
5.3 Piloter la convergence de l'offre et de la demande.....	41
5.3.1 Fixer des principes stables et cohérents	41
5.3.2 Mettre en place un cadre économique propice.....	42
5.3.3 Faciliter l'acceptabilité des projets.....	43
Conclusion.....	44
Annexes	45
Annexe 1. Lettre de mission	46
Annexe 2. Liste des personnes rencontrées	49

Annexe 3.	Glossaire des sigles et acronymes	54
Annexe 4.	Bibliographie.....	56
Annexe 5.	L'influence de l'humidité sur le pouvoir calorifique inférieur de la biomasse et les limites du recours au pouvoir calorifique supérieur	64
Annexe 6.	La modélisation du potentiel de biomasse en France métropolitaine et ses améliorations possibles	66
Annexe 7.	Quelles ressources de biomasse développer en France métropolitaine ?	70
Annexe 8.	Le potentiel forestier français	73
Annexe 9.	Les objectifs de décarbonation endossés par la France sont particulièrement ambitieux et contraignent fortement les scénarios envisagés.....	130
Annexe 10.	Estimation de la disponibilité en biomasse	134
Annexe 11.	Incidence des prix de la biomasse	137

Résumé

La biomasse est la plus ancienne source d'énergie utilisée par l'homme et un des moyens pour atteindre la neutralité carbone en 2050. Son exploitation rencontre cependant plusieurs contraintes :

- elle est dotée d'une faible densité énergétique ;
- elle concourt au stockage de carbone ; sa surexploitation engendre la dégradation du puits de carbone constitué par les sols, les prairies et les forêts ;
- sa récolte peut impacter la biodiversité ;
- l'alimentation, humaine et animale, ou la fourniture de matériaux sont des usages prioritaires par rapport à sa transformation en énergie.

Afin de vérifier que le potentiel de la biomasse agricole et forestière pouvait répondre aux besoins identifiés pour la stratégie nationale bas carbone 3 (SNBC 3) au sein de la Stratégie française énergie-climat (SFEC), les ministres chargés de l'agriculture, de l'écologie, de l'énergie et de l'industrie ont diligenté une mission interministérielle. Ce rapport en expose les résultats.

Tout d'abord, la mission a rencontré d'importantes difficultés pour réconcilier les sources de données et les nombreuses études qu'elle a consultées :

- Pour ses différents emplois, l'énergie existe sous plusieurs formes ou vecteurs non toujours substituables. Les carburants liquides ou gazeux sont très polyvalents et permettent des usages (hautes températures, motorisations, chimie notamment) que n'offre pas la combustion directe de la biomasse. En revanche, ils nécessitent de l'énergie pour leur fabrication, laquelle est d'un rendement énergétique de l'ordre de 50 % par opposition à celui de la combustion, considéré égal à 1. Cette réalité est très insuffisamment prise en compte dans les raisonnements, études et prospectives.
- Les mesures de la biomasse utilisent de multiples unités (énergie, masse, volume, surface) sans que leur usage ou leur équivalence soient toujours justifiés. Des confusions relatives aux concepts physiques sous-jacents peuvent aussi être décelées. En outre, les coefficients de transformation d'une quantité à une autre sont assez variables pour autoriser des fluctuations significatives des résultats.

Ce contexte rend ardues la compréhension et les évaluations. Ainsi, un lecteur non averti est rapidement conduit à admettre de nombreuses assertions ou comparaisons difficiles à vérifier. Il ne peut être exclu que certains agents économiques jouent de cette difficulté pour mieux présenter leur discours, tandis que d'autres intervenants ne paraissent pas s'interroger sur les conséquences d'un raisonnement incomplet ou biaisé.

Enfin, il est rapidement apparu que le recours à une sous-traitance imparfaitement suivie ou contrôlée et confiée à plusieurs cabinets conseils a conduit à des simulations entachées d'erreurs, parfois importantes, résultant de la conception et de l'articulation des modèles utilisés. À cela s'ajoute l'absence d'analyse de sensibilité pour les résultats présentés.

Malgré ces difficultés, un potentiel annuel de biomasse agricole et forestière peut être identifié avec des possibilités d'accroissement à moyen ou long terme :

- Aujourd'hui, les cultures dédiées à la production de biocarburants de première génération (11 TWh), le bois combustible (estimé à 25 MtMS – millions de tonnes de matière sèche, 115 TWh), les effluents d'élevage (environ 1 MtMS – 1,5 TWh) et les résidus de culture (5 MtMS – 10 TWh) sont des sources existantes qui pourraient être raisonnablement développées ou mobilisées.
- À court et moyen terme, les cultures intermédiaires à vocation énergétique peuvent offrir une nouvelle ressource d'environ 15 MtMS et 40 TWh. Un surcroît de récolte bois de 5 MtMS peut conduire à 10 TWh supplémentaires, 10 MtMS de résidus de cultures et 7 MtMS d'effluents d'élevage pourraient apporter 34 TWh en complément.

- À long terme, au-delà de 2050, la reforestation des terres délaissées pourrait concerner 1,5 Mha. Si leur exploitation est éloignée, en revanche la contribution au puits de carbone sera initiée plus rapidement.

À l'horizon 2050 et selon le mode de valorisation, par combustion directe, méthanisation ou synthèse de carburants liquides, cette biomasse (environ 70 MtMS), avec les biocarburants de première génération, pourrait fournir un total de 170 TWh en biogaz et biocarburants à 240-250 TWh (dont 35 TWh en biocarburants 2G, 60/65 TWh en biogaz et 110 TWh par combustion directe).

Cette offre, déjà optimiste, est significativement inférieure mais comparable aux projections actuelles de l'administration, qui envisagent une ressource de 305 TWh en énergie finale (dont 13 TWh issus de déchets). Toutefois, ces dernières mobiliseraient de façon peu réaliste environ 95 MtMS de biomasse, hors biocarburants de première génération, selon la mission en raison d'une conversion en biocarburants et biogaz importante. Elle est encore plus éloignée de la demande métropolitaine prévue en 2050 (340 TWh d'énergie finale, soit 540 TWh d'énergie primaire et environ 120 MtMS, si les carburants de deuxième génération sont substitués à ceux de première). De ce fait, la mission souligne l'impossibilité d'équilibrer la stratégie nationale bas carbone avec de l'énergie issue de la biomasse puisque les besoins estimés sont une fois et demie supérieurs aux ressources.

Biomasse énergie (TWh)	2030	2040	2050
Demande SFEC run 2 (Ep/Ef)	324/238	537/336	541/340
Ressource SFEC run 2 (Ef)	228	265	305
Ressource estimation mission (Ef)	n.s.	n.s.	170 à 250

Qui plus est, la demande correspond à une valeur minimale qui risque d'être rapidement dépassée car fondée sur des hypothèses ambitieuses, lesquelles pourraient aisément ne pas être satisfaites (rénovation thermique des logements, mutation des véhicules de transport, efficacité énergétique de l'industrie, etc.). Le risque d'accroissement du déséquilibre est donc réel.

Afin de rapprocher au mieux l'offre de la demande et compte tenu de l'importance majeure des enjeux nationaux, la mission fait plusieurs propositions :

- améliorer la connaissance de l'offre et de la demande de biomasse par la constitution d'un observatoire national doté de déclinaisons régionales à partir des structures existantes (sectorielles et aujourd'hui peu coordonnées) ;
- construire un modèle de simulation des productions agricoles et forestières de biomasse internalisant les conditions agronomiques et climatiques ainsi que la variabilité géographique. En l'absence d'un tel modèle, les prévisions resteront imprécises et contestables, même si elles sont fondées « à dire d'expert » ;
- améliorer le partage, le traçage et la compréhension des données utilisées par les administrations (les trop nombreuses erreurs, parfois significatives, empêchent de considérer les résultats qui en sont issus comme une référence non contestable) ;
- développer les cultures intermédiaires à vocation énergétique, mobiliser la production forestière par une meilleure gestion, plus rigoureusement encadrée, maintenir, voire accroître légèrement les productions de biocarburants de première génération ;
- organiser le boisement des terres délaissées ;
- définir les principes et un cadre stable de priorisation des usages de la biomasse ou « *merit order* ».

Liste des recommandations

Recommandation 1.	Confirmer l'intérêt des biocarburants de première génération, maintenir leur usage et tendre vers l'autosuffisance (ministères chargés de l'agriculture, et de l'énergie).....	15
Recommandation 2.	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 (MASA, avec appui INRAE, IGN).....	22
Recommandation 3.	Inciter au développement des cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) d'hiver, impérativement en association avec la constitution d'un réseau de méthaniseurs suffisamment dense, avec un objectif de l'ordre de 3 Mha. (MASA, MTE).	23
Recommandation 4.	Organiser le boisement des surfaces agricoles délaissées (actuelles et futures) (MASA, MTECT).	26
Recommandation 5.	Constituer un observatoire national de l'offre et de la demande de biomasse à partir des structures existantes pour agréger les informations disponibles au niveau national et régional et garantir leur exhaustivité (commissariat général au développement durable - CGDD/SDES, SSP).....	39
Recommandation 6.	Instituer un plan d'approvisionnement formalisé pour les installations classées soumises à autorisation et enregistrement utilisant de la biomasse à des fins non alimentaires et assurer son suivi (DGPR en lien avec la DGEC).....	40
Recommandation 7.	Organiser, tracer et documenter les partages d'information et l'interface entre les sources de données, ainsi que leur traitement dans les diverses modélisations de la SFEC (DGEC).	41
Recommandation 8.	Définir des principes et un cadre stable et rationnel de priorisation des usages de la biomasse à destination énergétique (DGEC/DGPE).....	42

Introduction

Plus ancienne source d'énergie utilisée par l'homme, la biomasse est un moyen de concourir à la neutralité carbone en 2050 nécessaire pour contenir le changement climatique. Toutefois, à lui seul, ce moyen est insuffisant face à l'ampleur des consommations anthropiques d'énergie. Aujourd'hui, en France, la biomasse fournit moins de 10 % de l'énergie finale utilisée.

La biomasse présente une faible densité énergétique. Elle dérive directement de la transformation du rayonnement solaire en énergie chimique par la photosynthèse, laquelle présente un rendement très faible, de l'ordre de 1 à 2 %. Les transformations successives qu'elle peut subir au travers des chaînes trophiques ne modifient pas ces caractéristiques¹. La force de la photosynthèse repose sur son caractère résilient depuis plusieurs milliards d'années et dans sa capacité à fournir des molécules élaborées et à réguler l'équilibre oxygène / dioxyde de carbone (CO₂).

Le CO₂ atmosphérique capté par la photosynthèse est stocké plus ou moins longtemps, puis relâché lors de la destruction de la biomasse par digestion, dégradation, respiration, fermentation ou par combustion. Ces transformations, qui sont des oxydations, libèrent de l'énergie.

Si l'exploitation de la biomasse relève d'un cycle stable et durable, son utilisation est neutre en carbone, ce qui lui confère un rôle particulier dans la décarbonation de nos activités et l'objectif de neutralité carbone en 2050. De nombreuses contraintes s'imposent cependant. L'alimentation, humaine et animale, est intégralement fournie par la biomasse ; de nombreux matériaux (du bois d'œuvre à certains plastiques) en sont issus. Enfin, le stockage du carbone dans les sols et les organismes (végétaux principalement), vivants ou non (bois mort, tourbe, coquilles animales, etc.), peut présenter des intérêts écologiques essentiels et s'opposer aux usages énergétiques. L'usage énergétique de la biomasse n'est donc généralement pas prioritaire.

La stratégie française énergie climat (SFEC) constitue la feuille de route actualisée de la France pour atteindre la neutralité carbone en 2050 et assurera l'adaptation de notre société à l'impact du changement climatique. Elle reposera sur la [Stratégie nationale bas-carbone](#) (SNBC 3), sur le [Plan National d'Adaptation au Changement Climatique](#) (PNACC 3) et sur la [Programmation pluriannuelle de l'énergie](#) (PPE 2024-2033) en cours d'élaboration. Elle fait l'objet de travaux intenses pour décrire les évolutions possibles et souhaitables du modèle productif national et des comportements collectifs et individuels ; elle intègre les possibles progrès technologiques et la sobriété nécessaires à l'atteinte de nos objectifs en matière d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et de consommation d'énergie. Cependant, la réalisation simultanée de tous les engagements et le respect des nombreuses contraintes conduisent à des trajectoires très difficiles et tendues, tant pour l'offre que pour la demande de biomasse.

La biomasse a pu être parfois perçue comme une variable d'équilibre des projections. Ainsi, la stratégie nationale bas carbone (SNBC 2) de 2020 et les premières simulations pour la future SNBC 3 ont proposé des mobilisations sensiblement différentes de la biomasse, fondées sur des hypothèses encore imparfaitement documentées.

C'est pourquoi, par une lettre du 29 mars 2023 (annexe n°1), les ministres chargés de l'agriculture, des transitions écologique et énergétique ainsi que de l'industrie ont demandé au Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux, au Conseil général de l'économie et à l'Inspection générale de l'environnement et du développement durable qu'une mission soit diligentée pour évaluer le potentiel de production d'énergies renouvelables à partir de la biomasse agricole et forestière au regard des autres objectifs assignés à ces deux secteurs à l'horizon 2050.

La mission, qui a fourni une note d'étape au début du mois de juillet 2023, a commencé ses analyses documentaires et ses auditions (annexes n° 2 et 4) dès le mois de mai. Elle a étudié les simulations informatiques ou « run » utilisées par les services de l'État ; celles-ci décrivent l'offre et la demande énergétiques, notamment pour la biomasse, projetées jusqu'en 2050 et permettent d'en estimer l'équilibre et le caractère soutenable. Elles supposent la prise en compte des mesures existantes, déjà décidées et inscrites dans les lois et règlements (scénarios dits AME) ou en introduisent d'autres pour construire les scénarios « avec mesures supplémentaires » (ou AMS).

¹ À la différence des transformations géochimiques qui ont conduit aux charbon, pétrole et gaz fossiles ; lesquelles exigent des millions d'années pour être réalisées.

1 Des connaissances insuffisamment partagées et la difficulté d'un langage commun

La biomasse ne peut être agrégée simplement en un concept unique, notamment parce que ses utilisations sont variées, (alimentation, matériaux, énergie) et correspondent à des propriétés mesurées par des caractéristiques différentes.

Pour ses usages énergétiques, la question, fondamentale et préalable à toute analyse, est de relier facilement une quantité d'énergie (sous forme solide, liquide ou gazeuse) à la quantité nécessaire de biomasse pour l'obtenir. Elle est traitée dans cette première partie.

Si cette question est ignorée, la compréhension et les comparaisons des différents scénarios présentés par des organismes, privés et publics, sont rendues difficiles par l'usage d'arguments multiples, appuyés sur des données présentées dans des unités très diverses (masses, énergie, volume, surface) et parfois accompagnés de confusions quant aux concepts physiques sous-jacents (énergies et puissance, pouvoirs calorifiques inférieurs et supérieurs).

Ainsi, un observateur non-averti est rapidement conduit à admettre de nombreuses assertions ou comparaisons difficiles à vérifier.

1.1 Les rendements de conversion de la biomasse en énergie dépendent des procédés utilisés

La biomasse peut être convertie en plusieurs vecteurs énergétiques qui présentent des possibilités d'utilisation et donc des intérêts variables :

- solide, brute ou transformée en charbon de bois, pour une combustion directe,
- liquéfiée et convertie en biocarburant (éthanol, huiles, composés estérifiés) de première ou seconde génération,
- méthanisée ou gazéifiée (par pyrolyse ou hydro-thermolyse).

Toutefois, le passage d'un état brut à un combustible évolué (liquide ou gazeux) implique nécessairement une perte significative, qu'elle soit mesurée en masse ou en énergie². Identifié dans de nombreux rapports et publications, ce constat est fondamental au sens où il soutient l'ensemble des raisonnements ultérieurs.

1.1.1 La combustion directe

Cette valorisation libère la totalité de l'énergie contenue dans la biomasse mais appelle trois remarques :

- Le degré d'humidité est essentiel car l'évaporation de l'eau est consommatrice d'énergie. En conséquence le pouvoir calorifique du bois (ou des pailles) chute rapidement avec la proportion d'eau qu'il contient (cf. annexe 5). Toutefois, s'il est rapporté à la matière sèche (anhydre), cette décroissance est beaucoup moins forte.
- La possibilité de récupérer la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau contenue dans les fumées permet d'atteindre le pouvoir calorifique supérieur (PCS) du combustible³. Elle existe si la température des fumées peut être abaissée à des niveaux assez faibles, ce qui est le cas pour le chauffage des bâtiments mais non pour de nombreuses applications industrielles qui exigent des températures de plusieurs centaines de degrés Celsius. Dans la négative, il faut alors considérer le pouvoir calorifique inférieur (PCI).

² Le rendement des dispositifs exploitant ces vecteurs énergétiques (chaudière, poêle, moteur à explosion ou turbine), qui diminuent encore l'efficacité énergétique, ne sont pas pris en compte dans les développements qui suivent.

³ Cette récupération de l'énergie de transition de phase (gazeuse à liquide) est mise à profit dans les chaudières domestiques à condensation brûlant du gaz fossile (voir aussi annexe 5).

- La densité énergétique de la biomasse brute est inférieure à celle des énergies fossiles⁴. Ce point ne devra pas être perdu de vue si des transports importants de biomasses brutes sont envisagés.

1.1.2 La production de carburants liquides

D'assez nombreuses voies autorisent la conversion de la biomasse en carburants liquides. Elles sont déjà mises en œuvre industriellement pour certaines, au stade de l'unité pilote pour d'autres.

1.1.2.1 Les carburants de première génération

Ces carburants dits « 1G » regroupent l'éthanol et les esters produits par des transformations simples⁵ des huiles et graisses (végétales ou animales).

Au-delà des rendements présentés ci-après, leur fabrication engendre également des produits riches en protéines et de haute valeur alimentaire pour les animaux (tourteaux de graines oléo-protéagineuses, drèches de céréales). Plusieurs huiles peuvent aussi être employées pour l'alimentation humaine.

La production d'éthanol par fermentation livre selon les industriels (en masse) :

- pour les céréales, environ 1/3 d'éthanol, 1/3 de résidus utiles pour l'alimentation animale et 1/3 de CO₂,
- pour une tonne de betterave 790 kg d'eau, 50 kg de pulpes (utilisées en alimentation animale ou méthanisables), et du sucre engendrant 80 kg (100 l) d'éthanol et 80 kg de CO₂.

L'essentiel de l'énergie du sucre se retrouve dans l'alcool (85 %) ⁶. Toutefois, les autres composants de la plante ne sont pas valorisés. Rapporté à l'énergie obtenue par combustion directe de la biomasse déshydratée (18 MJ/kg), le rendement de la production d'alcool est de l'ordre de 60 % (un peu moins si l'on considère l'énergie pour les fermentation, distillation et déshydratation).

La production de biodiesel est principalement assurée à partir d'huiles vierges (colza essentiellement), métropolitaines ou importées⁷ et d'huiles usagées (avec un important risque de fraudes). Une tonne d'huile brute livre quasiment une tonne de biodiesel⁸. Le rendement par rapport à la biomasse initiale de graines est aussi de l'ordre de 60 % en énergie.

1.1.2.2 Les carburants de seconde génération

Des voies biologiques exploitent l'hydrolyse enzymatique des polysaccharides pour obtenir des sucres eux-mêmes fermentés. Intéressantes en théorie pour la transformation de la cellulose⁹, elles sont peu mises en avant.

En revanche, les voies thermochimiques sont activement explorées. Elles consistent à pyrolyser¹⁰ la biomasse pour obtenir un mélange de mono- et dioxyde de carbone (CO et CO₂), hydrogène (H₂) et vapeur d'eau, le « syngaz » qui après purification permet la synthèse de chaînes carbonées plus ou moins longues selon les catalyseurs et les conditions de la réaction dite de Fischer -Tropsch.

⁴ Une tonne de pétrole (1 tep) correspond à 11,63 MWh, une tonne de charbon à 8,14 MWh, une tonne de biomasse à environ 4,5 MWh/tMS (5 MWh/tMS pour une matière parfaitement anhydre).

⁵ Transestérification et hydrogénation notamment.

⁶ D'un point de vue thermodynamique, l'énergie (de combustion) de l'alcool (28,7 MJ/kg) est supérieure à celle du sucre⁶ (16,7 MJ/kg).

⁷ L'huile de palme n'est plus utilisable en France depuis 2020 (décision 2017).

⁸ 10 % de méthanol sont ajoutés et 6 % de glycérine extraits ; en revanche, le biodiesel possède un PCI plus faible (-8 %) que celui du gazole

⁹ La cellulose et l'amidon sont deux polymères du glucose qui diffèrent par leur liaison inter-monomères. Les organismes capables de dégrader la cellulose par voie enzymatique sont presque exclusivement unicellulaires.

¹⁰ Chauffer à température plus ou moins élevée et en l'absence d'oxygène pour provoquer la dégradation des composés sans combustion.

Des opérations de raffinage proches de celles réalisées avec les combustibles fossiles achèvent le process.

Ces réactions connues depuis le début du 20^e siècle, mises en œuvre parfois en temps de guerre ou de blocus commercial, font l'objet d'actives recherches et de pilotes industriels. Les difficultés techniques sont réelles mais a priori surmontables¹¹. En revanche, les coûts de production et surtout d'investissements sont considérables (le ratio 1 milliard d'euros pour une capacité de 60 à 100 000 t/an a été évoqué). En conséquence les opérateurs pétroliers restent « prudents » malgré leur intérêt déclaré.

Les rendements communiqués par l'IFPEN sont précis : 0,53 en énergie (énergie des produits de synthèse par rapport à l'énergie de la biomasse entrée dont une partie est consommée par la pyrolyse) et beaucoup plus faibles en masse (environ 18 %, la densité énergétique des carburants liquides étant trois fois plus élevée que celle de la biomasse). Une voie pour accroître la quantité de carburants produits est d'enrichir le « syngaz » en hydrogène ; le rendement énergétique chute à 48 % en tenant compte du coût énergétique de production de l'hydrogène¹².

La pyrogazéification pourrait être remplacée par une hydro-thermolyse¹³ se déroulant en phase liquide et permettant de valoriser des biomasses à forte teneur en eau. Cette perspective suscite des recherches mais serait plus complexe à mettre en œuvre que la pyrolyse.

1.1.3 La production de gaz combustibles et de biométhane

Les voies biologiques et chimiques sont possibles, comme pour les carburants liquides.

1.1.3.1 La méthanisation

Cette voie biologique est largement mise en œuvre depuis quelques années. La fermentation des biomasses en milieu humide, le plus souvent liquide, produit du méthane (CH₄) et du CO₂ en quantités proches et un digestat conservant l'essentiel des éléments fertilisants (P, K et N).

La gestion d'un méthaniseur est une opération industrielle qui requiert une attention continue et une gestion précise des approvisionnements. Toutefois, les investissements pour ces installations sont suffisamment limités pour rester accessibles à de nombreux opérateurs.

Les rendements sont assez bien connus, variables selon les matières employées. Les céréales proches de la maturité, les graisses et les déchets de l'alimentation sont les plus performants, les déjections animales, certains sous-produits de cultures sont utilisables tandis que les déchets lignocellulosiques sont déconseillés. Souvent exprimés par un potentiel méthanogène en Nm³ (normo-m³) de méthane par tonne de matière sèche (tMS), ils peuvent être convertis en énergie et rapportés à celle qu'apporterait la matière première par combustion directe pour fournir un rendement ou facteur de conversion¹⁴.

Les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) et les ensilages de céréales ont un potentiel de production de l'ordre de 250 à 290 m³CH₄/tMS, soit environ 2,5 à 2,9 MWh/tMS¹⁵. Les graisses (intrinsèquement riches en énergie) ou des déjections de volailles peuvent accroître ce potentiel méthanogène. En revanche, les fumiers de ruminants et surtout les pailles ont des potentiels nettement plus faibles, de 150 à 200 Nm³CH₄/tMS¹⁶, soit environ 1,5 à 2 MWh/tMS. Ces coefficients peuvent varier sensiblement avec les sources, selon qu'il s'agit de potentiels théoriques

¹¹ Notamment l'acidité des produits de synthèse poserait des difficultés lors des opérations de raffinage (corrosion).

¹² Cette voie pourrait permettre un stockage de l'énergie associée à l'hydrogène.

¹³ Appelée encore gazéification hydrothermale.

¹⁴ Les opérateurs gaziers dénoncent souvent cette approche en raison de la réaction en milieu humide, mais la mission considère qu'il s'agit de la seule possibilité de comparer les différentes voies de valorisation énergétique.

¹⁵ 1 Nm³ CH₄ possède un PCI très proche de 10 kWh (9,96) et un PCS de 11,07 kWh.

¹⁶ Base Méthasym [31].

(déterminés en laboratoire et qui doivent être réduits d'environ 20 %) ou de résultats observés (plus rarement communiqués ...).

Le gaz produit est un mélange comportant en volume de 50 à 65 % de CH₄, de 35 à 45 % de CO₂, de la vapeur d'eau et différents composés polluants (hydrogène sulfuré, etc.). Une séparation purification est impérative avant une injection dans les réseaux de distribution et transport. Actuellement, ce CO₂ biogénique n'est en général pas valorisé et rejeté directement dans l'atmosphère.

Enfin, la consommation électrique des processus de méthanisation¹⁷ ne doit pas être omise. Des ratios issus des observatoires régionaux de méthanisation indiquent, pour les installations d'injection, des consommations électriques de l'ordre de 1 à 1,5 kWh par Nm³ de CH₄ auxquelles s'ajoutent les consommations d'énergie nécessaires au chauffage et au fonctionnement du méthaniseur. Le ratio d'efficacité énergétique de l'installation est alors de l'ordre de 80 à 86 %¹⁸.

Toutefois, un des principaux risques au développement de la méthanisation est la difficulté liée à l'acceptabilité sociale de certaines installations.

1.1.3.2 Les transformations chimiques

Il est possible de produire du gaz combustible par des voies de synthèse thermochimique, par pyrolyse, par hydro-thermolyse ou par la méthanation, réaction qui produit du méthane à partir de monoxyde ou dioxyde de carbone et d'hydrogène.

Ces voies ont été peu explorées par les interlocuteurs de la mission et semblent être encore au stade de la recherche¹⁹. Il est peu probable que leurs rendements soient supérieurs à ceux des réactions évoquées précédemment.

1.1.4 Les comparaisons sont toutefois assez simples

Les analyses précédentes donnent les ordres de grandeur :

- la combustion directe permet de récupérer l'essentiel de l'énergie de la biomasse environ 4,5 MWh/tMS²⁰ si celle-ci est à environ 20 % d'humidité (5 MWh/tMS pour le bois anhydre) ; cependant celle-ci ne permet d'obtenir que de la chaleur et non de l'énergie mécanique et les températures obtenues restent relativement faibles (de l'ordre de 800 °C au foyer, ce qui est inférieur aux besoins de nombreux usages industriels) ;
- la production de biocarburant ou de biogaz ne collecte que la moitié de l'énergie initiale (1,8 à 2,8 MWh/tMS) mais dans des vecteurs beaucoup plus performants et polyvalents, pouvant fournir directement de la chaleur haute température ou du travail (avec les moteurs ou les turbines à combustion) ;
- la méthanisation est vraisemblablement la méthode la plus efficace et la moins coûteuse, à partir de biomasse humide faiblement ligneuse ;
- sous des formulations littéraires diverses, dans des tableaux de coefficients ou dans leurs annexes, plusieurs études (par exemple [5], [6], [9]²¹) exposent précisément cette différence de rendement ; celle-ci est pourtant rarement reprise.

¹⁷ Les « run » (feuilles bilans énergie) utilisés par l'administration ne prennent pas en compte cette consommation d'électricité (pourtant non négligeable en 2050 : 9 à 10 TWh).

¹⁸ Selon les sources régionales, mais 92 % selon un opérateur industriel. Un autre confirme les premières valeurs en indiquant que les fermentations de déjections animales consomment plus d'énergie.

¹⁹ Toutefois un grand opérateur énergétique a fait état d'une très récente et première unité industrielle au Danemark (3 MNm³/an = 0,3 TWh/an).

²⁰ Valeur reprise par la mission pour tenir compte de l'humidité toujours présente dans la matière végétale (la valeur de 5 MWh/tMS pour les matières ligneuses anhydres est consensuelle).

²¹ Les nombres entre crochets [5], [6]... renvoient aux références bibliographiques listées en annexe 4.

Les nombreuses publications consultées par la mission comptabilisent souvent la biomasse en unités énergétiques et non massiques, ce qui est source d'ambiguïté et de confusion. Il est facile, même si c'est très simplificateur, de considérer que l'énergie primaire totale obtenue à partir d'un ensemble de biomasse est :

$$E = 4,5 \times Q_{\text{combustion}} + 2 \times Q_{\text{gaz ou carburants liquides}} \quad (1)$$

E est exprimé en MWh, Q en tMS, les coefficients de conversion étant 4,5 MWh/TMS pour la combustion directe et 2 MWh/TMS pour une conversion en biométhane ou en carburant liquide.

Cette formule permet de relier les quantités d'énergie exprimées dans de nombreuses études prospectives et la quantité de biomasse requise pour les produire.

D'autres éléments sont à prendre en compte dans la comparaison, en particulier économiques. La combustion de la biomasse peut permettre « d'effacer » à faible coût des pointes de consommation énergétique, notamment électrique (par exemple pour le chauffage domestique). Le biogaz pourrait aussi disposer d'un avantage déterminant sur les biocarburants de deuxième génération en raison des moindres investissements requis pour sa production (cf. 5.3.2.).

Une autre vision intéressante est de rapporter l'énergie à la surface nécessaire pour l'obtenir :

	rendement tMP/ha	conversion biocarburant par t MP	milliers de litres de biocarburant / ha	MWh/ha	coefficient d'allocation	MWh/ha alloué
Blé	7,3	4,3 hl éthanol	$7,3 \times 4,3 \times 100 = 3,1$	18,4	0,65	28,19
Maïs	10,1	4,3 hl éthanol	$10,1 \times 4,3 \times 100 = 4,3$	25,4	0,89	28,55
Betterave	93,4	1 hl éthanol	$93,4 \times 1 \times 100 = 9,3$	55,0	0,85	64,67
Colza	3,8	0,41 t biodiesel	$3,8 \times 0,41 / 0,89 = 1,8$	16,6	0,64	25,85
Tournesol	2,7	0,42 t biodiesel	$2,7 \times 0,42 / 0,89 = 1,3$	12,0	0,64	18,73
CIVE (tMS)	6	2,8 MWh/tMS	ns	16,8	-	-
Miscanthus 1 (tMS)	13	4,5 MWh/tMS	ns	58,5	1	58,5
Miscanthus 2 (tMS)	13	2 MWh/tMS	ns	26	1	26

Tableau n° 1 : production énergétique de quelques cultures métropolitaines

MP : matière première ; masse volumique biodiesel : 0,89 kg/litre, masse volumique alcool : 0,8 kg/l ; miscanthus 1 valorisé par combustion directe ; miscanthus 2 transformé en carburant liquides par réactions de Fischer-Tropsch. Les rendements agronomiques font implicitement des hypothèses « productivistes » où l'eau (de pluie ou d'irrigation) et les fertilisants ne sont pas limitants.

Le coefficient d'allocation permet de répartir comptablement les surfaces entre la production de carburant et la production d'aliments pour le bétail ; On peut y lire par exemple que 1 ha de maïs fournira la même quantité de biocarburant que 1 ha de miscanthus avec en plus des co-produits pour l'alimentation du bétail et une réversibilité plus grande (la culture du miscanthus sur une parcelle doit s'envisager pour environ 10 années).

(source : données Solagro et complétées par la mission).

Cette présentation met en avant un intérêt des biocarburants de première génération²², que souligne la mission, même si des dispositions législatives européennes constituent à ce jour des freins à leur développement et que la plupart des scénarios envisagent leur disparition à terme :

- il s'agit de filières industrielles matures ;
- ces combustibles sont associés à des aliments indispensables pour le bétail et encore largement importés²³ ;

²² La directive RED III n'interdit pas la production de biocarburants mais en limite la prise en compte dans les objectifs de développement des renouvelables.

²³ La part importée (grains et produits finis) est imparfaitement identifiée dans les simulations actuelles qui semble l'assimiler à une part des productions nationales.

- comparés aux biocarburants 2G, la production d'un hectare de betteraves sucrières fournit 55 MWh sous une forme « évoluée » (éthanol), ce qui est deux fois supérieur à ce que peut fournir du Miscanthus qui présente de surcroît l'inconvénient d'être une culture pérenne ;
- ces carburants semblent être la seule solution simple pour l'essentiel des activités motorisées agricoles et des travaux publics, ce que défend la DGITM (direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités) ; pour mémoire, environ 4,7 Mt de gazole non routier ont été utilisés en France en 2022 ;
- ils pourraient permettre de ne pas renouveler certains véhicules ou engins lourds peu fréquemment utilisés ou non électrifiables mais à durée de vie longue et ainsi faciliter le passage du cap de l'obsolescence des moteurs thermiques ;
- enfin, le développement des biocarburants 1G permettrait d'améliorer l'autosuffisance énergétique de la France, puisqu'actuellement la production agricole française ne couvre qu'environ un tiers de la consommation.

Recommandation 1. Confirmer l'intérêt des biocarburants de première génération, maintenir leur usage et tendre vers l'autosuffisance (ministères chargés de l'agriculture, et de l'énergie).

Ce développement, utile pour le commerce extérieur français (pour l'énergie et les protéines) et qui répondrait à une probable augmentation des prix mondiaux si le recours à la biomasse se développe dans le monde, exigerait toutefois de presque tripler les surfaces consacrées aux biocarburants pour atteindre de l'ordre de 2 à 2,2 Mha/an. L'augmentation de certaines cultures (tournesol, colza de printemps, betterave) pourrait faciliter la production de cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE, cf. 2.4.2.1.).

1.2 L'absence d'approches et d'unités de calcul harmonisées, des discours difficilement comparables

La comparaison entre les sources de biomasse et leurs valorisations est donc difficile. Outre les aspects qualitatifs de non-substituabilité des formes solides, liquides et gazeuses, les comparaisons exigent une approche souvent simultanée en masse, en énergie, voire en surfaces cultivées.

Or les unités utilisées présentent une diversité considérable : Joules (J), TéraWattheure (TWh), TWh_{PCI}, TWh_{PCS}, TWh_{EP}, TWh_{EF}, calories (cal), tonnes équivalent pétrole (tep), m³, litre (l), stères, tonnes de matière brute, organique, sèche ou sans précision, hectares, tCO₂...). Certains intervenants jouent de cette difficulté pour mieux présenter leur discours ; d'autres ne paraissent pas s'interroger sur les conséquences d'un raisonnement en masse ou en énergie.

La prise en compte ou non des apports d'énergie complémentaire, notamment électrique mais aussi d'hydrogène, n'est pas toujours convenablement mentionnée ou quantifiée (capture, purification et compression des gaz, fonctionnement des installations, transport des matières, etc.).

Les coefficients de conversion énergétique sont eux-mêmes assez variables, de 3,8 à 5 MWh/tMS pour la combustion (même si des valeurs de 4 à 4,2 sont les plus fréquentes), 1,8 à 2,8 MWh/tMS pour la méthanisation (cf. équation (1) supra).

L'utilisation systématique de PCS au lieu des PCI, qui n'est pas pertinente pour les hautes températures, est une autre source de biais conduisant à surestimer les projections de quelques pourcents (10 à 11 % au maximum).

Cette variabilité due à des hypothèses mal fixées n'est pas sans conséquence puisqu'elle peut affecter les résultats d'une marge de 20 % environ ; parfois supérieure à la différence entre l'offre et la demande.

Dès lors, la comparaison de différents scénarios et objectifs issus des travaux des nombreux organismes consultés par la mission ne peut qu'interpeller, tant en ce qui concerne l'offre que la demande :

- Tous s'entendent pour estimer les quantités de biomasse actuellement disponibles à environ 40 MtMS/an hors biocarburants, mais les quantités de biomasse agricole et forestière ou d'énergie potentiellement disponibles en 2050, peuvent varier considérablement (cf. tableau 2, 2.3.2. p. 20).
- Les demandes futures des différents utilisateurs rencontrés (producteurs de gaz, de carburants, de chaleur ou d'électricité) paraissent non compatibles, élaborées de façon indépendante avec parfois la non quantification des besoins d'énergie complémentaire nécessaire (hydrogène, électricité).

Surtout, la mission a rapidement constaté qu'au-delà de l'identification classique de discours volontaristes et occultant certaines difficultés, les différents acteurs utilisent souvent les données fournies par d'autres avec un très faible recul et une compréhension très imparfaite des calculs et hypothèses associés. Ainsi :

- Il est très difficile de comprendre l'articulation entre les sorties de l'application MoSUT et les tableaux de bilan énergétique et de bilan biomasse. Suivant les voies de valorisation et les étapes de la transformation, les notions d'énergie primaire et d'énergie finale sont différentes. De plus, l'application des coefficients de transformation ne semble pas bien maîtrisée par tous les intervenants de la chaîne de traitement.
- Dans le modèle du prestataire Solagro, la mission a identifié plusieurs erreurs manifestes concernant les coefficients de conversion de la biomasse en énergie, notamment pour les biocarburants de première génération²⁴. Ces erreurs étaient a priori sans conséquence du fait de leur faible ou non utilisation dans les calculs.
- dans les bilans d'énergie, la mission a identifié la non prise en compte de la perte d'énergie associée à la méthanisation de la biomasse primaire. Suite à une question de la mission, les besoins en énergie primaire issue de la biomasse ont été accrus de 29 % en novembre 2023 (passant de 419 à 541 TWh en 2050).
- La mission a rarement trouvé des interlocuteurs disposant d'une vision globale des modélisations et capables de répondre rapidement aux questions qu'elle se posait.

Dans ce contexte, la mission s'est heurtée à des difficultés certaines pour analyser d'une part l'offre de biomasse et d'autre part la demande d'énergie issue de cette dernière. Le recours à une sous-traitance imparfaitement suivie ou contrôlée, le travail cloisonné entre services pour l'administration et la difficulté pour les autres parties prenantes à appréhender les travaux en cours ne facilitent pas la cohérence d'ensemble et sont les causes les plus vraisemblables de cette situation.

²⁴ Certains coefficients étaient totalement incohérents, les masses en sortie peuvent être de 3 à 25 fois supérieures aux matières introduites. De même un coefficient de 5 TWh/tMS a été appliqué à la paille utilisée en combustion ou pyrogazéifiée.

2 Une offre contrainte et limitée de la biomasse à usage énergétique

La première étape pour répondre aux questions posées à la mission est de déterminer l'offre de biomasse disponible en France. La mission a écarté la possibilité de recourir aux importations car la demande internationale de biomasse devrait sensiblement s'accroître tandis que la France est, comparativement à d'autres pays notamment européens, relativement bien dotée. Elle pourrait d'ailleurs s'attirer les convoitises de ses partenaires européens.

Les surfaces agricoles et forestières couvrent 86 %²⁵ du territoire métropolitain et permettent de valoriser l'énergie solaire, naturelle et gratuite. En revanche, la maîtrise de la production est complexe, tant en ce qui concerne l'influence des facteurs extérieurs (eau, température, ensoleillement, attaques par des ravageurs...), que pour ceux impactant le milieu naturel (pollutions diffuses, concurrence pour la ressource en eau...).

La fertilité des sols, la disponibilité en eau, le climat, le patrimoine génétique des plantes, la teneur en CO₂ atmosphérique, la concurrence entre espèces... sont des facteurs limitants qu'il est possible de lever artificiellement par l'apport d'engrais (augmentation de la fertilité des sols), de produits agro-pharmaceutiques (réduction de la concurrence entre espèces, lutte contre les ravageurs), par des modifications génétiques (sélection et amélioration variétales, transgénèse...), voire par des modifications microclimatiques (serre, irrigation...). Les différents systèmes de production agricole (raisonné, biologique, conventionnel) jouent sur ces leviers (ce qui explique les différences de rendements). Les itinéraires techniques sylvicoles, ancrés sur le long terme, n'exploitent pas la plupart de ces possibilités²⁶.

2.1 La spécificité des productions agricoles et forestières

2.1.1 La contribution aux « puits de carbone »

L'agriculture et la forêt peuvent constituer des puits de carbone par un stockage net annuel dans les sols, les arbres auxquels s'ajoutent les produits biosourcés à longue durée de vie (meubles, panneaux, sciages...).

Le bilan global de ces flux fait l'objet d'une comptabilité particulière dans le secteur « Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie » (UTCATF) du bilan national des émissions de gaz à effet de serre (GES)²⁷.

Le paquet climat fixe un objectif 2030 d'un minimum de 310 MtCO_{2e} par an d'absorption nette dans l'Union européenne, se traduisant par des niveaux de puits de carbone à respecter par chaque État membre²⁸.

2.1.2 Des aménités au carrefour de multiples enjeux

Les productions agricoles et forestières doivent assurer la souveraineté alimentaire, préserver la fertilité des sols (par un retour suffisant), contribuer à la lutte contre la perte de biodiversité

²⁵ 29 Mha de SAU et 17 Mha de bois et forêts.

²⁶ Si l'on fait exception de la populi-culture et de la sylviculture du pin maritime, dont les cycles sont plus courts. Sur des durées plus longues, l'espérance de gains due à l'apport d'intrants est beaucoup plus aléatoire et lointaine face à une dépense immédiate.

²⁷ L'utilisation de produits biosourcés à la place de matériaux dont la production requiert des énergies fossiles (typiquement le béton ou l'acier) permet d'économiser aussi des émissions de GES fossiles.

²⁸ Cela représente des absorptions accrues d'environ 15 % par rapport aux niveaux actuels dans l'UE. La règle actuelle du « bilan neutre ou positif » continuera de s'appliquer jusqu'en 2025. Pour la période 2026 à 2030, au cours de laquelle les absorptions devraient dépasser les émissions, un objectif national contraignant à l'horizon 2030 sera fixé pour chaque État membre. La valeur proposée pour la France sera de l'ordre de 30 MtCO_{2e}/an, (pour mémoire, en 2021, le puits UTCATF était de 17,1 MtCO_{2e}/an).

(limitation des produits phytopharmaceutiques), préserver la qualité de l'eau et de l'air (réduction de l'emploi des engrais, des labours), fournir des matériaux et des molécules d'intérêt biosourcés, et fournir de l'énergie afin de contribuer à décarboner l'économie.

2.1.3 Des évolutions lentes

Les secteurs agricoles et forestiers se caractérisent par la multiplicité des acteurs (400 000 chefs d'exploitations, 3,5 millions de propriétaires forestiers), par le caractère capitalistique²⁹ de la production agricole et par la durée des cycles de production forestière, souvent proche du siècle. Les changements de pratiques dans un laps de temps court sont difficiles. En outre, toute évolution des systèmes de production se traduit par une prise de risque entrepreneurial³⁰.

2.1.4 Les usages de la biomasse sont concurrents

Une même biomasse peut assurer différents usages économiques, environnementaux et sociaux : alimentation (humaine et animale), matériaux (textiles, sciages, isolants...), chimie, énergie, amendement et fertilisation, contribution aux stockages de carbone, biodiversité, paysage, qualité de l'eau... Certains emplois de la biomasse peuvent être assurés autrement (matériaux de construction, combustibles), mais la biomasse reste non substituable pour l'alimentation.

Ces enjeux, qui peuvent être plus ou moins contradictoires, nécessitent des arbitrages. Des garde-fous réglementaires peuvent traduire l'intérêt général et limiter des choix de production qui seraient uniquement guidés par les marchés. On peut citer notamment : le contrôle de la fertilisation azotée et des produits phytosanitaires (eau potable, biodiversité, santé, émissions de GES), le développement des aires protégées (biodiversité), le respect de critères de durabilité des productions pour l'accès à certaines aides ou l'atteinte d'un niveau minimal de puits de carbone.

2.2 Une connaissance éclatée des ressources en biomasse

Actuellement, plusieurs organismes assurent un suivi de la production primaire de biomasse³¹, avec l'estimation des surfaces et des productions biologiques associées : le service de la statistique et de la prospective (SSP) du ministère chargé de l'agriculture (MASA) et FranceAgriMer (FAM) pour la partie agricole et l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) pour la partie forestière. Certaines productions échappent toutefois à ces dispositifs de suivi, notamment les cultures intermédiaires, dont les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE), ou bien le bois dans les haies et les arbres hors forêt.

Une connaissance globale des différents flux actuels de valorisation de la biomasse brute est un préalable à toute simulation et rapprochement offre-demande des différents usages, dont la fourniture d'énergie. Les productions agricoles *stricto sensu* sont suivies par le SSP, la biomasse non alimentaire par l'Observatoire national de la ressource en biomasse (ONRB)³². Pour la filière forêt-bois, les informations sont principalement issues des enquêtes du SSP³³.

Ces suivis ne sont pas totalement exhaustifs, avec des incertitudes et des difficultés pour estimer ce qui est utilisé de manière diffuse, hors circuits économiques (cas du bois énergie en autoconsommation) ou bien dans les filières de seconde transformation (compilation nécessaire de

²⁹ Agreste, primeur, 2001, n°7.

³⁰ Le point est rarement abordé, néanmoins une étude de l'IDDRI visant à établir les conditions socioéconomiques nécessaires à l'atteinte de résultat de la SNBC 2 insiste sur ce point.

³¹ La production est évaluée généralement en poids (tonne de matière brute) pour les productions agricoles et en volume (m³) pour la production de bois. Des coefficients, dépendant de la nature de la culture ou des essences forestières, permettent de ramener les productions à des tonnes de matière sèche (la teneur en eau étant importante, très variable selon les produits et fluctuante dans le temps après récolte).

³² Cultures dédiées, résidus de cultures annuelles ou pérennes, issus de silos, effluents d'élevage, plantes à fibres, plantes à parfum, sous-produits de l'industrie agroalimentaire, biomasse aquatique.

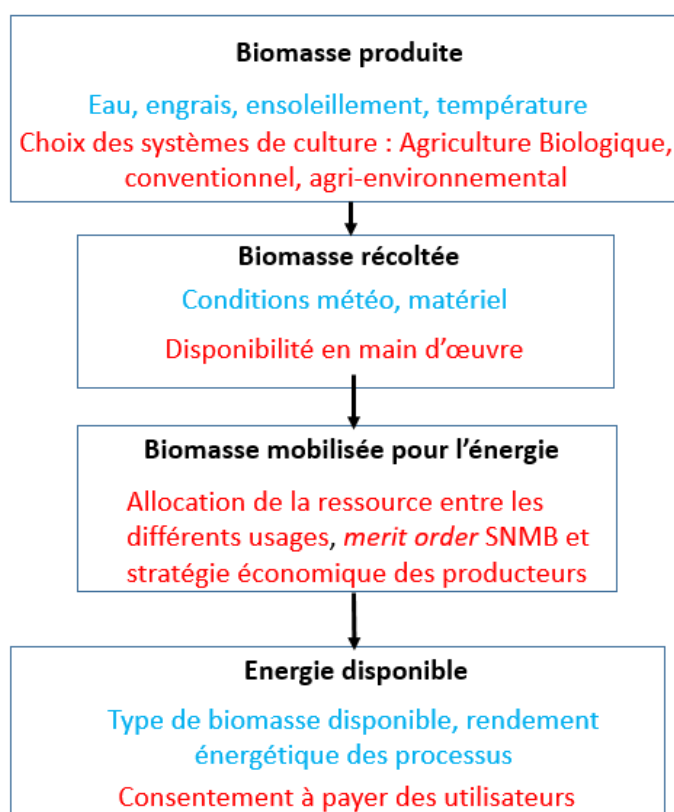
³³ Récolte en bois d'œuvre, bois d'industrie (essentiellement destinés à la trituration) et bois énergie – production de sciages – production de connexes de scierie.

plusieurs sources professionnelles). Enfin, tous les produits, coproduits ou déchets peuvent faire l'objet de flux d'importation et d'exportation parfois significatifs.

Le secrétariat général à la planification écologique (SGPE), a été le premier à réaliser un bilan pour l'ensemble de la biomasse. Celui-ci a été largement repris mais sans que son imprécision, connue de ses auteurs qui l'ont élaboré à partir de plusieurs sources de données évoquées précédemment, eût été prise en compte. En outre ce diagramme est très simplificateur de la complexité des flux ³⁴.

2.3 Des simulations multiples

2.3.1 La simulation des ressources de biomasse potentiellement disponibles pour l'énergie n'est pas un processus simple



Si, de prime abord, le processus de transformation de la biomasse en énergie semble linéaire et simple, sa modélisation n'est pas aisée ; ce qu'illustre le schéma ci-contre (en bleu les paramètres techniques, en rouge les paramètres socio-économiques). Il s'inscrit dans un projet de société qu'il faut écrire comme l'a fait par exemple l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) pour ses cinq scénarios « transition 2050 ».

De nombreuses prospectives réalisées à ce jour, y compris celles de l'ADEME, utilisent le modèle MoSUT développé par le cabinet Solagro. Le calcul des productions de biomasse résulte de la multiplication des surfaces par des rendements, et il n'y a en ce sens aucune « modélisation » ³⁵.

C'est également ce modèle qui a été utilisé pour élaborer les différentes simulations ou « run » de la SNBC 3. Les orientations quant à l'évolution des différents paramètres du modèle ont

été demandées à l'Institut national de la recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) pour évaluer les mesures supplémentaires.

Les données d'entrée respectent les principales contraintes que connaissent tous les experts. Par exemple, la somme des surfaces est égale à la surface agricole utile nationale actuelle ou estimée pour le futur, les rendements sont pris dans des fourchettes acceptables même si leur réalisme repose parfois sur des hypothèses qui gagneraient à être mieux argumentées ³⁶.

Toutefois les incertitudes sont importantes. D'une part, ces hypothèses reposent sur des projets de société dont les conséquences mériteraient d'être clairement affichées, notamment la sobriété

³⁴ Les travaux de FAM ou les diagrammes consultables sur le site <https://flux-biomasse.fr> offrent une approche plus fine illustrant la complexité des circuits.

³⁵ Ce propos n'est pas une critique du modèle MoSUT-Climagri, dont l'objet n'est pas de prévoir des productions mais d'évaluer leur impact environnemental en termes de consommation d'énergie ou d'émission de gaz à effet de serre notamment (cf. annexe 6).

³⁶ Notamment en ce qui concerne la croissance des rendements futurs de l'agriculture (en stagnation depuis 20 ans), l'équilibre des apports azotés ou la décroissance des élevages [8].

des usages ou l'évolution des régimes alimentaires. D'autre part l'INRAE, qui a fourni les données, précise que, « *même si le groupe d'experts a cherché à mettre en cohérence les hypothèses proposées pour chaque thématique, la modélisation de ces hypothèses n'a pas été effectuée* ». En particulier, « *les évolutions des rendements, en fonction de la fréquence des chocs climatiques et de la disponibilité en eau, sont incertaines. Cette incertitude sur une variable clé du secteur agricole crée une incertitude systémique sur l'ensemble des autres variables considérées. Il faut donc envisager une variante du scénario SNBC 3 représentant les risques pour les rendements d'une accélération de la fréquence et de l'intensité des chocs climatiques* » ([8], p. 47).

2.3.2 Les approches, privées et publiques, conduisent à des projections très différentes

Outre les simulations de l'ADEME et celles de la SFEC, plusieurs associations ou *think tanks* produisent leurs propres évaluations et scénarios, comme Solagro avec Afterres2050 ([21]), le Fonds mondial pour la nature (WWF) ([18]) ou France Stratégie ([6]). Cependant, l'absence de convergence de ces approches empêche de déduire une réponse quant à l'adéquation offre/besoin en biomasse à des fins énergétiques.

(valeurs annuelles)	Biomasse solide		Biomasse liquide		Biomasse gaz		Biomasse totale	
	MtMS	TWh	MtMS	TWh	MtMS	TWh	MtMS	TWh
observé 2019 (DGEC)	29	132	20	36	4	9	52	177
Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse ([9])	21	94			23	45	44	140
Afterres2050 ([21], p. 58)	52	233	7	14	62	124	121	371
SNBC 2 AME ([2], p. 84)	36	163	11	22	15	30	62	215
SNBC 2 AMS ([1], p. 33)	43	194	18	36	100	200	161	430
ADEME tendanciel ([17], p. 590 et suivantes)	20	92	37	74	45	89	102	256
ADEME S1 (id)	30	136	22	44	54	109	107	289
ADEME S2 (id)	31	141	26	51	55	111	112	303
ADEME S3 (id)	24	108	53	107	84	168	161	382
ADEME S4 (id)	17	75	57	113	74	148	148	337
France Stratégie (scénario A, base) ⁴¹	5	23			38	76	43	99
France Stratégie (scénario B, exploratoire), ([6], p. 103) ³⁷	8	35			44	89	52	124
NégaWatt scénario 22-50 ([18], p. 15)	44	196	26	52	69	138	139	386
WWF ([18], p. 9)	32	145	8	15	55	110	95	270
PTEF 2050 (données Shift project)	31	141			58	116	89	257
SNBC 3 run 1 AME	42	189	11	22	16	31	69	242
SNBC 3 run 1 AMS	43	192	24	48	13	25	79	265
SNBC 3 run 1bis AMS	29	129	42	85	49	98	120	312
SNBC 3 run 2 AME	35	155	19	37	16	33	70	225
SNBC 3 run 2 AMS	26	116	45	90	50	99	120	305

Tableau n° 2, projections à 2050 de différents scénarios pour l'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques

³⁷ France Stratégie ne considère que la biomasse agricole sans les biocarburants, il faudrait ajouter 20-23 tMS pour la biomasse forestière. Une valeur de comparaison avec les autres études serait alors de l'ordre de 200 TWh.

Attention : Il faut lire dans ce tableau des ordres de grandeur plutôt que des valeurs exactes (les valeurs qui ne sont pas en gras sont recalculées par la mission, parfois à partir d'histogrammes ou par application de l'équation simplificatrice (1) p. 17). Parfois la consommation est assimilée à la production, les importations sont a priori ignorées ou assimilées à des productions intérieures. Il s'agit en principe d'énergie finale et il peut y avoir des assimilations entre PCS et PCI. Quelques simulations encore plus divergentes n'ont pas été reprises.

Les résultats sont divergents, notamment parce que leurs hypothèses sont contrastées, voire parfois orientées *ab initio* (par exemple la suppression ou la forte réduction des biocarburants de première génération), mais aussi :

- l'amplitude des résultats s'étend très largement au-delà des incertitudes d'entrée, des variations « cachées » (qui peuvent atteindre 10 % par truchement des unités non totalement équivalentes,) ou des produits pris en compte (certaines études ignorent les biocarburants) ;
- enfin aucune étude ne quantifie les variations interannuelles possibles, même si les hypothèses de l'INRAE, comme quelques autres publications, les évoquent sans ambiguïté.

Sur ces bases, il n'est pas apparu possible de sélectionner une projection qui serait plus pertinente (même si certaines pourraient être écartées a priori), notamment parce que les quantités de biomasse disponibles sont plus estimées que simulées.

2.3.3 Des prévisions fondées sur un modèle internalisant les contraintes et les variables sont nécessaires

Les simulations actuelles reposent sur des hypothèses insuffisamment reliées aux résultats de sortie (par exemple avec des valeurs issues de quelques travaux : 1,5 ou 4 Mha de CIVE aux rendements de 4, 6 ou 8 tMS/ha assurent de 6 à 32 MtMS ; transformées avec un pouvoir méthanogène de 2,23 à 2,8 MWh/tMS, elles livrent de 13,4 à 88 TWh PCI de méthane, soit un rapport de 1 à 6).

Pour sortir de controverses potentiellement confuses, il faut que les « modélisations » puissent notamment :

- intégrer les contraintes du climat, des rotations culturales et de l'élevage ;
- prendre en compte les conditions de production non uniformes sur le territoire ;
- intégrer les évolutions réglementaires prévisibles (diminution des intrants, promotion de l'agriculture biologique...) ;
- suivre les cycles des fertilisants (en particulier de l'azote) et la fertilité des sols ;
- introduire des contraintes d'ordre technique et économique (disponibilité en main d'œuvre et matériel), prix d'achat et de vente, etc., lesquelles peuvent conduire à moins récolter.

Un tel modèle (précisé en annexe 6) ne présente pas de difficulté conceptuelle et offrirait, outre un plus grand réalisme, plusieurs avantages, notamment :

- des quantités en sortie (masse ou énergie) qui ne soient pas simplement déductibles des valeurs d'entrée et qui conduiraient à focaliser la réflexion sur les paramètres internes du modèle (par exemple les équations de rendement agronomique) ;
- la possibilité de réaliser facilement des analyses de sensibilité simples (modulation des rendements agronomiques et des facteurs de conversion énergétique, des données pluviométriques, etc.), voire plus complexes (simulations dites de Monte-Carlo sur les conditions météorologiques) et d'analyser avec précision certains effets attendus du changement climatique.

À cet égard, il est inutile d'entrer dans le détail de toutes les productions agricoles car seules quelques-unes portent l'essentiel des variations. Travailler sur l'exhaustivité des productions agricoles peut donner l'illusion d'une fausse précision, alors que la marge d'erreur des approximations successives est bien plus importante. Se limiter aux principales productions permettrait aussi de gagner en lisibilité et en compréhension pour un examen critique des résultats.

Dans le domaine forestier, le temps long des cycles de production oblige déjà à paramétrer plusieurs scénarios climatiques. C'est ce que réalise l'étude récente IGN/FCBA qui utilise le modèle MARGOT, simulant le développement long terme des peuplements. Ces éléments (taux de mortalité, de croissance...) sont indispensables pour alimenter le calculateur forêt-bois.

Recommandation 2. 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 (MASA, avec appui INRAE, IGN).

Sa réalisation dans le domaine agricole³⁸ et son maintien en conditions opérationnelles auraient un coût modeste (un à deux agents équivalent temps plein) par rapport aux enjeux et coûts même de la seule politique énergétique correspondante.

La gestion de l'interface entre les modèles de simulation de la demande en énergie et ces modèles des prévisions de la production de biomasse restera à documenter.

2.4 Les ressources de biomasse à usage énergétique en France

2.4.1 Les productions agricoles actuelles

Hors biocarburants, celles-ci sont aujourd'hui très limitées : 120 000 ha de CIVE et de façon anecdotique un peu de paille et de cultures lignocellulosiques et une fraction des déjections animales.

2.4.2 Quelques ressources agricoles supplémentaires peuvent être développées, essentiellement pour la production de biométhane

Au regard des informations issues des documents et des entretiens, la mission identifie des domaines où le potentiel de développement d'une valorisation énergétique de la biomasse est important, sans avoir a priori un impact rédhibitoire sur les autres enjeux ou utilisations.

Seules les CIVE et un prélèvement supplémentaire en forêt privée offrent de nouvelles ressources à court terme. Dans une moindre mesure, la mobilisation des effluents d'élevage et des résidus de culture pourra également être augmentée. Les autres gisements (haies, agroforesteries,) pourront très difficilement produire plus d'ici à 2050.

2.4.2.1 Développer les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE)

Les CIVE présentent des avantages agronomiques certains ([23]) avec toutefois une baisse moyenne de rendement de la culture suivante de l'ordre de 10 %.

La surface actuelle des CIVE n'est pas connue avec précision mais serait aujourd'hui de l'ordre de 120 000 ha, le potentiel d'augmentation est donc conséquent. Il reste toutefois conditionné à la nécessité de changer les pratiques et d'augmenter la technicité. Au regard des contraintes techniques et notamment du fait qu'il n'est pas réaliste de compter significativement sur des CIVE d'été³⁹ et que la surface affectable aux CIVE d'hiver est contrainte par la sole en cultures d'été (tournesol, maïs, pomme de terre, betterave), la mission estime que la surface en CIVE réaliste serait d'environ 2,5 à 2,8 Mha⁴⁰. Avec un rendement de 6 tMS/ha⁴¹ (seuil de rentabilité) et un

³⁸ Proposition confirmée par l'INRAE, lors d'un échange. La réalisation pourrait être confiée à cet institut en association, en tant que de besoin, avec une université.

³⁹ Un échec total une à deux années sur trois selon les régions a été évoqué précisément devant la mission.

⁴⁰ L'hypothèse retenue par l'INRAE d'une sole de CIVE de 4 millions d'hectares avec un rendement moyen de 6 tMS/ha semble ambitieuse et conduirait à 60 à 70 TWh/an mais la mission remarque que la production de biogaz associée aux CIVE par l'INRAE (37 TWh/ ([8], p. 48) est nettement inférieure

⁴¹ Ce rendement semble toutefois exiger une fertilisation en azote

coefficient de transformation de 2,8 TWh/MtMS⁴², on obtient une production potentielle de biométhane de 42TWh.

Recommandation 3. *Inciter au développement des cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) d'hiver, impérativement en association avec la constitution d'un réseau de méthaniseurs suffisamment dense, avec un objectif de l'ordre de 3 Mha. (MASA, MTE).*

Ce développement des CIVE demande de :

- définir des itinéraires techniques⁴³ pour leur culture,
- favoriser la constitution d'un réseau dense de méthaniseurs à même de valoriser ces CIVE et les accrues d'effluents d'élevage en injection dans le réseau gazier, en associant les agriculteurs et les territoires aux projets (MASA, MTE) ; sans méthaniseurs les CIVE ne seront pas valorisées ;

La mission souligne que le potentiel des CIVE exige, pour garantir les rendements agricoles, des techniques raisonnablement intensives avec des apports de fertilisants, destinés à compenser les insuffisances des retours par les digestats, et avec un recours aux produits phytosanitaires voire à l'irrigation⁴⁴ si nécessaire. Dans ce contexte, la mission trouve peu réaliste que « *L'ADEME recommande la mise en œuvre de pratiques agro-écologiques pour produire ces CIVE : travail simplifié de préparation du sol pour le semis (économie d'énergie, et préservation des sols), absence de traitement phytosanitaire, fertilisation organique uniquement, recours à un couvert multi-espèces plutôt que monospécifique (biodiversité), et absence d'irrigation* » ([28, p. 8).

Enfin les CIVE ne peuvent être mises en œuvre qu'à la condition que les digestats soient aisément retournés aux sols qui les ont produits, ce qui exige de construire des unités de méthanisation suffisamment proches et en nombre suffisant, sans trop s'éloigner du réseau gazier pour limiter les coûts d'injection.

2.4.2.2 Utiliser le potentiel des effluents d'élevage

Les hypothèses de tonnages d'effluents d'élevage disponibles sont directement liées à l'évolution des cheptels, notamment bovins et porcins.⁴⁵ En outre, seuls les effluents en stabulation sont mobilisables ; un recours accru au pâturage conduit à réduire le gisement.

En se fondant sur les sorties du modèle MoSUT, la mission retient, à l'horizon 2050, un potentiel de production de biogaz à partir des effluents d'élevage de 16 TWh, proche de l'évaluation du run 2, 19TWh. Toutefois, elle souligne que son atteinte nécessitera une modification profonde des pratiques en vigueur. En effet, fumier et lisier sont déjà majoritairement valorisés pour amender et fertiliser les sols via l'épandage direct, notamment en agriculture biologique. La méthanisation de 80 % des effluents d'élevage, suivant les hypothèses retenues dans le modèle MoSUT, nonobstant le défi logistique qu'elle pose, pourrait donc constituer un frein au doublement de la surface en AB qui constitue un des objectifs phare de la planification écologique.

2.4.2.3 Mobiliser un surcroît de résidus de culture se heurte à de nombreuses contraintes

Bien que les hypothèses sous-jacentes soient fortes (cf. annexe 7), la mission est partie des sorties du modèle MoSUT qui prévoient qu'en 2050 15 000 MtMS de résidus de cultures pourraient être utilisés pour la production d'énergie. Toutefois ces produits ne présentent pas un potentiel

⁴² Hypothèses de l'INRAE qui intègrent les études récentes sur les CIVE.

⁴³ Un itinéraire technique liste toutes les interventions culturales à réaliser pour obtenir une production.

⁴⁴ Celle-ci pouvant concerner la culture suivante qui souffrirait de l'épuisement par la CIVE de la réserve utile du sol en eau.

⁴⁵ L'atteinte des objectifs assignés au secteur agricole en matière d'émission de GES, conduit à retenir des hypothèses de diminution conséquente des élevages bovins (-30 %) et moindre mais néanmoins sensible (-16 %) des élevages porcins, ces hypothèses figurent en entrée des simulations MoSUT.

méthanogène très élevé car il s'agit de matières ligneuses. De surcroît, il s'agit d'une ressource très dispersée, peu dense et donc d'un transport malaisé.

En conséquence, la mission n'en consacre qu'un tiers à la production de biogaz (5 MtMS soit 10 TWh) et, sous réserve de la contrainte de transport et de l'existence d'unités de transformation, affecte le reste (10 MtMS pour 20 TWh) à la production de biocarburants avancés par voie thermo-chimique, valorisation qui lui paraît plus opportune.

2.4.2.4 Une production de biométhane substantielle mais à ne pas surestimer

Il est extrêmement difficile de donner une estimation fine du potentiel de biogaz productible en 2030 et 2050. Il paraît raisonnable de prendre en compte les aléas climatiques pour les CIVE, les difficultés de mobilisation des déjections animales et la faiblesse des autres sources agricoles méthanisables. Toutefois avec des hypothèses optimistes : 15 MtMS/an de CIVE (soit environ 2,5 Mha à 6 tMS/ha ou 4 Mha à 4 tMS/ha), environ 5 MtMS/an de résidus de culture⁴⁶ et autres ainsi qu'environ 8 MtMS/an issus des effluents d'élevage, environ 65 TWh/an de biométhane sont accessibles. Toutefois la variation interannuelle pour les CIVE peut être de plus ou moins 5 MtMS.

La mission souligne toutefois deux points :

- Il faudra alors prévoir 5 à 10 TWh/an d'électricité consommés par les méthaniseurs.
- l'accroissement éventuel de la part des résidus de culture, jusqu'à 10-15 MtMS exigerait d'avoir le complément de la ration en CIVE ou en matières fermentescibles riches en azote ; la production potentielle de biocarburants liquides 2G sera alors diminuée du fait de la concurrence sur les ressources.

2.4.2.5 Un potentiel de cultures lignocellulosiques limité

Les cultures lignocellulosiques recouvrent essentiellement le miscanthus et les taillis à courte rotation (TCR). Le miscanthus demande pour assurer de bons rendements des terres passes profondes et humides et une implantation sur plusieurs années (environ 10 ans). La concurrence avec les grandes cultures est donc directe, même si les besoins en fertilisants sont a priori moindres. Une sole de 600 000 ha, conforme aux hypothèses de l'INRAE paraît un maximum pour la mission.

2.4.3 Pour la biomasse ligneuse, un choix cornélien entre augmentations de la récolte ou du puits de carbone

Le bois peut fournir de la chaleur renouvelable par combustion, mais aussi être pyrogazéifié ou fournir des biocarburants 2G. En outre, la forêt subit les effets du changement climatique qui rendent plus incertaines les augmentations de récolte espérées par la résorption de la « sous-gestion » d'un certain nombre de forêts, essentiellement privées.

2.4.3.1 Augmenter les récoltes de bois reste un objectif

Les études de disponibilité, fondées sur des données des années 2010, avaient conduit à retenir un objectif de +12 Mm³/an de récolte supplémentaire en 2026 en misant sur une dynamisation de la gestion (programme national de la forêt et du bois - PNFB, 2016). Depuis ces évaluations, la croissance biologique a diminué et la mortalité a augmenté. Les récoltes ayant également progressé, le puits de carbone forestier s'est fortement réduit. Si des disponibilités supplémentaires sont toujours mobilisables, les dernières études montrent que cette augmentation se fera au détriment du puits de carbone forestier et est très sensible aux scénarios climatiques⁴⁷. La décision publique devra donc choisir entre plus de bois disponible (matériau et énergie) pour la décarbonation et l'amélioration de la balance commerciale et un puits de carbone restreint, voir nul, ou l'inverse. Les termes du choix seront de plus biaisés par des récoltes « subies » du fait des tempêtes, des dépérissements et du

⁴⁶ D'après les données utilisées par MoSUT, 85 % des 80 MtMS/an de résidus de culture sont laissés au champ (pour conserver la qualité des sols). Il est possible que cette quantité puisse être un peu réduite mais sans beaucoup de marge.

⁴⁷ La crise actuelle est-elle conjoncturelle, partie d'une succession de crises espacées de quelques années avec des phases de rattrapage, ou conduit-elle à l'atteinte durable d'un plateau haut de mortalité et de baisse de croissance ?

renouvellement anticipé des peuplements les plus vulnérables⁴⁸, qui vont interférer avec les récoltes programmées dans le cadre d'une gestion durable.

Dans ce contexte, la mission considère qu'une augmentation de la récolte nette de 10 Mm³/an (pour atteindre un total de 63 Mm³/an à partir de 2030, souhaitable pour fournir plus de matériaux biosourcés et d'énergie renouvelable, est possible, à condition de lever de nombreux freins, identifiés depuis très longtemps, dont la mobilisation des propriétaires privés actuellement « dormants »⁴⁹ et une meilleure valorisation des essences feuillues, majoritaires dans la forêt. En corollaire, la neutralité en 2050 ne pourra pas reposer sur un puits de carbone forestier significatif, sauf à prendre en compte le stockage dans les sols forestiers.

En revanche, aller au-delà paraît peu réaliste : ainsi, les simulations de la dernière étude IGN-FCBA avec une augmentation régulière pour atteindre 75 Mm³/an de récolte en 2080, avec un scénario climatique médian, conduisent à des taux de prélèvement supérieurs à 100 % dès 2040 et à un puits nul à partir de 2035-2040, devenant même une source d'émissions à partir de 2050. Dans un scénario climatique défavorable, le taux de prélèvement dépasserait 125 % dès 2030.

2.4.3.2 Optimiser l'usage du bois

Actuellement, pour un m³ de bois récolté, environ 75 % finit en bois énergie (dont 28 % issu des coproduits de transformation⁵⁰) et 25 % dans des produits (sciages, panneaux, papiers...). Cette proportion est très différente entre les feuillus (88 % énergie – 12 % produit) et les résineux (55 % énergie – 45 % produits), pour lesquels la ressource française est déjà insuffisante.

Pour autant, le ratio matière/énergie de la récolte ne va pas facilement évoluer d'ici 2050, la part de bois énergie restera importante : d'une part, le volume de bois de chauffage consommé par les ménages ne va pas être drastiquement réduit, d'autre part des produits connexes en augmentation ne pourront pas être valorisés par la filière papier (dont on attend une stagnation de l'activité) et seront très difficilement absorbés par la filière panneaux qui utilise de plus en plus de bois déchet et dont les augmentations de capacité à due concurrence seraient irréalistes.

En complément, le bois hors forêt, qui fournit aujourd'hui de l'ordre de 5 Mm³/an, pourrait augmenter avec une inversion de la tendance à la disparition des haies (avec replantation et gestion durable des haies⁵¹) et un développement de l'agroforesterie, mais cette évolution n'apportera pas de volume de bois supplémentaire significatif d'ici 2050.

Faute de nouveaux débouchés pour le bois d'œuvre feuillu, les surcroîts de récolte resteront essentiellement transformés en énergie.

2.4.3.3 Boiser des surfaces inutilisées de terres agricoles délaissées en phase d'afforestation

Sur la période 1985-2021, la surface forestière s'est accrue de 80 000 ha/an⁵², du fait de l'abandon de terres agricoles (principalement des prairies permanentes peu productives et des cultures fourragères). Sous nos climats, ces terrains s'enfrichent naturellement et présentent des caractéristiques forestières

⁴⁸ Dans tous les cas, l'effort d'adaptation, par amélioration et substitution progressives d'essences ou par reboisement en plein, est essentiel pour limiter les impacts.

⁴⁹ Une mission CGAAER, IGEDD, IGF est en cours sur ce sujet, sur ce problème identifié comme crucial dans le cadre de la planification écologique.

⁵⁰ 1 m³ de bois scié produit environ la moitié de produits connexes.

⁵¹ Une étude récente permet d'évaluer le prélèvement en bois des haies à environ 3.5 MtMS France entière. Plus que doubler ce chiffre ne 2050 paraît particulièrement ambitieux, d'autant que des haies nouvellement plantées ne produiront pas pleinement à cette échéance.

⁵² Inventaire forestier national. L'inventaire de GES SECTEN 2020 réalisé par le Centre interprofessionnel d'étude de la pollution atmosphérique (CITEPA) chiffre à 50 000 ha les terres agricoles délaissées reboisées annuellement par des accrus forestiers.

après un laps de temps variable⁵³. Dans les prochaines années, un flux de 60 000 ha par an semble faire consensus parmi les acteurs agricoles du fait de la régression de l'élevage⁵⁴.

Sans préjuger de l'évolution de ce flux d'ici 2050⁵⁵, le stock actuel de terres en voie d'afforestation, qui peut être estimé à environ 1 500 000 ha, présente une opportunité pour réaliser des boisements volontaires afin de constituer une nouvelle ressource forestière adaptée aux conditions climatiques futures, produisant plus de bois d'œuvre et stockant plus de carbone⁵⁶.

En ciblant uniquement des terres agricoles délaissées depuis plusieurs années, les travaux préparatoires à la SNBC 3 tablent sur un accroissement régulier de tels boisements pour atteindre 15 000 ha/an en 2030 soit, au total, 90 000 ha sur la période de dix ans à venir. Compte tenu de l'importance du stock d'accrus, et tout en laissant des possibilités de remise en culture si nécessaire, la mission considère qu'un effort important de boisement constitue une action qui mérite d'être conduite, même si son impact sur la production de biomasse à vocation énergétique ne sera pas perceptible avant 2050.

Recommandation 4. Organiser le boisement des surfaces agricoles délaissées (actuelles et futures) (MASA, MTECT).

La réalisation de tels boisements pourra bénéficier de subventions mais est toutefois subordonnée à la mobilisation des propriétaires fonciers, à la disponibilité des entreprises de travaux forestiers tout comme celle des plants forestiers⁵⁷ et à la réalisation, en tant que de besoin, des évaluations environnementales⁵⁸.

2.4.4 Les déchets, une ressource limitée

La valorisation des déchets des filières alimentaires et non alimentaires ne faisait pas partie a priori du champ de la mission. Si les déchets des industries agricoles et alimentaires, bien qu'en quantité limitée, sont très utilement incorporés dans les méthaniseurs agricoles, il n'en va pas de même pour la part fermentescible des ordures ménagères. Pour ces dernières, les contraintes techniques et réglementaires sont non-négligeables (hygiène notamment).

Toutefois et à moyen et long terme, il semble à la mission que le développement de l'hydro-gazéification, pourrait être une voie intéressante pour la production de carburants 2G à partir de déchets humides et carbonés. Il en va de même de la valorisation des déchets bois du bâtiment ou des meubles usagés. Ces voies restent cependant trop exploratoires pour donner lieu à une quantification.

Les déchets de bois collectés (autres que papiers cartons) représentent environ 7 Mt. Une partie est valorisée dans la fabrication de panneaux, en France ou à l'export, et environ 2,5 Mt sont utilisés en tant que combustible pour fournir de la chaleur ([32]). Le taux de récupération étant déjà assez élevé, un accroissement des volumes est possible mais limité. Tout en conservant des utilisations matière, un ordre de grandeur d'un million de tonnes supplémentaire disponible pour l'énergie est plausible.

⁵³ Parallèlement, le flux de boisement volontaire de terrains agricoles reste faible, de l'ordre de 1 500 ha, même s'il est amené à augmenter avec le développement du Label bas-carbone.

⁵⁴ Groupe de travail agriculture de révision de la SNBC (tenant compte de politiques volontaristes de maintien des prairies).

⁵⁵ Les travaux de la SNBC indiquent que ce flux devrait baisser régulièrement pour atteindre à l'horizon 2050 une moyenne de 30 000 ha par an.

⁵⁶ Sous réserve de respecter les équilibres paysagers et des critères de diversification, ces boisements sont sans doute plus aisés que la transformation d'une forêt déjà constituée avec coupe des arbres en place et replantation (option restreinte par le règlement sur la déforestation importée). La structure foncière est également a priori plus favorable.

⁵⁷ Cf. le rapport « Objectif forêt » du comité spécial « gestion durable des forêts » publié en juillet 2023.

⁵⁸ Au cas par cas à partir de 0.5ha de boisement

2.5 Le potentiel énergétique espéré en 2050 est significatif mais inférieur aux besoins

À l'horizon 2050, en ignorant les biocarburants de première génération, l'exploitation de 63 Mm³/an de bois, de 7 Mm³/an de bois hors forêt et de 3,5 Mt/an de déchets bois pourrait livrer de l'ordre de 30 MtMS/an de ressource à usage énergétique correspondant à environ 135 TWh/an en combustion directe ou 60 TWh/an par conversion thermo-chimique en carburants liquides ou gazeux.

60 à 65 TWh/an de biométhane pourraient être produits en complément (cf. 2.4.2.4.). Des ressources mineures peuvent être espérées telles que des déchets, un surcroît de mobilisation des résidus de culture (10 MtMS au maximum a priori⁵⁹) et des rendements agricoles meilleurs les bonnes années climatiques. Les biocarburants de première génération actuellement produits en France permettraient d'ajouter 10 à 15 TWh/an, 30 TWh si l'autosuffisance est atteinte.

Il semblerait toutefois déraisonnable d'imaginer dépasser 240-250 TWh/an et seulement 140-160 TWh/an si on ne produisait que des carburants liquides ou gazeux. Des calculs plus précis sont fournis en annexe 10.

Cette estimation, entachée d'incertitudes, est comparable à celle de France Stratégie mais inférieure à celles de l'ADEME ou des simulations préparatoires à la SNBC 3 (plutôt supérieures ou égales à 300 TWh/an). Elle est supérieure à la situation observée en 2019 (177 TWh), mais encore insuffisante. Une des raisons est qu'une part importante de la biomasse collectée serait alors transformée en biogaz ou biocarburant alors qu'actuellement la combustion directe est prépondérante (95 %) (cf. tableau 2).

Dans tous les cas les ressources en biogaz et en biocarburants seront extrêmement contraintes, représentant au plus de l'ordre de 15-20 % des consommations actuelles de gaz et de pétrole fossiles (1 092 TWh en 2021, dont 743 TWh de produits pétroliers et 349 TWh de gaz fossile, les usages non-énergétiques étant inclus pour 149 TWh, [27]). Il faudra donc gérer une ressource rare et souvent choisir entre le biogaz et les biocarburants ; qui plus est, leur production exigera des méthaniseurs et des usines thermochimiques, donc des investissements importants (cf. 5.3.2.).

2.6 Des points de vigilance

Plusieurs considérations suggèrent que ces estimations sont optimistes et pourraient difficilement être accrues.

2.6.1 La volatilité des prix

Certains utilisateurs potentiels de biomasse énergie, focalisés sur des objectifs de décarbonation, ne se posent pas toujours la question de l'évolution du prix de la biomasse qu'ils envisagent de mobiliser, ni de la sensibilité du modèle économique à ce facteur, comme si ce prix n'était pas une contrainte forte.

Les prix des céréales, du sucre, des oléagineux, du bois dépendent des cours mondiaux ainsi que de ceux des carburants et des engrais. En cas d'envolée des cours, le *merit order* économique peut différer de celui souhaité pour les usages de la biomasse⁶⁰. Des mesures correctives pourraient alors s'avérer nécessaires.

2.6.2 La disponibilité de la main d'œuvre

La nécessité de disposer d'une main d'œuvre suffisante pour mobiliser la biomasse est souvent sous-estimée. Un interlocuteur de la mission a d'ailleurs résumé cette situation : « La question n'est pas tant de savoir s'il y aura assez de biomasse disponible mais plutôt de savoir s'il y aura des

⁵⁹ Au-delà, le maintien des qualités structurales et humiques du sol serait compromis.

⁶⁰ On peut citer le *merit order* figurant dans la SNBM, la directive RED III et l'engagement RSE des acteurs – en 2023 le groupe Avril a consacré toute sa production d'huile de tournesol à un usage alimentaire.

bras pour la récolter ». C'est particulièrement le cas dans le secteur forestier où la pénurie de personnel pour la récolte a été signalée à la mission.

2.6.3 L'absence de filières de valorisation et de références techniques de terrain

Les exploitants agricoles restent très prudents en l'absence de filières de valorisation locale et de références techniques. Cela semble le cas en ce qui concerne les productions de biomasse énergie à partir des haies, des cultures pérennes (miscanthus, taillis à courte rotation - TCR) ou de cultures innovantes comme la cameline. Les résultats techniques obtenus sur des fermes expérimentales ne suffisent pas, il faut des résultats en situation de production normale obtenus dans le cadre de groupes de développement et de vulgarisation.

2.6.4 La surface agricole utile limitée

La surface agricole utile française (26,7 Mha en 2020) comporte 11,5 Mha ou 42,8 % de « grandes cultures » (céréales, oléagineux, protéagineux), 11,1 Mha ou 41,4 % de « prairies » (artificielles, temporaires, permanentes) et 1 Mha ou 3,8 % de cultures permanentes (vignes, vergers, etc.).

Libérer un surcroît de 1,5 Mha pour les biocarburants 1G et 600 kha pour les cultures lignocellulosiques (miscanthus, taillis à courte rotation, etc.) sera difficile. C'est pourquoi, la mission écarte le développement massif de ces cultures lignocellulosiques au profit des carburants 1G (cf. 1.1.4. et recommandation 1).

2.6.5 La nécessité d'incitations et d'orientations économiques fortes

Les agriculteurs choisissent leurs productions en fonctions des prix de marché et des aides de la PAC. Les hypothèses agronomiques sous-jacentes (développement des haies, des cultures intermédiaires, substitution du digestat au fumier et aux engrais minéraux) supposent des reconceptions des itinéraires techniques entraînant un surcroît de travail et des investissements conséquents. Les surcoûts devront vraisemblablement être pris en charge par des interventions publiques ou des paiements pour services environnementaux. La mobilisation des propriétaires privés et la nécessaire adaptation au changement climatique des forêts nécessitera également des investissements.

3 La demande en énergie issue de la biomasse sera difficile à maîtriser

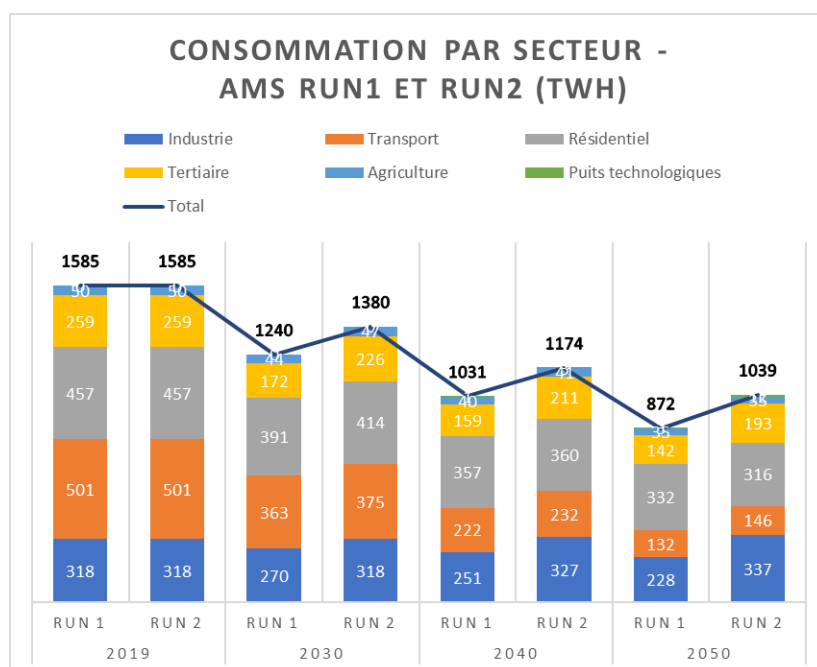
3.1 Les objectifs climatiques de la France contraignent très fortement les trajectoires

La France a de nombreux engagements européens et nationaux très ambitieux en matière d'énergie et climat que viennent renforcer les textes du paquet « Fit for 55 »⁶¹.

L'ensemble de ces objectifs constitue un réseau de contraintes pour les scénarios de la SFEC et conduit à des hypothèses très fortes sur les leviers de la transition : maîtrise de la consommation, développement des énergies renouvelables, décarbonation du mix. Sur ces trois leviers, les projections sont en rupture par rapport aux tendances.

La mission a principalement examiné les scénarios construits par l'administration dans le cadre des travaux de la SFEC⁶². Le premier de ces scénarios (« run 1 » et essentiellement sa variante « run 1bis ») a soutenu l'ensemble des travaux et des présentations du SGPE jusqu'à octobre 2023. À cette date, la direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) a transmis à la mission un second scénario (« run 2 ») dans un état encore provisoire mais stabilisé pour les consommations d'énergie. Il s'agit de scénarios « AMS », qui doivent permettre d'atteindre les objectifs. La mission a étudié la façon dont ces résultats sont obtenus et tenté d'apprécier leur sensibilité au respect des trajectoires annoncées. Ce second scénario a été partiellement révisé et transmis le 10 novembre.

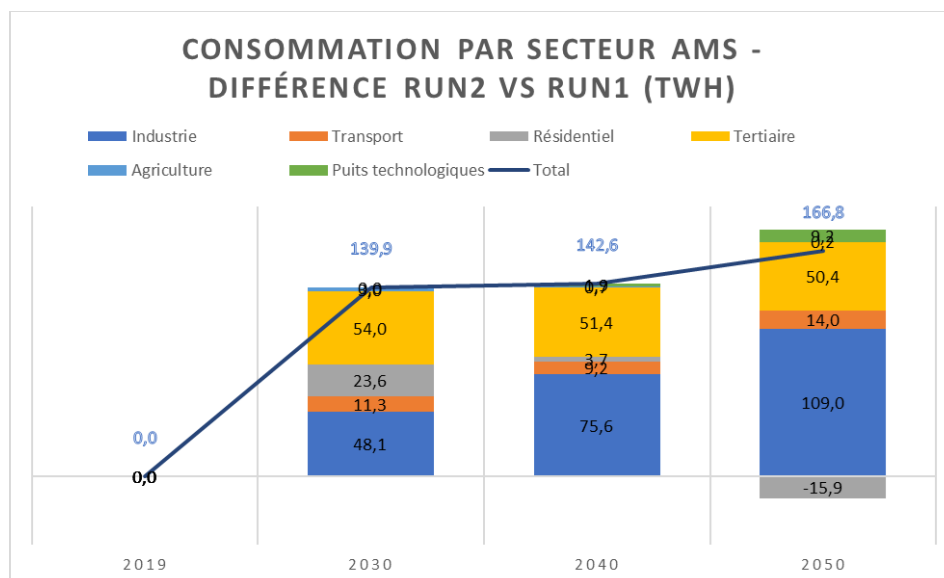
Les évolutions de la demande entre ces deux scénarios illustrent bien le poids du faisceau de contraintes qui pèse sur ces modélisations et la difficulté à stabiliser une projection qui permette de les concilier. Les deux graphiques ci-après comparent les consommations sectorielles dans les deux scénarios, d'abord les consommations et leur niveau, puis, dans le second, la différence de consommation par secteur (run 2 – run 1) :



Graphique 1 (mission à partir de source DGEC)

⁶¹ La liste des engagements ayant un impact sur la demande de biomasse et les trajectoires des principaux indicateurs associés figurent en annexe 9.

⁶² Plusieurs scénarios de transition énergétique existent (Engie, EdF-Agrosolutions, ADEME, négaWatt ou WWF, etc.). La compréhension de l'impact des hypothèses qui les fondent exigerait un travail important.

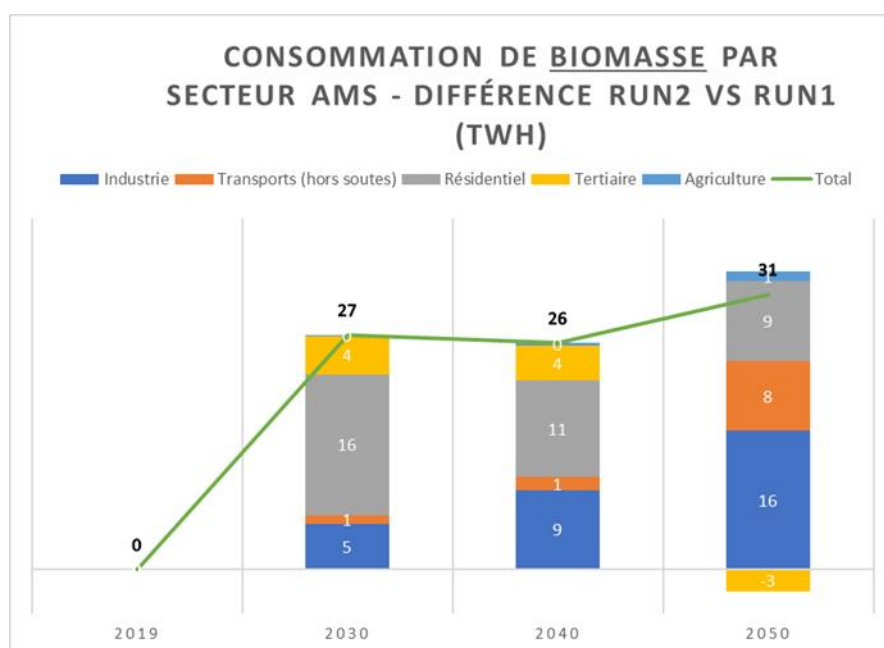


Graphique 2 (mission à partir de source DGEC)

Les principaux changements intervenus entre les deux évaluations de la demande toutes énergies résident dans :

- la consommation du secteur tertiaire, qui a été réévaluée à la hausse après retour d'expérience et révision de la projection d'application du décret tertiaire, principal outil pour ce secteur ;
- la consommation du secteur industriel, revue également à la hausse, après l'exploitation des feuilles de route des 50 sites plus gros émetteurs et des feuilles de route sectorielles des secteurs plus diffus (cf. 3.4.1). En outre, les hypothèses de réindustrialisation sont également relevées.

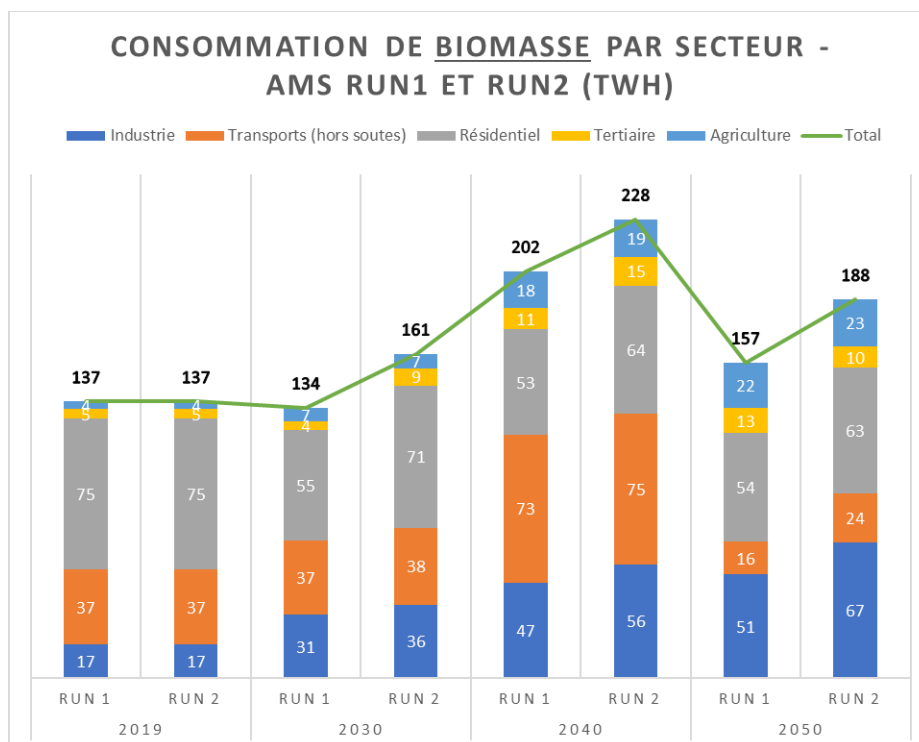
3.2 Les variations de la demande toutes énergies ont un impact important sur la demande de biomasse.



Graphique 3 (mission à partir de source DGEC)

L'impact est sensible sur la demande de biomasse, laquelle constitue au premier ordre un levier directement opérationnel et éprouvé de décarbonation pour beaucoup d'activités.

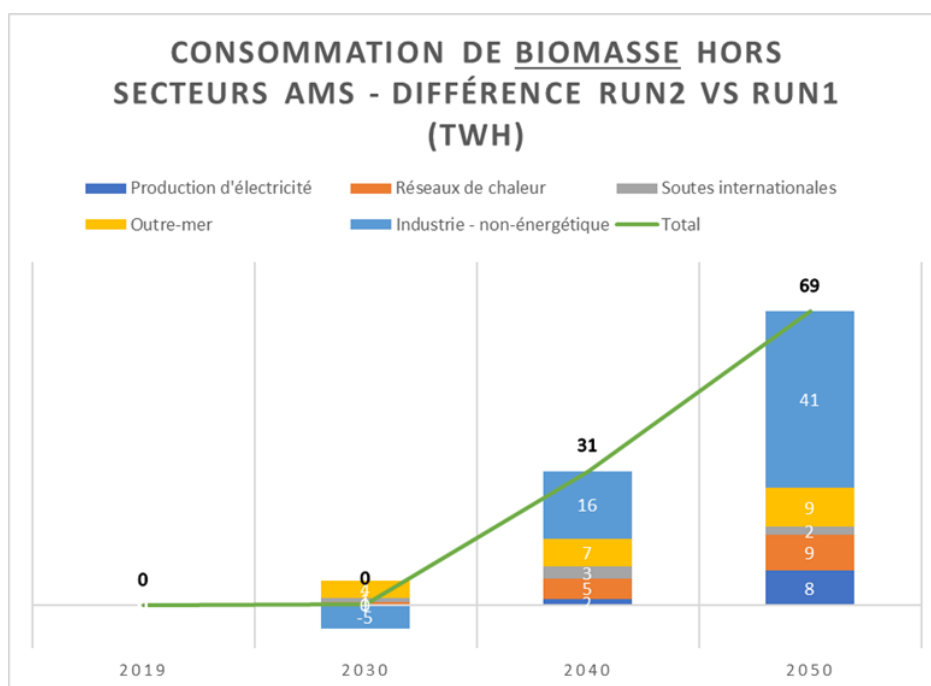
En effet, si on s'intéresse uniquement aux consommations de biomasse des différents secteurs, on constate une évolution sensible entre les deux scénarios, qu'illustrent les deux graphiques ci-contre et suivant.



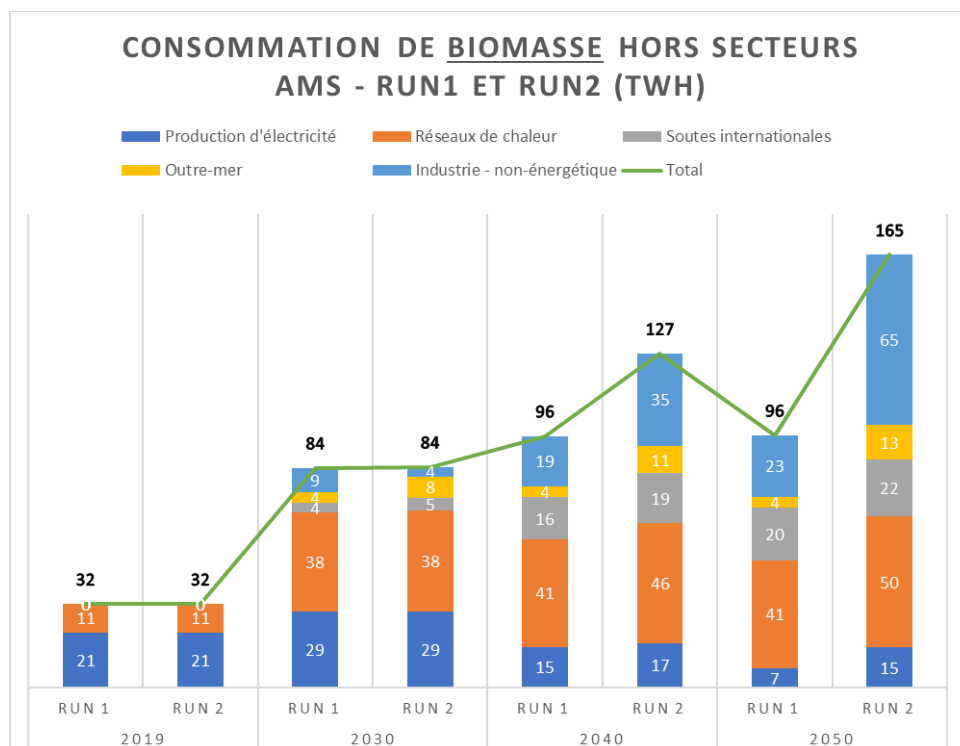
Graphique 4 (mission à partir de source DGEC)

On constate une projection de consommation plus élevée dans l'industrie et dans les transports, avec une trajectoire de baisse des consommations des bâtiments, moins rapide au départ mais plus marquée en 2050.

Les scénarios comptabilisent également les consommations « hors secteurs » de biomasse. Ce sont celles qui n'apparaissent pas directement dans les bilans énergétiques métropolitains (Outremer, soutes), ne sont pas réparties entre secteurs (chaleur, électricité) ou enfin ne sont pas à finalité énergétique (des produits énergétiques consommés comme des réactifs, notamment biocarburants utilisés comme matière première des industries chimiques).



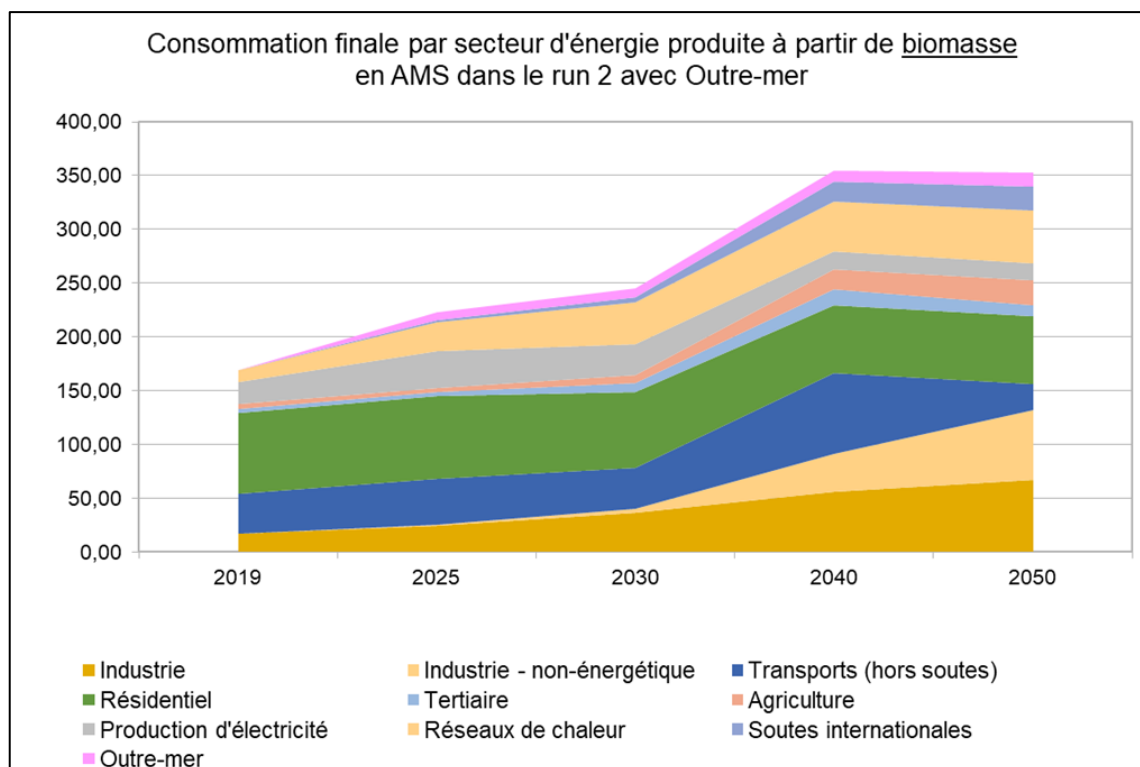
Graphique 5 (mission à partir de source DGEC)



Graphique 6 (mission à partir de source DGEC)

3.3 La consommation de biomasse dans le scénario AMS 2 est encore accrue

Les consommations finales d'énergie produite à partir de biomasse dans le scénario AMS run 2 sont ainsi retracées (en TWh) :



Graphique 7 (source DGEC)

Par définition, ces graphiques ne font toutefois pas apparaître les consommations internes de la branche énergie, c'est-à-dire la consommation de biomasse dans la production de biogaz ou de bioliquides à partir de biomasse solide.

Si on retrace les montants de biomasse correspondants dans le scénario AMS du run 2 au périmètre Kyoto ⁶³ on obtient les consommations primaires de biomasse supplémentaire suivantes :

AMS run 2	2023 ⁶⁴	2030	2040	2050
Consommation interne de la branche énergie pour biocarburants et biogaz (TWh Ep)	52	86	191	200

Les consommations de biomasse primaire domestique totales anticipées dans ce scénario sont donc de :

AMS run 2	2023	2030	2040	2050
Consommation primaire de biomasse (TWh Ep)	257	331	546	553

À noter que le recours à l'importation y est envisagé pour une petite part et vient s'ajouter à la consommation de ressources domestiques :

AMS run 2 - Importations (TWh)	2023	2030	2040	2050
Biomasse solide	1,7	2,5	4,1	5,2
Biocarburants	2,6	3,4	5,5	6,8

In fine, la reprise des hypothèses et la prise en compte des dernières évaluations des besoins sectoriels conduisent à un nouvel équilibre avec une moindre maîtrise des consommations et un besoin accru en énergie décarbonée, à la fois pour la biomasse, mais également pour l'électricité décarbonée pour laquelle ce nouveau scénario affiche un besoin d'importation de 76 TWh en 2050.

3.4 Les projections de demande sont très sensibles aux hypothèses

Les évolutions entre le run 1 et le run 2 illustrent ces sensibilités. Le besoin en biomasse exprimé par secteur peut être impacté par l'atteinte des autres objectifs de la SFEC : par exemple, la part d'énergie renouvelable dans les bâtiments où le secteur du chauffage appellera plus de biomasse si les autres solutions (pompes à chaleur, solaire thermique, géothermie...) sont insuffisantes en raison d'un manque de capacité d'investissement. Il peut aussi être impacté par la remise en question des hypothèses sectorielles.

Dans l'évolution entre les deux « run », c'est le cas en premier lieu pour le secteur de l'industrie dont les évolutions sont substantielles.

C'est le cas aussi dans les autres secteurs de la consommation : le différentiel entre les deux scénarios nous renseigne sur une forme d'élasticité de la demande de biomasse au niveau de chaque secteur par rapport à sa consommation, mais qui est trop agrégée pour aider à la décision.

⁶³ Le périmètre « Kyoto » inclut la France métropolitaine et les régions ultra périphériques de l'Union Européennes (Guadeloupe, Martinique, Réunion, Mayotte, Guyane et Saint Martin). Il peut y avoir des écarts statistiques mineurs entre ces chiffres et ceux qui ont été présentés à la partie précédente au format métropole + outremer.

⁶⁴ On débute par 2023 qui est la première année de la simulation et pour laquelle les données sont disponibles de façon homogène avec les années suivantes.

3.4.1 L'industrie exprime une demande forte de biomasse

Depuis 1990, malgré une baisse d'émissions de CO₂ de 50 %, imputable au deux-tiers à une hausse des rendements et un tiers à la désindustrialisation, l'industrie contribue encore à hauteur de 18 % aux émissions de CO₂ françaises. L'analyse précise de l'apport de la biomasse énergie comme solution de décarbonation est rendue délicate par la diversité des installations et la présence de quelques grosses installations concentrant une forte part des émissions.

La direction générale des entreprises (DGE) a mené deux approches, l'une via les cinquante sites les plus émetteurs, l'autre via les quatre secteurs les plus émetteurs, à savoir : acier et matériaux métalliques, ciment et matériaux non métalliques, chimie et industrie agroalimentaire. À ce stade, les chiffres ne sont encore disponibles qu'en TWh d'énergie liée à la biomasse.

Depuis novembre 2022, chacune des cinquante plus grosses installations a pu présenter une trajectoire de décarbonation. Six sites sont métallurgiques (dont Arcelor Dunkerque et Fos), vingt-cinq sites produisent des matériaux non métalliques dont du ciment, seize sites chimiques et deux sites agroalimentaires. Ils concentrent 50 % des émissions industrielles. Les 600 installations industrielles suivantes soumises à ETS représentent 25 % des émissions. La part des projets biomasse n'a pas été communiquée à la mission. Pour ces sites, les demandes complémentaires de biomasse sont de 10 TWh/an en 2030, 20,5 TWh/an en 2050. Les besoins iraient vers 50 % de biomasse solide, 45 % de CSR biogéniques et 5 % de biogaz en 2030, puis une répartition 40 %, 35 %, 25 % en 2050.

À ce stade, les plans d'approvisionnement sont en cours d'étude à l'ADEME. Au vu de la taille des sites, certains ont un impact notable sur leur territoire géographique, notamment en Hauts-de-France, Normandie et Pays de la Loire, certains sites mobilisant des ressources dans un rayon de près de 150 km. L'approvisionnement des sites les plus importants devra donc être étudié avec la plus grande prudence.

L'État a d'ores et déjà lancé via l'ADEME un appel à projet pour financer des chaudières biomasse pour l'industrie. Par ailleurs, environ 50 % des investissements de décarbonation sont jugés non rentables, et pourraient faire l'objet d'un soutien de l'État.

En parallèle, dans le cadre de l'article 301 de la loi climat et résilience, les quatre plus gros secteurs émetteurs ont élaboré une feuille de route de décarbonation.

En matière de biomasse, de manière résumée, la filière métallurgique n'a pas fait de demande.

Les cimenteries sont demandeuses de carburants alternatifs (huiles, pneus usagés, résidus de solvants et peintures, combustibles solides de récupération CSR), à hauteur de 1 030 kt/an en 2030 et 1 300 kt/an en 2050. La répartition de l'effort de décarbonation est notée dans le tableau suivant.

	2030 (Mt CO ₂)	2050 (Mt CO ₂)
Efficacité énergétique	0,33	0,44
Combustibles alternatifs	1,06	1,23
Clinker ⁶⁵	1,1	1,7
CCS	0	5

Tableau n° 3 : voies de décarbonation du ciment en 2030 et 2050 (source feuille de route de la filière)

Les autres sous-secteurs des matériaux non métalliques sont principalement le verre, la chaux, les briques et tuiles et le plâtre. La demande de biomasse est concentrée dans l'accès au biogaz pour le chauffage des fours.

⁶⁵ Composant du ciment

Pour la chimie, qui représente 25 % des émissions de l'industrie, l'usage de la biomasse se concentre sur des besoins de chaleur, via des chaudières biomasse. Le besoin en biomasse énergie de la chimie est estimé à 4,7 TWh/an en 2030 avec un supplément de 2,5 TWh/an en 2050. À ce stade, la feuille de route ne précise pas la forme de la biomasse demandée, combustible solide ou biogaz. Par ailleurs la chimie est un des principaux responsables de la consommation de produits énergétiques à des fins non énergétiques (hydrocarbures pour les produits plastiques) ce qui est une cause importante des variations entre les « run » 1 et 2.

À ce stade, la mission n'a pas pu exploiter la feuille de route de l'industrie agroalimentaire. Le seul point notable est que ce secteur a naturellement à disposition des résidus de process qui peuvent être versés dans des méthaniseurs internes aux sites. Cette industrie est donc très intéressée par l'autoconsommation de biogaz avant purification et compression pour injection, ce qui pose des problèmes d'accès au soutien public via le tarif d'injection. Par ailleurs, une partie de ces déchets disposait d'autres valorisations, notamment pour l'alimentation animale. Il existe donc de réels conflits d'usage sur ces matières organiques.

en TWh/an		Demande biomasse énergétique		
Secteurs	Émissions CO ₂ en 2015 (Mt)	TWh 2019 (a)	TWh 2030 (b)	TWh 2030 CSR (b)
Sidérurgie (Feuille de route)	26	0	0	0
Ciment et non métalliques (Feuille de route)	10,75	5,0	+3,7	+3,0
Chimie (Feuille de route)	20,1	1,1	+7,4	+2,2
Agroalimentaire	10,3	2,1	+7	0
Autres secteurs	10,85	8,2	+2,6	0
Dont Papier carton			+3,5	+0,4
Total DGE		17,5	+24,2	+5,7
Total DGE		17,5	47,4	
Total SNBC (Met ligne 255)	78,0	20,2	43,7	

Tableau n° 4 : synthèse de la demande industrie
Source : feuilles de routes filières, SNBC run 2 (a), DGE (b) traitement mission

La mission souhaite néanmoins signaler deux cas particuliers liés au marché du bois énergie : l'industrie du bois et les usagers du bois industrie. Le développement des produits techniques en bois construction exigent de sécher le bois d'œuvre et les industries du bois ont un besoin croissant d'énergie estimé à 16,4 TWh/an. Par ailleurs, le développement du bois énergie est susceptible de peser sur le prix et la disponibilité du bois industrie utilisé pour les papiers et les panneaux de bois.

3.4.2 L'intérêt des stress-tests

La réalisation de l'équilibre offre-demande énergétique semble très difficile compte tenu des minorations exposées en partie 2. Cette situation peut conduire à prioriser certains objectifs et à en suspendre ou différer d'autres. Pour cet exercice, il serait utile que la sensibilité des consommations de biomasse aux hypothèses les plus dimensionnantes soit explicitée dans ces scénarios.

Les travaux de la SFEC ont conduit à élaborer un scénario de stress-test pour la demande d'électricité dans le cadre du run 1. Cet exercice a été présenté par le SGPE. Il serait utile d'avoir un exercice identique pour la biomasse, qui pourrait examiner, sans exhaustive :

- La production d'électricité à partir de biomasse solide pour la reconversion de centrales à charbon⁶⁶ ;
- L'approvisionnement en biocarburants 2G du transport aérien, projeté à 30 % de la consommation en 2050, soit 20 TWh/an en énergie finale, soit 40 TWh/an de biomasse primaire, alors que les opérateurs rencontrés par la mission se sont montrés dans leur ensemble sceptiques ;
- Une électrification moins rapide des transports ;
- Une moindre diffusion des pompes à chaleur pour le chauffage domestique ;
- ...

Ces sensibilités devraient s'exprimer autant en termes de consommation de biomasse que de coût des mesures.

3.4.3 Des points de vigilance

Les analyses qui précèdent ne prennent pas en compte les aspects économiques et notamment les prix dont les variations pourraient changer considérablement le mix de la demande.

Le coût des mesures d'économie d'énergie pourrait également s'avérer limitant sur les capacités à maîtriser les demandes.

Dans les scénarios envisagés par la SFEC, le régime alimentaire national devrait sensiblement évoluer. En économie ouverte, la production nationale ne suit pas nécessairement la demande nationale, mais le souhait de sécurité et de souveraineté alimentaire pourrait imposer des contraintes, notamment sur l'utilisation des terres, qui pourraient perturber les anticipations de la SFEC.

⁶⁶ Pour Emile Huchet à Saint-Avoid, une tranche de 600 MW_e qui fonctionne de l'ordre de 1 000 h par an et correspondrait en ordre de grandeur à 1,5 TWh/an de biomasse, soit 650 000 m³/an de bois (de l'ordre de 10 % du bois utilisé aujourd'hui dans toutes les chaufferies) ou 400 000 t/an de déchets bois (un peu moins de 20 % de tous les déchets bois valorisés en énergie aujourd'hui). Pour Cordemais, ce chiffre pourrait être multiplié par 4 (deux tranches de 600 MW et un fonctionnement annuel de l'ordre de 2 000 h). Outre la tension nationale sur la ressource biomasse, ce genre de projet pose à l'évidence d'importants problèmes d'approvisionnement. La conversion de la centrale de Gardanne est considérée comme déjà prise en compte.

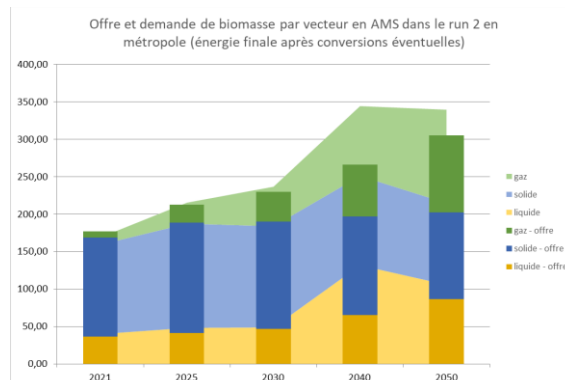
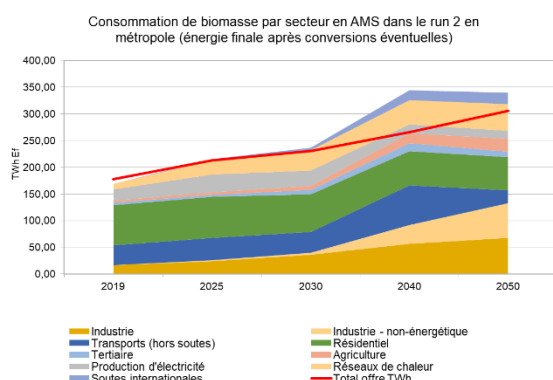
4 L'offre ne peut raisonnablement pas répondre à la demande

Dans les travaux de la SFEC en cours, les anticipations sur la demande de biomasse et sur sa répartition entre secteurs économiques et vecteurs physiques (solide, liquide gazeux) sont le résultat d'une programmation sous contraintes issues des nombreux engagements souscrits par la France, tempérée par une estimation des potentiels et par les appétences manifestées par les secteurs concernés.

En regard, les anticipations pour la production de biomasse ne semblent pas atteignables. Les simulations issues du run 2, communiquées à la mission à sa demande mi-novembre 2023, laissent un important fossé à combler avant d'espérer un éventuel équilibre. Le travail, résumé par les graphiques 8, 9, n'est pas achevé par l'administration mais les principales marges de progression de l'offre de biomasse (CIVE, bois en forêt et hors forêt), déjà poussées à leur maximum théorique, ne permettent pas de satisfaire la demande jusqu'en 2050. De plus, sous ces hypothèses, le puits de carbone forestier est amené à se réduire considérablement, voire à s'inverser. L'estimation de l'offre (graphiques 10 et 11) est de surcroît sensiblement supérieure à ce que la mission perçoit comme possible pour une « année moyenne » (305 TWh/an⁶⁷ vs. 160-250 TWh/an⁶⁸, cf. 2.5. et annexe 10).

L'écart global offre/demande pourrait être accru :

- L'offre d'énergie globale issue de la biomasse diminuera si on doit augmenter la production de biocarburants (ou de biogaz).
- Certaines hypothèses initiales bien que revues à la baisse⁶⁹ semblent encore optimistes et leurs conditions de réalisation incertaines.
- Enfin, la production de biomasse est par nature variable selon les années (et aussi intermittente au cours de l'année en raison des cycles de récolte) et sur le moyen terme impactée par les évolutions climatiques. Les simulations ne présentent ni incertitudes, ni analyses de sensibilité.
- Enfin, les consommations internes électriques pour la fabrication du biogaz et des biocarburants ne semblent pas être prises en compte. Si cela n'a pas beaucoup d'incidence pour les volumes actuels de biométhane injectés, de l'ordre de 5 TWh/an, ce n'est plus négligeable pour des volumes affichés de 90 TWh/an en 2050.

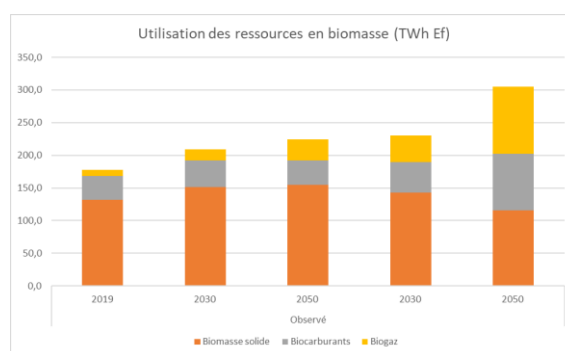
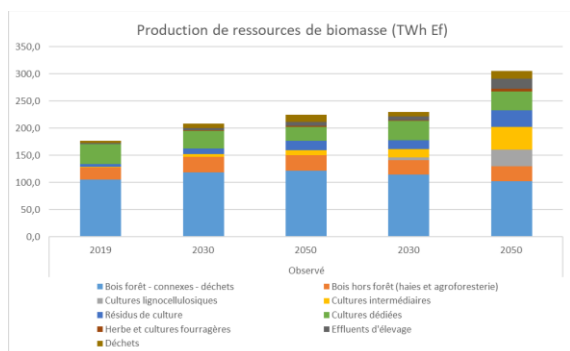


Graphiques n° 8 et 9 : offre et demande de biomasse à usage énergétique par vecteur et par secteur de 2019 à 2050, simulations du run 2 AMS, novembre 2023, résultats préliminaires, source DGEC

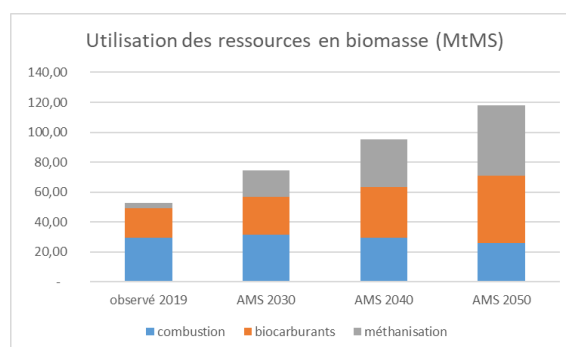
⁶⁷ Les 305 TWh figurant dans les fichiers de la DGEC comprennent 13 TWh issus de divers déchets (boues de STEP, déchets industriels, ...) ne relevant pas du champ de la mission

⁶⁸ Production estimée à partir des seules ressources biomasse nationale pour les biocarburants 1G

⁶⁹ Commentaires de l'onglet biomasse du fichier 20230109_SFEC_Hyp_AGRI_Run2.xls ; les contributions énergétiques des effluents d'élevage, des surplus d'herbe et des déjections d'élevage ont été revues à la hausse, ...



Graphiques n° 10 et 11 : offre de biomasse à usage énergétique par ressource détaillée et par vecteur de 2019 à 2050, simulations du run 2 AMS, novembre 2023, résultats préliminaires, source DGEC



Graphique n° 12 : utilisation de la biomasse à usage énergétique par vecteur de 2019 à 2050, simulations du run 2, novembre 2023, calcul et mise en forme par la mission, l'énergie est transformée en masse par la mission (TWh → MtMS), en utilisant l'équation (1)⁷⁰, source DGEC et mission

La mission conclut de cette analyse que l'équilibre entre l'offre et la demande de biomasse à usage énergétique ne sera pas réalisé.

Le besoin de biomasse exprimé dans la simulation est de l'ordre de 120 MtMS (graphique 12), supérieur à ce qui peut être raisonnablement espéré en France (de l'ordre de 75 MtMS) d'autant que la productivité du milieu naturel sera vraisemblablement diminuée du fait de l'impact du changement climatique et que le recours aux intrants et à l'irrigation, qui conditionnent une partie de la productivité agricole, est supposé baisser.

La compétition entre les utilisateurs pour une ressource sous tension est un point de vigilance particulier. Hors de toute régulation, le marché donnera vraisemblablement une forte priorité à des usages énergétiques dont la capacité à payer est la plus grande (par exemple, les carburants durables d'aviation). La puissance publique doit alors avoir une vision systémique de la biomasse, arrêter les principes pour son usage et se doter des moyens de prescription, de contrôle et, le cas échéant, de sanction du non-respect de ces règles de priorisation.

⁷⁰ Les biocarburants incorporent les biocarburants 1G d'origine nationale et importée qui sont donc traités comme des carburants 2G, ce qui biaise légèrement les résultats.

5 Rapprocher l'offre et la demande – propositions pour la gouvernance

5.1 Se donner des instruments de connaissance et de pilotage

5.1.1 Mettre en place un observatoire national de l'offre et de la demande

La stratégie nationale de mobilisation de la biomasse (SNMB) mise en place par le décret n° 2016-1134 du 19 août 2016⁷¹ pris en application de la loi de transition énergétique pour la croissance verte a prévu un recensement des composantes de la biomasse.

Sans revenir sur les développements du 1.2., il n'existe pas de vision exhaustive et partagée de la production et de l'utilisation de la biomasse.

Recommandation 5. Constituer un observatoire national de l'offre et de la demande de biomasse à partir des structures existantes pour agréger les informations disponibles au niveau national et régional et garantir leur exhaustivité (commissariat général au développement durable - CGDD/SDES, SSP).

Au niveau national, cet observatoire réunirait notamment les services statistiques des ministères chargés de l'agriculture, de l'énergie, de l'industrie, des transports, FranceAgriMer, l'IGN, l'INRAE, l'ADEME. Intégrant l'ONRB et doté de missions élargies, notamment pour la demande, il produirait à fréquence semestrielle une note de situation. Son pilotage devrait être assuré au sein de l'administration par un service statistique à l'instar de ce qui a été historiquement utilisé pour les hydrocarbures, le charbon ou l'électricité pour prévenir pénuries et surinvestissements. La mission ne se prononce pas sur son rattachement mais souligne la nécessité d'une autorité unifiée.

Au niveau régional, la loi climat et résilience de 2021 (article 83) a institué les comités régionaux de l'énergie (CRE), dont les missions ont été précisées dans un décret du 27 janvier 2023. Leur rôle a été amplifié par la récente loi sur l'accélération des énergies renouvelables. Ces CRE associent, sous co-présidences du préfet de région et du président du conseil régional, des représentants de l'Etat et de ses établissements publics, des élus locaux à tous niveaux (région, département, EPCI, communes), les autorités organisatrices de la distribution d'énergie et les gestionnaires des réseaux publics de distribution ou de transport intéressés ainsi que des acteurs économiques et des représentants de la société civile. Ils font des propositions pour atteindre les objectifs régionaux de développement des énergies renouvelables et participent à leur évaluation. Ces structures pourraient être associées à la mise en place de l'observation. Elles devraient valoriser les travaux réalisés antérieurement pour l'élaboration des stratégies régionales biomasse et des programmes régionaux de la forêt et du bois. Une « commission régionale biomasse » pourrait être installée au sein de ces CRE.

5.1.2 Faire établir et suivre des plans d'approvisionnement formalisés pour les plus gros consommateurs

Sans régulation autre qu'économique, la tension sur les usages de la biomasse et les aléas de production conduiront à des difficultés d'approvisionnement à répétition. Pour atténuer ce risque, les plus grosses installations consommant de la biomasse (méthaniseurs, unités de combustion, raffineries de biocarburants, industries de transformation – scieries, papeteries, producteurs de panneaux et de meubles) devraient avoir l'obligation de construire un plan d'approvisionnement et de rendre compte de sa réalisation, avec des propositions d'actions correctives en cas d'écart majeur.

⁷¹ Celle-ci aurait dû être réactualisée après 2020, mais ce chantier n'a pas été engagé.

Ce plan devrait démontrer la disponibilité de la ressource et évaluer les effets de son prélèvement sur les écosystèmes concernés. Il devrait être validé par un tiers, intégré dans les obligations d'exploitation fixées par l'autorité compétente et contrôlé au travers d'un compte rendu annuel, lequel serait également utilisé pour l'alimentation des statistiques de consommation.

Recommandation 6. *Instituer un plan d'approvisionnement formalisé pour les installations classées soumises à autorisation et enregistrement utilisant de la biomasse à des fins non alimentaires et assurer son suivi (DGPR en lien avec la DGEC).*

Un tel plan ou ses prémisses existent déjà dans un certain nombre de cas, avec un suivi souvent non pérenne, pour les installations :

- souhaitant bénéficier de subventions de l'ADEME, pouvant conditionner le versement de la subvention ;
- bénéficiant de tarifs d'achat du biogaz qui doivent attester de la limite de consommation de cultures dédiées ;
- de méthanisation agricole respectant le cahier des charges « digestat » ou Dig⁷² qui doivent fournir annuellement un plan d'approvisionnement à la direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt.

En outre, les exigences de suivi de la durabilité de la biomasse consommée vont être renforcées par la directive RED III.⁷³

Aujourd'hui, les administrations et des opérateurs consultés par la mission ont confirmé l'absence de vision globale et exhaustive des consommations de biomasse. L'instauration de ce plan exigerait une obligation juridique dont le support le plus approprié à ce stade semble être celui de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement. Les procédures d'autorisation et d'enregistrement se prêtent à sa mise en œuvre, et permettraient d'utiliser l'arsenal de contrôle et sanctions des installations classées (inspections, mise en demeure en cas d'écart, etc.) pour le respect des plans. Un rapportage annuel pourrait être envisagé.

Les cellules biomasse⁷⁴ procéderaient à l'évaluation initiale des plans d'approvisionnement au regard du contexte régional (voire inter-régional) et donneraient un avis sur ses évolutions au cours de la vie de l'installation. Leurs moyens pourraient être renforcés pour leur permettre d'assurer la consolidation régulière des données régionales, la confrontation et la concertation entre les différents acteurs économiques utilisateurs de biomasse. Même si ce n'est pas leur vocation première, les données ainsi recueillies alimenteraient naturellement l'observatoire de l'offre et de la demande de biomasse aux niveaux régional et national.

5.2 Améliorer la connaissance et les prévisions

5.2.1 Nécessité d'une meilleure compréhension et d'une approche cohérente de la question au sein des administrations

Si l'on peut saluer le caractère global des travaux conduits pour l'élaboration de la SFEC, force est de constater que, s'agissant de la biomasse, les parties prenantes n'ont pas réussi à trouver un

⁷² Arrêté du 22 octobre 2020, NOR : AGRG2028614A.

⁷³ Renewable Energy Directive. La version III a été adoptée par le Conseil de l'Union européenne le 9 octobre 2023.

⁷⁴ Créées au niveau national (circulaire du 23 février 2009), composées de représentants des administrations concernées, elles veillent à la bonne articulation des plans d'approvisionnement des différents projets biomasse bois énergie d'un territoire donné. Leur rôle a été étendu aux autres compartiments de la biomasse dont la méthanisation, et depuis l'arrêté du 13 décembre 2016, elles assurent l'analyse des plans d'approvisionnement en biomasse des installations utilisant à titre principal le biogaz produit par méthanisation de déchets non dangereux et de matière végétale brute dont la puissance est comprise entre 300 et 500 kW.

langage commun, à diffuser une compréhension collective et formalisée, et à élaborer des scénarios compris et partagés de tous.

Sans reprendre les propos des parties 1 et 2, la mission a souvent rencontré des difficultés pour comprendre les tableaux de résultats et fichiers livrés par les simulations en l'absence de guide ou fiche permettant leur exploitation.

Recommandation 7. Organiser, tracer et documenter les partages d'information et l'interface entre les sources de données, ainsi que leur traitement dans les diverses modélisations de la SFEC (DGEC).

Les experts associés à la préparation de la SFEC devraient valider les résultats des simulations utilisées par ou pour le SGPE dans leur secteur de compétence et les documenter pour garantir leur bonne compréhension par les autres utilisateurs. Un guide de lecture simple devrait être rédigé pour faciliter le partage et le contrôle de la cohérence des résultats.

5.2.2 Mieux modéliser l'offre et les usages potentiels et futurs de la biomasse

La deuxième partie a souligné combien la modélisation de la production de biomasse agricole est fruste et a recommandé le développement d'un modèle sur des bases plus agronomiques et climatiques. Celui-ci sera couplé avec des modules forestier, climatique et énergétique déjà largement existants (IGN, Solagro, EnerData). La recommandation n° 2 n'est pas reprise mais la mission rappelle son caractère tout à fait prioritaire et son intérêt pour conduire des études de sensibilité au changement climatique.

5.3 Piloter la convergence de l'offre et de la demande

Mieux connaître ou évaluer l'offre et la demande ne permet pas de les rapprocher mais seulement de savoir ce dont on parle. Leur accord exige de définir des usages prioritaires de façon générale mais aussi de déterminer comment procéder aux arbitrages en cas de nécessité.

5.3.1 Fixer des principes stables et cohérents

La biomasse possède de multiples usages avec une priorité « générale » bien établie par la SNMB : l'alimentation humaine puis animale, le maintien de la biodiversité et de la qualité des sols, les usages en matériaux et énergétiques.

Cette hiérarchie paraît non contestable mais peut connaître des « variations locales », notamment en raison des approches multicritères qui la guident (les luttes contre le changement climatique et contre l'érosion de la biodiversité peuvent être parfois difficiles à conduire simultanément). Il est par exemple logique de permettre la conversion énergétique d'excédents agricoles les années de fortes récoltes. Une dérogation existe déjà pour les méthaniseurs, avec une limite de 15 %.

Par ailleurs, la forme sous laquelle la biomasse est disponible contraint sa valorisation énergétique (les CIVE étant inadaptées à la combustion, le bois à la méthanisation, ces deux ressources ne sont pas interchangeables). La façon dont la biomasse disponible est utilisée (combustion, pyrogazéification, méthanisation, biocarburants) est dépendante des demandes exprimées et du caractère plus ou moins substituable de la demande. Choisir une allocation entre les différentes filières revient à définir une seconde hiérarchie, spécifique aux usages énergétiques de la biomasse.

Cette seconde hiérarchie ou *merit order* doit être établie avec suffisamment de force et de réflexion pour garantir sa pérennité et éviter des tournants politiques perturbateurs (comme d'autres

secteurs ont pu en connaître⁷⁵). Elle doit prendre en compte les spécificités des secteurs demandeurs, chercher à minimiser le coût socio-économique des réductions d'émissions et prévoir des éléments doctrinaux de priorisation des projets et de résilience face aux crises.

Parmi les mesures institutionnelles à mettre en place au niveau national *ab initio* devraient figurer notamment :

- la définition d'usages prioritaires en fonction du caractère stratégique du secteur demandeur, de sa capacité à absorber des prix élevés des énergies ou à recourir à d'autres énergies, du coût des réductions d'émission pour ce secteur et de sa contribution à la transition écologique⁷⁶ ;
- la définition d'éléments de doctrine pour la gestion des conflits, permettant de classer entre eux les différents projets demandeurs de biomasse ; certains usages pourraient éventuellement être restreints, comme l'usage du biogaz pour le chauffage domestique ou l'usage de la biomasse pour produire de l'électricité en base ;
- la suppression ou la modification des aides jugées incohérentes avec cette priorisation ;
- un soutien à la recherche, aux pilotes et unités industrielles de démonstration pour explorer le maximum possible de voies, avec une évaluation approfondie et rapide des résultats pour accélérer l'émergence des filières les plus prometteuses.

Il est vraisemblable que le caractère contraignant de certains de ces principes ou de leur application devra être inscrit dans la loi pour pouvoir les garantir.

Au-delà de ce cadre de long terme, il est presque certain que si la biomasse est massivement utilisée, des difficultés conjoncturelles d'approvisionnement apparaîtront, par exemple en cas de succession d'années de sécheresse ou de crise extérieure (conflit armé, pénurie planétaire, etc.).

Ce cadre doit intégrer les dispositions pour la prise en compte des risques de court terme (intermittence interannuelle...), dans leurs dimensions administrative (quelles dérogations aux plans d'approvisionnement ?), contractuelle (par exemple entre agriculteurs et énergéticiens pour un méthaniseur), économique (quelle couverture du risque économique) et énergétique (stockages ? énergies de substitution ?) pour éviter qu'une année de pénurie sur la biomasse ne conduise à des comportements dictés par un court-termisme mercantile.

Ces dispositions devront s'appuyer sur des constats régionaux ou nationaux précis et non contestables. Les instances régionales auront un rôle particulier pour la résolution des difficultés et doivent y être préparées (l'organisation de stockages temporaires, la mise en place de quotas ou d'allocations réservées, etc. pourraient être explorées). L'observatoire de l'offre et de la demande de biomasse à usage énergétique y contribuera au travers de ses composantes centrale et territoriales.

Recommandation 8. Définir des principes et un cadre stable et rationnel de priorisation des usages de la biomasse à destination énergétique (DGEC/DGPE).

5.3.2 Mettre en place un cadre économique propice

Les coûts de production des carburants biogéniques feront partie des déterminants pour les choix. Ceux du biogaz sont bien estimés par de récents travaux de l'ADEME : environ 3,5 M€/MW pour l'investissement pour un coût du MWh produit de l'ordre de 100 € ([33]⁷⁷). Les estimations pour les biocarburants 2G sont plus incertaines en raison du manque de maturité technologique du secteur et parce que fondées sur des indications d'opérateurs économiques : entre 6,5 et 10 M€/MW pour

⁷⁵ Par exemple les réglementations thermiques pour la construction des bâtiments favorisant successivement, l'électricité, le gaz puis l'électricité.

⁷⁶ Les travaux du comité de prospective de la Commission de régulation de l'énergie apportent des éléments intéressants [29].

⁷⁷ Les valeurs originelles sont en kWhPCS.

l'investissement pour un coût du MWh produit aux environs de 150€. Ces carburants d'origine biogéniques seront donc rares et chers.

En termes d'investissements et avec toutes les réserves qu'appelle une estimation grossière, en 2050, la production de 70 TWh de biogaz et 35 TWh de biocarburants 2G et de gaz de pyrolyse exigerait 30 et 25-40 G€ d'investissements cumulés (les prévisions actuelles de l'administration, 111 TWh de biogaz et 57 TWh de biocarburants 2G conduiraient à un total de 75 à 100 G€). Ces investissements devront être aidés par des subventions ou des prix garantis, sauf envol des prix mondiaux de l'énergie, ce que ne prévoient pas les hypothèses de cadrage harmonisées préconisées par la Commission européenne pour les exercices de prospective climat.

L'annexe 11 fournit un certain nombre d'éléments économiques prospectifs relatifs à ces filières et une estimation par la mission du niveau de soutien qui serait nécessaire pour atteindre les objectifs de la SFEC en matière de biomasse.

Cependant, ces coûts de production et ces investissements induiront nécessairement des changements de consommation aux effets économiques et sociaux difficilement prévisibles.

5.3.3 Faciliter l'acceptabilité des projets

Plusieurs interlocuteurs de la mission ont évoqué la difficulté à faire aboutir des projets en France (allant même jusqu'à évoquer des délais de 5 à 8 ans contre 2 à 4 ans chez nos partenaires européens). Ces projets sont divers : chaufferies, méthaniseurs, installations de thermochimie, etc. Un des arguments utilisés par les opposants réside dans les nuisances (odeurs, noria de camions, risque de pollution des eaux, ...) et le coût carbone de l'approvisionnement à partir de ressources distantes.

En l'absence de données quantifiées et comparables, la mission ne prendra aucune position mais souligne l'impérative nécessité d'informer, de montrer l'utilité des projets pour l'intérêt général, de garantir leur encadrement réglementaire et leur contrôle ainsi que d'assurer une concertation avant la décision. Elle souligne l'intérêt vraisemblable d'un partage des bénéfices avec les habitants et des redevances avec les collectivités avoisinantes pour faciliter l'acceptation.

Conclusion

En conclusion, et bien que le potentiel de la biomasse à usage énergétique puisse être substantiellement développé sur un pas de temps compatible avec les contraintes agricoles et sylvicoles, la mission souhaite souligner quatre points :

- l'absence d'équilibre entre l'offre et la demande de biomasse à l'horizon 2050 est confirmée et sera difficile à résorber, surtout avec un usage important des biocarburants 2G liquides ou du biogaz ;
- la nécessité de bien documenter les scénarios de la SFEC pour qu'ils puissent constituer une référence partagée et stabilisée pour permettre la poursuite des travaux ; la réalisation d'analyses de sensibilité y contribuerait ;
- l'importance des investissements qui seront nécessaires pour la production des biocarburants de deuxième génération et du biométhane ;
- La nécessité de définir les principes et un cadre stable de priorisation des usages de la biomasse (« *merit order* ») et se doter d'outils pour la gouvernance de la ressource biomasse énergie dans un contexte d'usage durablement tendu.

Le développement des gisements identifiés (cultures intermédiaires à vocation énergétique, produits ligneux en et hors forêts et, plus marginalement, effluents d'élevage et résidus de cultures) représente un premier défi à relever en priorité. Sa réalisation dans de bonnes conditions exige la connaissance fine et le suivi de la ressource et de la demande.

En complément, l'exploration d'autres voies devra être poursuivie : la sobriété, la production d'électricité décarbonée, notamment pour produire de l'hydrogène qui est un moyen d'incorporer de l'énergie au carbone biogénique par des réactions thermochimiques industrielles, la capture-stockage du carbone qui est une façon de soustraire des émissions de CO₂ du bilan national et donc de l'équilibrer.

* *

Signatures des auteurs

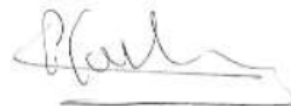
Emmanuel Clause (CGE)



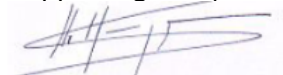
Pascal Dupuis (CGE)



Philippe Follenfant (IGEDD)



Philippe Guignard (IGEDD)



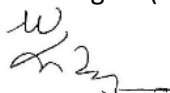
Michel Hermeline
(CGAAER)



Françoise Lavarde
(CGAAER)



Michel Rostagnat (IGEDD)



Annexes

Annexe 1. Lettre de mission



GOUVERNEMENT

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Paris, le 29 MARS 2023

Le ministre de l'agriculture et de la
souveraineté alimentaire

Le ministre de la transition écologique et de
la cohésion des territoires

La ministre de la transition énergétique

Le ministre délégué chargé de l'industrie

à

Monsieur le Vice-Président du Conseil
Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et
des Espaces Ruraux

Monsieur le Vice-Président du Conseil général
de l'Economie, de l'Industrie, de l'énergie et
des technologies

Monsieur le Chef du service de l'Inspection
générale de l'environnement et du
développement durable

Référence Airs : MTE/2023-03/11447

Objet : Mission d'évaluation du potentiel de production d'énergies renouvelables à partir de la biomasse agricole et forestière française au regard des autres objectifs assignés à ces deux secteurs à l'horizon 2050

Dans le cadre de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC), l'ensemble des secteurs d'activités doivent miser sur le recours aux énergies renouvelables pour améliorer leur empreinte carbone, en complément des démarches de sobriété. Ces énergies renouvelables incluent notamment les sources d'énergies produites à partir de biomasse agricole et forestière (bois énergie, méthanisation, agrocarburants,...).

Elle est également une ressource matière nécessaire pour le développement d'une industrie moins dépendante de ressources fossiles, en particulier pour le développement d'une biochimie susceptible de se substituer à la pétrochimie comme source de matière de l'industrie chimique.

78, rue de Varenne
75349 PARIS 07 SP
Tél : 01 49 55 49 55

La biomasse permet enfin la séquestration du carbone via l'augmentation du stock dans les sols et sur pied en forêt et via son exploitation comme matière première pour la fabrication de produits manufacturés (bois d'œuvre notamment).

La SNBC s'appuie sur un scénario de référence élaboré au cours d'un exercice de modélisation commun à la programmation pluriannuelle de l'énergie de métropole continentale. Ce scénario, nommé « Avec Mesures Supplémentaires » (AMS), prend en compte des mesures de politiques publiques, en supplément de celles existant aujourd'hui, qui permettraient à la France de respecter ses objectifs climatiques et énergétiques à court, moyen et long-terme. Il dessine une trajectoire possible de réduction des émissions de gaz à effet de serre jusqu'à l'atteinte de la neutralité carbone en 2050, à partir de laquelle sont définis les budgets carbone. Ce scénario intègre la contribution des secteurs agricoles et forestiers à la production d'énergie, pour l'ensemble des secteurs consommateurs.

A l'horizon 2050, la Stratégie Nationale Bas Carbone élaborée en 2019 (SNBC2) comporte des hypothèses fortes d'utilisation de la biomasse dans le secteur énergétique afin de parvenir à la neutralité carbone, en utilisant près de 400TWh de biomasse. Ces hypothèses ambitieuses ont été revues à la baisse dans les premières modélisations de la nouvelle SNBC, avec un potentiel en énergie finale qui pourrait finalement se situer entre 220 et 290 TWh à répartir entre biomasse liquide, solide et gazeuse. Ces évaluations sont fondées sur des études et expertises de SOLAGRO, l'INRAE et l'Ademe.

Par ailleurs, un travail d'évaluation des besoins de biomasse des secteurs transport et logement a été effectué dans le cadre des feuilles de route requises par l'article 301 de la Loi Climat et Résilience et rédigées au cours de l'année 2023 par les organisations représentatives de ces secteurs et en lien avec l'administration. Pour le secteur industriel, un travail d'évaluation des besoins des filières et sites les plus consommateurs a été lancé par le Président de la République le 8 novembre 2022 et doit rendre ses conclusions avant juin 2023.

Ces différentes modélisations ont vocation à permettre de proposer des trajectoires des prochaines SNBC et PPE et la priorisation des différents usages de la ressource rare biomasse. Lors du Conseil de planification écologique du 26 janvier, le Président de la République a décidé que les arbitrages sur ces trajectoires seraient rendus au printemps pour publication des orientations retenues en juin.

A l'instar d'autres secteurs économiques, l'agriculture doit tendre vers davantage d'autonomie énergétique. A cet égard, la mission n°21065 du CGAAER « Décarboner 100 % de l'énergie utilisée en agriculture à l'horizon 2050 : c'est possible » considère réalisable à l'horizon 2050 une économie d'énergie de l'ordre de 15 % par rapport à la consommation actuelle et le remplacement de 100 % des usages actuels des énergies fossiles de ce secteur par des énergies renouvelables.

Dès lors, se pose la question de l'adéquation entre, d'une part, la fonction première de l'agriculture, celle de produire pour nourrir la population, d'autre part, le potentiel de production d'énergies renouvelables et de biomasse des secteurs agricole et forestier et de la demande globale en énergies renouvelables et biomasse d'une économie décarbonée. La question de la disponibilité des produits agricoles et forestiers pour ces différents usages est donc centrale.

Dans ce contexte, nous souhaitons confier au CGAAER, au CGE et à l'IGEDD une mission de conseil durant laquelle les missionnés s'attacheront à :

- évaluer la contribution possible de l'agriculture et de la forêt à la production d'énergies renouvelables à partir de biomasse et à l'alimentation de l'industrie en matière d'origine non fossile à l'horizon 2050 en tenant compte du changement climatique ;
- vérifier la disponibilité de la biomasse pour les différents usages, alimentation, énergie (au regard des scénarios envisagés pour les prochaines SNBC et PPE) et matière. Cette analyse devra prendre en compte les enjeux de souveraineté alimentaire, ainsi que les enjeux environnementaux de l'agriculture et de la forêt et notamment la vulnérabilité de la ressource agricole et forestière au regard des effets du réchauffement climatique. Elle pourra se baser sur une revue des études de perspectives existantes concernant le potentiel en biomasse sur le territoire français et sa valorisation sous forme solide, liquide et gazeuse, afin d'établir des bornes basses et hautes en TWh et en Mm3 de l'énergie finale et des ressources matières disponibles à partir de ces ressources sur le territoire national. Elle passera en revue les

hypothèses des modèles utilisés pour l'élaboration de la Stratégie Nationale Bas Carbone ainsi que les évaluations consolidées au niveau des acteurs économiques dans les processus « Article 301 » et « Feuilles de route 50 sites industriels, et fera des recommandations quant à leur robustesse et aux marges de manœuvre qui devraient être prises dans la modélisation (études de sensibilités pour modéliser un impact plus important du changement climatique, une plus forte prise en compte de la biodiversité, une difficulté dans la logistique de mobilisation de la biomasse...).

- étudier l'intérêt d'introduire un ordre de mérite de référence utilisable par l'administration pour la priorisation des usages des différents types de biomasse et la conception des politiques publiques.
- proposer des recommandations concernant le suivi global et la gouvernance possible du sujet de la biomasse, en interrogeant les opérateurs de l'État les plus concernés et à même de mener cette gouvernance, notamment l'Ademe, l'IGN, France AgriMer et l'INRAE.
- identifier les leviers réglementaires ou financiers pouvant concourir à faciliter la production durable de biomasse agricole et forestière et permettant d'assurer la cohérence des politiques publiques de soutien à la production d'énergie.

Pour mener cette mission, vous bénéficierez de l'appui des services des quatre ministères, et notamment de la direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises, de la direction générale des entreprises, de la direction générale de l'énergie et du climat, de la direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature, du Commissariat général au développement durable ainsi que des principaux opérateurs concernés (notamment, INRAE, OFB, Ademe, ONF, etc.). Vous pourrez également vous appuyer sur les conclusions du rapport CGAAER – IGEDD sur le développement de la filière bois, ainsi que sur le rapport CGAAER- CGE-CGEDD sur les externalités du biogaz ainsi que sur celui-ci de l'évaluation du potentiel du développement de la biomasse dans les ZNI.

Le rapport de cette mission devra nous être remis au plus tard six mois après la désignation des missionnés.

Un point d'étape à deux mois pourra être réalisé, comprenant notamment les premiers résultats sur les hypothèses concernant la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie et la Stratégie Nationale Bas Carbone.



Le Ministre de l'agriculture
et de la souveraineté
alimentaire

Marc Fesneau



Le Ministre de la transition
écologique et de la
cohésion des territoires

Christophe Béchu



La Ministre de la transition
énergétique

Agnès Pannier-Runacher



Le Ministre délégué
chargé de l'industrie

Roland Lescure

Annexe 2. Liste des personnes rencontrées

Nom Prénom	Organisme	Fonction	Date de rencontre
AGEORGES Bruno	Ufip EM	directeur des relations institutionnelles et des affaires juridiques	06/06/2023
AIGRAIN Patrick	France AgriMer	chef du service analyse et fonctions transversales et multifilières	16/06/2023
AJJARD Joseph	SGPE	directeur du programme énergie, bouclage GES et adaptation	01/06/2023
AVELIN Christine	France AgriMer	directrice générale	16/06/2023
AXELOS Monique	INRAE	directrice scientifique alimentation et bioéconomie	12/06/2023
BARTHELEMY Amance	DGITM	chargée de mission climat et changement climatique	23/10/2023
BEDIER Louis	Ministère chargé de l'industrie, direction générale des entreprises	chargé de mission décarbonation de l'industrie, suivi SNBC et biomasse	25/05/2023
BIGOT Dominique	Ufip EM	coordonnateur produits et douanes-accises	06/06/2023
BONENFANT Romain	Ministère chargé de l'industrie, direction générale des entreprises	chef du service de l'industrie	25/05/2023
BONNET François	MTE	délégué ministériel forêt-bois	05/07/2023
BOUVATIER Sebastien	MASA/DGPE/ SDFE/SDFCB/	sous-directeur adjoint	25/05/2023
BRUEL Patrice	EDF/ direction régulation	directeur	12/06/2023
CAQUET Thierry	INRAE	directeur scientifique environnement	12/06/2023
CARANTINO Benjamin	Cabinet du Ministre délégué chargé de l'Industrie	conseiller industrie de base et décarbonation	05/05/2023
CAYLA JEAN-Michel	EDF/ direction de la stratégie		12/06/2023
CHANTRENNE Nicolas	Cabinet du Ministre délégué chargé de l'Industrie	directeur adjoint	05/05/2023
CHEVET Pierre-Franck	IFPEN	président directeur général	06/06/2023
CHMITELIN Isabelle	Chambre d'agriculture France	directrice générale	30/05/2023

Nom Prénom	Organisme	Fonction	Date de rencontre
CLAQUIN Pierre	France AgriMer	directeur marchés, études, prospective	16/06/2023
COLIN Antoine	IGN/ DAFOR	chef du département	02/06/2023
COMTE-BELLOT Antoine	CGDD/SEVS	adjoint au directeur de projet de décarbonation	05/06/2023
COREAU Audrey	CGDD/SEVS	cheffe de service	05/06/2023
CORON Anne-Florie	DGITM	adjointe au directeur général	23/10/2023
CORRE Valérie	Syndicat national des producteurs d'alcool agricole	présidente	11/07/2023
COTTEN Gildas	AGPM/AGPB	responsable nouveaux débouchés	11/07/2023 12/07/2023
COUTURIER Christian	Solagro	directeur général	26/05/2023
de FRANCLIEU Hugues	Cabinet du ministre de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire	conseiller innovation dont énergie	11/05/2023
de LACAZE Xavier	DGEC/ DCEEA/ SD5/5CD	chargé de mission	01/06/2023
de MARCELLUS Delphine	Ministère chargé de l'industrie, direction générale des entreprises sous-direction santé, IAA. et ameublement	chargé de mission décarbonation, agroalimentaire, santé, biens de consommation	25/05/2023
DELPORTE Vincent	DGEC/DE/SD2	adjoint à la sous- directrice	01/06/2023
DELPRAT-JANNAUD Florence	IFPEN	directrice du centre de résultats produits énergétiques	06/06/2023
DEMOURES Sylvain	Syndicat national des producteurs d'alcool agricole	secrétaire général	11/07/2023
DOUBLET Sylvain	Solagro	responsable de l'activité bioressources et prospective	26/05/2023
DUHALDE Michel	DGEC/DCEEA/SDAC/ BAFCC	adjoint au chef de bureau	01/06/2023
DUHAMEL Constance	EDF	relations publiques	12/06/2023
EGUIENTA Janine	CGDD/SDES	adjointe au chef de bureau des statistiques del'offre d'énergie	05/06/2023
ERBS Guillaume	ENGIE Impact	responsable d'équipe d'études économiques internes prospectives	30/06/2023
GANTOIS Olivier	Ufip EM	président	EDF

Nom Prénom	Organisme	Fonction	Date de rencontre
GENTHON Bénédicte	ADEME	chef du service chaleur renouvelable, produits biosourcés et biocarburants	28/06/2023
GOUZENES Thomas	Ministère chargé de l'industrie, direction générale des entreprises	suivi SNBC et besoin biomasse	25/05/2023
GUERRINI Olivier	Total Energies	directeur business unit biogaz	27/06/2023
GUIRAUD François	Copacel	président de la fédération des industries du bois d'Aquitaine, directeur de l'usine de Tartas dans les Landes (Ryam)	31/05/2023
GUIZOUARN Kristell	Groupe Avril	directrice des affaires réglementaires	13/07/2023
HAACK Alexandre	Syndicat national des producteurs d'alcool agricole	vice-président	11/07/2023
HAAS Benjamin	ENGIE SA	direction régulation France	30/06/2023
HILAIRET Christophe	Chambre d'agriculture France	secrétaire national	30/05/2023
HUYGUE Christian	INRAE	directeur scientifique agriculture	6 octobre 2023
JANCOVICI Jean-Marc	Carbone 4	associé	18/10/2023
JANISZEWSKI Pierre	Cabinet du Ministre délégué chargé de l'Industrie	conseiller énergie et efficacité énergétique	05/05/2023
JEANNIN Thomas	Ministère chargé de l'industrie, direction générale des entreprises	directeur de projet décarbonation	25/05/2023
JEREMIE Pierre	Cabinet de la ministre de la transition énergétique	directeur de cabinet adjoint	22/05 /2023
JOBERT Frédéric	SGPE	directeur de programme transport et biomasse	01/06/2023
JOUDON Laurent	EDF/ direction des études économiques	directeur	12/06/2023
KAUFMANN Uriel	DGITM	chargé de mission synthèse et analyse stratégie	23/10/2023
KIEFFER Dominique	EDF/ Dalkia		12/06/2023
LACOUR Paul-Antoine	Copacel	délégué général	31/05/2023
LAFOND Dominique	EDF	recherche et développement	12/06/2023
LAMBERT Nicolas	IGN/SPRI	chef du service	02/06/2023
LECETRE Pierre	Shell		12/10/2023

Nom Prénom	Organisme	Fonction	Date de rencontre
LEHERMITE Serge	MASA/ DGPE	directeur général adjoint	25/05/2023
LESUEUR Thomas	CGDD	commissaire général	05/06/2023
LOIR Guillaume	Nature Energy	directeur du développement	12/10/2023
MACHEFAUX Emilie	ADEME	chef de service produits renouvelables	28/06/2023
MAESTRACI Sylvain	Cabinet du ministre de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire	conseiller biomasse	11/05/2023
MALAFOSSE Florin	Solagro	responsable de l'activité stratégies territoriales	26/05/2023
MARCHAND Guillaume	IGN/ SPRI	chargé du secteur agriculture	02/06/2023
MARTIN Sarah	ADEME	Chef de service agriculture et forêt	28/06/2023
MAUGUIN Philippe	INRAE	président directeur général	12/06/2023
MESQUI Bérangère	CGDD/SDES	sous-directrice des statistiques de l'énergie	05/06/2023
MEUNIER Baptiste	MASA/DGPE/ SDFE/SDFCB/BB	chef de bureau	25/05/2023
MICHEL Stéphane	Total Energies	directeur général gaz, électricité, ENR ; membre du comex de Total-énergies	27/06/2023
MOREVILLEZ Claire	Shell France	directrice des relations extérieures	12/10/2023
MORIN Nicolas	Cabinet de la ministre de la transition énergétique	conseiller approvisionnement gaz et pétrole et pouvoir d'achat	22/05 /2023
MORONI Marc	CGDD/SRI/SDR	sous-directeur	05/06/2023
MOUSSET Jérôme	ADEME	directeur bioéconomie et énergies renouvelables	28/06/2023
OHANNESSIAN Guillaume	EDF	conversion aux bioliquides des centrales dans les DOM et la Corse	12/06/2023
PAYEN Aurore	FAM/ direction marchés, études et prospectives	cheffe d'unité analyses transversales (bioéconomie)	16/06/2023
PODESTA Gwenaél	DGEC/DCEEA/SDAC/ BESNBC	adjoint à la cheffe de bureau	01/06/2023
REALLON Sylvain	MASA/DGPE/ SDFE/SDFCB/	sous-directeur	25/05/2023
RICOTTE ELSA	Terres Univia	chargée de mission bioéconomie (non alimentaire)	21/06/2023

Nom Prénom	Organisme	Fonction	Date de rencontre
RIU Olivier	Copacel	responsable énergie, transport et innovation	31/05/2023
ROSSO LAURENT	Terres Univia	directeur	21/06/2023
SAGOT Maxime	EDF	Expert hydrogène	12/06/2023
SALEUR Laurent	Exxon	Senior Lower-Emissions Fuels Business Development Advisor	20/07/2023
SIBUET Laurent	Shell France	directeur low carbon fuels	12/10/2023
TERRISSE Frédéric	STORENGY	directeur général adjoint filiale production biométhane	30/06/2023
THIERY Mickaël	DGEC/DCEEA/SDAC	sous-directeur	01/06/2023
THUAL Julien	ADEME	direction bioéconomie, énergies renouvelables	08/11/2023
TONNET Nicolas	ADEME	adjoint au chef du service chaleur renouvelable, produits biosourcés et biocarburants	28/06/2023
TURQUET Xavier	Ministère chargé de l'industrie, direction générale des entreprises	chargé de mission décarbonation, chimie et bois	25/05/2023
TUTENUIT Claire	Entreprises pour l'environnement	directrice générale	02/06/2023
VICHARD Henri	DGITM	chargé de mission filière ferroviaire	23/10/2023
WINDSOR Sébastien	Chambres d'agriculture France	président	30/05/2023
ZILLI Dario	DGITM	chargé de mission transports routiers	23/10/2023

Annexe 3. Glossaire des sigles et acronymes

Acronyme	Signification
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AME	Avec mesures existantes
AMS	Avec mesures supplémentaires
ATJ	Alcohol to Jet (fuel)
CGAAER	Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux
CGDD	Commissariat général au développement durable
CGE	Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies
CITEPA	Centre interprofessionnel technique d'étude de la pollution atmosphérique
CIVE	Culture intermédiaire à vocation énergétique
CH ₄	Méthane
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone (gaz carbonique)
CO ₂ e	Dioxyde de carbone (gaz carbonique) équivalent
CRE	Comité régional énergie biomasse
CRE	Commission de régulation de l'énergie
DGEC	Direction générale énergie climat
DGALN	Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature
DGITM	Direction générale des infrastructures, des transports et de la mobilité
DGPE	Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises
DGPR	Direction générale de la prévention des risques
EPCI	Etablissement public de coopération intercommunale
FAM	FranceAgriMer
FCBA	Institut technique FCBA (Forêt, cellulose, bois, ameublement)
1 G	Première génération (carburant)
GES	Gaz à effet de serre
H ₂	Hydrogène
ha	Hectare
IGEDD	Inspection générale de l'environnement et du développement durable
IGN	Institut géographique national
INRAE	Institut national de la recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.
K	Potasse (potassium)
MASA	Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire
MTECT	Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires
MTE	Ministère de la transition énergétique
MWh	MégaWatt heure
N	Azote
Nm ³	Normo m ³

Acronyme	Signification
ONRB	Observatoire national de la ressource en biomasse
P	Phospore
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PCS	Pouvoir calorifique supérieur
PNFB	Programme national de la forêt et du bois
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
RED	Renewable energy directive
Run	Version de la SNBC
SDES	Service des données et études statistiques (MTE-CT)
SFEC	Stratégie française énergie climat
SGPE	Secrétariat général à la planification écologique
SNBC	Stratégie nationale bas carbone
SNMB	Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse
SSP	Service de la statistique et de la prospective
TCR	Taillis à courte rotation
tMS	Tonne de matière sèche
TWh	TéraWatt heure
WWF	Fonds mondial pour la nature

Annexe 4. Bibliographie

- [1] Ministère de la transition écologique, direction générale de l'énergie et du climat. Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat – Stratégie nationale bas carbone (SNBC) et programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). 1^{er} janvier 2020.
- [2] Ministère de la transition écologique, direction générale de l'énergie et du climat. Synthèse du scénario « avec mesures existantes » 2021 (AME 2021) – projections climat et énergie à 2050. juin 2021.
- [3] ADEME. Actualisation du scénario énergie climat ADEME 2035-2050, série « Horizon ». Août 2017.
- [4] ADEME. Biomasse et transition énergétique : l'approche de l'ADEME, support de présentation remis à la mission. 28 juin 2023.
- [5] Solagro, ADEME. Climagri : guide méthodologique, version février 2020.
- [6] Mourjane Ilyas et Fosse Julien. La biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ? France Stratégie. Document de travail n° 2021-3. Juillet 2021.
- [7] Mourjane Ilyas et Fosse Julien. La biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ? France stratégie. Note de synthèse. Juillet 2021.
- [8] INRAe : Jean-François Soussana, Thierry Caquet, René Baumont, Nicolas Bernet, Philippe Debaeke, Xavier Fernandez, Christophe Gouel, Jean-Louis Peyraud, Edwige Quillet, Sylvie Recous, Louis-George Soler. Propositions d'hypothèses pour le scénario AMS de la SNBC 3 pour le secteur Agriculture. Avril 2023.
- [9] Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse, document non daté, sans auteur identifié, mis en ligne le 16 mars 2018 selon Wikipedia et postérieur à décembre 2016 selon le texte.
- [10] EDF. Atelier PPE transverse offre/demande biomasse, contribution à la préparation de la programmation pluriannuelle de l'énergie. Début 2023.
- [11] Oumaïma El Korri. Fiche : substrats et prétraitements. Association technique énergie et environnement (ATEE), Club biogaz. Antérieur à 2016.
- [12] ADEME, Critt Bois – Fibois – CTBA. Mesure des caractéristiques des combustibles bois. Juillet 2001.
- [13] ADEME, X. Logel, J. Lhotellier, B. De Caemel, C. Alexandre, S. Cousin, E. Vial, AL. Dubilly, M. Buitrago, M. Durand, E. Machefaux, J. Mousset. Analyse du Cycle de Vie du bois énergie collectif et industriel – Synthèse. Janvier 2022.
- [14] Association Technique Internationale des Bois Tropicaux (ATIBT). L'humidité du bois, fiche technique. Non daté.
- [15] Institut technique FCBA. Mémento 2022.
- [16] Comparatif des combustibles bois - Conseils Thermiques, <https://conseils-thermiques.org/contenu/comparatif-granule-bois-buche-...>, consulté le 5 juin 2023.
- [17] ADEME. Transition 2050 – Choisir maintenant agir pour le climat. Novembre 2021.
- [18] Chardonnal F., Frossard M., Legeay M., Marx I., Uthayakumar T., Ollivier L. et Vallauri D. Biomasse : un réel potentiel pour la transition énergétique ? WWF France, janvier 2022.
- [19] Solagro. Présentation de ClimAgri®. <https://solagro.org/travaux-et-productions/outils/climagri>
- [20] Première Ministre, Secrétariat général à la planification écologique. Mieux agir - La planification écologique, synthèse du plan. France Nation Verte. Juillet 2023.
- [21] Christian Couturier, Madeleine Charru, Sylvain Doublet et Philippe Pointereau. Le scénario

[22] Agrosolutions (Kiener Mathilde, Lanckriet Edouard, Palvadeau Juliette), European Institut for Energy Research (Rabot-Quercy Marie-Laure). Évolution de systèmes agricoles en France : quels impacts sur la disponibilité et les flux de biomasse méthanisable – Synthèse. Juin 2022.

[23] Agrosolutions (Kiener Mathilde, Lanckriet Edouard, Palvadeau Juliette), European Institut for Energy Research (Rabot-Quercy Marie-Laure). Évolution de systèmes agricoles en France : quels impacts sur la disponibilité et les flux de biomasse méthanisable. Juin 2022.

[24] Solagro. MoSUT, un outil de modélisation systémique sur l'utilisation des terres développé par Solagro, Non daté. <https://solagro.org/travaux-et-productions/outils/mosut-outil-de-modelisation-systemique-sur-l-utilisation-des-terres>

[25] Solagro. ClimAgri® : conception et évolution d'un outil d'aide à la décision pour l'agriculture et la forêt à l'échelle des territoires. Accompagnement de la diffusion en France. Non daté mais postérieur à 2019. <https://solagro.org/travaux-et-productions/references/climagri-conception-et-test-dun-outil-daide-a-la-decision-pour-lagriculture-et-la-foret-a-lechelle-des-territoires-accompagnement-de-la-diffusion-de-loutil-et-de-la-demarche>

[26] Comité professionnel du pétrole. L'Intégral pétrole 2022. Juillet 2023.

[27] MTE - SDES. Chiffres clés de l'énergie – Édition 2023. Septembre 2023.

[28] ADEME. La méthanisation. Avis d'experts. Octobre 2023.

[29] Monique Axelos, Patrice Geoffron, Pierre Vaiss. La biomasse et la neutralité carbone. Groupe de travail 1 - Comité de prospective de la CRE. Mars 2023.

[30] The Shift Project. Climat, crises : Le plan de transformation de l'économie française. Odile Jacob, février 2002.

[31] IFIP – Institut du porc. Base de données Méthasym des potentiels méthanogène et analyse chimique (co)produits organique, version 2.0. Septembre 2021.

[32] ADEME. Déchets chiffres-clés, Faits et chiffres, édition 2023.

[33] ADEME, APCA. Analyse technico-économique de 84 unités de méthanisation agricoles – Synthèse des résultats du programme PROdige 1 et 2. 2022.

COMPLEMENT

Stratégies, modélisations et scénarios

Association négaWatt. La transition énergétique au cœur d'une transition sociétale – Synthèse du scénario négaWatt 2022.

Carine Barbier (CNRS-CIRED), Christian Couturier (Solagro), Patrice Dumas (CIRAD-CIRED), Emmanuelle Kesse-Guyot (INRAE-EREN), Julia Baudry (INRAE-EREN), Ivan Pharabot (PhiLabs), Prabodh Pourouchot-Tamin (EDF R&D), Florence Toilier (LAET). Prospective du système alimentaire et de son empreinte énergétique et carbone - Cinq visions de l'alimentation en France vers la neutralité carbone en 2050. 2022.

ENGIE. Trajectoire de décarbonation de l'Europe : le scénario d'ENGIE. Juin 2023.

Julia Grimault, Clothilde Tronquet, Valentin Bellassen, Thomas Bonvillain Claudine Foucherot. Puits de carbone : l'ambition de la France est-elle réaliste ? Analyse de la Stratégie Nationale Bas-Carbone 2. I4CE. Février 2022.

RTE. Bilan prévisionnel - Édition 2023 – Futurs énergétiques 2050. 2023-2035 : première étape vers la neutralité carbone. Septembre 2023.

Chiffres clés

ADEME : Brice Arnaud, Jean-Michel Parrouffe, Stefan Louilliat, In Numeri : Laurence Haeusler, Siessima Toe, Chaimae Elmoujarrade. Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France. Mars 2022.

AFPG, CIBE, FEDENE, SER, UNICLIMA, ADEME. Panorama de la chaleur renouvelable et de récupération – édition 2022.

Citepa. Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2022. Rapport Secten 2023.

Citepa. Rapport OMINEA – 20^e édition. 2023.

FranceAgriMer. L'Observatoire National des Ressources en Biomasse - Évaluation des ressources agricoles et agroalimentaires disponibles en France – édition 2020.

MTE - SDES. Chiffres clés des énergies renouvelables – Édition 2023. Octobre 2023.

MTE - SDES. Méthodologie du bilan énergétique de la France. 2023.

Biocarburants

Académie des technologies. La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables. Février 2023.

Paul Bardon, Olivier Massol. *Decarbonizing aviation with sustainable aviation fuels: Myths and realities of the roadmaps to net zero by 2050*. IFPEN Economic Papers n°156. Octobre 2023.

Jean-François Cesarini et Bertrand Pancher. Mission d'information sur les biocarburants. Rapport d'information au nom de la commission du développement durable et de l'aménagement du territoire de l'Assemblée Nationale. 22 janvier 2020.

Commission européenne. {COM(2022) 230 final}. *REPowerEU Plan*. 18 mai 2022.

Cour des Comptes. La politique de développement des biocarburants. Juillet 2021.

Gilbert-Luc Devinaz et Vincent Capo-Canellas. Mission d'information sur le développement d'une filière de biocarburants, carburants synthétiques durables et hydrogène vert. Sénat. Rapport d'information n° 825 (2022-2023), déposé le 3 juillet 2023.

Horst Fehrenbach, Silvana Bürck, Annika Wehrle. *The Carbon and Food Opportunity Costs of Biofuels in the EU27 plus the UK*. IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung. January 2023.

Feuillette Vincent. Enjeux et technologies des biocarburants en Europe. ENEA Consulting. Mars 2013.

FranceAgriMer. Facteurs de compétitivité sur le marché international des biocarburants - Veille concurrentielle 2020 (Données 2019). Février 2021.

IEA Bioenergy. *Advanced Biofuels - Potential for Cost Reduction*. 2020.

Nikita Pavlenko, Stephanie Searle, and Adam Christensen. *The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union*. The Internal Council on Clear Transportation, working paper 2019-05. Mars 2019.

OCDE/Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. « Biocarburants », dans OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032. Éditions OCDE, Paris. 2023.

Jane O'Malley, Nikita Pavlenko, Stephanie Searle. *Estimating sustainable aviation fuel feedstock availability to meet growing European Union demand*. ICCT Working Paper 2021-13. March 2021.

Syndicat National des Producteurs d'Alcool Agricole. Filière du Bioéthanol. 16 mars 2023.

Terres Univia. Audit de la Cour des Comptes Européenne. 14 novembre 2022.

UFIP Énergies et Mobilités. Les Carburants Liquides Bas Carbone en France métropolitaine à l'horizon 2035. 15 février 2023.

Joachim Voisin Marras. Biocarburants : avancée vers l'impasse. Canopée forêts vivantes. Octobre 2021.

Déchets

ADEME, Chloé Devauze, Alima Koite, Anaëlle Chrétien, Véronique Monier. Bilan National du Recyclage 2010-2019 - Évolutions du recyclage en France de différents matériaux : métaux ferreux et non ferreux, papiers-cartons, verre, plastiques, inertes du BTP et bois. 2021.

ADEME. Performances de traitement de la filière REP PMCB – Proposition d'une trajectoire pour le 1er agrément. 2021.

FCBA, Groupe de travail plan Déchets du CSF bois. 2022. Référentiel de classification des déchets bois - Version 05/2022.

FEDEREC. Le marché du recyclage en France en 2022.

Forêt et filière bois

Académie d'agriculture de France. La Forêt et le Bois en France en 100 questions, fiches en ligne.

ADEME, TERRA, TBC Innovations, ELCIMAÏ Environnement, Au-Dev-Ant, E. Parola. Étude de préfiguration de la filière REP Produits et Matériaux de Construction du secteur du Bâtiment. Mars 2021.

ADEME, CODIFAB, FBF, BIPE, FCBA. Étude prospective : Évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments. 2019.

ADEME, Solagro, Biomasse Normandie, BVA, Étude sur le chauffage domestique au bois : Marchés et approvisionnement. 2018.

ADEME, FCBA. Évaluation du gisement de déchets bois et son positionnement dans la filière bois/bois énergie. Avril 2015.

ADEME, IFN, FCBA, Solagro. Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020. Novembre 2009.

Agreste. Récolte de bois et production de sciages en 2021. Chiffres et données n°3. Mars 2023.

Agreste. Enquête Structure de la forêt privée (propriétés forestières privées de 1 ha et plus). 2012.

Hélène Arambourou. Vers une planification de la filière forêt-bois. France Stratégie – La note d'analyse n°124. Juillet 2023.

Bellassen Valentin, Cevallos Gabriella, Grimault Julia. Relocaliser la filière bois française : une bonne idée pour le climat. I4CE, mai 2019.

Mary S. Booth. Partnership for Policy Integrity. *Burning up the carbon sink : How the EU's forest biomass policy undermines climate mitigation, and how it can be reformed*. 4 novembre 2022.

Cattelot Anne-Laure. La forêt et la filière bois à la croisée des chemins : l'arbre des possibles. Rapport au Premier Ministre. Juillet 2020.

CGAAER n° 22114 (Catherine de Menthère, Patrick Falcone, Xavier Ory, Vincent Piveteau). La haie, levier de la planification écologique. Avril 2023.

Catherine Couturier et Sophie Panonacle. Mission d'information sur l'adaptation au changement climatique de la politique forestière et la restauration des milieux forestiers. Rapport d'information au nom de la commission du développement durable et de l'aménagement du territoire de l'Assemblée Nationale. 2 mai 2023.

Colin Antoine, Cuny Henri, Monchaux Philippe, Thivolle-Cazat Alain. Réévaluation de la ressource et de la disponibilité en bois d'œuvre des essences feuillues et conifères en France. FCBA, IGN. Septembre 2019.

Colin Antoine, Thivolle-Cazat Alain, Bouvet Alain, Buitrago Miriam, Mousset Jérôme, Pilate Marion, Py Nicolas, Rantien Caroline. Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035. FCBA, IGN, février 2016.

Comité stratégique de filière bois, FCBA, CODIFAB. Plan déchets du CSF bois. 2022.

Copacel. Décarbonation de l'industrie – Feuille de route de l'industrie papetière. Février 2022.

Cour des Comptes. La structuration de la filière forêt-bois, ses performances économiques et environnementales. Avril 2020.

A. Denardou-Tisserand (2019). Changements du stock de bois sur pied des forêts françaises - Description, analyse et simulation sur des horizons temporels pluri-décennal (1975 - 2015) et séculaire à partir des données de l'inventaire forestier national et de statistiques anciennes. Université de Lorraine. 344 p.

Mathias Etienne et Robert Colas. La biomasse énergie est-elle neutre en carbone ? Citepa. Rapport Secten édition 2020. Juin 2020

Fibois Bourgogne-Franche-Comté. Observatoire du bois énergie en Bourgogne-Franche-Comté – édition 2022 sur les données 2020.

France nature environnement, Fondation WWF, Humanité & biodiversité, Ligue pour la protection des oiseaux, Comité français de l'UICN, Réserves naturelles de France. Forêts françaises en crise – Analyse et propositions des ONG de conservation de la nature. 2020.

IGN. Mémento 2023.

IGN. Les flux en forêt - édition 2023.

IGN. Portait des forêts privées avec ou sans PSG. IF n° 41. 2018.

IGN. La forêt plantée en France. IF n°40. 2017.

IGN. Un siècle d'expansion des forêts françaises. IF n° 31. 2013.

Dassot Mathieu, Commagnac Loïc, Letouze Frédéric, Colin Antoine. 2022. Stocks de bois et de carbone dans les haies bocagères françaises. 2022.

Jean Claude Migette, Marie Calvin, CODA Stratégies. Enquête sur les prix des combustibles bois pour le chauffage domestique, tertiaire, industriel et collectif en 2022-2023 : Synthèse. 2023.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation – France Nation verte. Pacte en faveur de la haie. Septembre 2023.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, IGN. Indicateur : Contribution des écosystèmes forestiers et de la filière forêt-bois à l'atténuation de l'effet de serre (bilan carbone). Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, édition 2020. 2021.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. Feuille de route pour l'adaptation des forêts françaises au changement climatique. Décembre 2020.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. Programme national de la forêt et du bois 2016-2026. Mars 2016.

Ministère de la transition écologique et solidaire. Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFESE) – Les écosystème forestiers, octobre 2018.

Roux A. (coord.), Colin A. (coord.), Dhôte J.-F. (coord.), Schmitt B. (coord.), Bailly A., Bastien J.-C., Bastick C., Berthelot A. Bréda N., Caurla S., Carnus J.-M., Gardiner B., Jactel H., Leban J.-M., Lobianco A., Loustau D., Marçais B., Meredieu C., Pâques L., Rigolot E., Saint-André L., Guehl J.-M. Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique : entre séquestration du carbone en forêt et développement de la bioéconomie. Versailles, éditions Quæ, 2020.

Méthanisation

AAMF. Intrants des unités de méthanisation agricole - état des lieux AAMF 2022. Enquête AAMF « Intrants » 2022-2023.

AAMF. Cultures Intermédiaire à Vocation énergétique, Pratique existantes. Enquête AAMF « Etat des lieux CIVE ». Juin 2021.

ADEME, Solagro, APESA, AGROBIOMASSE. Suivi technique, économique et social d'installations de méthanisations – Synthèse des résultats. 2020.

Biomethane Industrial Partnership (BIP Europe). *Insight into the current cost of biomethane production from real industry data*. Task force 4.2. Octobre 2023.

Sophie Carton (AgroParisTech), Florent Levavasseur (Inrae). Performances agronomiques et environnementales de la méthanisation agricole dans un contexte de grandes cultures céréalières (sans élevage) et recommandations de bonnes pratiques. Février 2022.

CGAAER n° 20066 (Charles Pujos et Michel Vallance), CGEDD n° 013389-01 (Philippe Ayoun et Pascal Douard), CGE n° 2020/16/CGE/SG (Emmanuel Clause). Modalités de prise en compte des externalités du biogaz. Février 2021.

Comité de filière Nouveaux systèmes énergétiques. Cartographie des observatoires de flux de biomasse pour la méthanisation. Avril 2021.

Elanor Consulting, S3D. Identification des indicateurs et données, définition du cadrage et de la collecte des données pour l'observation Méthanisation. ADEME. 29 mars 2022.

FranceAgriMer. Ressources en biomasse et méthanisation agricole : quelles disponibilités pour quels besoins ? Analyse des données théoriques de l'ONRB. Octobre 2022.

France Nature Environnement. Méthanisation : état des lieux de l'analyse des controverses. 20 décembre 2021.

INRAE. Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique (CIVE) : spécificités agronomiques et impacts environnementaux. Les rendez-vous INRAE au SPACE. 3 septembre 2022.

Institut Paris Région. Bilan de fonctionnement des unités de méthanisation en Île-de-France. Novembre 2022

Camille Launay. Insertion de cultures intermédiaires à vocation énergétique dans les systèmes de culture en France : évaluation multi-échelles du potentiel de production et des impacts eau - azote - carbone. Soutenance de thèse. 3 juillet 2023.

Sylvain Marsac, Manuel Heredia, Marie Bazet, Nicolas Delaye, Robert Trochard, Hélène Lagrange, Caroline Quod, Eve-Anna Sanner : Optimisation de la mobilisation de CIVE pour la méthanisation dans les systèmes d'exploitation. 2019.

Préfecture de la région Auvergne-Rhône-Alpes. Bilans de fonctionnement des unités de méthanisation en Auvergne-Rhône-Alpes – Synthèse 2020.

Préfecture de la région Bretagne. Synthèse des bilans de fonctionnement des unités de méthanisation sur l'année 2021 en Bretagne. Avril 2023.

S3d Ingénierie. Observation régionale de la méthanisation en région Grand Est – synthèse régionale, édition 2021.

SER, GRDF, GRTgaz, SPEGNN, Teréga. Panorama des gaz renouvelables en 2022.

Solagro et Association négaWatt. Note d'information – Méthanisation. Juin 2021.

Gilbert Solène. Panorama de la méthanisation en Île-de-France. Direction régionale et interdépartementale de l'environnement, de l'aménagement et des transports d'Île-de-France. 25 novembre 2022.

Étude génériques biomasse et énergie

Aubert, P.-M., Doublet, S., Couturier, C., Malafosse, F. Biomasse et neutralité climat en 2050 : gérer la rareté pour maintenir des écosystèmes productifs et résilients. Iddri, Document de propositions N°03/23. 2023.

Thomas Bonvillain, Lucile Rogissart et Claudine Foucherot. Transition de l'élevage : gérer les investissements passés et repenser ceux à venir. I4CE. Février 2023.

CGAAER n°18047 (François Colas et Michel Vallance), CGEDD n°012218-01 (Jean-Jacques Becker et Florence Tordjman), CGE n°2018/08/CGE/SG (Jean Cueugnet). Évaluation des gisements et des modes de production de la biomasse pour la production électrique dans les zones non interconnectées. Octobre 2018.

CGAAER n° 21065 (Hervé Lejeune et Michel Vallance). Décarboner 100% de l'énergie utilisée en agriculture à l'horizon 2050 : c'est possible ! Avril 2022.

Cour des Comptes. Les soutiens aux énergies renouvelables. Mars 2018.

Directive (UE) 2023/2413 du Parlement européen et du Conseil modifiant la directive (UE) 2018/2001, le règlement (UE) 2018/1999 et la directive 98/70/CE en ce qui concerne la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, et abrogeant la directive (UE) 2015/652 du Conseil. 18 octobre 2023.

Haut Conseil pour le climat. Acter l'urgence, engager les moyens - rapport annuel 2023. Juin 2023.

Icare & Consult. Étude prospective fixant des objectifs stratégiques d'augmentation de la part de fertilisants issus de ressources renouvelables. Étude commandée par le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA), et financée par le programme 149 du MAA. Septembre 2020.

Emmanuelle Ledoux, Alain Chardon. Stratégie Nationale Bas Carbone sous contrainte de ressources – Une approche intégrée de la transition bas carbone circulaire - Rapport final. Institut national de l'économie circulaire, CAPGEMINI INVENT. Avril 2022.

Lorine Labrue, Léna Poirier et Louis Bédier. L'action de l'État en faveur de la décarbonation de l'industrie. Ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique. Les Thémas de la DGE n°8. Mars 2023.

Margo Michaël et Grillet Céleste. Chaleur renouvelable : la grande oubliée de la stratégie énergétique française ? Carbone 4. Novembre 2022.

Material Economics. *EU Biomass Use In A Net-Zero Economy - A Course Correction for EU Biomass*. 2021.

Calliope Panoutsou et Kyriakos Maniatis. *Sustainable Biomass Availability in the EU*. Imperial College London Consultants. August 2021.

Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz. Les incidences économiques de l'action pour le climat. France Stratégie. Mai 2023.

Rüdinger Andréas. Planification de la transition bas-carbone en France : faire mieux avec moins. Billet de blog. IDDRI. 2 février 2023.

Tutenuit Claire. Quels besoins de gouvernance de la biomasse en Europe ? Schuman Paper n°726. 13 Novembre 2023.

Annexe 5. L'influence de l'humidité sur le pouvoir calorifique inférieur de la biomasse et les limites du recours au pouvoir calorifique supérieur

Chacun sait que l'herbe verte ne brûle pas, que le bois humide le fait difficilement, voire ne le peut pas. Plus précisément et techniquement, la quantité de chaleur fournie par la biomasse varie avec sa teneur en eau.

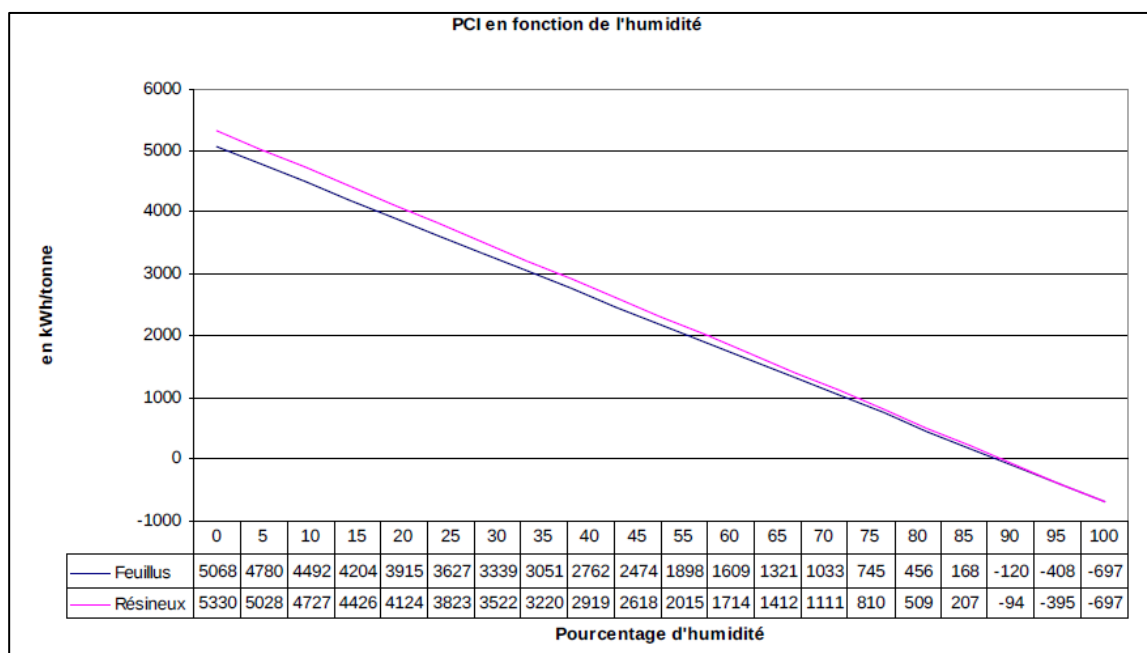
Les données ne sont facilement accessibles que pour le bois mais peuvent raisonnablement être étendues à d'autres matières (résidus de culture, pailles, cultures lignocellulosiques) pour lesquelles existent des sources concordantes avec cette extension).

L'ADEME indique ([12], p. 12) que :

- En premier lieu, les valeurs des pouvoirs calorifiques inférieurs (bois à 0 % d'humidité) données dans la littérature sont très peu dépendants des espèces :
 - 5,07 MWh/tMS pour les feuillus (avec un écart maximal de 308 kWh/tMS entre l'acacia, 5 270 MWh/tMS, et le peuplier, 4 890 MWh/tMS, soit 8 %),
 - 5,33 MWh/tMS pour les résineux (avec un écart maximal de 140 kWh/tMS entre le mélèze, 5 400 MWh/tMS, et l'épicéa, 5 260 MWh/tMS, soit 3 %).

L'écart maximal toutes essences confondues est de 10% (510 kWh/tMS). Toutefois, rapportés au volume, les feuillus sont plus denses en énergie.

- En second lieu, l'humidité est déterminante pour le pouvoir calorifique inférieur comme le montre le graphique ci-dessous :



« Dans les plages d'humidité fréquemment utilisées dans le bois énergie (10% à 65% d'humidité), le PCI varie de 1 370 à 4 610 kWh/tonne soit un facteur 3.4 ». Il s'agit « d'humidité sur brut », c'est-à-dire le rapport de la masse d'eau contenue dans le bois à la masse totale du bois et de l'eau.

Il convient de distinguer l'eau libre facilement extractible, éventuellement par pression, de l'eau liée étroitement associée à la matière organique, notamment dans les parois cellulaires, qui ne peut être retirée que par évaporation et donc à un coût énergétique supérieur. L'image d'une éponge essorée puis séchée peut éclairer cette distinction. Toutefois, un bois séché à l'étuve (100-105 °C) contient encore un peu d'eau « de constitution » [14].

L'humidité d'un bois sur pied varie entre 40 et 65 % (selon les essences en particulier, les valeurs extrêmes concernent les bois tropicaux). Un bois coupé (de climat tempéré) sans eau libre en équilibre avec une atmosphère saturée d'eau présente une humidité d'environ 30 %, séché à l'air naturellement, son humidité est d'environ 18 à 22 % (elle varie en fonction de l'humidité de l'air) [14].

Le taux de 22 % est celui communément accepté en dessous duquel le bois n'est pas dégradé par des attaques fongiques, lesquelles réduisent son pouvoir calorifique [14]. C'est pourquoi les modèles utilisés par la DGEC pour évaluer les apports énergétiques de la biomasse distinguent les bois en fin de vie dont le pouvoir calorifique est diminué de 20 %.

En conditions abritées, le bois atteint environ 20 % d'humidité ou un peu moins en 18 à 24 mois. En revanche, des formes plus déshydratées (granulés ou « pellets », bûches « compactées ») peuvent facilement reprendre de l'humidité si elles sont mal conservées.

Un PCI de 4 MWh/tMS, cohérent avec les développements précédents, est souvent utilisé mais ce n'est pas constant, il peut varier de 5 à 20 % selon certains PCI reconstitués par la mission ou annoncés par les vendeurs de bois énergie⁷⁸. Il est très vraisemblable que certaines présentations commerciales assimilent matière sèche et matière à 20 % d'humidité. La mission a retenu un PCI de 4,5 MWh/tMS plus conforme a priori aux résultats issus de la littérature technique.

Un autre facteur de variation est l'utilisation du pouvoir calorifique supérieur ; ce qui permet un surcroît d'énergie de 11 % (10,5 % pour le bois bûches, 8 % pour les copeaux de bois). L'utilisation de ce pouvoir calorifique supérieur permet de revendiquer des valorisations énergétiques supérieures mais interpelle car l'ADEME rappelle ([13], p. 19) que la mise en place d'une unité de condensation présente un intérêt mais nécessite la disponibilité d'une « source froide » (ce qui est une évidence thermodynamique). Une telle unité permet l'amélioration significative du rendement thermique et la dépollution des gaz de combustion (résultant de la captation de poussières lors du changement d'état de la vapeur d'eau). Mais *« il convient cependant de préciser que pour condenser les fumées de combustion du bois, la température de la « source froide » doit être comprise entre 47 °C et 63 °C selon l'humidité du bois et le niveau de maîtrise de la combustion. L'enjeu de la mise en place d'une unité de condensation résulte donc en la disponibilité de cette « source froide ». Elle peut être disponible dans le cas d'un système de chauffage collectif pour des logements équipés de planchers chauffants. Ce n'est pas un levier environnemental pertinent pour des chaufferies de petites puissances (< 0,5 MW) car ces systèmes ne sont pas adaptés »*.

⁷⁸ Les pouvoirs calorifiques utilisés pour les « run » de la DGEC sont plutôt supérieurs : 5 MWh PCS/tMS sont attribués aux résidus de culture, ce qui peut être approximativement converti en 4,5 MWh PCI/tMS, soit 10 % de ce qui est le plus souvent retenu. Ailleurs, ils peuvent être difficiles à reconstituer ou d'une valeur discutable et a priori élevée pour d'autres (par exemple « 2,67176556 MWh PCS /m³ pour la ressource primaire et connexe de la biomasse forestière », la précision est totalement irréaliste et correspond à 5 voire 5,5 MWh/tMS de PCS). Un opérateur énergétique établit ses perspectives avec un pouvoir calorifique manifestement supérieur ou égal à 5.

Annexe 6. La modélisation du potentiel de biomasse en France métropolitaine et ses améliorations possibles

Les calculs font aujourd'hui appel aux modèles MoSUT et Climagri® de la Société Solagro dont ce n'est pas l'objectif initial

Conçu dès 2011 par Solagro et constamment enrichi depuis, MoSUT (Modélisation Systémique de l'Usage des Terres) est « un tableur qui met les besoins présents et futurs (alimentaires, énergétiques) en adéquation avec les surfaces disponibles » ([24]).

Les impacts ou les consommations d'intrants sont évalués avec des méthodes mises au point et approuvées collectivement, notamment avec le modèle Climagri® qui a été développé à partir de 2009 par les sociétés d'études et de conseil Solagro et Biointelligence Service et Oreade-Breche pour le compte de l'ADEME ([5], [19], [25]). L'objectif de ce second modèle, associé à MoSUT, est d'évaluer sur un territoire donné (exploitation, zone territoriale : France, région, département ou autre) l'impact environnemental des cultures qui y sont conduites.

Les présentations par Solagro ([19], [25]), exposent que cet outil met en perspective plusieurs types de données : les consommations d'énergie (directes et indirectes), les émissions de gaz à effet de serre (directes et indirectes), les polluants atmosphériques et le potentiel nourricier des territoires auxquels s'ajoutent le stock de carbone lié aux sols agricoles et forestiers ainsi qu'à la biomasse forestière et la production de matière première agricole et forestière. Les résultats fournis à la mission par les administrations confirment cette présentation.

Pour cela, les modèles conçus par Solagro distinguent les différentes productions possibles, animales et végétales, de façon détaillée (123 cultures, des céréales aux cultures maraichères et fruitières notamment) et les déclinent en différents types de pratique culturale (conventionnel, intégré, raisonné, agri-biologique, avec ou sans cultures intermédiaires, haies, agroforesterie, etc.).

Pour chaque combinaison possible, les consommations d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre, le carbone stocké, etc. sont précisément évaluées en distinguant soigneusement les différents postes de consommation (par exemple les engins agricoles, le séchage des récoltes, l'énergie de pompage pour l'irrigation) ou d'émission (CO₂, oxydes d'azote pour les différentes formes de stockage et d'épandage des engrais, etc.). Conceptuellement, le modèle repose sur un ensemble d'équations linéaires reliant (i.e. pondérant avec de multiples paramètres internes au modèle, dont les rendements par mode de culture et caractéristiques de ces dernières) des données ou « hypothèses » d'entrée (les surfaces et la proportion de chaque mode de culture) à des « résultats ».

Sans avoir réalisé une analyse exhaustive du modèle Climagri® que seuls des experts agronomes et zootechniciens pourraient conduire, la mission n'a pas décelé de problème dans la conception et sa réalisation qui paraît bien répondre à son objet.

En revanche, il convient de bien comprendre et noter que :

- les paramètres internes au modèle (quantités d'azote, d'autres engrais et de produits phytosanitaires, facteurs d'émission de gaz à effet de serre et consommations énergétiques unitaires – i.e. par ha ou par t –, etc.), sont fixés (par le concepteur sur la base de données scientifiques) et sont donc de facto exogènes.
- il en est de même pour les surfaces d'assolement et les rendements (les contraintes qui leur sont propres, partage des surfaces, réalisme pour les rendements, etc. sont intégrées lors de leur définition).

Ainsi et dans ce sens, MoSUT n'est pas un modèle de simulation des productions agricoles (c'est alors un simple tableur de calcul)⁷⁹ ; mais ce n'est pas son objet et cette remarque ne doit pas être perçue comme une critique.

⁷⁹ Et assurément, ce n'est pas « un modèle biophysique de type bottom-up, ajustant l'offre et la demande en modélisant l'évolution des systèmes productifs agricoles et des besoins » comme le présente l'administration.

Pour répondre à la demande de la DGEC de simuler les productions d'énergie issues de la biomasse, quelques équations ont été ajoutées pour convertir la biomasse en énergie selon le principe de l'équation (1), (cf.1.1.4.), mais avec des coefficients plus précis selon les matières méthanisées (2,5 MWh/tMS pour les cultures intermédiaires à vocation énergétique, 2,3 MWh/tMS pour l'herbe, 2,1 MWh/tMS pour le fumier de bovin, etc.⁸⁰).

Quelques erreurs ont été identifiées par la mission, notamment pour les carburants 1G mais Solagro a indiqué que « *comme les biocarburants 1G n'évoluent pas, d'éventuelles erreurs de calcul n'auraient aucune incidence* »⁸¹. Pour la pyrogazéification ou les carburants 2G, Solagro se contente « *d'attribuer un volume de bioénergie à ces filières en masse et en pouvoir calorifique* » (ce qui implique *de facto* l'existence d'un coefficient de conversion ...). Leur incidence paraît faible dès lors que *in fine* les calculs n'en tiennent pas compte ou seulement de façon marginale.

Les résultats sont ensuite introduits dans d'autres « modèles-tableurs » comme les outils d'EnerData et revus par le CITEPA pour l'évaluation du puits de carbone (agriculture et forêts). Cela conduit aux « runs » 1, 1bis, 2, avec mesures existantes (AME) ou avec mesures supplémentaires (AMS), utilisés par les administrations.

Les projections actuelles présentent d'assez nombreuses limites

Le modèle MoSUT, parce qu'il n'a pas été conçu pour simuler des productions agricoles mais leurs impacts, présente plusieurs limites, voire risques, dans l'utilisation qui en est faite pour les exercices de projection qui nourrissent la SNBC ou la PPE :

- Il détaille très précisément les productions possibles (par exemple, lupin doux, fraises, fraises de plein champ, aubergines, etc.) et peut donner l'impression d'une fausse précision (mais il ne laisse a priori aucune surface agricole sans résultat).
- L'agrégation des résultats, nécessaire pour les conversions énergétiques et nullement critiquable en soit, introduit vraisemblablement des approximations (sans doute très supérieures aux précisions précédentes).
- L'interdépendance des productions et de leurs enjeux semble insuffisamment prise en compte (ex. semis $n + 1$ après la récolte n).
- Les contraintes réglementaires sont absentes (par exemple les dates réglementaires limites de semis ou de récolte pour qu'une culture soit qualifiée d'intermédiaire).
- Les multiples facteurs d'incertitude d'ordre technique et socio-économique ne sont pas intégrés.
- L'influence des prix qui orientent les choix des agriculteurs est inexistante.
- La simulation nationale pour des productions, qui ne sont pas uniformes sur le territoire, est une approche trop simpliste.

Enfin, la prise en compte des impacts du changement climatique ne semble pas traitée finement, L'influence sur les facteurs de productions se traduit par des choix de rendements « à dire d'expert » mais ne résultent pas d'une réelle modélisation (c'est une limite essentielle).

⁸⁰ Source Solagro.

⁸¹ Cette réponse peu contestable n'est toutefois pas acceptable si la quantité de biocarburants de première génération évoluait. Par ailleurs, les confusions entre les densités des huiles végétales et leur inverses ou l'existence de rendements pour lesquels la masse de produits sortants est 2 à 3 fois voire 51 fois supérieure à celle des produits entrants (avec une confusion manifeste entre masses et volumes, car la valeur en question résulte très vraisemblablement, voire manifestement, d'un calcul stœchiométrique utilisant les masses atomiques sans introduire une quelconque perte due à la fermentation) ne peuvent qu'interpeler.

En complément, la réponse, générale, de Solagro est parfaitement recevable : « *Les informations que vous nous demandez sont hors format et nécessitent du temps de développement, qui est donc hors du budget de notre mission pour la DGEC, et il est possible qu'il reste des erreurs* ». En revanche, cela peut conduire à l'idée d'un travail de sous-traitance, cloisonné entre les administrations et dont le contrôle paraît faible et perfectible.

Dans le domaine forestier, le temps long des cycles de production oblige à paramétrer plusieurs scénarios climatiques. Plus précisément, le modèle MARGOT⁸² permet de simuler l'évolution de la forêt française dans son ensemble, avec des paramètres de dynamique naturelle et de coupes pouvant être modulés suivant des scénarios définis par le choix de paramètres climatiques ou de gestion. Sur cette base, une étude est en cours (IGN, FCBA) pour réinterroger les projections des disponibilités en bois et des stocks et flux de carbone à l'aune des changements récents constatés sur la croissance biologique et la mortalité⁸³ : les résultats permettront d'ajuster le niveau de récolte possible et ses conséquences sur le niveau du puits de carbone forêt-bois.

Une meilleure modélisation des productions de biomasse est possible et nécessaire

Les modèles économétriques ont montré depuis plusieurs décennies l'intérêt d'internaliser autant que possible les variables, c'est-à-dire de réduire les paramètres fixés par le modélisateur (i.e. de façon exogène ou extérieurs au modèle). Par exemple et de façon très simplifiée, les demandes des biens ne sont pas déterminées en référence à la consommation actuelle ou passée mais dépendent de leurs prix et des revenus des agents, dépendant eux-mêmes des prix de vente ; en revanche, le nombre de biens pris en compte, leur substituabilité, les imports-exports, etc. restent exogènes ou extrinsèques au modèle.

Dans le cas présent, les rendements R_j des productions agricoles pourraient être estimés assez précisément, au moins au niveau de la parcelle, par des équations linéaires du type :

$$R_j = \alpha_0 + \alpha_{j1}\text{pluviométrie} + \alpha_{j2}\text{réserve utile du sol} + \alpha_{j3}\text{évapotranspiration} + \alpha_{j4}\text{température (en degré jours)} + \alpha_{j5}\text{azote} + \dots + \varepsilon \quad (2)$$

ε reprend les aléas annuels, les coefficients α_{ji} peuvent être spécifiques d'un parcours cultural, etc.⁸⁴ Les variables explicatrices peuvent être liées (ex évapotranspiration, réserve utile des sols, pluviométrie et température dans l'exemple précédent un peu caricatural) mais c'est un problème bien connu en économétrie et largement résolvable.

Des contraintes pourraient être introduites quant à la période des précipitations considérées, les quantités d'azote apportées par les élevages ou les cultures précédentes, etc. Certaines peuvent ne pas être linéaires au travers de variables indicatrices (i.e. prenant la valeur 0 ou 1) traduisant l'insuffisance des précipitations au moment du semis, la faiblesse des prix ou de la masse végétale pour justifier une récolte ou encore l'interdiction de traitements phytosanitaires (permettant la présence de ravageurs ou des attaques fongiques engendrant une faible ou non-valorisation pour l'alimentation humaine), etc. Les contraintes induites par la succession des cultures au sein d'une rotation doivent être intégrées.

L'INRAE a développé pour la plupart des grandes cultures le modèle STICS (Simulateur multi-disciplinaire pour les Cultures Standard) dans les années 90. Celui-ci simule les effets à la parcelle des pratiques agricoles (irrigation, fertilisants, etc.) et des paramètres climatiques (pluviométrie, températures, rayonnement, etc.). STICS prend en compte les qualités du sol.

Il s'agit d'un modèle « incrémental à pas de temps quotidien » qui simule les arrêts de synthèse biologique et qui est plus raffiné que l'approche linéaire évoquée précédemment. Les résultats sont

⁸² MARGOT est un modèle démographique déterministe structuré en classes de diamètre. Il est calibré et initialisé avec les données annuelles de l'IFN. Les peuplements forestiers sont réunis en strates qui constituent l'unité de modélisation permettant de décrire l'ensemble des forêts françaises (combinaison essences x grandes régions écologiques x classes de propriété). Dans chaque strate la ressource actuelle est décrite au travers d'un effectif d'arbres par classe de diamètre, tandis que les paramètres de dynamique naturelle (production, mortalité, recrutement) sont estimés à partir des observations récentes de flux réalisées par l'IFN. La gestion courante est décrite sous la forme d'un taux de coupe en effectif par classe de diamètre.

⁸³ Sur la période 2012-2020, la production biologique a baissé de 4 % et la mortalité a augmenté de plus de 50% par rapport à la période 2005-2013.

⁸⁴ Il est intéressant de rappeler que plusieurs méthodes d'analyses statistiques (analyse de la variance, régressions multilinéaires notamment) ont souvent connu leurs premiers développements pour répondre à des préoccupations d'agronomes.

présentés comme très bons pour le Blé, le Maïs, le Colza, le Tournesol, la Luzerne, la Betterave ou la Pomme de terre... mais insuffisants pour les prairies temporaires et encore plus mauvais pour les prairies permanentes (le modèle ne décrirait pas correctement la mort totale ou partielle du végétal). Le modèle ne pourrait pas modéliser, actuellement, des cultures à cycles chevauchant (le semis $n + 1$ est effectué avant la récolte n) ou associées (Maïs légumineuses par exemple).

Ce modèle pourrait être adapté pour répondre à des questions du type : « que se passe-t-il suite à une réduction de 20 % de la fertilisation azotée ou à une chute de 15 % de la pluviométrie estivale ? » et donc à des interrogations relatives à la production de biomasse.

Deux axes restent à prendre en compte⁸⁵ :

- Réaliser des modèles à des échelles plus petites pour la France (100 à 300 unités pédoclimatiques),
- intégrer des évolutions des pratiques agricoles . C'est plus difficile (par exemple, si on réduit de 50 % les pesticides, les agriculteurs ne travailleront plus avec les mêmes espèces) ; il existe une initiative internationale sur cette thématique.

Intuitivement, un nouveau modèle pertinent et efficace issu de STICS pourrait être conçu. Un module pourrait vraisemblablement être repris du modèle Climagri® pour suivre la fixation du carbone dans les sols et les impacts environnementaux (consommations d'énergie, émissions de gaz à effets de serre, etc.) dont c'est l'objet originel ; un autre pour le secteur forestier en s'inspirant du modèle MARGOT précité.

C'est l'objet de la recommandation 2 de la mission.

Ce type de modélisation, qui internalise de nombreuses variables et contraintes, ne présente aujourd'hui aucune difficulté en termes de capacité informatique et de programmation. L'INRAE n'a jamais développé un tel modèle à l'échelle de la France mais en a identifié récemment la nécessité.

Une telle approche permettrait d'apprécier facilement l'impact d'effets du changement climatique ou de décisions politiques (ex. interdiction ou usage restreint des engrais minéraux de synthèse) au travers de simulations avec des hypothèses déterministes simples ou par des procédures dites de Monte-Carlo⁸⁶. Ce serait une façon de progresser par rapport aux simples dires d'experts, lesquels sont éventuellement influencés par les demandes politiques et administratives.

⁸⁵ Il y aura plus de problème si on généralise les cultures en association, STICS n'en est pas capable (ex. association Pois -Blé), si les cultures sont conduites en cycles chevauchants (semis $n + 1$ avant récolte n). De même l'introduction de certaines cultures « inconnues » peut être difficile (mais le Sorgho est simple à modéliser). Enfin l'irruption de ravageurs ou de pathogènes pose un problème de prévision évident.

⁸⁶ De façon schématique les hypothèses d'entrée comme une baisse des précipitations ne sont plus fixées mais engendrées aléatoirement ; les nombreux résultats issus des simulations obtenues avec les différents « tirages aléatoires » d'hypothèses sont ensuite étudiés pour déterminer leur moyenne et leur variabilité (ce qui serait autrement très difficile voire non résoluble).

Annexe 7. Quelles ressources de biomasse développer en France métropolitaine ?

Plusieurs ressources de biomasse sont identifiées dans les différents travaux consultés par la mission. Celles étudiées de façon agrégée par les « run » supports des travaux de l'administration semblent pertinentes. Toutefois, tous ne présentent pas un potentiel important. Le corps du rapport évoque les cultures intermédiaires, les effluents d'élevage, les résidus de cultures et le potentiel forestier. Les autres sources semblent insuffisantes pour livrer des quantités importantes de biomasse.

Replanter des haies, une nécessité pour la biodiversité mais une ressource limitée pour l'énergie

Le récent « Pacte en faveur de la haie », présenté le 29 septembre 2023, a pour objectif de planter 50 000 km de haies d'ici à 2030 et de développer leur gestion durable⁸⁷, avec 110 M€ de dotation dès 2024. La tendance actuelle conduit à une diminution rapide du linéaire de haies ; les 3 500 à 4 000 km supplémentaires de haies plantés actuellement par an sont loin de compenser les pertes (arrachages et dépérissements faute d'entretien). Les avantages diffus fournis par les haies (biodiversité, ressources en eau, ombrage et ressources fourragères pour le bétail, etc.) sont avérés. Toutefois, les possibilités actuelles pour leur valorisation, principalement en bois de chauffage, ne permettent pas de compenser les surcoûts et contraintes de leur gestion (notamment en ce qui concerne les périodes possibles pour la réalisation des travaux d'entretien⁸⁸).

Si ce pacte est indéniablement un élément structurant d'une politique en faveur du développement de la ressource ligneuse des haies, les dernières simulations ne prévoient plus qu'une faible augmentation de la mobilisation de cette ressource qui devrait fournir 27,9 TWh en 2050 alors qu'elle en a fourni 22,8 en 2021.

Pour les agriculteurs, la gestion des haies est considérée comme contraignante et coûteuse et le pacte ne comprend que des aides à la plantation.

Compte-tenu de l'importance des freins à lever pour inverser une tendance bien ancrée, mais aussi de la difficulté technique et économique à assurer une gestion durable des haies, la mission considère que les dernières simulations sont réalistes.

Certes le bois hors forêt comprend également le bois issu des systèmes agro-forestiers mais leur développement quasi inexistant à ce jour (du fait notamment de l'insuffisance des références technico-économique hors ferme expérimentale) ne permet pas d'espérer en retirer une production avant 2050 et plus certainement 2070 car ces plantations, réalisées à espacement définitif, se conduisent sans éclaircie.

Le développement des cultures lignocellulosiques, un potentiel limité.

Les cultures lignocellulosiques sont représentées principalement par le Miscanthus et les taillis à courte rotation (TCR). Le Miscanthus est une plante à rhizome, déjà cultivée sur environ 11 000 ha⁸⁹, principalement dans le nord-ouest de la France, notamment parce que cette culture, certes nécessitant peu d'apports de fertilisants ou de traitements phytosanitaires, ne se développe bien que dans des sols à bonne minéralisation (donc des sols riches) et bien pourvus en eau⁹⁰. En outre la récolte est rendue difficile en zone de relief et les unités de valorisation doivent être à proximité des zones de production, le transport étant malaisé. Les contraintes pédoclimatiques et physiques (pente) sont identiques pour l'implantation de TCR qui valorisent des plantations à croissance rapide (peuplier, saule, eucalyptus...). Il ne faut pas non plus sous-estimer les difficultés d'acceptabilité

⁸⁷ Le plan de gestion durable des haies (PGDH) permet de faire un état des lieux, de planifier la gestion des haies par un programme de coupes et de travaux d'amélioration. Des coupes peuvent être effectuées en moyenne tous les 10 ans.

⁸⁸ Interdictions de coupe ou d'élagage en période de reproduction animale par exemple.

⁸⁹ <https://france-miscanthus.org/le-miscanthus-en-chiffres>

⁹⁰ C'est une production sensible au stress hydrique.

sociétale de production en monoculture de plantes dont l'impact sur la biodiversité locale⁹¹ a été peu étudié. Enfin, ces cultures pérennes (environ 10 ans d'implantation pour le miscanthus) entrent en concurrence directe avec les grandes cultures.

Pour toutes ces raisons, la mission estime que ces productions ne connaîtront à court et moyen terme que des développements limités et trouveront des valorisations autres que l'énergie (actuellement le miscanthus est principalement utilisé en litière pour les animaux, pour palier la disponibilité insuffisante en paille, et en paillage horticole).

Une sole de 600 000 ha, conforme aux hypothèses de l'INRAE paraît un maximum pour la mission.

Les résidus de culture, un atout pour le puits de carbone des sols.

Les résidus de culture comprennent les pailles (céréales, oléagineux, protéagineux), les fanes de betteraves, les cannes de maïs, les menues pailles.

L'essentiel des résidus de culture (85 - 90 %) est laissé au champ pour assurer un retour suffisant de la matière organique au sol, laquelle est nécessaire au maintien du potentiel agronomique et de la réserve utile (capacité de rétention de l'eau) des terres arables. En outre, cet objectif est directement corrélé à l'accroissement du stockage du carbone dans les sols, un élément important pour atteindre l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050. Pour France stratégie, pour des raisons techniques diverses, le volume de résidus de cultures mobilisables n'excède pas 40 %, ce qui est cohérent avec les hypothèses du modèle MoSUT qui prévoient un retour au sol à hauteur de 71 % en 2050.

Toutefois les résidus de culture ont d'autres utilisations : tout d'abord ils sont largement utilisés pour les litières (il y a même des tensions sur l'approvisionnement d'où le recours au miscanthus) et pour la production de biomatériaux (développement de la paille en isolation). Les utilisations énergétiques, par combustion directe ou en méthanisation (pour rééquilibrer les rations) sont minoritaires. Cette hiérarchie est respectée dans les hypothèses du modèle MoSUT même si, à l'horizon 2050, la part du retour direct au sol est réduite et qu'une fraction plus importante de paille est méthanisée ou transformées en biocarburants (30 TWh soit 15 MtMS). Au demeurant, la mission reste dubitative quant à la division par deux de la part des résidus consacrés au paillage dès lors que la diminution du cheptel n'est pas aussi importante même si un recours accru au pâturage diminue de facto le besoin de paillage. Enfin la mission souligne que les tonnages de résidus de culture pris en compte impliquent la mobilisation des collets de betteraves, des fanes de pomme de terre et de toutes les pailles d'oléagineux et de protéagineux ainsi que des cannes de maïs, ce qui nécessitera une modification des pratiques agricoles et posera des problèmes de logistique certains.

Dans ce contexte, la multiplication par 10 des résidus de cultures méthanisées à l'horizon 2050 semble ambitieuse, car la valorisation par méthanisation pourrait à cette échéance, être concurrencée par une valorisation en carburants 2G, choix justifié par un potentiel méthanogène plutôt faible. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la mission valorise majoritairement les résidus de culture pour la production de biocarburant 2G.

Les surplus d'herbe, une idée vraisemblablement plus théorique que pratique

L'idée sous-jacente est que la diminution de l'élevage bovin va libérer des terres qui pourront être consacrées à la production d'énergie alors que précédemment leur production était destinée à l'alimentation animale.

Cette évolution concerne pour une part des terres arables, essentiellement celles qui produisaient des prairies artificielles ou temporaires mais également les surfaces en maïs fourrager. D'une part avec la baisse prévisible des rendements agricoles (impact du changement climatique et de la baisse des fertilisants ou des traitements phytosanitaires), les élevages qui continueront à utiliser ces productions auront besoin de plus de surface par unité de bétail ; donc la réduction de surface ne sera pas une fonction linéaire de la réduction de cheptel. D'autre part, un des objectifs de la transition agro-écologique est de relocaliser la production de protéagineux et de légumineuses. Les terres

⁹¹ Il est fait état du fait que les sangliers trouvent refuge dans les plantations de miscanthus, y prolifèrent à l'abri des prédateurs et détruisent les cultures environnantes

libérées pourraient être valorisées par ces productions. La mission estime donc peu probable que la diminution de l'élevage permette de dégager un volume important de terres arables qui seraient destinées à la production d'herbe en vue de sa méthanisation.

Les autres surfaces concernées sont principalement des prairies permanentes, situées le plus souvent en zone de moyenne montagne ou dans des zones humides peu propices aux cultures. Leur retournement est pénalisant pour l'agriculteur. Il aura donc intérêt à les valoriser pour le pâturage soit de ses propres animaux, soit en les louant. Dans le cas où ces parcelles ne pourraient plus être pâturées (départ à la retraite de l'éleveur sans reprise de l'exploitation, absence de voisin intéressé) il est vraisemblable que ces surfaces seront laissées à l'abandon et viendront constituer le flux annuel d'accrus forestiers⁹². L'idée que des agriculteurs viendront faucher l'herbe pour alimenter un méthaniseur semble peu crédible à la mission, excepté dans le cas où l'éleveur est partie prenante dans un projet de méthanisation agricole.

Même si les hypothèses retenues pour la modélisation SFEC prévoient seulement 5 TWh issus des surplus d'herbe et de fourrage, cela correspond à 2 MtMS soit une surface d'environ 500 000 ha, lesquels pourraient être assez dispersés, ce qui ne facilitera pas leur mobilisation.

⁹² En cohérence avec les hypothèses retenues pour la modélisation SFEC, qui axe la diminution de la surface toujours en herbe (STH) sur les surfaces de prairies peu productives, parcours et alpages

Annexe 8. Le potentiel forestier français

Sur un tiers du territoire métropolitain, la forêt produit chaque année de la biomasse ligneuse qui s'accumule (troncs, branches, racines...) jusqu'à la mort ou la récolte des arbres, selon un cycle qui s'étale sur plusieurs décennies voire des siècles.

En France, cette biomasse est récoltée dans un cadre de gestion durable, en s'assurant notamment que les prélèvements ne dépassent pas les capacités de production biologique. Dans le cas contraire, la récolte correspondrait à une exploitation minière de la forêt sans garantie du renouvellement de la ressource.

Le bois ainsi récolté peut répondre à plusieurs usages, regroupés en trois grandes catégories.

- Le bois d'œuvre (BO) qui est majoritairement scié et utilisé notamment en construction, en aménagements intérieur ou extérieur ;
- Le bois d'industrie (BI), destiné à être transformé après déchiquetage (« trituration »), soit en panneaux (particules, fibres...), soit en pâtes pour fabrication de papier-cartons ;
- Le bois énergie (BE), directement brûlé (bûches, plaquettes...) pour produire de la chaleur.

Les processus de transformation du bois d'œuvre et du bois d'industrie produisent des quantités importantes de co-produits (écorces, sciures, déchets de coupes, liqueur noire...) qui peuvent trouver une valorisation matière (en trituration) ou énergie (dont granulés de bois).

Évaluer le potentiel de production d'énergie à partir de la biomasse forestière nécessite d'expertiser plusieurs grands paramètres.

- La superficie des forêts dont dépend la production biologique de biomasse ligneuse – Depuis des décennies, les surfaces forestières s'accroissent, essentiellement au détriment de terres agricoles abandonnées. Selon les hypothèses d'évolution de l'activité agricole, et particulièrement de l'élevage, cette progression peut se maintenir ou se ralentir d'ici 2050.
- La récolte potentielle de bois, en respectant les critères de gestion durable – Celle-ci est directement dépendante de la composition en essences, de la distribution des classes d'âge, de la production biologique et de la mortalité annuelles, autant de variables sensibles à l'évolution du climat. Sa concrétisation dépend de la volonté des propriétaires à gérer et exploiter leurs bois, elle-même dépendante de facteurs économiques (prix de vente des bois récoltés, disponibilité de main d'œuvre et coûts d'exploitation, fiscalité...), techniques (choix des essences face aux incertitudes climatiques, réussite des régénérations, dégâts de gibier...) et sociologiques (implication dans la gestion forestière, préférences patrimoniales, âge...).
- Les utilisations de cette récolte (répartition entre BO, BI et BE), avec les volumes correspondants de coproduits des process de transformation de bois d'œuvre et du bois industrie – La valorisation bois d'œuvre, qui est la plus exigeante et la plus rémunératrice, dépend de l'essence et des propriétés du bois, mais aussi de la demande des marchés et de la compétitivité des industries de transformation. Les bois qui ne peuvent être valorisés en bois d'œuvre peuvent être destinés à la trituration ou à l'énergie. Le devenir des produits bois en fin de vie doit également être pris en compte, avec là encore un usage matière ou énergie. La notion de cascade d'usages prend ici tout son sens.

Tous ces grands paramètres influencent in fine la disponibilité en bois énergie, mais ils conditionnent également le bilan carbone. La forêt peut ainsi être un puits de carbone, si la production biologique annuelle excède la récolte et la mortalité, ou si les surfaces forestières s'accroissent. Les produits bois à longue durée de vie (sciages, panneaux...) peuvent aussi constituer un puits de carbone si le flux annuel d'utilisation est en croissance et dépasse le flux annuel de produits en fin de vie. Enfin, des effets de substitution à du carbone d'origine fossile se manifestent lorsque que le bois est utilisé à la place de matériaux dont la production demande des énergies fossiles (ciment, acier...) ou bien à la place de combustible fossile (fuel, gaz...).

1. Évolution des surfaces forestières

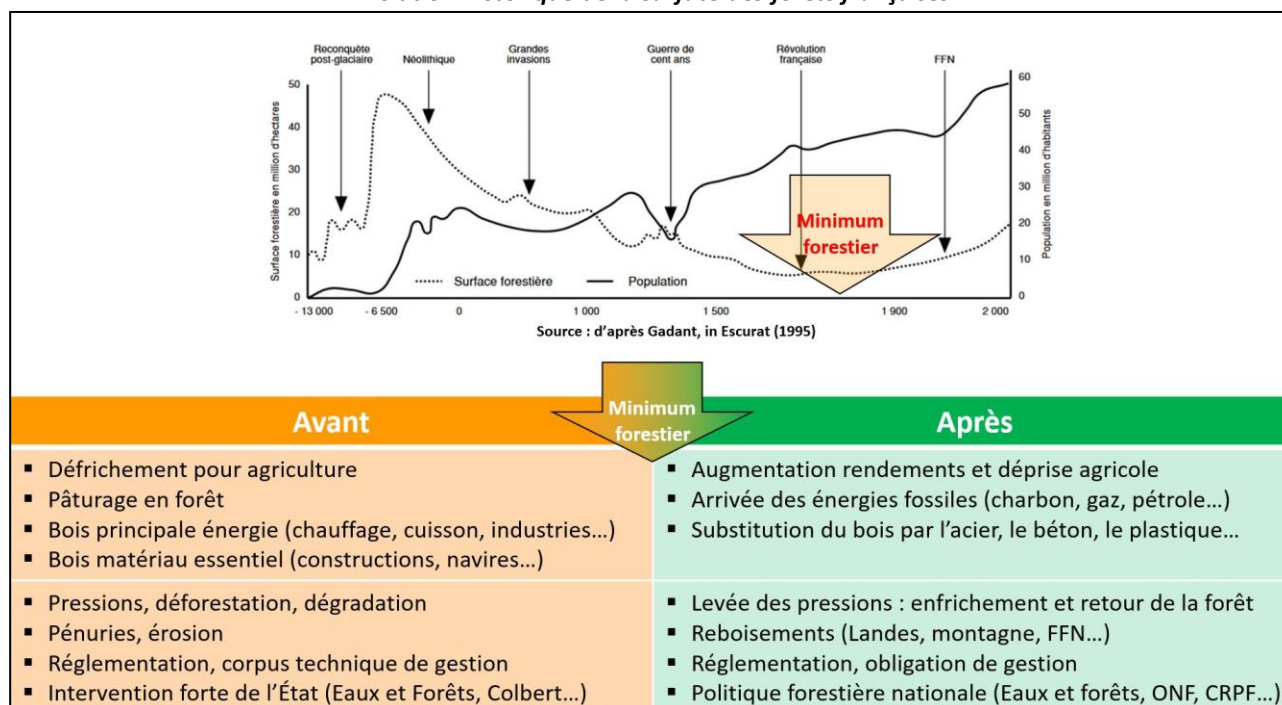
1.1. La surface de la forêt française s'accroît régulièrement depuis des décennies par la reconquête de terres agricoles délaissées

Qu'appelle-t-on forêt ?

Une forêt est un territoire occupant une superficie d'au moins 50 ares (5 000 m²) avec des arbres pouvant atteindre une hauteur supérieure à 5 mètres à maturité in situ, un couvert boisé de plus de 10 % et une largeur moyenne d'au moins 20 mètres. Elle n'inclut pas les terrains boisés dont l'utilisation prédominante du sol est agricole ou urbaine. Cette définition est celle adoptée au niveau international (FAO) et utilisée par l'IGN pour l'Inventaire forestier national. Un bosquet est un territoire occupant une superficie supérieure ou égale à 50 ares (500 m²) et inférieure à 50 ares avec un couvert arboré de plus de 40 %.

La forêt française s'accroît en surface depuis un minimum vers le milieu du XIX^e siècle, comme l'illustre le graphique ci-dessous.

Évolution historique de la surface des forêts françaises



L'augmentation sensible et régulière des surfaces depuis la fin du XIX^e siècle est une tendance de fond qui structure la forêt française. Un flux important de terres agricoles délaissées (principalement des prairies permanentes peu productives, mais aussi des cultures fourragères) est constaté depuis des décennies. Sous nos climats, les terrains abandonnés s'enrichissent naturellement et présentent des caractéristiques forestières⁹³ après un laps de temps variable. Ils sont alors recensés et suivis par l'Inventaire forestier national qui constate ainsi en moyenne sur la période 1985-2021 environ 80 000 ha/an de nouvelles forêts⁹⁴. Cette extension des surfaces était d'environ 40 000 ha/an entre 1900 et 1975. Depuis 1975, cette expansion en surface concerne à 90 % des forêts privées et à 73 % des feuillus. Sur les dernières décennies, l'expansion des forêts résineuses en surface stagne, voire ralentit, alors que celle des forêts feuillues est de plus en plus rapide.

Dans les prochaines années, un flux de 60 000 ha par an d'abandon de terres cultivées et de prairies

⁹³ Cf. définition FAO de la forêt adoptée par l'Inventaire forestier national.

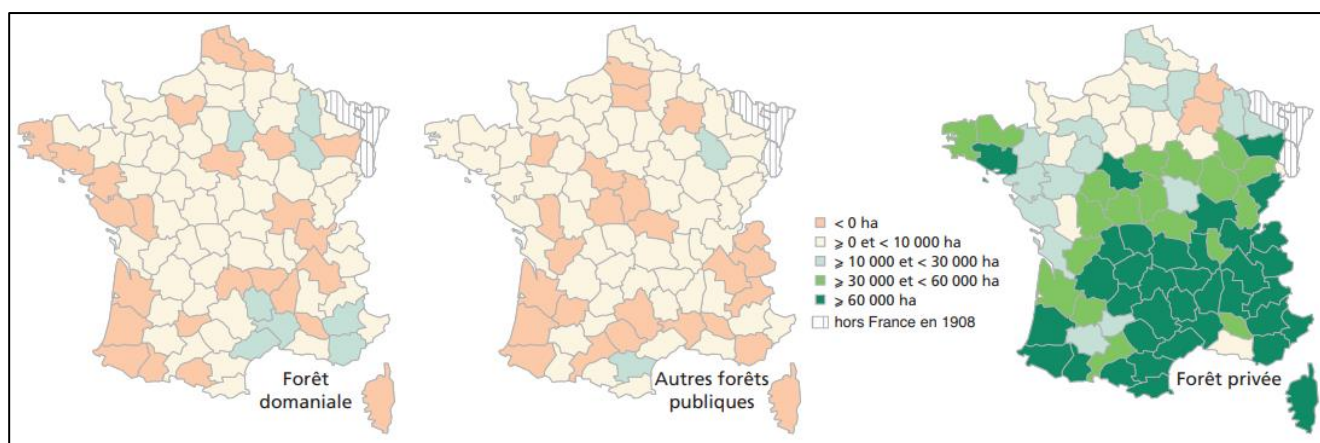
⁹⁴ Les derniers inventaires de GES SECTEN réalisés par le CITEPA chiffre à 40 000 ha les terres en culture ou prairies délaissées passant annuellement au stade forêt (« accrus forestiers »).

semble faire consensus par les acteurs agricoles⁹⁵. Une partie de ce flux ira vers l'artificialisation mais la majeure partie ira abonder le stock de « friches ».

Depuis le début du XX^e siècle, l'expansion en surface des forêts françaises concerne principalement une large moitié sud de la France, plus particulièrement dans les zones de moyennes montagnes et autour du bassin méditerranéen où les déprises agricoles, pastorales et rurales ont été les plus soutenues.

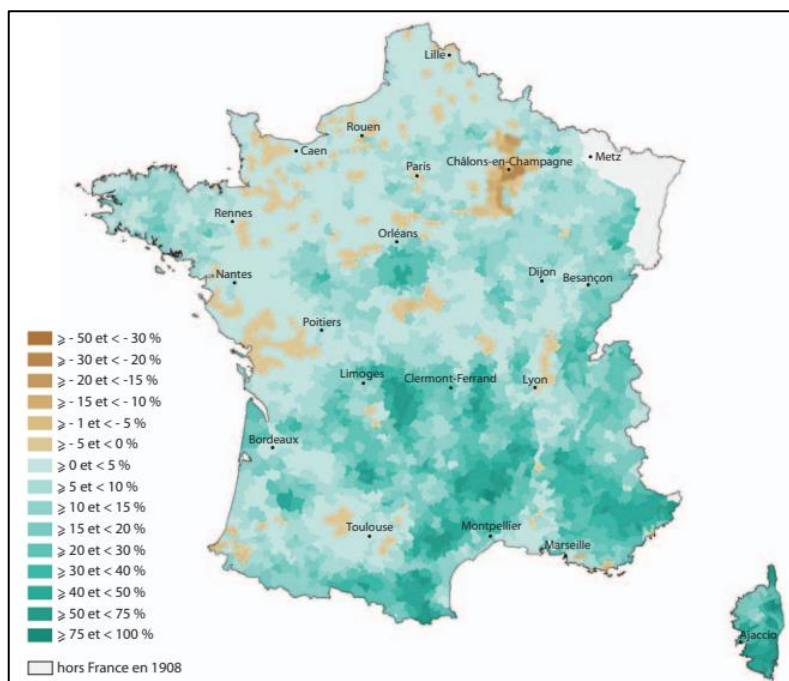
Alors qu'elles représentaient 35 % de la superficie forestière en 1908, et malgré une extension d'environ 280 000 ha au cours du siècle, les forêts publiques n'en représentent plus que 25 % aujourd'hui. Sur la même période, la part des forêts privées est donc passée de 65 % à 75 % et le nombre de propriétaires forestiers a doublé.

Évolution de la superficie des forêts au cours du XX^e siècle



Source : IGN. Un siècle d'expansion des forêts françaises. IF n° 31. 2013.

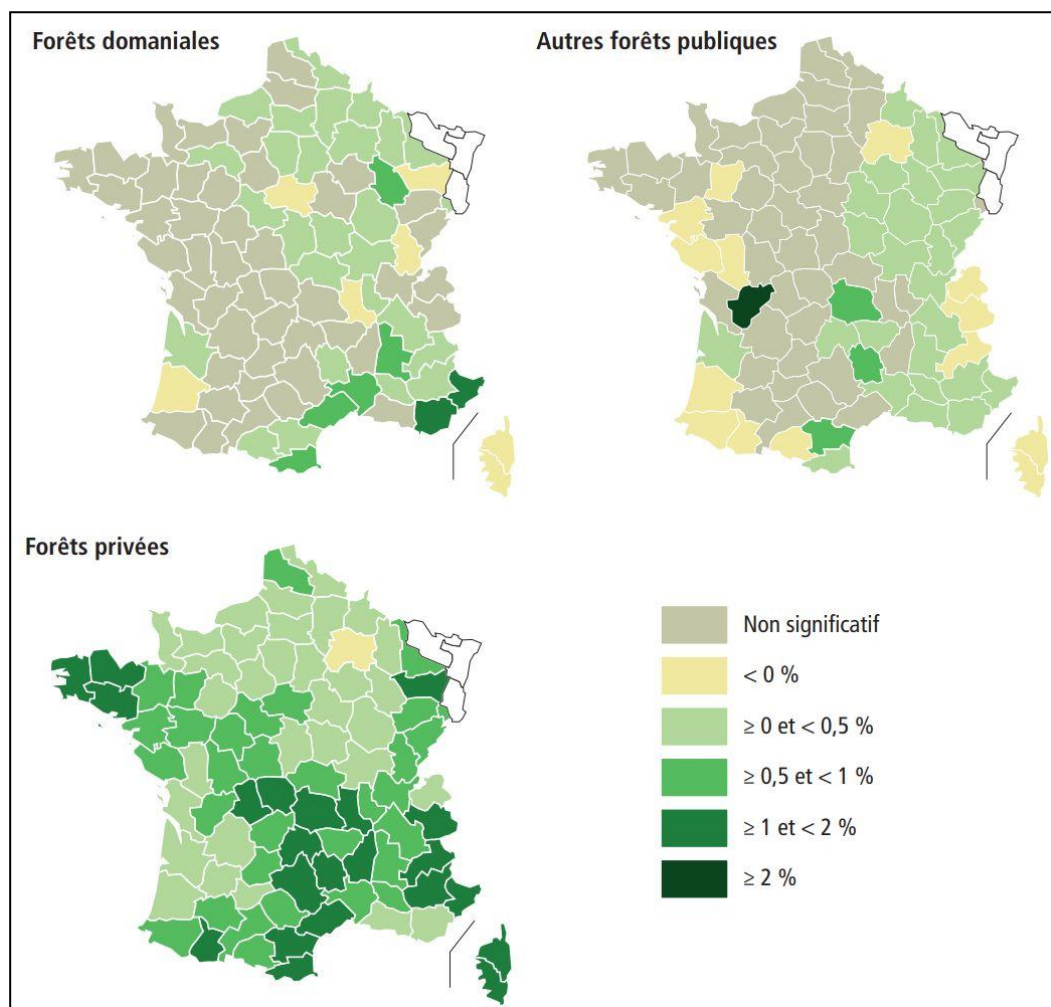
Évolution du taux de boisement au cours du XX^e siècle



Source : IGN. Un siècle d'expansion des forêts françaises. IF n° 31. 2013.

⁹⁵ Groupe de travail agriculture de révision de la SNBC : le chiffre de 60 000 ha tient compte de politiques volontaristes de maintien des prairies

Taux d'accroissement annuel de la superficie des forêts par type de propriété, entre 1908 et 2014



Source : IGN. Portait des forêts privées avec ou sans PSG. IF n° 41. 2018.

1.2. Les politiques publiques de boisement-reboisement ont permis la création de nouvelles forêts plus productives

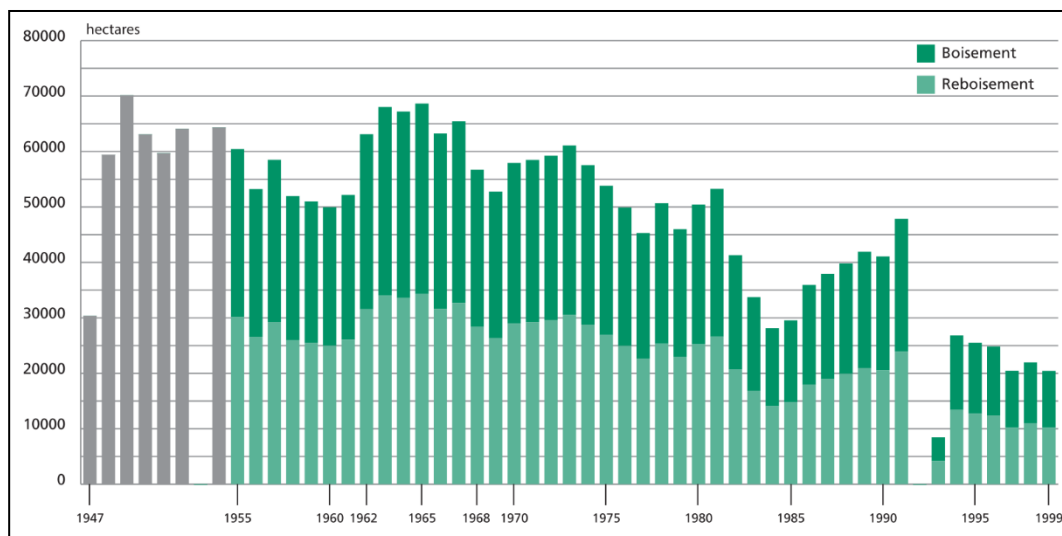
L'extension des forêts au détriment de terres agricoles délaissées a été accompagnée par des politiques publiques favorisant le boisement. Sans parler des opérations de mise en valeur de terres ingrates dans les Landes de Gascogne ou en Sologne, ou celles des importants boisements de protection pour la restauration des terrains en montagne (RTM), initiées au XIX^e siècle, la mise en place du Fonds forestier national (FFN) à la sortie de la deuxième guerre mondiale a facilité les boisements et les reboisements sur des surfaces estimées à 2,3 Mha (FFN supprimé en 2000).

En tenant compte de la part de boisements nouveaux et de l'existence de boisements volontaires sans aides du FFN, certaines estimations font état d'environ 1,2 Mha de nouvelles forêts créées par boisement (compte tenu des échecs), soit le quart des 4,5 Mha d'extension forestière en France depuis 1945 (le solde résultant principalement de l'expansion feuillue sur des terres agricoles délaissées)⁹⁶.

En outre, ces boisements et reboisements ont souvent installé des essences résineuses, dont la France d'après-guerre était déficitaire. La contribution du FFN dans l'augmentation de la superficie des conifères en France, entre 1947 et 1999, a pu être estimée à 1,5 Mha, représentant les trois-quarts des nouvelles surfaces résineuses apparues dans la forêt française au cours de la seconde moitié du XX^e siècle.

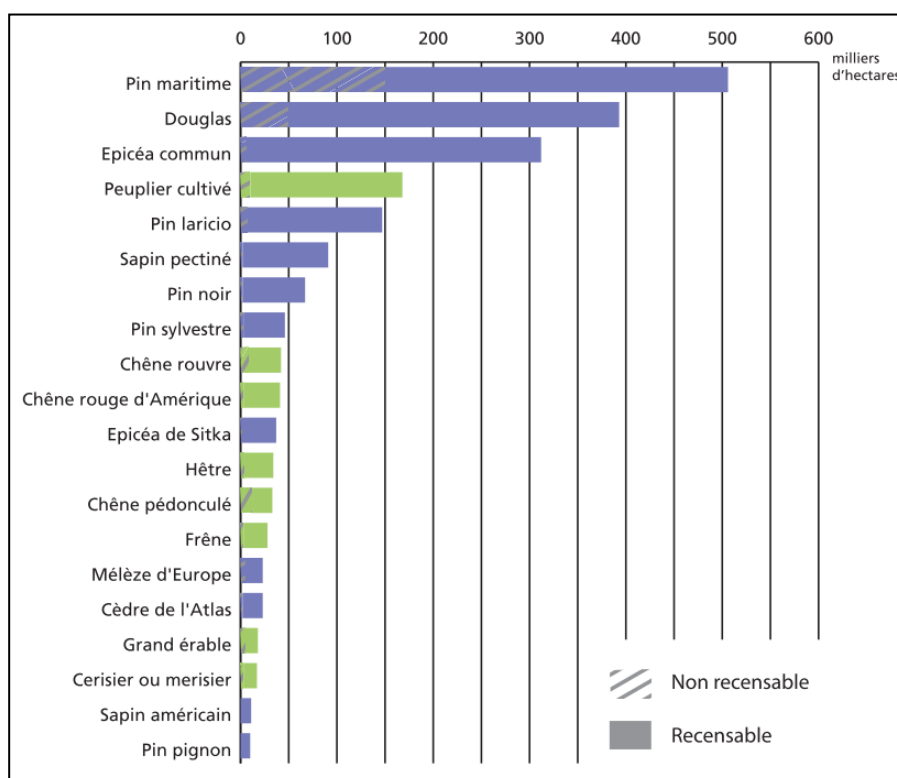
⁹⁶ Clément Dodane. Géoconfluences - DGESCO - ENS de Lyon. 2013

Répartition des superficies boisées et reboisées financées par le FFN entre 1947 et 1999



Source : Durin, Legay 2012, projet Nomade, RMT AFORCE in IGN. La forêt plantée en France. IF n°40. 2017.

Répartition des surfaces de plantations par espèce principale plantée



Source : IGN. La forêt plantée en France. IF n°40. 2017.

Selon l'inventaire forestier national, la surface de la forêt plantée est aujourd'hui de 2,1 Mha, soit 13 % de la forêt française. Les trois quarts de ces surfaces sont en forêt privée et 80 % sont résineuses. Cinq essences sont plantées sur plus de 100 000 ha : pin laricio, peuplier, épicéa commun, douglas et pin maritime.

Les plantations et les boisements ont ainsi permis la constitution d'une ressource résineuse importante, dont bénéficient aujourd'hui nos industries de transformations. Même s'il reste d'ampleur limité à l'échelle de la forêt française, cet enrésinement est parfois décrié quand il conduit à des transformations importantes des paysages dans certains territoires (Morvan, Plateau de Millevaches...). La prise en compte de la biodiversité a également pu être limitée dans le passé,

avec peu de précautions prises pour éviter des plantations monospécifiques sur de grandes étendues. Certaines de ces plantations se sont montrées vulnérables aux aléas, notamment quand elles ont été réalisées dans des conditions stationnelles limites par rapport aux exigences des essences de reboisement employées (exemple des plantations d'épicéas en plaine, décimées actuellement par les scolytes en Grand-Est et Bourgogne Franche-Comté).

Aujourd'hui, le flux de boisement volontaire de terrains agricoles reste faible. Selon les chiffres fournis par les DRAAF, la surface de terres agricoles boisées en 2022 est de l'ordre de 1 500 ha. Il s'agit là de premiers boisements⁹⁷ soumis à l'évaluation environnementale au cas par cas au-dessus du seuil de 0,5 ha⁹⁸. Pour mémoire, les 229 projets labellisés selon la méthode « boisement » du Label bas-carbone à ce jour représentaient 1 600 ha, ce qui est cohérent avec les chiffres précédents. À noter toutefois que le processus du Label bas-carbone est en pleine expansion et que 175 projets de boisements sont en voie de labellisation.

1.3. Les forêts issues de la reconquête de terres délaissées ne sont pas installées sur les meilleures terres

Les terres délaissées par l'agriculture, qui viennent accroître les surfaces forestières, ne sont pas les plus fertiles et sont plutôt situées dans des zones présentant des handicaps d'exploitation : zones méditerranéennes ou zones de moyenne montagne comme l'indique une étude sur la réserve utile des sols publiée dans les indicateurs de gestion durable des forêts françaises de 2015 (encadré ci-dessous).

Répartition et évolution des surfaces, par niveau de réserve utile des sols

La déprise agricole est l'un de ces processus importants. Elle se développe le plus souvent dans des espaces manifestant des potentialités de production limitantes pour l'agriculture. Les surfaces ayant été affectées par la déprise n'évoluent pas rapidement au stade de la forêt, sauf s'il y a une démarche active de boisement par plantation. Les ligneux qui les couvrent ne passent donc que très progressivement au stade d'arbres formant une forêt. Il peut ainsi s'écouler plusieurs décennies entre l'enclenchement du processus et le constat d'extension de la surface de forêt de production.

Variation des surfaces de forêts, par niveau de réserve utile en eau des sols

	2005-2007			2011-2013			Évolution entre les deux périodes (* : écarts significatifs)
Niveau de réserve utile	Surface forêt de production						
mm eau	1000 ha						
Forte : >= 150 mm	1 885	±	71	1 948	±	76	64
Moyenne : 110 - 149 mm	2 316	±	80	2 172	±	83	-144
Faible : 70 - 109 mm	3 212	±	93	3 203	±	102	-9
Très faible : 30 - 69 mm	5 684	±	119	6 018	±	130	333 *
Extrêmement faible : < 30 mm	1 899	±	78	2 281	±	92	382 *
Non défini	n.s.			n.s.			
Total	15 197	±	118	15 811	±	129	614 *

Une comparaison des surfaces forestières selon l'estimation de la réserve utile de leurs sols est présentée dans le tableau ci-dessus. Ces résultats permettent d'observer que les augmentations significatives de surfaces relevées entre les années moyennes 2006 (2005 à 2007) et 2012 (2011 à 2013) ne concernent que deux classes de réserve utile : celles des sols à très faible réserve utile en eau (30 à 69 mm) et celles des sols à réserve utile extrêmement faible (moins de 30 mm). Les surfaces en cours d'extension de la forêt sur cette période ne correspondront donc probablement pas à des surfaces à potentialités de production aussi élevées que les surfaces antérieurement forestières. Elles peuvent avoir été gagnées dans des régions à faible réserve utile moyenne, mais aussi ponctuellement sur des sites à faible réserve utile (RU) dans diverses régions sujettes à déprise agricole. Les sols à faible et très faible RU manifestent des potentialités de production nettement plus faibles en comparaison de l'ensemble des sols forestiers : pour la période 2003-2011, la production moyenne est de 5,4 m³/ha/an tous points confondus alors qu'elle n'est que de 4,9 pour les sols à très faible réserve utile et 3,6 pour ceux à réserve utile extrêmement faible.

Source : IGN, inventaire forestier national.

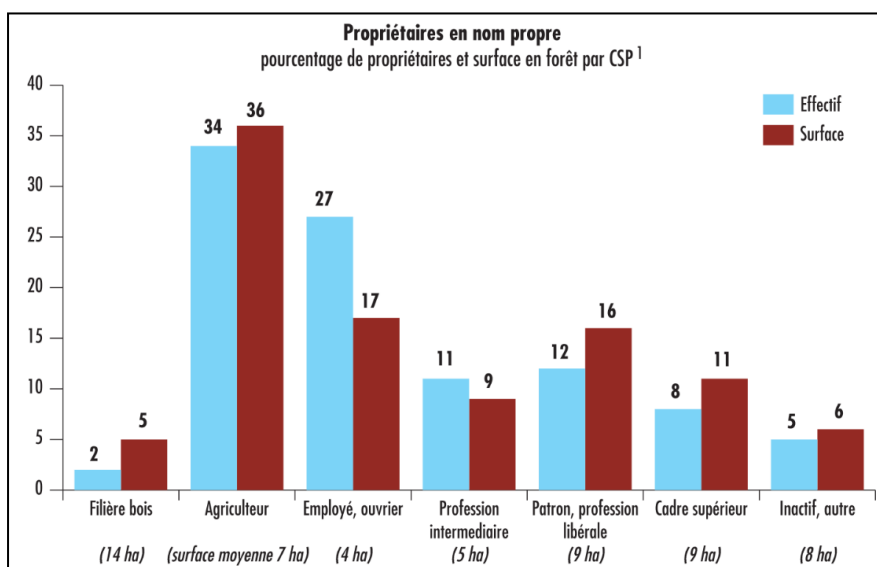
⁹⁷ Les premiers boisements sont les opérations de boisement de terrains qui n'avaient pas de vocation forestière avant ce boisement. Le premier boisement se différencie du reboisement qui concerne des parcelles qui étaient déjà à l'état boisé.

⁹⁸ Le niveau du seuil de 0,5 ha pour l'évaluation environnementale est souvent cité par les propriétaires et opérateurs comme un facteur freinant, voire bloquant, les projets de boisement, du fait de la complexité administrative et des incertitudes en résultant.

1.4. La structure foncière de ces nouvelles forêts n'est pas la plus propice à la gestion

Outre leur faible productivité, les terres abandonnées ne sont pas les plus propices à une gestion active : propriétaires non motivés, morcellement au fil du temps... L'examen des cartes d'extension des forêts au cours du XX^e siècle montre que les nouvelles forêts se situent dans les zones où les forêts privées sans PSG sont actuellement largement majoritaires. L'inventaire forestier national indique d'ailleurs que si la surface des forêts privées a progressé de 100 000 ha/an en moyenne depuis 2005, 92 000 ha n'ont pas la superficie minimale pour un PSG.

Les propriétaires issus du monde agricole (en activité ou retraité) représentent ainsi une proportion importante, comme l'indique les résultats des enquêtes sur la structure de la propriété privée. Un examen de la part des surfaces de propriété par département selon la catégorie de propriétaire dominant montre une forte représentativité de la propriété agricole dans l'ouest et le sud de la France, là où l'extension des forêts a été la plus forte.

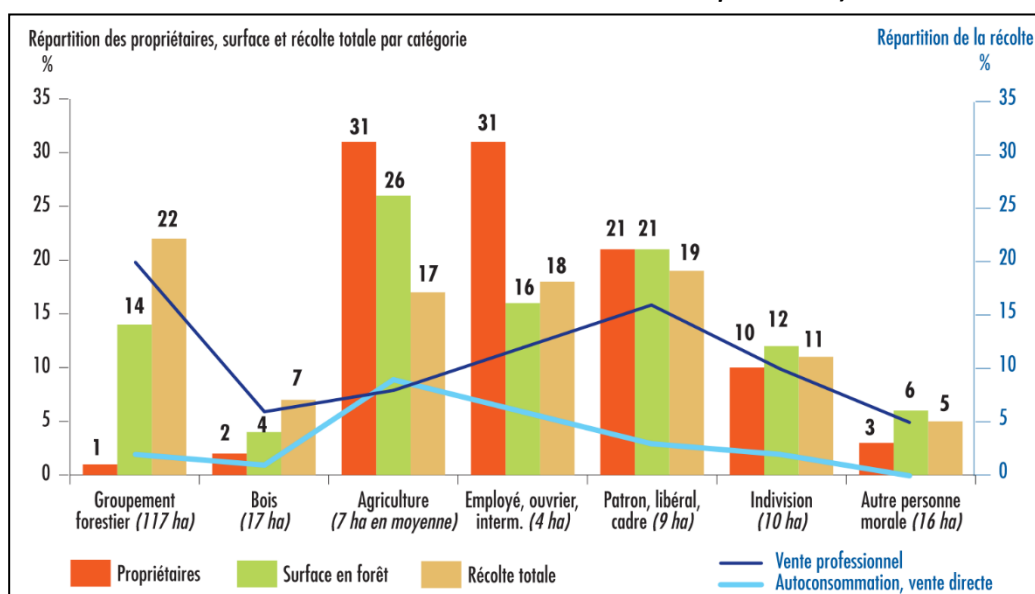


Catégorie de propriétaires dominante selon la part de sa surface en forêt privée dans celle du département et surface occupée par cette catégorie dans le département

Source : Agreste – Enquête SFP 2012, propriétés forestières privées de 1 ha et plus.

Globalement, les propriétés relevant du monde de l'agriculture sont également celles dont l'intensité de récolte est faible, mais où le pourcentage d'autoconsommation est le plus fort.

Répartition des propriétaires, de la surface en forêt, des volumes de bois récoltés (vendus à des professionnels, autoconsommés ou vendus directement à des particuliers)



Source : Agreste – Enquête SFP 2012, propriétés forestières privées de 1 ha et plus.

1.5. Les friches ou accrus

Les flux annuels de surface de terres agricoles délaissées n'étant pas constant et les conditions de croissance de la végétation étant fluctuantes, il est difficile de modéliser et d'évaluer précisément le stock actuel de surfaces abandonnées par l'agriculture qui ne sont pas encore « forêt ».

L'inventaire forestier national évalue statistiquement l'accroissement de surface forestière à hauteur d'environ 80 000 ha/an (cf. 1.1). Les enquêtes plus ciblées sur les changements d'usage des terres agricoles, comme l'enquête TERRUTI, indiquent des flux nets annuels de l'ordre de 40 000 ha au bénéfice des surfaces forestières⁹⁹. Il reste difficile de rapprocher les deux chiffres compte-tenu des différences méthodologiques. Le CITEPA, dans le cadre de l'inventaire national des émissions de GES mesure aussi chaque année les changements d'usage des sols (rubrique UTCATF). Les données TERRUTI étaient auparavant utilisées, mais dorénavant le suivi des terres utilise un maillage de 0,25 ha de l'ensemble du territoire pour détecter ces changements en utilisant différentes sources combinées de produits cartographiques (images satellite SPOT, base de données Forêt de l'IGN, orthophotographies de l'IGN, Registre parcellaire graphique, Corine Land Cover...). La matrice de passage entre 2020 et 2021 est reproduite ci-dessous¹⁰⁰.

1 an	F	C	P	H	A	O	Total 2020
F	18 530 389	9 371	21 543	415	4 968	180	18 566 867
C	30 091	22 278 496	159 533	8	16 066	0	22 484 193
P	39 795	38 760	8 719 530	7	995	0	8 799 087
H	828	99	5	484 741	138	0	485 810
A	2 919	0	0	0	4 325 438	0	4 328 357
O	329	0	0	0	21	255 346	255 696
Total 2021	18 604 351	22 326 725	8 900 611	485 171	4 347 626	255 526	54 920 010

F : forêt – C : cultures – P : prairies – H : zones humides – A : terrains artificialisés – O : autres

Toutefois, l'approche du CITEPA ne permet pas pour l'instant de repérer en continu les passages à la forêt dans le détail. En effet, faute de données cartographiques annuelles robustes, les boisements sont détectés à partir de la comparaison des deux millésimes de la BD Forêt de l'IGN par département¹⁰¹. Le changement est attribué à une année tirée au sort dans la sous-période [année BDF1 - année BDF2] et l'usage initial est celui de la maille l'année BDF1. De ce fait, les changements annuels cultures à forêts sont plutôt liés à cette méthodologie qu'à un changement « réel » qui résulterait d'un boisement volontaire d'une culture. Le changement culture vers friches (= prairies arbustives, landes...) n'est ainsi pas spécialement détecté et une maille "culture" l'année de BDF1 le reste jusqu'à ce qu'il soit détecté comme "forêt" l'année de la BDF2, le changement étant alors affecté aléatoirement entre les deux. Pour détecter les passages à la forêt après la BDF2 (année la plus récente : 2015), une méthode hybride est employée en rajoutant en post traitement des changements non géolocalisés : le taux annuel moyen détecté sur la période couverte est extrapolé aux périodes non couvertes. Les calculs carbone de changement d'usage, finalité de l'exercice, ne se font alors plus à la maille de 0,25 ha pour ces périodes extrapolées, mais sur la base d'agréats par région.

⁹⁹ Dossier Agreste « Occupation du sol entre 1982 et 2018 » sur la base des enquêtes Terruti sur la période, avril 2021.

¹⁰⁰ La surface de forêt indiquée par le CITEPA est différente de celle de l'IGN avec l'inventaire forestier national. Deux sources de divergence sont invoquées. D'une part, les placettes IFN (terrain) évaluent les forêts sous les houppiers, alors que le CITEPA utilise la BD Forêt ou la vision aérienne détoure les houppiers : cela crée un effet de lisière et donc un delta. D'autre part, le nouveau suivi multisource du CITEPA peut rajouter des forêts hors BD Forêt, ce qui grossit le bilan : les bosquets (type forêt mais < à 0,5 ha) sont notamment difficilement séparables des forêts et se retrouvent dans le total forêt alors qu'ils devraient être en catégorie « grassland - prairies » (comptabilité GIEC).

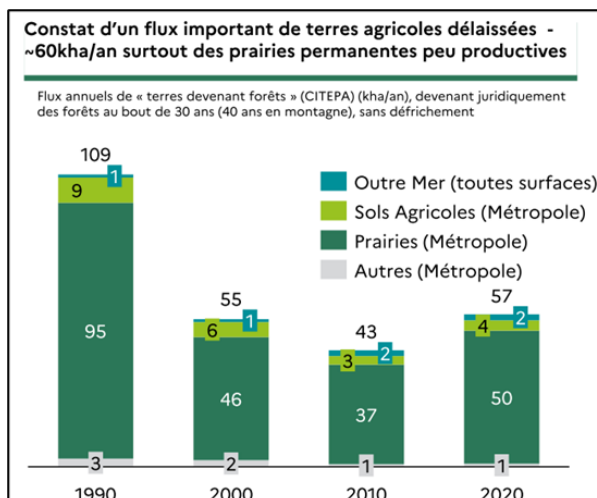
¹⁰¹ L'intervalle des prises de vues entre BDF1 (1990 à 2002) et BDF2 (2004 à 2015) est variable par département. Il est a priori de l'ordre d'une douzaine d'années, un peu moins dans certains départements de l'Est (6 ans pour les Vosges, 8 ans pour la Meurthe-et-Moselle ou la Meuse), mais plus dans des départements du Sud (16 ans dans l'Aude, les Pyrénées-Orientales ou l'Ardèche, 18 ans pour l'Aveyron ou 19 ans pour le Tarn), ces derniers étant d'ailleurs sans doute plus sujets à des dynamiques d'enfrichement/afforestation.

La méthodologie actuellement utilisée par le CITEPA est donc intéressante et adaptée à des calculs d'émission de GES dues au changement d'usage, mais elle ne permet pas pour l'instant de suivre précisément la séquence d'abandon d'une culture ou d'une prairie permanente, passage par un état de friche, avant d'atteindre un état de forêt. Une amélioration interviendra quand le nouveau référentiel OCS GE¹⁰² de l'IGN sera disponible régulièrement.

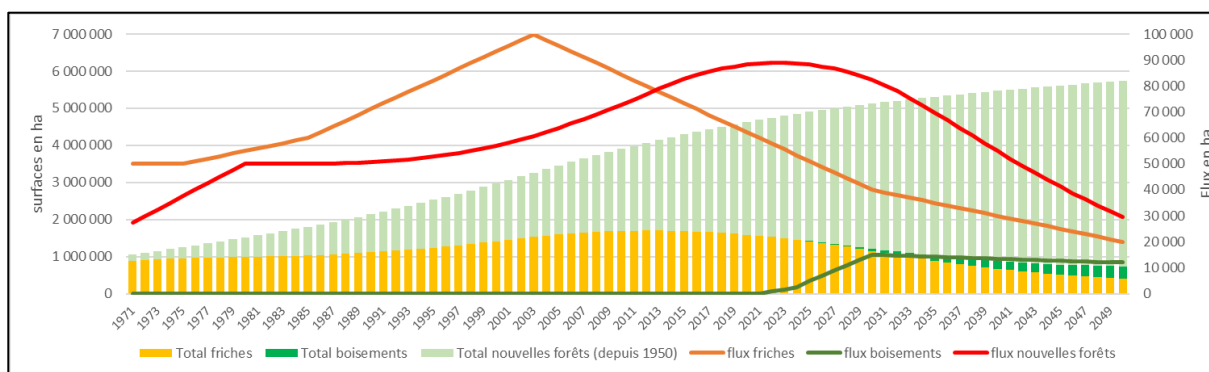
Les analyses du SGPE indiquent également des chiffres de changement d'usage des terres (graphique ci-contre). Ils correspondent à l'édition 2022 des données du CITEPA qui reposait sur l'ancien mode de suivi des terres basé sur l'enquête Teruti (avant l'utilisation des produits cartographiques multisource).

En tout état de cause, l'ordre de grandeur des surfaces de cultures, prairies temporaires ou prairies permanentes qui sont abandonnées est d'au minimum 40 000 ha net par an, ce qui alimente un stock de terres qui s'enrichissent avant de devenir forêt.

En posant l'hypothèse que le stade « forêt » est atteint en moyenne en 20 ans après l'abandon de la production agricole, ce serait environ 1 500 000 ha d'accrus qui seraient concernés aujourd'hui (estimation CGAAER modélisée à partir d'un flux annuel de surfaces agricoles abandonnées proportionnel au flux de nouvelles forêts constaté par l'Inventaire forestier national) comme l'illustre le graphique ci-dessous



Simulation des flux et surfaces de friches, forêts et boisements volontaires
(rythme d'abandon simulé à 40 000 ha/an en 2030 et 20 000 ha/an en 2050)



Simulation et traitement : CGAAER

Sans préjuger de l'évolution du flux de terres agricoles délaissées au cours de la prochaine décennie, ce stock de terres en voie d'afforestation, qui n'a pas encore atteint le stade de forêt, présente une opportunité pour boiser volontairement une partie de ces surfaces afin de constituer une nouvelle ressource forestière adaptée aux conditions climatiques futures, produisant plus de bois d'œuvre et stockant plus de carbone (cf. Méthode Boisement du label bas carbone). En outre, l'installation de

¹⁰² L'OCS GE – Occupation du Sol à Grande Échelle – est une base de données de référence pour la description de l'occupation du sol. Elle est produite à partir des prises de vues aériennes, des données existantes extraites des bases de l'IGN, et de toutes autres données mobilisables issues de référentiels nationaux ou locaux. Plus récemment, dans le cadre du dispositif de l'artificialisation des sols, elle est également produite grâce à des procédés inédits d'intelligence artificielle. L'OCS GE contient deux couches de données : d'une part l'occupation du sol qui décrit le territoire en couverture et usage du sol, d'autre part la zone construite, déduite de l'occupation du sol, qui englobe les zones bâties et leur environnement proche. La couverture du sol est une vue « physionomique » du terrain qui décrit les éléments structurant le paysage sans préjuger de leur fonction (ex : zone bâtie, surface d'eau, ...). L'usage du sol est une vue « anthropique du sol » qui indique le rôle que joue la portion de terrain en tant qu'activité économique. L'OCS GE couvrira d'ici fin 2024 l'ensemble des départements. Chaque département disposera à minima de deux millésimes correspondant aux ortho-photos disponibles au moment de la production.

nouvelles forêts sur des terres en friche, sous réserve de respecter les équilibres paysagers et des critères de diversification, est sans doute plus aisée que la transformation d'une forêt existante déjà constituée avec coupe des arbres en place et replantation.

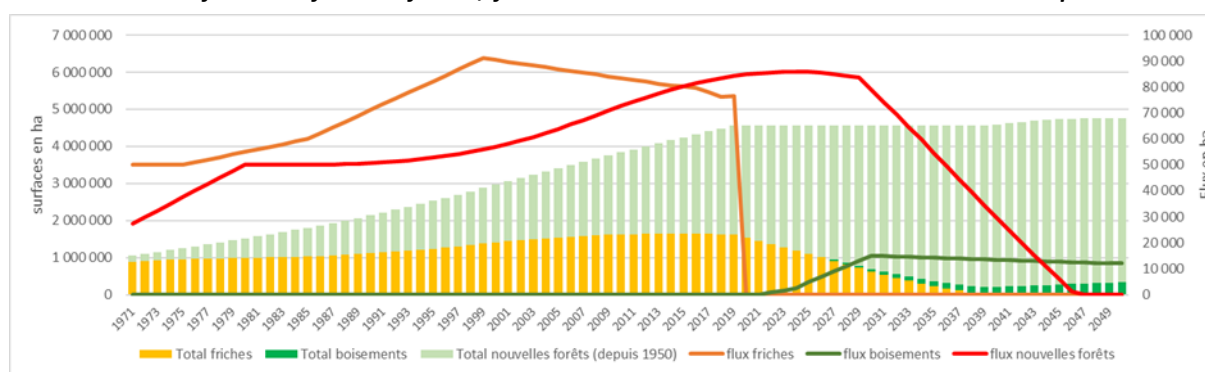
En ciblant uniquement des terres agricoles délaissées depuis plusieurs années, les travaux préparatoires à la SNBC 3 tablent sur un accroissement régulier de tels boisements pour atteindre 15 000 ha en 2030 soit, au total, 90 000 ha sur la période de dix ans à venir.

Cet objectif semble compatible avec le souhait exprimé par le monde agricole de ne pas grever outre mesure la possibilité de mobiliser des espaces à moyen terme pour répondre à des besoins fonciers induits par d'autres objectifs stratégiques, alimentaires et énergétiques notamment¹⁰³. Une approche territorialisée est indispensable pour envisager concrètement les arbitrages à opérer localement, notamment entre le maintien d'activités agricoles et pastorales et l'orientation vers la gestion forestière. En effet, les sensibilités sont très différentes selon le taux de boisement, le dynamisme ou le déclin de certaines filières de production, les pressions sur le foncier, le risque incendie de forêt, de surfaces agricoles et de végétation (rôle des espaces agricoles et du sylvopastoralisme dans la prévention), etc. Des règles claires, seront à prendre en compte dans les territoires pour accepter ou refuser les projets de mise en valeur forestière des surfaces de terres délaissées. Plusieurs instances pourraient assurer cette consultation : les commissions de préservation des espaces agricoles, naturels et forestiers (CDPENAF), les commissions régionales de la forêt et du bois (CRFB), des commissions départementales/régionales ad hoc, les comités départementaux d'aménagement foncier (CDAF), les commissions départementales d'orientation de l'agriculture (CDOA)...

Dans les derniers scénarios SNBC, les « accrus forestiers » passent d'environ 80 000 ha/an en 2015 à 76 000 ha/an en 2020, 50 000 ha/an en 2025, 15 000 ha/an en 2030, 8 000 ha/an en 2040 et 1 000 ha/an en 2050. Parallèlement, les boisements volontaires d'accrus passent de 0 ha/an en 2020 à 5 000 ha/an en 2025, 15 000 ha/an en 2030, 13 500 ha/an en 2040 et 12 000 ha/an en 2050.

Toutefois le passage de 80 000 ha/an en 2015 à 15 000 ha/an en 2030 ne peut correspondre à des accrus forestiers car ceux-ci sont déterminés par le flux d'abandon de terres agricoles remontant 15 à 20 ans auparavant, or ce flux ne s'est pas tari depuis les années 2000¹⁰⁴. À titre d'illustration, le graphique ci-dessous simule une déprise agricole nulle à partir de 2020 et montre que le flux de nouvelles forêts est encore 80 000 ha/an en 2030 et ne baisse qu'ensuite pour s'éteindre vers 2045.

Simulation des flux et surfaces de friches, forêts et boisements volontaires avec arrêt de la déprise en 2020



Simulation et traitement : CGAAER

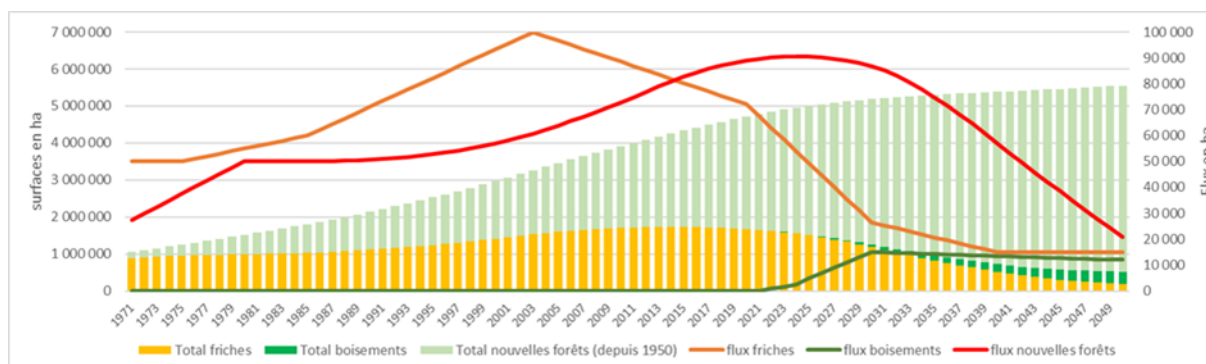
Par ailleurs le scénario SNBC indique pour la partie agricole une baisse de la SAU de l'ordre de 60 000 ha/an sur 2020-2030, 30 000 ha/an sur 2030-2040 et 20 000 ha/an sur 2040-2050, dont une partie est dévolue aux « accrus forestiers » (le reste à l'artificialisation et à des cultures lignocellulosiques).

¹⁰³ Pour mémoire, les forêts issues de terres agricoles abandonnées depuis moins de 30 ans (40 ans en zone de montagne) sont exonérées d'autorisation de défrichement en cas de remise en culture.

¹⁰⁴ L'inventaire forestier national « voit » le flux annuel de nouvelles forêts et celui-ci est relativement constant, autour de 80 000 ha depuis les années 80 ce qui implique que le flux de terres agricoles abandonnées est également assez régulier et du même ordre de grandeur. Avec les réserves méthodologiques de comparaison avec l'inventaire, le CITEPA constate aussi un flux annuel assez régulier d'au moins 40 000 ha de nouvelles forêts.

Le graphique ci-dessous simule les flux correspondants. Ce ralentissement considérable du flux annuel de terres délaissées se manifesterait dans le flux de nouvelles forêts avec retard, ce dernier s'élevant à 80 000 ha/an en 2030, 60 000 ha/an en 2040 et encore 20 000 ha/an en 2050.

Simulation des flux et surfaces de friches, forêts et boisements volontaires avec rythme de déprise des derniers scénarios SNBC



Simulation et traitement : CGAAER

Manifestement, il y a confusion temporelle entre les flux de terres agricoles délaissées (abandon de l'activité agricole - déprise) et les flux de nouvelles forêts ou « accrus forestiers ». Ces deux flux ne sont pas concomitants, sauf quand une terre agricole (culture, prairie) devient immédiatement forêt par boisement volontaire, ces derniers étant toutefois très limités jusqu'à présent.

2. Quel potentiel de récolte supplémentaire de bois dans les forêts existantes, en respectant les critères de gestion durable ?

2.1. Parallèlement à l'augmentation des surfaces, une progression du stock essentiellement structurelle et démographique

Parallèlement à l'extension en surface (cf. 1.1), la forêt française connaît un accroissement remarquable de son stock de bois sur pied. Alors que la surface a augmenté de 60 % entre 1892 et 2010, le stock sur pied a augmenté de 300 %. Cette capitalisation résulte à la fois de la densification des forêts préexistantes à la fin du XIX^e siècle (les meilleures simulations montrent que la densité tournait autour de 65 -70 m³/ha en moyenne autour de 1900) et de la croissance des peuplements nouveaux issus de l'expansion en surface.

De fait, depuis 1975 et les premières estimations nationales de l'inventaire forestier national (IFN), l'augmentation des stocks est trois fois plus rapide que l'augmentation en surface (+ 61 % contre +19 %). Cet accroissement du stock relève pour 50 % des forêts privées feuillues, pour 30% des forêts privées résineuses, pour 10 % des forêts communales feuillues et pour 5% des forêts communales résineuses. Les forêts domaniales n'interviennent que marginalement dans cette dynamique de croissance en volume.

Cette dynamique globale de densification des forêts « anciennes » et de croissance des forêts « récentes », ne montre pas de signes d'essoufflement jusqu'à présent. Les travaux récents conduits par le laboratoire de l'inventaire forestier et, notamment, la thèse soutenue par Anaïs Denardou-Tisserand en février 2019¹⁰⁵ permettent d'aller plus loin avec une analyse contextualisée des mécanismes d'expansion du stock de bois sur pied.

2.2. Une grande partie de l'expansion du stock correspond à une maturation « normale » des peuplements

L'exploitation du patrimoine de données de l'inventaire, couplée aux statistiques anciennes disponibles, a permis de fournir de nombreux résultats sur l'évolution des surfaces et des stocks dans les forêts françaises. Ces travaux illustrent que l'évolution constatée est largement le résultat d'un effet démographique qui modifie progressivement le visage de la forêt française et qui se poursuit encore aujourd'hui.

À partir des données de l'IFN, l'analyse repose sur le calcul du bilan de stock (recrutement, accroissements, mortalité, prélèvements), pour différentes classes de diamètre, entre différents cycles d'une dizaine d'années de l'inventaire. Cette analyse est contextualisée selon les régions écologiques de l'inventaire (GRECO), la propriété, les espèces forestières et leur répartition par classe de diamètre. In fine, il est possible de ventiler plus de 80 % de l'expansion des stocks selon quatre grands compartiments, décrits ci-après.

1	2	3	4
Forêts privées résineuses jeunes (Massif central - Nord-Ouest)	Forêts majoritairement résineuses matures toutes propriétés (montagne)	Forêts privées traditionnelles gérées divers feuillus et résineux (Nord-Est - Sud-Ouest)	Chênaies de plaine en maturation/conversion toutes propriétés (Centre-Nord - Sud-Ouest) Hêtraies-chênaies - communales et privées (Nord-Est et moyenne montagne) Feuillus d'accompagnement et de taillis privés (Nord-Est - Sud-Ouest - Massif central)

Source : A. Denardou-Tisserand (2019). Changements du stock de bois sur pied des forêts françaises. Université de Lorraine. 344 p.

Chacun de ces grands compartiments présente les caractéristiques suivantes.

1. Ce faciès correspond à de jeunes peuplements résineux (douglas et épicéas principalement), issus de programmes de boisements récents et plus anciens (fin du FFN dans le massif central).

¹⁰⁵ A. Denardou-Tisserand (2019). Changements du stock de bois sur pied des forêts françaises - Description, analyse et simulation sur des horizons temporels pluri-décennal (1975 - 2015) et séculaire à partir des données de l'inventaire forestier national et de statistiques anciennes. Université de Lorraine. 344 p.

Selon leurs dynamiques de croissance (essence, adaptation aux stations, intensité des éclaircies), ces peuplements atteignent plus ou moins rapidement leur diamètre d'exploitabilité.

2. Ce facies recouvre des résineux et divers feuillus de haute et moyenne montagne de toute propriété. Il s'agit de forêts matures, dont l'exploitation est souvent difficile (pente, distance de débardage...). La sous exploitation conduit à une capitalisation en gros et très gros bois.
3. Ce facies regroupe essentiellement des forêts privées traditionnelles feuillues et résineuses (forêts privées de feuillus divers et pins ou forêts communales et privées de feuillus secondaires et résineux), gérées (avec des prélèvements). L'accroissement de stock traduit ici une intensité de gestion-exploitation en dessous des possibilités. Toutefois, les stocks de bois de ces forêts restent en moyenne plus faibles qu'en forêt publique ; le choix de ne pas prélever l'intégralité de l'accroissement biologique peut résulter d'un objectif d'accroissement en valeur du capital forestier.
4. Le dernier facies, qui explique près de la moitié de l'expansion globale en stock de la forêt française, correspond à des grandes essences feuillues de plaine et moyenne montagne (chênes de plaine du Centre-Nord et Sud-Ouest de toute propriété, chênes et hêtres plus matures des plaines du NE et des massifs de moyenne montagne en forêt communale et privée, feuillus d'accompagnement et taillis des forêts privées du quart NE et du massif central, châtaigniers privés du SO et du MC). L'expansion est due pour partie à des petits diamètres et pour partie à des diamètres plus importants de feuillus sociaux ou d'accompagnement, faisant écho aux strates de taillis ou taillis sous futaie en maturation/conversion.

Enfin, certaines forêts publiques, essentiellement domaniales, ne contribuent pas du tout à l'expansion globale en stock. Une petite décapitalisation dans les feuillus de plaine (dont chênes), essentiellement en domanial (Nord-Est, Centre Nord), est compensée par une légère capitalisation dans les hêtraies-chênaies (plaine) et hêtraies-sapinières (montagne) publiques.

In fine, l'expansion en stock de la forêt française semble donc principalement expliquée par une maturation « normale » des peuplements.

Les enjeux de mobilisation de bois doivent être alors appréciés selon les principaux contextes.

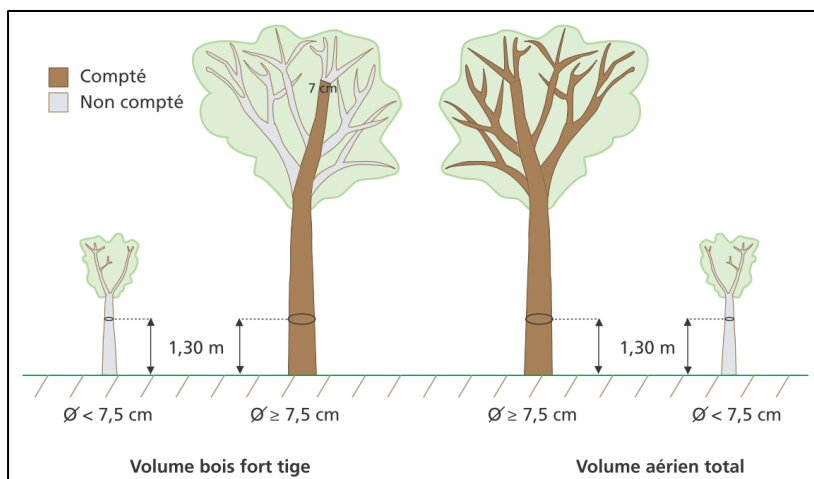
- Dans les jeunes ressources résineuses ou les ressources feuillues en maturation, avec des conditions d'accessibilité plutôt favorables, l'exploitation dépendra de la qualité des bois et de la demande, avec également l'enjeu du renouvellement après exploitation.
- Les forêts de montagne en condition d'exploitation difficile nécessiteraient une amélioration forte des techniques de débardage en milieu difficile (câble) et une amélioration de l'accessibilité des forêts ; en l'absence d'exploitation, les conséquences d'une surmaturation des peuplements, puis de leur dégradation et les incertitudes de renouvellement sont à envisager.
- Dans les forêts privées matures, souvent gérées, une intensification des prélèvements semble possible, avec l'épée de Damoclès du renouvellement à réussir après exploitation, dans un contexte d'incertitude dû au changement climatique.

2.3. Le piège des chiffres de production biologique et de récolte

D'une façon générale, seuls sont pris en compte dans l'inventaire les arbres dits « recensables » dont la circonférence à 1,30 m est supérieure ou égale à 23,5 cm (7,5 cm de diamètre).

Pour chaque arbre, une part du bois en rebut (bois pourri, décheté, piqué, inutilisable même pour du chauffage, voire absent : arbre creux, tige non convexe) est estimée. Cette part est systématiquement déduite dans les résultats publiés.

Le volume que cherche à estimer l'IGN est le volume « bois fort tige sur écorce ». Il englobe la tige principale depuis le niveau du sol (à l'amont lorsque le terrain est en pente) jusqu'à une découpe de 7 cm de diamètre. Ce volume est calculé par tarifs de cubage, à partir de la circonférence à 1,30 m et de la hauteur total

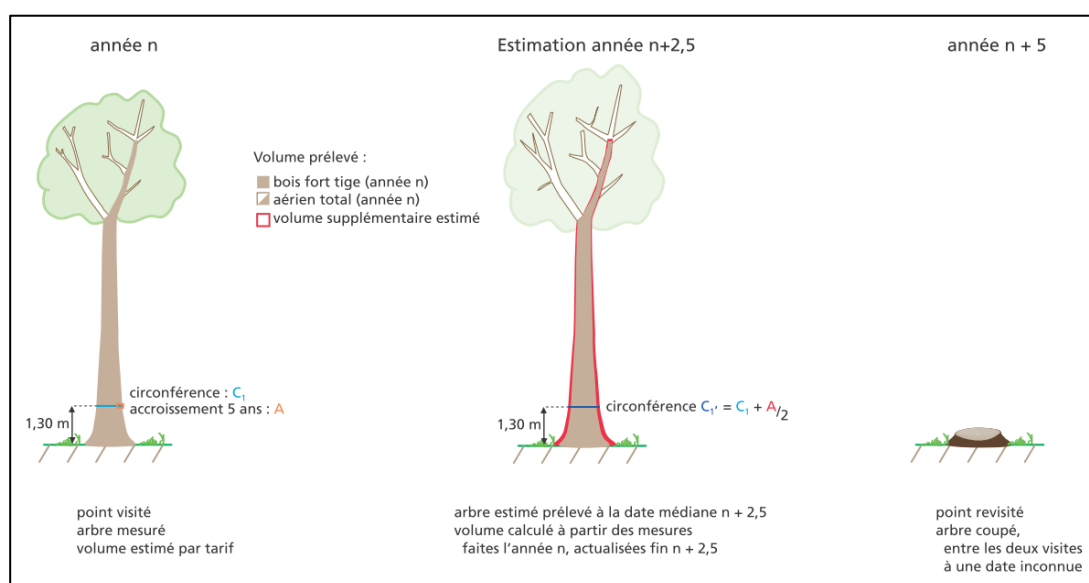


Le volume aérien total correspond au volume de la tige, depuis le niveau du sol jusqu'à la cime de l'arbre, et des branches indépendamment de leur diamètre. Il est estimé à l'aide de tarifs de cubage issus du projet de recherche national Carbofor (Vallet et al. 2006, Saint André et al. in Loustau 2010). Ces modèles ont été calibrés pour les principales essences de la forêt française à partir de données de cubage historiques (période allant de 1920 à 1950 environ) organi-

sées en base de données par l'INRA. Ainsi, pour un prélèvement estimé actuellement à 51 Mm³ bois fort tige, le volume aérien total correspondant est de 72 Mm³.

L'estimation du volume aérien total est toutefois moins robuste que celle du volume bois fort tige. Cela tient notamment au fait que les tarifs de cubage ont été établis sur des données anciennes et sur un sous-échantillon de la forêt française. Or au cours des dernières décennies, la structure forestière a fortement évolué (moins de taillis et taillis sous futaie, plus de futaies), et avec elle la forme des arbres également. La surface forestière a également fortement augmenté dans certaines régions autrefois peu forestières et les jeux de données de calibration des tarifs de cubage couvrent peu ou mal certains secteurs géographiques ou certaines essences pionnières.

Pour estimer les prélèvements, l'IGN revient sur toutes les placettes inventoriées cinq ans auparavant et sur lesquelles des arbres vivants recensables avaient été observés. Sur les points où au moins un prélèvement de moins de 5 ans est signalé, chaque arbre qui était vivant et inventorié au passage précédent est noté comme coupé ou non. Un arbre est noté coupé que la grume soit vidangée ou non et que la souche soit déracinée ou non. Il est alors possible de calculer les prélèvements réalisés sur la période de cinq ans. Ne connaissant pas la date exacte de coupe, on considère que celle-ci a eu lieu en moyenne 2,5 ans après le premier passage des agents de terrain. La croissance des arbres coupés (= gain de volume sur les 2,5 ans théoriques précédant la coupe) est prise en compte pour actualiser les volumes prélevés à la date de coupe.

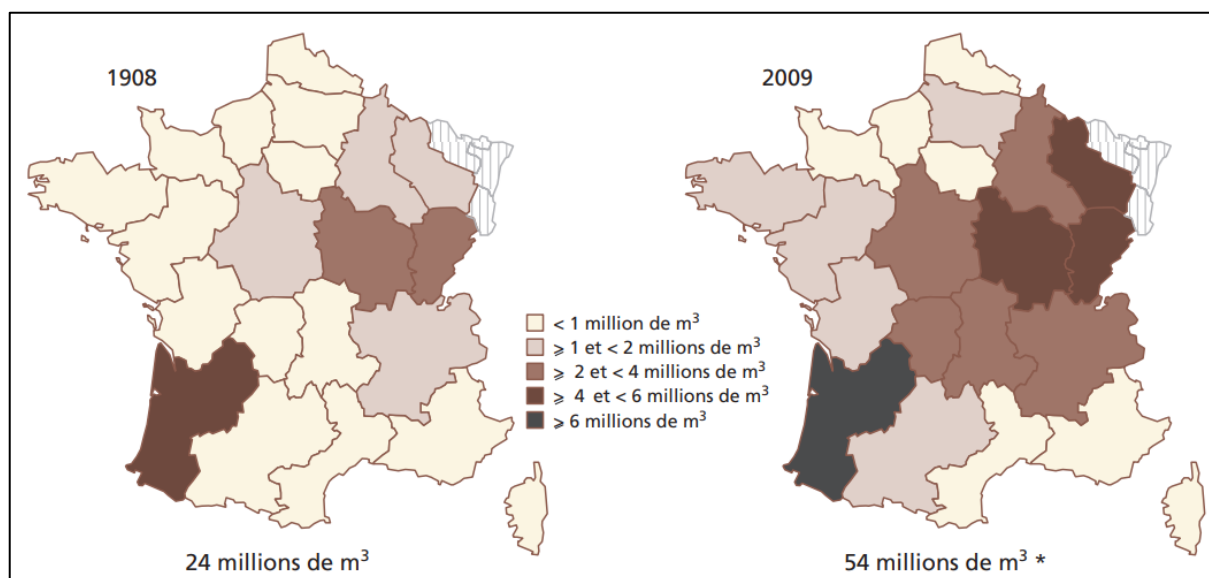


Source : IGN. Pour bien comprendre les résultats du kit « Programme régional de la forêt et du bois. 2016

2.4. Un potentiel de récolte actuellement non mobilisé est disponible, tout en restant dans les critères de gestion durable des forêts

Si les récoltes de bois ont fortement augmenté au cours du XX^e siècle, accompagnant l'extension en surface et en stock de la forêt française (cf. graphique ci-dessous), les études montrent qu'un potentiel physique et économique existe pour augmenter ces récoltes.

Évolution des volumes de bois récoltés

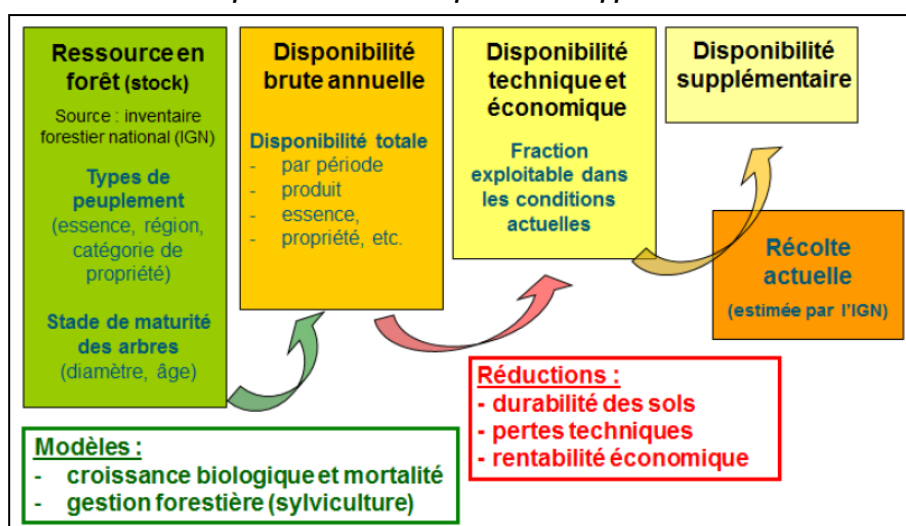


* Afin de comparer la récolte en 1908 et la récolte actuelle, les volumes actuels sont exprimés en volume aérien total (tronc et branches)

Source : IGN. Un siècle d'expansion des forêts françaises. IF n° 31. 2013.

Ce potentiel a été évalué dans l'étude de disponibilité en bois d'origine forestière pour l'énergie et les matériaux en 2035, réalisée par l'IGN et le FCBA en 2015. Cette étude a été adaptée en 2019 pour mieux distinguer la qualité bois d'œuvre de la qualité bois d'industrie. Le principe de calcul des disponibilités supplémentaires est expliqué dans le schéma ci-dessous.

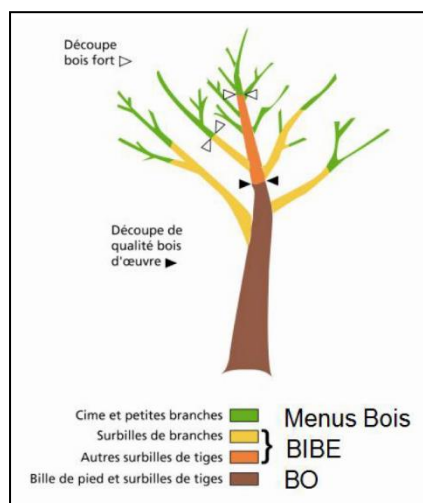
Principes de calcul des disponibilités supplémentaires



Source : IGN - FCBA.

Des scénarios d'évolution de la disponibilité en bois sont réalisés en divisant la forêt française en domaines d'étude relativement homogènes sur lesquels sont appliquées les mêmes hypothèses de croissance biologique, de mortalité, et de prélèvement, à conditions de développement données (classe d'âge ou de diamètre). Les taux de coupes constatés reflètent des pratiques moyennes et intègrent de manière implicite tous les facteurs environnementaux, économiques et sociaux qui

pèsent sur la mobilisation des bois, comme la difficulté physique d'exploitation, la préservation de la fertilité des sols, les zonages environnementaux, la demande et les marchés des bois, la motivation des propriétaires, etc.



La ventilation des bois selon les grandes catégories d'usage (bois d'œuvre - BO, bois d'industrie - BI, bois énergie - BE, menus bois) résulte d'un classement des arbres sur pied fondé sur la dimension et la qualité des grumes et billons, indépendamment du marché des essences ¹⁰⁶. L'usage potentiel (P) correspond à la valorisation la plus élevée possible, en termes économiques.

Dans cette étude, les modèles de croissance et de mortalité utilisés ne tiennent pas compte des effets liés aux aléas exceptionnels qui pourraient survenir à l'échéance de 2035 (tempêtes, incendies, maladies, ravageurs) ni des effets du changement climatique.

Deux simulations ont été réalisées, selon des hypothèses d'évolution tranchées.

- Un scénario à sylviculture constante qui continue d'appliquer sur la période allant de 2016 à 2035 les taux de coupe observés en forêt au cours de la période 2005-2013. Il simule un prolongement des pratiques actuelles sans faire varier les paramètres du scénario de coupe. Dans le contexte d'une forêt française globalement jeune et qui ne se trouve pas en situation d'équilibre, l'application d'un tel scénario révèle l'effet démographique de vieillissement progressif de la ressource. Cette approche empirique (statistique) et démographique de modélisation de la gestion représente bien les tendances lourdes de la forêt française ; elle est toutefois raisonnablement limitée aux vingt prochaines années.
- Un scénario de dynamisation progressive de la gestion qui consiste à intensifier globalement la gestion forestière en généralisant progressivement les pratiques réelles relevées dans les peuplements gérés les plus activement (par exemple : mise en gestion de nouvelles forêts privées sans PSG, rattrapage des peuplements en retard d'éclaircie ou raccourcissement progressif des durées de révolutions...). Le scénario ne suppose pas de rupture dans les dimensions demandées par les marchés et reste donc conservatif sur les gros et très gros bois actuellement peu mobilisés. Les pratiques plus dynamiques sont appliquées progressivement à de nouvelles surfaces forestières selon le type de propriétés et les enjeux, les zones sans enjeu de production de bois étant exclues.

Le calcul de la disponibilité technico-économique

La disponibilité technico-économique est la part de la disponibilité brute qui est techniquement et économiquement exploitable, c'est-à-dire de façon rentable à la fois pour le propriétaire, l'exploitant, et l'utilisateur final. Pour calculer cette disponibilité, on estime successivement :

La valeur des bois sur pied, compte tenu des essences, du volume et de la dimension des bois présents ;

Le coût de leur exploitation, compte tenu là aussi des essences, du volume unitaire, mais aussi des conditions d'exploitation ;

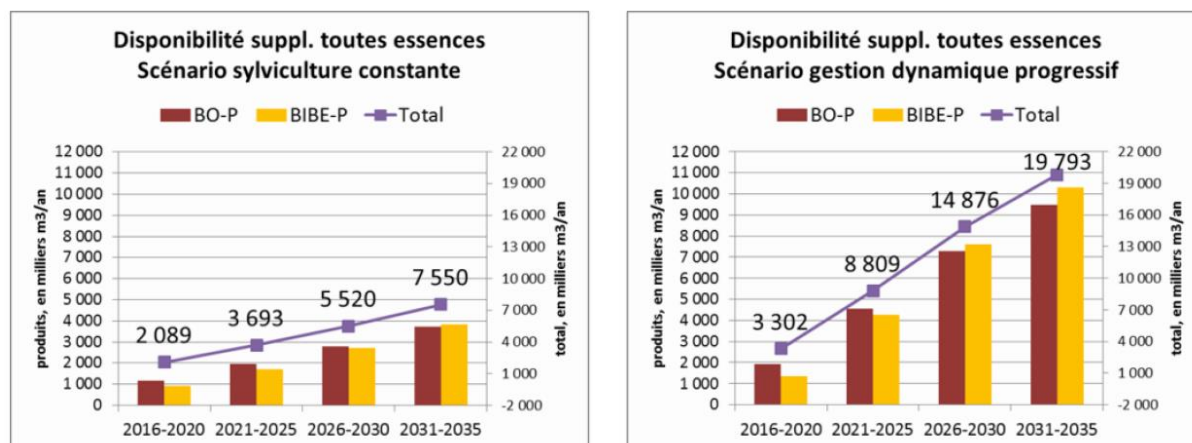
La valeur des produits bord de route finalement extraits. On tient compte ici des pertes d'exploitation et des précautions environnementales pour l'exploitation des rémanents ;

Et enfin on calcule le bilan financier de l'opération, qui permet de déterminer si l'opération est économiquement rentable

Les conséquences de la présence de réglementations particulières sur le site ont été prises en compte en sus, en majorant le coût d'exploitation d'un montant forfaitaire de 5 €/m³.

¹⁰⁶ Le volume estimé par l'Inventaire forestier est le volume « bois fort tige sur écorce ». Il englobe la tige principale depuis le niveau du sol jusqu'à une découpe de 7 cm de diamètre. Ce volume est calculé par tarifs de cubage, à partir de la circonférence à 1,30 m, la hauteur totale et la hauteur de découpe (depuis 2014). Les autres volumes sont calculés en utilisant des coefficients d'extension.

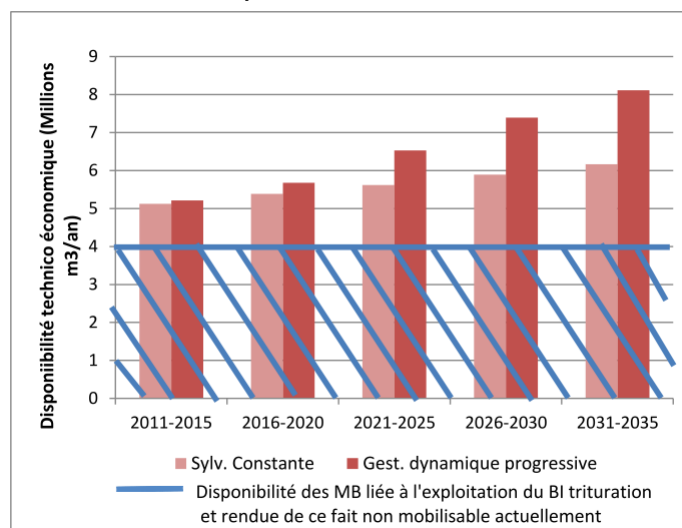
Disponibilités supplémentaires en bois d'œuvre, bois d'industrie et bois énergie jusqu'en 2035



Source : IGN - FCBA. 2016.

Le PNFB s'est appuyé sur cette étude et a retenu un objectif de 12 Mm³ de récolte supplémentaire en 2026, se décomposant en + 8,8 Mm³ pour le BO-P et le BIBE-P (en retenant le scénario de gestion dynamique progressif) et + 3,1 Mm³ pour les menus bois¹⁰⁷.

Disponibilité en menus bois



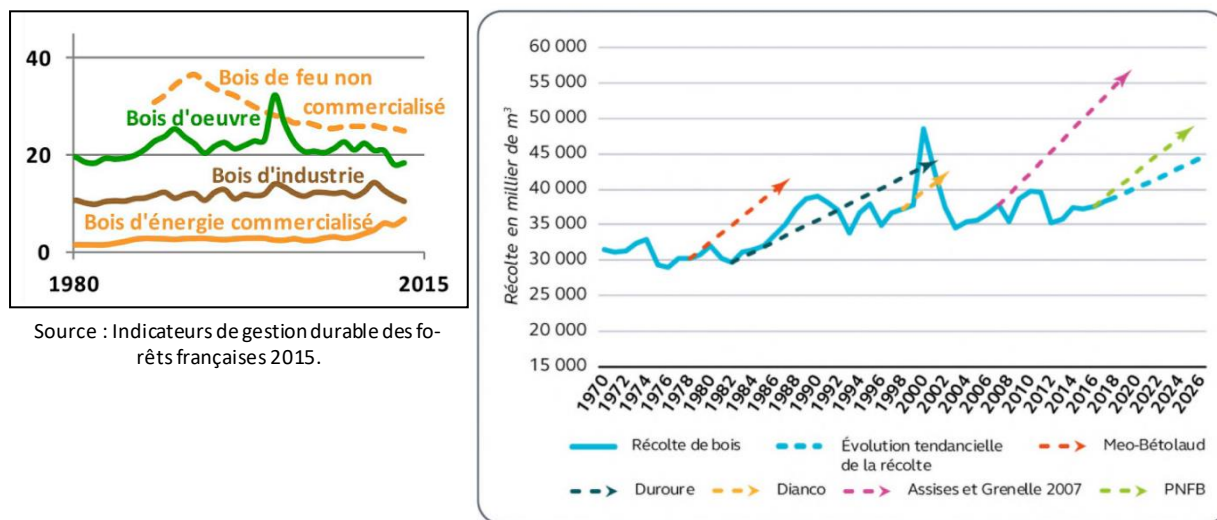
Source : IGN - FCBA. 2016.

La dernière SNBC s'alignait sur ces objectifs, avec une augmentation de la commercialisation de bois de 12 Mm³ par an à l'horizon 2026 (PNFB), puis une poursuite de cette augmentation par la suite jusqu'en 2035 et ensuite un accroissement de + 0,8 Mm³ par an à partir de 2036 jusqu'en 2050. La cible était donc une augmentation d'environ 36 Mm³ d'ici 2050, soit un doublement de la récolte commercialisée actuelle (la récolte autoconsommée par les ménages se chauffant au bois est considérée comme stable, l'augmentation du nombre de foyers étant compensée par un meilleur rendement énergétique du parc d'appareil de chauffage).

L'objectif d'augmentation des récoltes, s'il est cohérent avec le potentiel forestier récoltable en respectant des critères de gestion durable, relève d'un scénario de rupture. Un tel objectif, prôné depuis des dizaines d'années, n'a en effet jamais pu se concrétiser comme l'indique le graphique ci-dessous ; il nécessite de lever de nombreux obstacles en amont, essentiellement auprès des propriétaires privés, mais aussi d'adapter l'outil de transformation industriel pour qu'il puisse valoriser cette récolte supplémentaire, essentiellement feuillue, sur des marchés demandeurs d'un volume accru de produits bois.

¹⁰⁷ Soit la moitié des 6,2 Mm³ de disponibilité technico-économique supplémentaire de menus bois (dans cette configuration la moitié des menus bois des arbres coupés serait récoltée, et l'autre moitié laissée au sol) pour tenir compte des difficultés d'exploitation net de la nécessité de préserver les sols.

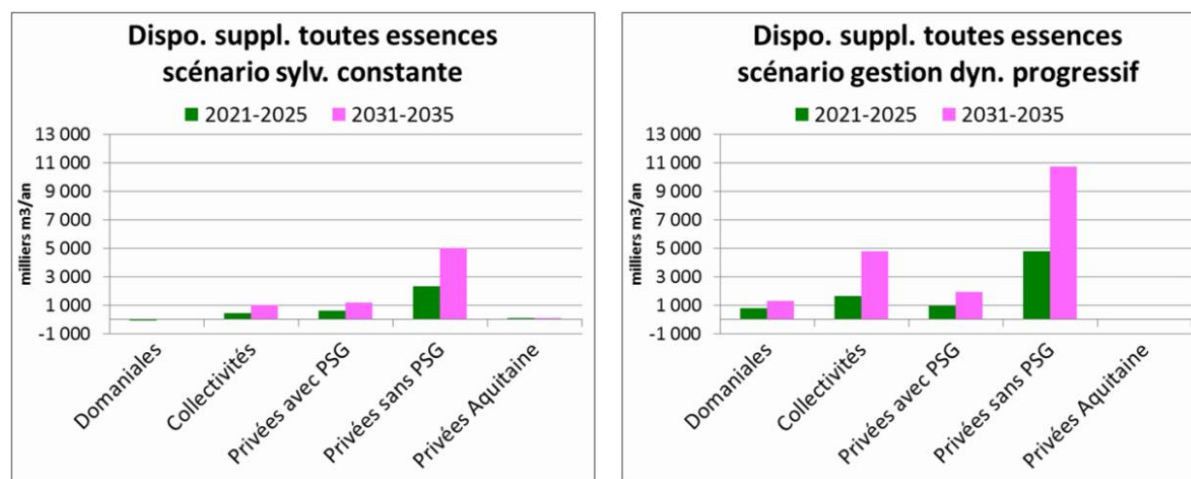
Évolution des récoltes de bois d'œuvre, bois d'industrie et bois énergie entre 1980 et 2015 en volume (Mm³) et objectifs d'augmentation de la récolte globale



2.5. Le potentiel de récolte supplémentaire est surtout mis en évidence en forêt privée hors PSG

En décomposant les disponibilités supplémentaires selon les grands types de propriétés, il apparaît nettement que les forêts privées sans PSG concentrent près des deux tiers du potentiel. Comme l'indique l'étude, ces forêts sont plus souvent jeunes, issues d'accrus, et connaissent une gestion souvent peu productive et fournissent surtout du BI-BE. Le taux de prélèvement moyen est actuellement voisin de 35 %, soit un chiffre bien inférieur à la moyenne nationale (entre 50 et 55%).

Disponibilités supplémentaires en bois d'œuvre, bois d'industrie et bois énergie jusqu'en 2035 et répartition par types de propriété



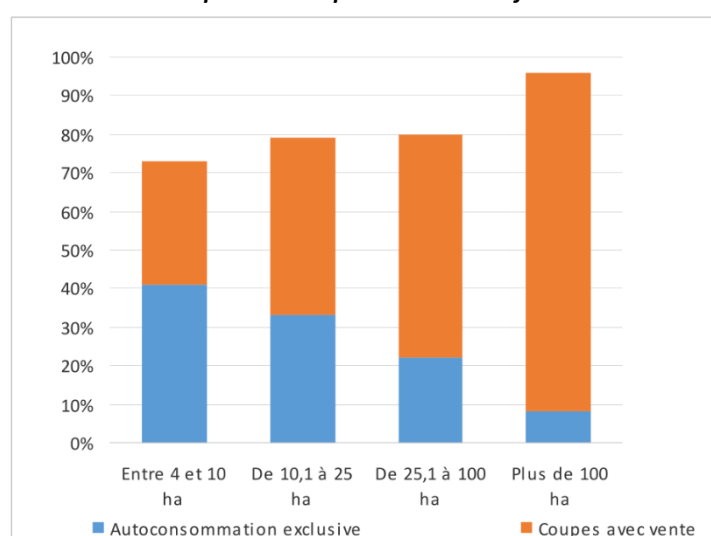
Les taux de prélèvements montrent en effet des différences significatives entre les grands types de propriétés, avec des taux importants dans les forêts privées du massif aquitain et en forêt domaniale, un peu plus modérés dans les forêts des collectivités et les forêts privées sous PSG, et le plus faible dans les forêts privées sans PSG.

Caractéristiques de la ressource et des prélèvements selon le type de propriétaire

Type de propriété	Part dans la surface boisée nationale	Part dans le stock sur pied national	Part dans la production biologique nette de la mortalité nationale	Part dans les prélèvements de bois	Taux de prélèvement (sur le stock)	Taux de prélèvement (sur la production nette)
1_Domaniale	9,3%	10,7%	10,4%	14,7%	2,2%	70%
2_Collectivités	16,4%	18,4%	17,3%	20,1%	1,8%	57%
3_Privée_avec PSG	13,7%	15,6%	16,5%	16,7%	1,7%	50%
4_Privée_sans PSG	50%	47,6%	46,5%	32%	1,1%	34%
5_Privée_Aquitaine*	10,6%	7,6%	9,4%	16,4%	3,5%	86%
Total général	100%	100%	100%	100%	1,6%	50%

Source : IGN - FCBA. 2016 (période 2005-2013).

Pourcentage de propriétaires ayant coupé ou prévoyant de couper du bois par classe de surface

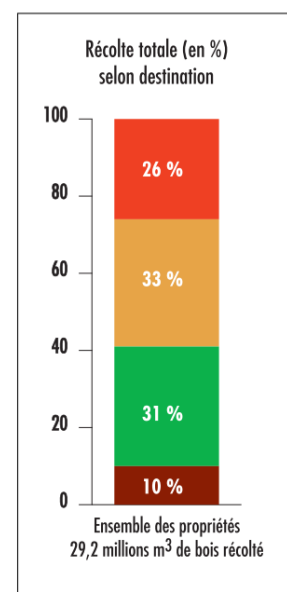
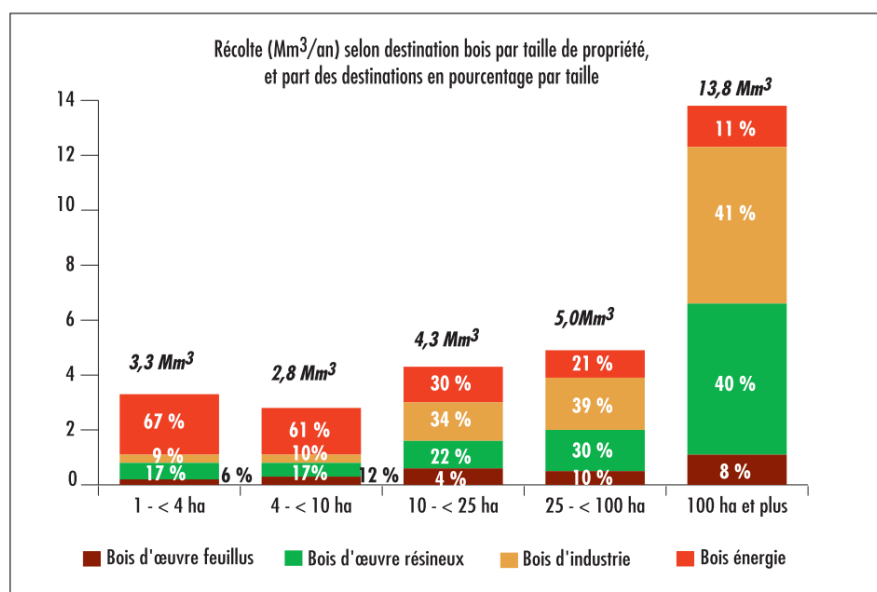


Source : enquête CREDOC 2015 - CNPF, Fransylva, FBF.

Le potentiel de récolte supplémentaire étant majoritairement situé en forêt privée, l'observation des coupes réalisées par les propriétaires est un paramètre essentiel à étudier. Les volumes récoltés et la proportion de bois d'œuvre et bois d'industrie destinés à la vente décroissent avec la taille de la propriété (cf. graphiques ci-dessous).

Parallèlement, l'autoconsommation (bois de chauffage essentiellement) domine dans les petites propriétés et décroît avec l'augmentation de la surface. L'objectif d'accroissement des récoltes passe donc par le développement de la récolte commercialisée par les petites propriétés de moins de 10 ha.

Près de la moitié de la récolte issue des propriétés de 100 ha et plus

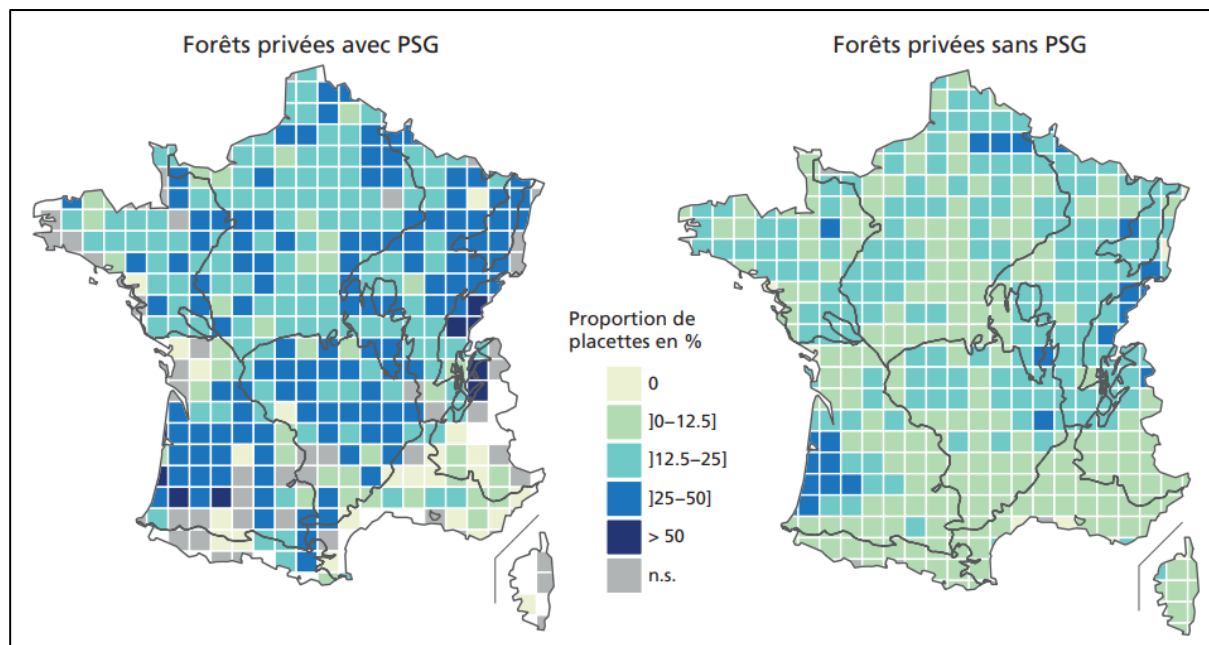


Ensemble des propriétés
29,2 millions m³ de bois récolté

Source : Agreste – Enquête SFP 2012, propriétés forestières privées de 1 ha et plus.

Dans l'enquête SSP 2012¹⁰⁸, les récoltes réalisées au cours des cinq dernières années par les exploitants forestiers privés sont constituées à la fois des volumes de bois vendus à des professionnels (22 millions de m³ à peu près conformes¹⁰⁹ aux statistiques de l'enquête annuelle de branche : 24 Mm³) et des volumes autoconsommés ou vendus en direct à des particuliers (7 millions de m³ mais manifestement sous-estimés¹¹⁰).

Fréquence de placettes avec des coupes de moins de 5 ans, en forêt privée



Source : IGN. Portait des forêts privées avec ou sans PSG. IF n° 41. 2018.

La controverse sur la non gestion ou la non exploitation

En métropole, où les forêts ont toutes connu des phases d'exploitation plus ou moins intensives, voire des phases de défrichement et de mise en culture, avant de retourner à l'état forestier, les forêts primaires n'existent plus. La politique forestière met en avant une approche multifonctionnelle de la gestion forestière, associant production de bois et maintien des autres services écosystémiques apportés par la forêt. La récolte de bois permet de produire une ressource renouvelable utilisable pour de nombreux usages et cette récolte doit respecter les potentialités du milieu et ne doit pas dégrader le fonctionnement des écosystèmes forestiers afin de ne pas impacter les autres services (biodiversité, préservation des sols, régulation du cycle de l'eau, maintien de la qualité des eaux, paysages...). Selon les méthodes sylvicoles choisies, les coupes permettent d'extraire le bois, ressource renouvelable, tout en assurant la croissance et le renouvellement des arbres : les coupes peuvent être assimilées aux perturbations naturelles qui, en l'absence de l'homme, façonnent les forêts (vents, incendies, maladies, parasites...). Toutefois, dans le cycle forestier, ces coupes interviennent avant que les arbres soient dans un stade de maturité trop avancé ou sénescent, ce qui nécessite de prendre des précautions pour garder des éléments caractéristiques de cette phase du cycle forestier pour ne pas perturber le bon fonctionnement de l'écosystème : bois mort, trame d'arbres ou d'îlots de vieux bois.

Dans ce cadre et avec ces précautions, la récolte de bois a vocation à concerner toutes les forêts métropolitaines, sauf à vouloir conserver volontairement des espaces en libre évolution, sans coupe de bois quand cela est nécessaire pour remplir certains objectifs particuliers. C'est notamment le cas des réserves intégrales mises en place pour étudier le fonctionnement « naturel » des écosystèmes forestiers en l'absence de prélèvements de bois. Ces réserves doivent être représentatives des différents habitats forestiers et avoir une certaine taille pour que les processus naturels puissent pleinement s'exprimer. Elles constituent également des zones privilégiées de préservation de la biodiversité inféodées aux phases de maturité et de sénescence des arbres. D'autres raisons sont également avancées pour mettre en place de telles réserves : en laissant libre

¹⁰⁸ Enquête sur la structure de la forêt privée, SSP, 2012

¹⁰⁹ Une partie des bois commercialisés peut effectivement provenir de petites propriétés forestières (moins de 1 ha) ou de parcelles boisées non forestières (haies, bosquets...).

¹¹⁰ De très loin inférieurs à ce qui peut être estimé à partir de l'enquête de l'Insee sur l'autoconsommation des ménages (18 millions de m³), même si une partie de la consommation de bois déclarée par les ménages peut provenir de propriétés de moins de 1 ha ou de surfaces boisées non forestières.

cours aux processus naturels, ces forêts sanctuarisées permettent de se plonger dans un espace « originel », à haute naturalité.

Si la mise en place de réserves intégrales est tout à fait légitime, la part de la surface forestière à y consacrer fait débat. Certains indiquent que les objectifs poursuivis peuvent être satisfaits par un réseau de réserves d'ampleur limitée, représentant moins de 1 % des forêts. D'autres préconisent d'atteindre des taux plus élevés de l'ordre de 10 %.

Une partie des forêts françaises métropolitaines, bien que théoriquement exploitables, ne le sont pas et ne le seront pas à court terme notamment du fait de handicaps naturels qui se traduisent par des conditions d'exploitabilité techniquement difficiles et non rentables. Le morcellement et le nombre de propriétaires distants de leur forêt (cf. 1) entraîne aussi le gel de certaines surfaces. Certains propriétaires, peu nombreux, font par conviction le choix de ne pas récolter, en accordant la priorité à la préservation de la biodiversité.

Quelle que soit la part des surfaces forestières non exploitables ou volontairement laissée en libre évolution, la marge de progression des récoltes par extension des surfaces gérées et exploitées reste importante. L'évaluation du potentiel de récolte supplémentaire tient compte pour partie des freins à la récolte dans des forêts aux conditions d'exploitabilité difficile et dans des zones actuellement en réserve intégrale ou à statut de protection donnant priorité à l'objectif de protection de la biodiversité, à l'accueil du public ou la protection des biens et des personnes.

S'il est légitime de respecter le choix explicite d'un propriétaire de laisser en libre évolution tout ou partie de sa propriété, les surfaces concernées ne remettent pas en cause le potentiel global d'accroissement des récoltes fondé sur des surfaces où les propriétaires ne font rien par ignorance ou désintérêt et sur des surfaces où les propriétaires ont une gestion peu dynamique sans pour autant rejeter la possibilité de récolter.

2.6. Des évaluations à remettre en question au vu de la baisse de production et de la hausse de la mortalité constatée ces dernières années

Tableau 1 – Évolution du gain annuel de bois en forêt (Mm³) entre les périodes 2005-2013 et 2012-2020

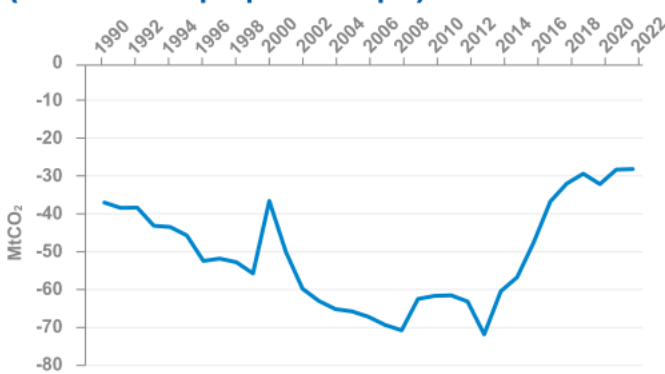
En Mm³/an	2005-2013	2012-2020
Production biologique brute	91,5	87,8
Mortalité	7,4	11,4
Prélèvements	42,4	51,0
Gain en forêt = production biologique brute - mortalité - prélèvements	41,7	25,4

Source : France Stratégie, d'après IGN (2022), *Mémento de l'inventaire forestier*, p. 31

Les études de disponibilité supplémentaires ont été réalisées à partir de données des années 2010 à 2015. Depuis ces évaluations, la croissance biologique a diminué et la mortalité a augmenté du fait d'épisode de sécheresse récurrents et d'attaques parasitaires massives (scolytes dans l'Est notamment). Parallèlement, les récoltes ayant également progressées, le puits de carbone forestier s'est fortement réduit, comme l'indique le tableau ci-contre et le graphique ci-dessous.

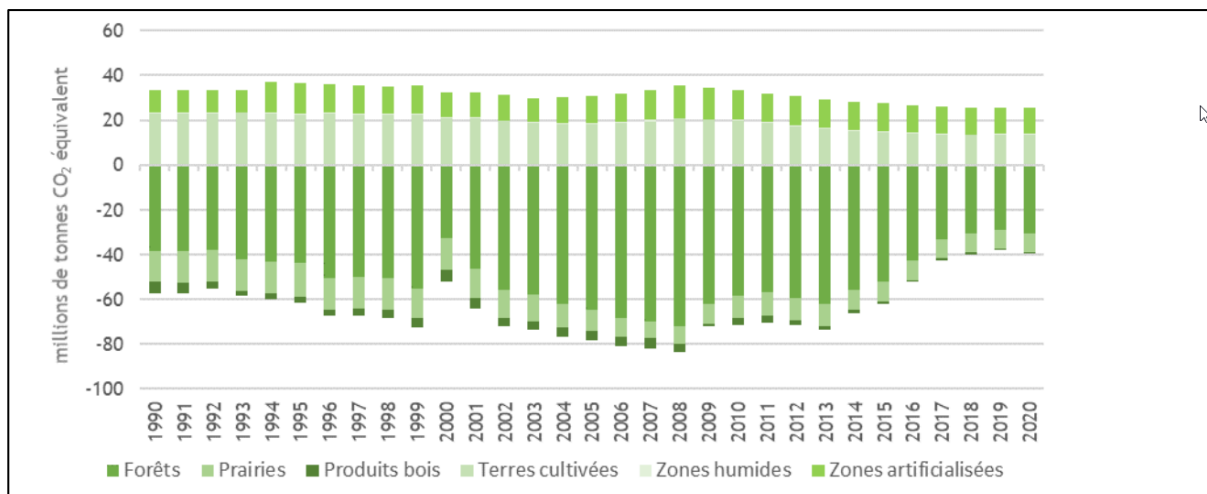
Cette baisse du puits forestier, qui constitue la principale composante du puits de carbone du secteur des terres (UTCATF) dans l'inventaire national des émissions de GES, explique la diminution de ce puits depuis une dizaine d'années (graphique ci-après).

Graphique 3 – Évolution de la séquestration annuelle de carbone dans la forêt française (les sols ne sont pas pris en compte) entre 1990 et 2022



Source : Citepa (2023), *Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2022 – Rapport Secten*

Répartition des émissions et absorptions de CO₂eq du secteur de l'UTCATF en France (métropole + Outre-mer)

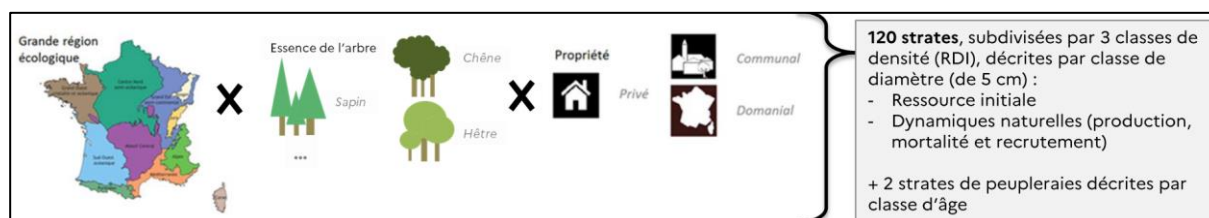


Source : CITEPA - SECTEN 2022

Ces nouvelles conditions de croissance et de mortalité dans les forêts françaises, associées aux simulations de changement climatique, ont conduit à réaliser une nouvelle étude, conduite par l'IGN et le FCBA, pour « simuler l'évolution des disponibilités en bois et de l'atténuation de l'effet de serre par l'activité forêt-bois selon des scénarios de gestion et d'utilisation des produits au cours de la période 2020-2080, en prenant en compte les effets du changement climatique ».

Pour la partie forestière, cette étude se fonde sur le modèle MARGOT¹¹¹ qui permet de simuler l'évolution de la forêt française dans son ensemble, avec des paramètres de dynamique naturelle et de coupes pouvant être modulés suivant des scénarios définis par le choix de paramètres climatiques ou de gestion.

Schéma de description des 120 strates utilisées par le modèle MARGOT



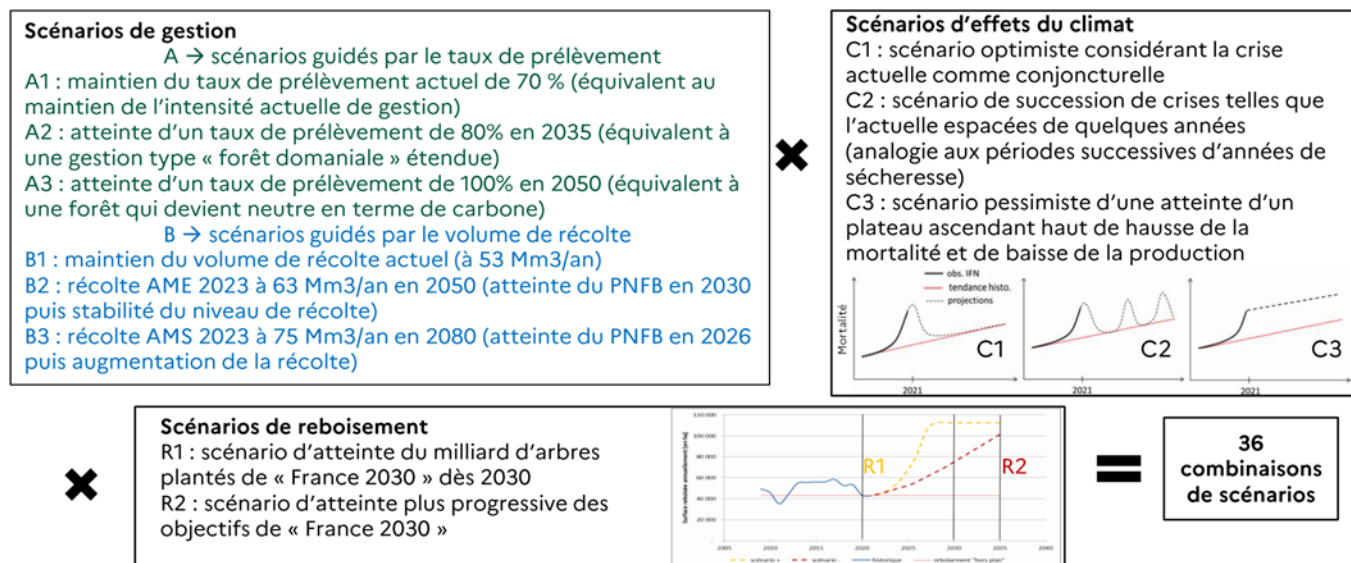
Trois scénarios contrastés d'évolution de la croissance et de la mortalité sous l'effet du changement climatique ont été modélisés. L'évolution prévisible des aires de répartition des différentes essences a également été prise en compte (ClimEssence).

Un plan de reboisement a également été simulé, dans le sillage de l'annonce d'un objectif de plantation d'un milliard d'arbres d'ici 2030. Les surfaces correspondantes sont choisies en fonction des peuplements déperissants, des peuplements les plus vulnérables au changement climatique et des peuplements à fort potentiel de production de bois d'œuvre.

Enfin, des scénarios de gestion sont modélisés. Certains sont guidés par le taux de prélèvement : la récolte est subie, fonction de la production biologique et de la mortalité. D'autres sont guidés par le volume de la récolte. Dans les deux cas, les scénarios sont indépendants des consommations. Le potentiel d'intensification des récoltes est déterminé à partir de l'évolution possible des facteurs d'accessibilité et du niveau de gestion.

¹¹¹ MARGOT est un modèle démographique déterministe structuré en classes de diamètre. Il est calibré et initialisé avec les données annuelles de l'IFN. Les peuplements forestiers sont réunis en strates qui constituent l'unité de modélisation permettant de décrire l'ensemble des forêts françaises (combinaison essences x grandes régions écologiques x classes de propriété). Dans chaque strate la ressource actuelle est décrite au travers d'un effectif d'arbres par classe de diamètre, tandis que les paramètres de dynamique naturelle (production, mortalité, recrutement) sont estimés à partir des observations récentes de flux réalisées par l'IFN. La gestion courante est décrite sous la forme d'un taux de coupe en effectif par classe de diamètre.

La figure ci-dessous illustre les combinaisons de ces différents types de scénarios.



Le volume de récolte indiqué correspond au bois qui est réellement utilisé par les particuliers ou la filière. Il fait référence au volume aérien total (cf. 2.3) pour englober les branches et menus bois utilisés essentiellement en bois-énergie. Il est calculé en appliquant au volume aérien total prélevé, mesuré par l'Inventaire, des pourcentages de matière laissée sur coupe (les « pertes ». Globalement le taux retenu est de 27 % mais il est variable selon les essences et les parties de l'arbre considérées, comme l'illustre le tableau ci-dessous.

Hypothèses retenues pour les pertes d'exploitation

Groupe d'essence	Classe de diamètre	Compartiment	Usage potentiel	Pertes	Commentaires
Toutes essences	Toutes	Tige principale	BO	8%	Conservés des études précédentes
			BIBE	15%	
Pins	Tous diamètres	Grosses branches ($\varnothing \geq 7$ cm)	BIBE	60%	Valorisation occasionnelle des branches
		Menus bois ($\varnothing \geq 7$ cm)	BIBE	80%	
Autres résineux	Tous diamètres	Grosses branches ($\varnothing \geq 7$ cm)	BIBE	75%	Valorisation rare des branches (récolte arbres entiers en dépressage)
		Menus bois ($\varnothing \geq 7$ cm)	BIBE	95%	
Feuillus	< 20 cm	Grosses branches ($\varnothing \geq 7$ cm)	BIBE	50%	Valorisation occasionnelle d'une partie des branches en autoconsommation/affouage et dans des coupes d'éclaircie avec exploitation du houppier
		Menus bois ($\varnothing \geq 7$ cm)	BIBE	70%	
	20-40 cm	Grosses branches ($\varnothing \geq 7$ cm)	BIBE	60%	Valorisation occasionnelle d'une partie des branches en autoconsommation/affouage et peu de récolte "arbre entier" dans ces classes de diamètre qui correspondent à des arbres prélevés en éclaircies intermédiaires
		Menus bois ($\varnothing \geq 7$ cm)	BIBE	80%	
	> 40 cm	Grosses branches ($\varnothing \geq 7$ cm)	BIBE	50%	Une partie des grosses branches valorisée en récolte normale, valorisation occasionnelle d'une partie des branches en autoconsommation/affouage et dans des coupes de régénération avec exploitation arbre entier
		Menus bois ($\varnothing \geq 7$ cm)	BIBE	70%	

Source : Groupe de travail sur les pertes (ONF, Unisylva, FCBA, IGN)

Les premiers résultats de cette étude IGN-FCBA laissent penser, qu'à moins de considérer ces évolutions comme purement conjoncturelles, avec un retour progressif à la normale, il ne sera pas possible d'augmenter la production sans faire disparaître le puits de carbone forestier, voire en faire une source d'émissions, et sans dépasser – conjoncturellement ou systématiquement – les 100 % de taux de prélèvement (avec baisse du volume à l'hectare).

Résultats des simulations sur le taux de prélèvement, le volume à l'hectare et le niveau du puits de carbone forestier en 2030 et 2050 pour trois scénarios de volumes de récoltes couplés à trois scénarios climatiques

	Récolte 2050 (Mm ³)	Taux de prélèvement en 2050			Volume sur pied en 2050 (m ³ /ha)		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3
Récolte maintenu » constante à 53 Mm ³	53	60 %	90 %	105 %	190	175	160
Récolte augmentée à 63 Mm ³ en 2030 puis stable	63	80 %	120 %	135 %	170	160	140
Récolte augmentée jusqu'à 75 Mm ³ en 2050	68	90 %	125 %	140 %	165	160	140

	Récolte 2050 (Mm ³)	Puits de carbone 2030 (MtCO _{2e})			Puits de carbone 2050 (MtCO _{2e})		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3
Récolte maintenu » constante à 53 Mm ³	53	14,6	13,8	-3,1	21,9	9,9	-1,8
Récolte augmentée à 63 Mm ³ en 2030 puis stable	63	4,5	4,5	-12,6	8,1	-3,2	-14,3
Récolte augmentée jusqu'à 75 Mm ³ en 2050	68	3,9	3,9	-11,5	4,3	-6,5	-17,6

Source : IGN – FCBA - résultats provisoires

Scénario climatique C1 : optimiste, crise actuelle conjoncturelle.

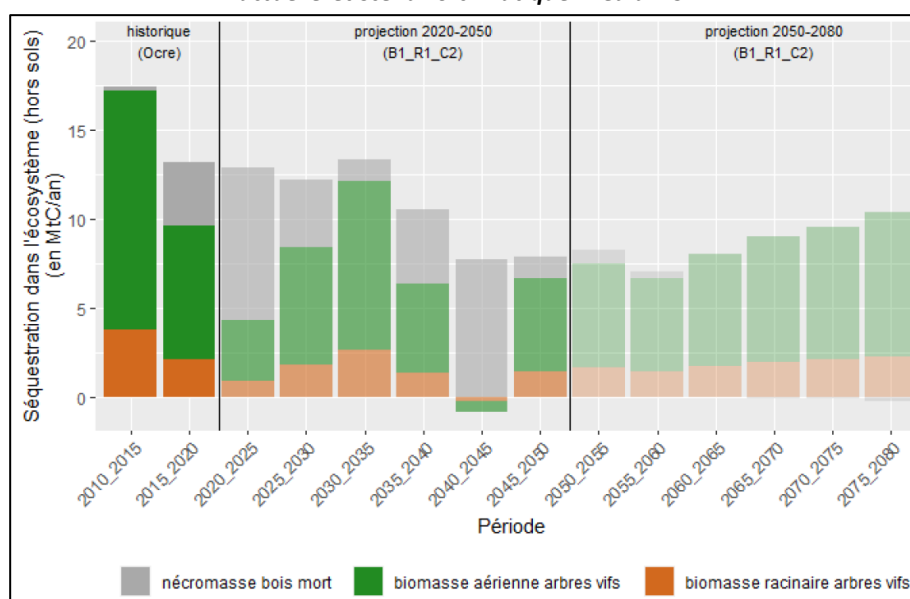
Scénario climatique C2 : succession de crises telle que l'actuelle, espacées de quelques années.

Scénario climatique C3 : pessimiste, atteinte durable d'un plateau haut de mortalité et de baisse de croissance.

Dans tous les cas, un scénario d'environ 600 000 ha de reboisement et 100 000 ha de boisements en 10 ans (conforme aux annonces du Président de la République) est pris en compte.

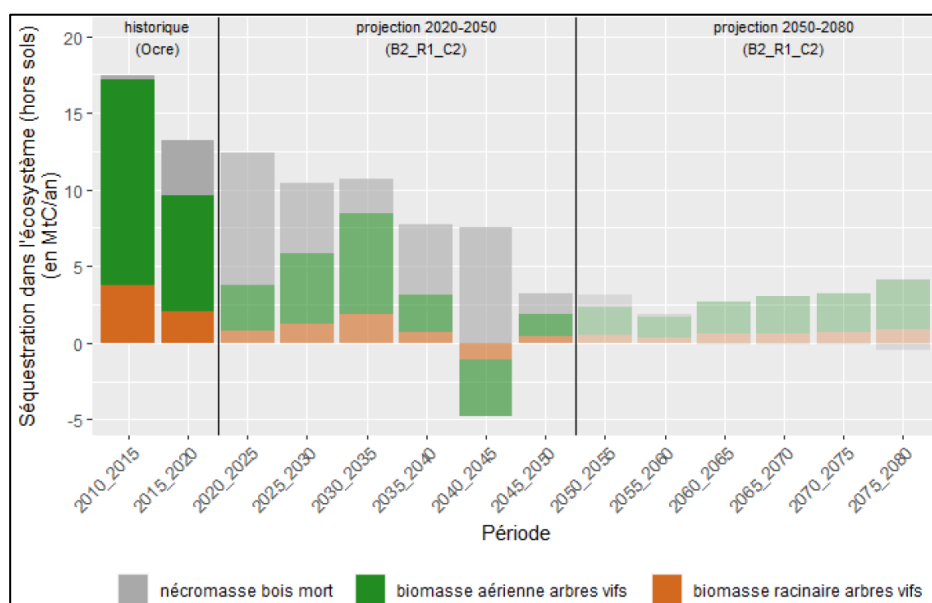
Le tableau ci-dessus fait référence au puits de carbone tel qu'il est actuellement calculé par le CITEPA dans le cadre du rapportage de l'inventaire des émissions de GES de la France. Le stockage dans le compartiment bois mort et celui dans les sols ne sont pas retenus. À titre d'illustration, les graphiques ci-dessous mentionnent le compartiment « bois mort » qui peut être temporairement important suite aux dépérissements, mais dont la demi-vie du carbone est courte.

Puits de carbone dans la biomasse vivante et morte – simulation 2010-2080 avec maintien de la récolte actuelle et scénario climatique médian C2



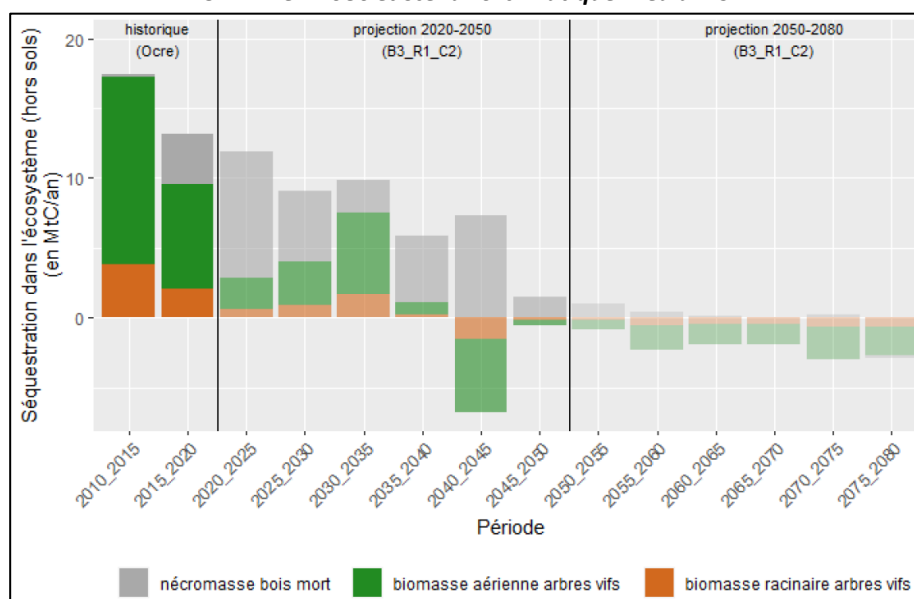
Source : IGN - FCBA

Puits de carbone dans la biomasse vivante et morte – simulation 2010-2080 avec augmentation de la récolte à 63 Mm³ en 2030 puis stabilité jusqu'en 2050 et scénario climatique médian C2



Source : IGN - FCBA

Puits de carbone dans la biomasse vivante et morte – simulation 2010-2080 avec augmentation de la récolte à 75 Mm³ en 2080 et scénario climatique médian C2



Source : IGN - FCBA

Compte tenu des aléas, une partie de la récolte sera « subie » du fait de la nécessité de valoriser des bois déperissants. De ce fait les coupes liées à la gestion courante sont ajustées pour atteindre l'objectif de récolte totale sans le dépasser.

Le plan de reboisement constitue une réponse à l'adaptation de peuplements déperissants ou très vulnérables. Dans tous les cas, l'effort d'adaptation, par amélioration substitution d'essence progressif ou par reboisement en plein, est essentiel pour limiter les impacts.

Quels que soient les scénarios, les calculs ont pris en compte un potentiel d'augmentation des surfaces gérées et de l'intensité de gestion (permettant des récoltes supplémentaires). Celui-ci est essentiellement situé en forêt privée et concerne plus les feuillus que les résineux. La mobilisation des propriétaires privés « dormants » est nécessaire, au risque de ne pas atteindre les objectifs de récolte et de ralentir la nécessaire adaptation des peuplements aux évolutions du climat.

3. Au-delà des volumes récoltés, quelle part pour le bois énergie ?

3.1. Le bois énergie et le bilan carbone : des controverses fondées sur des questionnements sur la durabilité de la gestion forestière et le respect de la hiérarchie des usages

La combustion du bois-énergie est réputée neutre en carbone puisque le gaz carbonique émis lors de la combustion est d'origine atmosphérique. D'un point de vue comptable, les émissions de CO₂ liées à la récolte de bois sont comptabilisées dans le secteur UTCATF (déstockage en forêt par la récolte), évitant ainsi un double compte¹¹². La production de chaleur à partir du bois évite en effet d'injecter du carbone fossile dans le cycle de la biosphère. Cet effet de substitution est estimé par le rapport EFESSE à 18 MtCO₂ annuels. Il dépend cependant de l'impact climatique de la source d'énergie à laquelle se substitue le bois : la référence utilisée est aujourd'hui le gaz naturel, principale source de production de chaleur par combustion mais si la part des énergies non carbonées dans la production de chaleur augmente, l'effet de substitution pourrait diminuer.

Le CO₂ émis dans l'atmosphère par la combustion du bois est issu d'une biomasse renouvelable à cycle long, sur plusieurs décennies, voire siècles. L'appréciation de la neutralité carbone renvoie alors à l'équilibre entre croissance et prélèvement à l'échelle d'un territoire donné et sur un laps de temps donné. La neutralité du bois qui serait récolté pour l'énergie dépend du bilan net des flux de carbone dans l'ensemble forestier et sur la durée considérée. Dans ce bilan carbone, doivent être incluses les émissions liées à l'exploitation et au transport du bois.

En se plaçant délibérément sur une courte durée, ce bilan net est amélioré en laissant le bois en forêt, mais dans un ensemble forestier en équilibre, un tel choix repousse la gestion de la saturation de la forêt (en augmentant aussi les risques d'aléas) et perturbe le rythme de la « pompe à carbone » forestière. Comme le précise L'EFESSE : *« du fait du risque de non-permanence associé à la séquestration in situ, « séquestrer une tonne de carbone dans un écosystème » n'est pas équivalent à « éviter l'émission d'une tonne de carbone de plus dans l'atmosphère à partir de combustibles fossiles ». Le niveau d'équivalence entre ces deux options dépend d'une évaluation du risque de non-permanence pour chaque compartiment et de notre attitude face à ce risque. L'évaluation de ce niveau d'équivalence est complexe et reste incertaine ».*

En tout état de cause, il est certain qu'il vaut mieux privilégier les usages matière du bois qui permettent d'une part un stockage de carbone dans les produits à longue durée de vie et d'autre part un effet de substitution plus important que celui d'une valorisation énergétique. Ainsi, le bois énergie n'est pas une fin en soi, mais constitue en revanche une opportunité pour valoriser du bois inapte à un autre usage, tout au long de la filière, et éviter sa décomposition (en forêt ou en enfouissement) qui libérerait sans aucun bénéfice le carbone contenu. Il convient donc d'être vigilant sur l'équilibre entre les usages matériaux et les usages énergétiques. La SNBC table sur une plus forte proportion de la récolte valorisée sous forme matière. Cette orientation permet en effet d'augmenter la durée de stockage dans les produits bois, mais de toute façon, en fin de vie, après des cycles de réemploi ou de recyclage, cette matière ligneuse a vocation à être valorisée en production d'énergie.

Comme l'indique le CITEPA en conclusion d'une analyse spécifique¹¹³, « la pertinence de la valorisation énergétique des bois issus d'éclaircies, de déchets de scierie est facilement démontrable, car il s'agit de co-produits de l'activité sylvicole. La démonstration est plus complexe pour des parcelles exclusivement dédiées à la production de bois énergie. Autant que possible, il faudrait exploiter le bois pour ses atouts comme matériau avant une éventuelle valorisation énergétique en fin de vie. L'intérêt d'une valorisation de la biomasse sous forme d'énergie dépend donc du bilan global de la chaîne de production de la biomasse (incluant les gains et pertes de carbone) et du bilan que présentent les alternatives à la biomasse. Il faut rappeler que ces dernières sont le plus souvent très loin de la neutralité carbone, surtout si on prend l'ensemble des étapes de production depuis l'exploration à la distribution ».

¹¹² En revanche, les émissions autres que le CO₂ générées lors du brûlage (CH₄, N₂O, polluants) sont bien comptabilisées dans le secteur consommateur de l'énergie.

¹¹³ CITEPA. Rapport SECTEN édition 2020. Analyse complémentaire « La biomasse énergie est-elle neutre en carbone ? ». Juin 2020.

Dans ce débat sur la neutralité carbone du bois énergie, il est souvent mis en avant la notion de « dette carbone », qui n'existe pas pour des cultures annuelles pour lesquelles ce qui est récolté est reconstitué au pas de temps annuel¹¹⁴. Cette « dette carbone » correspond au temps nécessaire pour qu'un peuplement forestier régénéré après coupe stocke autant de carbone que celui contenu dans les arbres récoltés.

Toutefois, cette notion correspond à une approche restreinte à une parcelle ou un peuplement récolté. Elle n'est pas généralisable à l'échelle d'un ensemble de parcelles. Par simplification, si des arbres poussent en 100 ans, il faudra 100 ans pour reconstituer le stock d'une parcelle de 1 ha coupé ; si la parcelle fait partie d'une forêt de 100 ha divisée en 100 parcelles dont une est coupée chaque année, il y a neutralité carbone et aucune dette carbone ; ce constat est également valable pour la coupe de quelques arbres au sein d'une futaie irrégulière, l'ensemble du peuplement compensant sur une année la récolte de ces arbres.

De fait, c'est bien à l'échelle d'un ensemble de peuplements, de propriétés et de forêts qu'il faut expertiser la neutralité carbone et regarder si le carbone exporté dans le bois récolté une année n est compensé, ou non, par le carbone séquestré par la croissance biologique de tous les arbres pendant cette même année n .

Si la forêt est mature et en équilibre des classes d'âge sur le périmètre considéré (une propriété ou un ensemble de propriétés, la forêt française...), la notion de gestion durable s'applique pleinement, avec un niveau de récolte qui correspond à l'accroissement annuel. Le bois récolté est bien neutre en carbone et la forêt est également neutre (ni puits de carbone, ni émission de carbone). En revanche, dans ce cas, si on décide d'augmenter les récoltes, on crée un déséquilibre et le carbone exporté peut être supérieur à celui séquestré.

À l'inverse, si on ralentit les récoltes, la séquestration annuelle est supérieure aux exportations et la forêt devient un puits de carbone ; cependant, les peuplements vieillissent progressivement, l'accroissement annuel diminue, la mortalité s'accroît ainsi que le risque d'aléas.

Dans les autres cas, l'équilibre entre exportation annuelle de carbone dans la récolte et séquestration par accroissement biologique annuel des peuplements n'est pas garanti :

- si la forêt est globalement jeune, l'accroissement biologique annuel sera important et les récoltes absentes ou faibles, la forêt est un puits de carbone ;
- si la forêt est globalement vieillie, l'accroissement biologique annuel est ralenti et une récolte va exporter un gros volume de carbone: le bois récolté génère une « dette » carbone.

Cette notion de neutralité carbone est donc particulièrement complexe à appréhender, conjuguant une approche dans l'espace (quel périmètre considérer ?) et dans le temps (évolution de la croissance, de la mortalité, des récoltes, du stockage dans le sol, de la répartition des essences et des classes d'âge...). Certaines affirmations peuvent être réductrices extraites de leur contexte, comme l'illustrent certains passages de l'étude « La biomasse et la neutralité carbone » du comité de prospective de la commission de régulation de l'énergie (CRE)¹¹⁵, même si les propos de conclusion sont équilibrés.

Citations	Remarque
« Par ailleurs, une combustion de la biomasse récoltée ne garantit nullement l'absorption simultanée d'une quantité équivalente de CO ₂ , condition d'une neutralité. Il faut plusieurs décennies, a minima, pour que les forêts se régénèrent et absorbent à nouveau le CO ₂ qui a été relâché lors de la combustion. Cette différence de temporalité entre absorption et émission invite à relativiser la notion de neutralité. »	Le propos est vrai pour une coupe de bois destinée à l'énergie. La rédaction laisse penser que cela est vrai pour « les forêts » alors qu'à l'échelle d'une forêt (un ensemble de parcelles, de propriétés... ou même la forêt française), il ne faut pas « plusieurs décennies, a minima, pour que les forêts se régénèrent et absorbent à nouveau le CO ₂ »

¹¹⁴ À noter qu'en cas d'utilisation d'intrants notamment, une ACV sur les émissions de GES associées à la production des engrais et phytocides, ainsi que la consommation de carburant du matériel agricoles, ne conduisent pas à la neutralité carbone (mais ces émissions sont comptabilisées à part dans les inventaires GES).

¹¹⁵ La Biomasse et la neutralité carbone. Groupe de travail 1 – Comité de prospective de la CRE. Mars 2023.

<i>Les arbres étant coupés pour la récolte de bois, ce prélèvement ampute l'activité naturelle d'absorption du carbone de l'atmosphère. Il s'agit d'une suppression du puits pendant une durée longue, le temps que l'écosystème naturel soit reconstitué et puisse absorber à nouveau du CO₂ atmosphérique</i>	Même remarque : annuellement, l'absorption de carbone se fait par les autres arbres et il ne faut pas attendre une durée longue.
<i>L'extraction du bois génère une perturbation de l'environnement direct (sols, écosystème forestier) : les émissions indirectes en provenance de la récolte de biomasse forestière (l'érosion, la décomposition accélérée, etc.) réduisent les réservoirs forestiers de carbone, tandis que les pertes en nutriments et en matière organique ralentissent la régénération</i>	Ces impacts peuvent exister, mais uniquement dans certains cas très particuliers de coupes rases de grande taille, avec un travail du sol important pour installer un nouveau peuplement. C'est loin d'être un cas général dans les forêts françaises, avec une majorité de coupes d'éclaircie et de coupes progressives de régénération naturelles en futaie régulière, ou de coupes d'arbres diffuses en futaie irrégulière.
Synthèse du 2.1 – Les biomasses végétales à cycle long [...] Principales limites : - la récolte de cette biomasse impacte durablement le puits de CO₂, ainsi que les écosystèmes ; - une longue période de reconstitution des stocks ; - l'usage énergie est émetteur de CO₂ ; - [...]	Ces deux premières limites peuvent être réelles dans certaines configurations – heureusement limitées – mais ne s'appliquent pas à toute forêt en général. La troisième limite est vraie dans l'absolu (réactions chimiques) mais d'une part il s'agit de CO₂ biogénique, d'autre part le bois étant le plus souvent issu de gestion durable, l'usage énergie n'est pas émetteur net.
Conclusion	
<i>On ne devrait, en toute rigueur, parler de neutralité carbone que si dans le même temps cette activité générerait à un horizon court, un captage équivalent de CO₂. Or, ce n'est pas systématiquement le cas. Si cette condition de neutralité est remplie pour la biomasse de cycle court, la problématique est plus complexe pour le bois (cycles longs) : les stocks de bois présents dans les arbres des forêts sont le résultat de décennies voire de siècles de croissance des arbres. Dès lors que couper ces arbres est une opération instantanée, il peut en résulter un déséquilibre entre croissance et prélèvement. Pour que la production de bois énergie ait une plus-value carbone, il convient que l'une ou l'autre de ces conditions soit remplie : soit l'espace libéré laisse place à une formation avec des stocks de carbone à l'hectare plus élevés à terme ; soit la récolte permet d'anticiper un phénomène de saturation de la forêt (voire de détérioration) et par conséquent d'entretenir la pompe à carbone ; soit la capacité d'absorption pourra être maintenue à la condition qu'il y ait bien (mais pas nécessairement sur le site du prélèvement) une régénération de la forêt, tout en conservant voire en renforçant, par stockage, le carbone prélevé sur la zone de prélèvement, par exemple par une utilisation en usage énergie des co-produits du bois (bois B, etc.), ce qui est également le cas en France.</i> <i>Ces deux conditions – régénération et maintien des stocks de carbone – font partie des critères de durabilité rendus obligatoires par la Directive relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables dite « REDII » pour des installations de combustion d'une puissance thermique nominale supérieure à 20 MW (cf. article 29.6.a) ii) et l'article 29.7. de la directive REDII).</i>	

3.2. Destination bois d'œuvre, bois d'industrie et bois énergie pour les bois issus de forêt

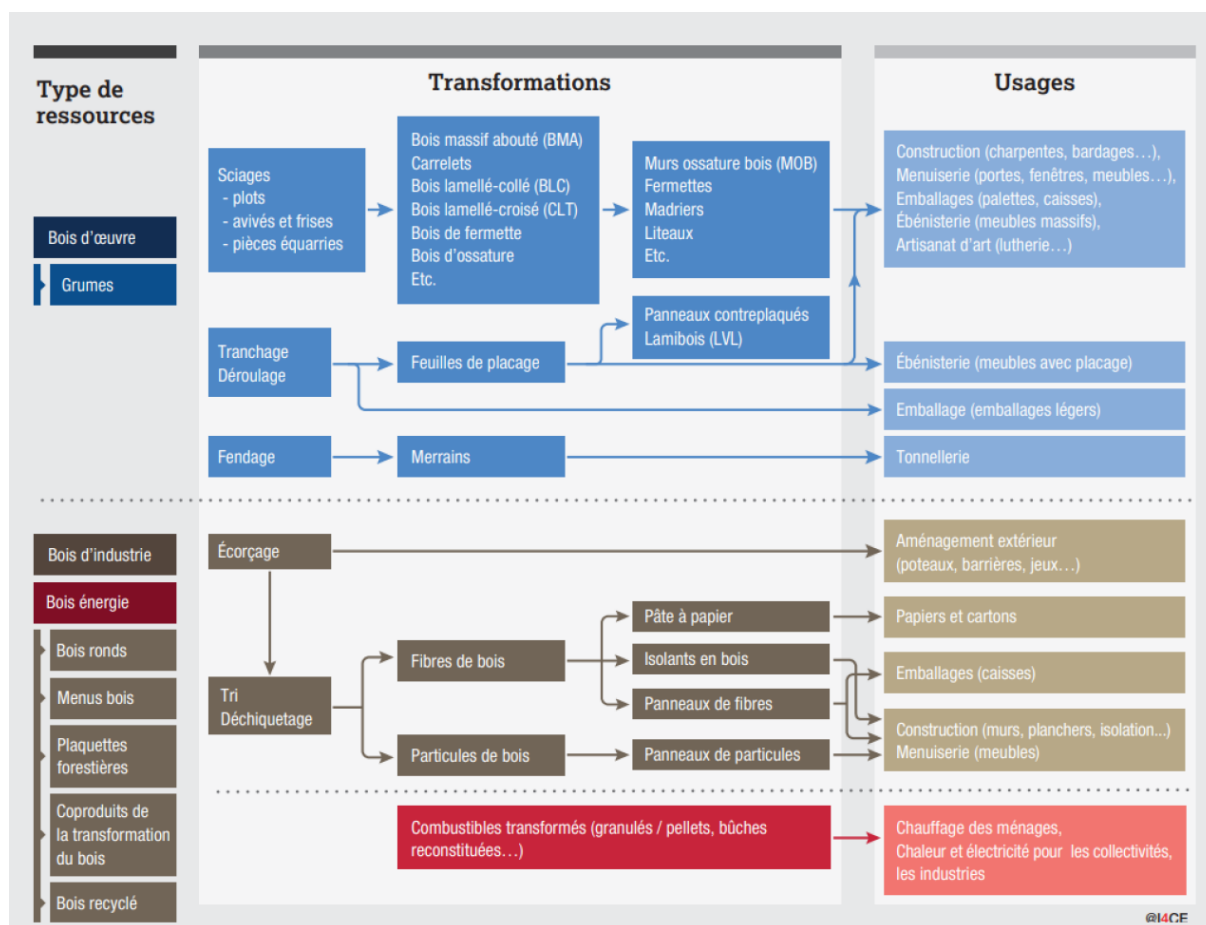
Le bois récolté est couramment divisé en trois catégories : bois d'œuvre (BO), destiné à être scié, tranché, déroulé ou fendu et transformé en de multiples produits en bois, bois d'industrie (BI), destiné à être déchiqueté (trituré) et entrer dans la fabrication de panneaux et de pâtes à papier (industries de la trituration), bois énergie (BE) qui sert directement à des usages énergétiques, aujourd'hui essentiellement par combustion. Le schéma ci-dessous, réalisé par l'institut de l'économie pour le climat (I4CE), illustre ces trois types de bois, leurs transformations et leurs usages.

Si le bois d'œuvre demande des caractéristiques particulières (diamètre, longueur de fût, qualité...), les usages bois d'industrie ou bois énergie sont souvent substituables pour les autres bois.

L'approvisionnement des usines de trituration ne se fait pas exclusivement à partir de bois forestier (bois rond dont menus bois, plaquettes forestières), mais est également composé de produits connexes de scieries (dosses, délignures, plaquettes, sciures), de papier recyclé (usines de pâtes) et de bois recyclé (usines de panneaux).

La dénomination bois énergie englobe souvent les bois récoltés en forêt directement utilisés pour l'énergie (petits bois issus d'éclaircie ou des houppiers des grumes de BO) mais aussi les coproduits des filières de transformation ainsi des déchets bois en fin de vie des produits.

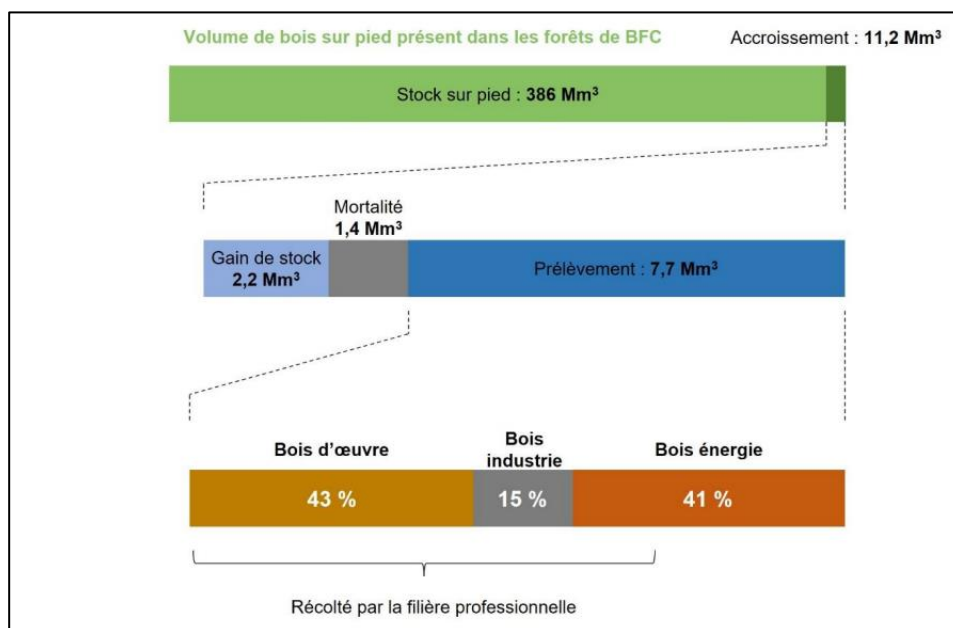
Chaines de transformations du bois de la ressource forestière aux usages



Source I4CE

Le graphique ci-dessous schématise la production forestière et la récolte à l'échelle d'une région. À noter qu'une partie du bois énergie récolté en forêt échappe aux suivis statistiques officiels du fait de récolte en autoconsommation ou hors des circuits commerciaux traditionnels. (cf. 3.3).

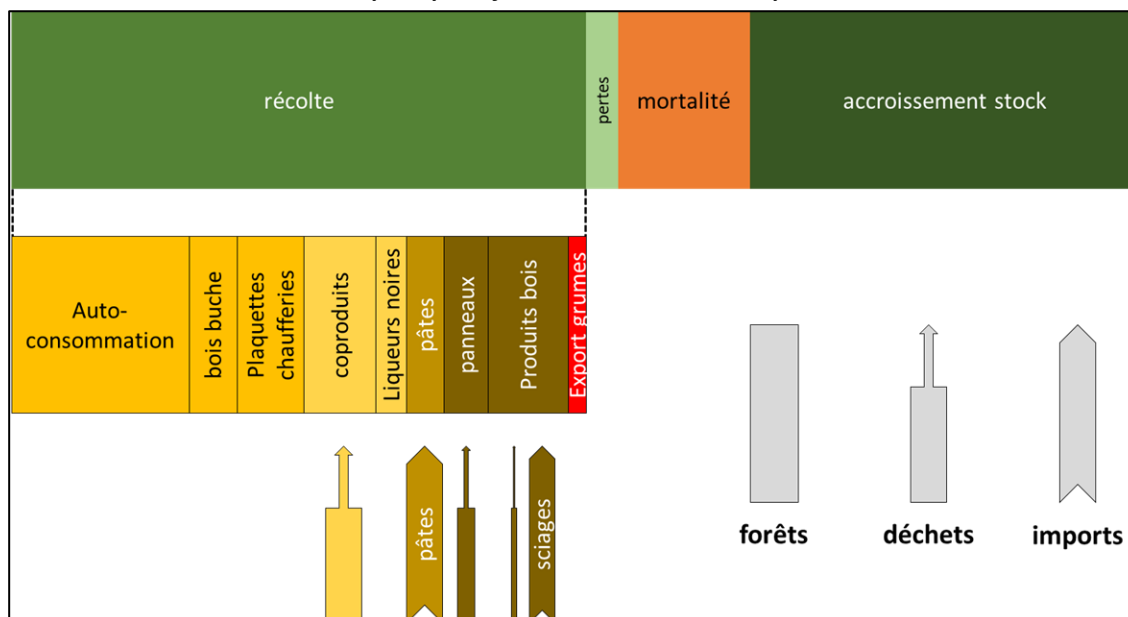
Schéma de la production et de la récolte annuelles de bois en Bourgogne-Franche-Comté



Source : Observatoire régional du bois énergie de Bourgogne-Franche-Comté, d'après Mémento 2021 de l'Inventaire forestier national et enquête annuelle de branche 2020 – DRAAF Bourgogne-Franche-Comté

À l'échelle nationale, la place de la récolte dans la production forestière, ses différents usages et les apports de déchets ou flux d'import-export net sont représentés dans le graphique ci-dessous.

Modellisation des principaux flux de bois, en volume équivalent bois rond



Source : traitement CGGAER d'après IGN, EAB, ADEME et douanes.

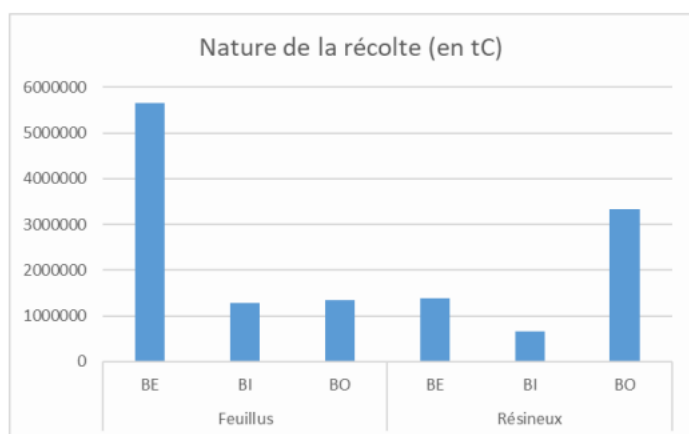
La transformation du bois d'œuvre et du bois d'industrie génère des quantités importantes de co-produits qui peuvent être valorisés en matière ou en énergie

Les process de première transformation du bois génèrent d'importante quantité de produits « connexes ». Ce volume dépend des essences et des techniques de sciage utilisées (scie à ruban, canter...). Le rendement moyen des sciages par exemple est de 1,9 m3 de grumes sur écorce pour 1 m3 de sciages pour le sapin-épicéa ou 2,3 m3 de grumes sur écorce pour 1 m3 de sciages pour le chêne.

De fait, la production de sciages fournit plus de 8 Mt de produits connexes, auxquels s'ajoutent 1 Mt d'importation nette et près d'1 Mt provenant d'autres industries (tranchage, panneaux, pâte à papiers hors résidus), dont les trois-quarts ont aujourd'hui une valorisation énergétique, soit en autoconsommation sur site (15 %), soit dans des chaudières collectives ou industrielles (63 %), soit sous forme de granulés commercialisés (18 %), soit à l'exportation (4%).

La fabrication de pâte à papier génère également des résidus, estimés à environ 1,6 Mt, soit 3,6 Mm3 de bois, qui sont valorisés pour produire de la chaleur.

Globalement, la valorisation énergétique des produits connexes à la première transformation représente 27 % du total bois énergie (23 % si on inclut le bois hors forêt). Pour les seuls produits connexes hors résidus papetiers, cette proportion est de 19 % (17 % si on inclut le bois hors forêt).

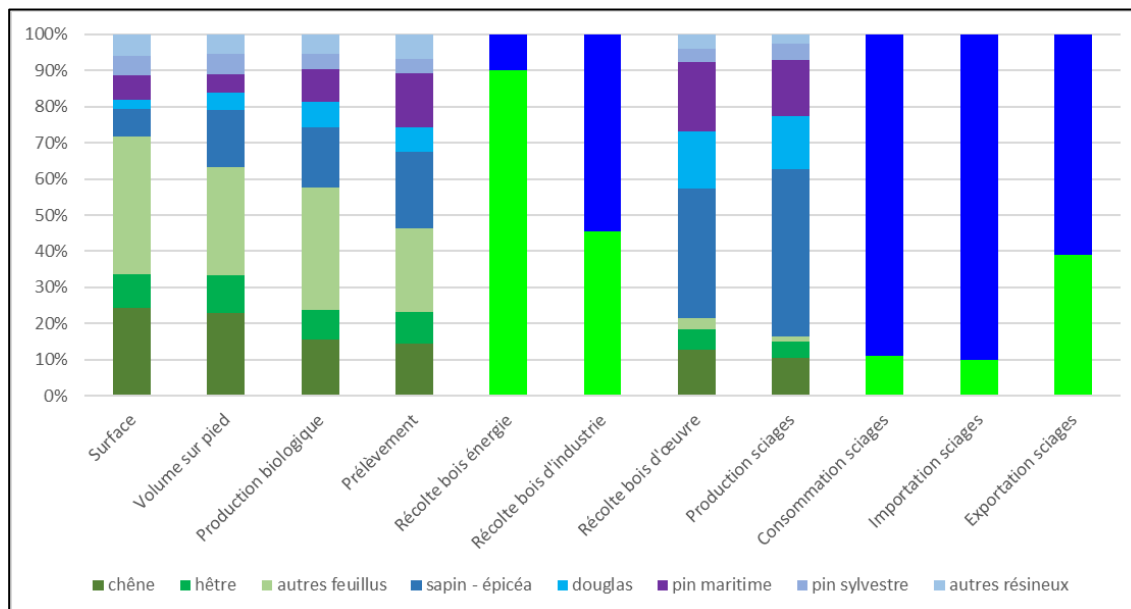


Source : étude IGN-FCBA (résultats provisoires)

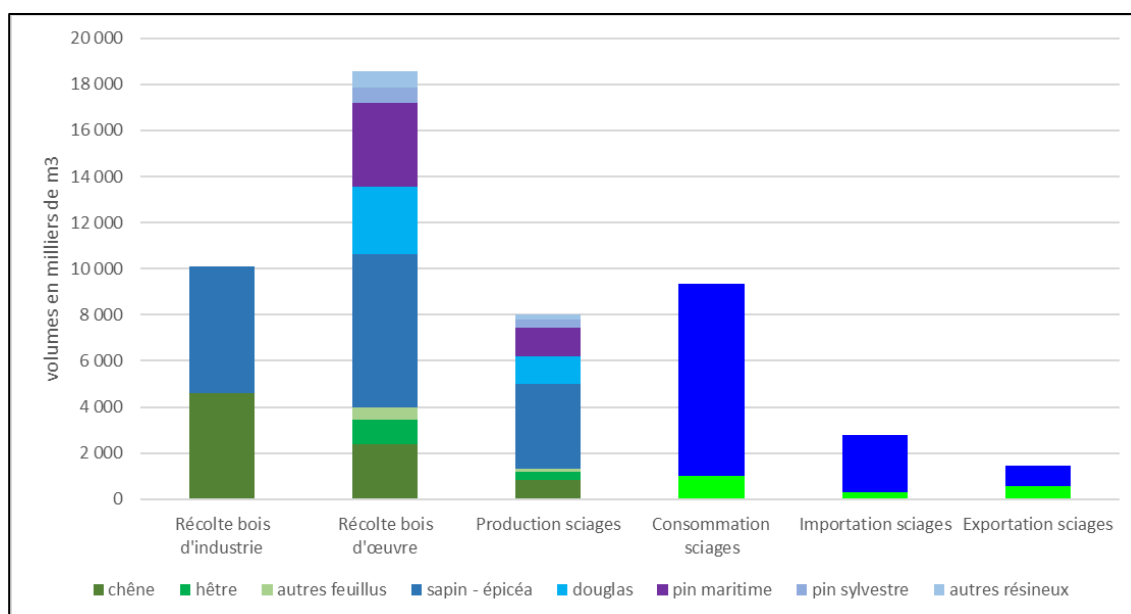
La répartition de la récolte entre BO, BI et BE est très différente entre feuillus et résineux, comme l'illustre le graphique ci-contre. La part de BO dans la récolte de résineux est beaucoup plus importante, traduisant à la fois des caractéristiques plus favorables pour la transformation industrielle des résineux (homogénéité, diamètres plus faibles dans les outils de sciage...) et une demande des marchés (produits de construction notamment) portant sur des produits résineux.

Cette dichotomie entre feuillus et résineux se retrouve dans les forêts (surfaces, volume, accroissement), dans les récoltes, dans les sciages (production, import-export, consommation), comme l'indique les deux graphiques ci-dessous.

Place des essences feuillues et résineuses dans la forêt française, la récolte de bois, la production-importations-exportations de sciages



Volumes de bois récolté et de production-importations-exportations de sciages des essences feuillues et résineuses



sources : CGGAER d'après IGNet SSP

Les exportations de grumes feuillues (essentiellement de chêne), notamment vers la Chine, font régulièrement l'objet de polémiques. L'importance des peuplements feuillus dans les forêts françaises, le manque de compétitivité de l'outil industriel de transformation feuillu et les prix d'achat des importateurs expliquent cette situation. Si ces courants exportateurs peuvent déstabiliser les prix et les approvisionnements locaux, leur importance reste faible au regard de l'offre de biomasse énergie. Ces exportations représentent en effet de l'ordre de 1,5 Mt MS : si ces grumes étaient transformées en France, environ la moitié du volume donnerait lieu à des produits bois et l'autre moitié à des produits connexes pouvant être valorisés en énergie, soit de l'ordre de 0,7 Mt MS et 3 TWh, ce qui reste modeste face à d'autre « gisements ».

Effet stockage et effet substitution

Le puits des produits bois

La récolte de bois constitue une exportation nette pour l'écosystème forestier. Toutefois, selon les usages qui en seront fait, le stockage de carbone peut se prolonger dans les produits bois sur des durées variant de quelques années (papier) à plusieurs centaines d'années (850 ans pour la charpente de Notre-Dame).

Si les produits bois ne séquestrent pas par eux-mêmes du CO₂, ils continuent de stocker le carbone présent dans les arbres durant toute leur durée d'utilisation. Ils constituent des réservoirs jusqu'à ce qu'ils libèrent leurs stocks de carbone dans l'atmosphère.

L'évaluation du stock de carbone dans les produits bois résulte de calculs fondés sur les flux annuels entrant (connaissance des volumes utilisés pour différents usages) et sortants (affectation arbitraire d'une durée de vie moyenne aux différents usages du bois). Par construction, ce stock ne varie pas si les utilisations du bois sont constantes en volumes et en usage, ce qui n'est jamais le cas. Une projection dans le futur nécessite donc de faire des hypothèses sur la répartition de la récolte annuelle de bois selon les différents usages.

À l'instar du « puits forestier », il est possible de mesurer ce « puits des produits bois » résultant de la différence de stocks, sur une période donnée, du carbone contenu dans tous les produits bois utilisés. Les entrées sont connues par la consommation annuelle des différents produits. Les sorties sont estimées en affectant des durées de demi-vie¹¹⁶ à chacun des produits en fonction de son usage moyen. Ainsi, l'ordre de grandeur des durées moyennes généralement retenues est de 35 ans pour les sciages, 25 ans pour les panneaux et un an pour le papier. Pour simplifier certains calculs, des durées de demi-vie moyennes peuvent également être affectées aux bois qui serviront à la fabrication des produits, en distinguant le bois d'œuvre (20 ans) et le bois d'industrie (5 ans). Le choix de tels coefficients est déterminant sur les calculs.

Du fait de ce calcul de flux entrant et sortant, le stockage du carbone dans les produits bois était jusqu'à présent très faible car d'une part la récolte de bois n'a pas beaucoup progressé, d'autre part la consommation de bois d'œuvre n'a pas significativement augmenté. Cette tendance étant valable depuis plusieurs dizaines d'années, le flux entrant et le flux sortant dans le stock des produits bois s'équilibraient.

Pour que le stock augmente, il faudrait que le flux entrant de produits bois à longue durée de vie progresse chaque année pendant une période assez longue. Une telle évolution suppose un accroissement de la demande et de la consommation de ce type de produits, dont l'approvisionnement peut provenir indifféremment d'une récolte supplémentaire de bois d'œuvre, d'un pourcentage plus important de la récolte qui est valorisée en bois d'œuvre ou d'une croissance des importations de produits bois.

Substitution matériaux

La substitution matériau désigne la quantité d'émissions de CO₂ évitées par la consommation d'un produit bois plutôt qu'un produit issu d'un matériau plus émetteur, comme le béton, l'acier, le plâtre ou encore l'aluminium.

Le calcul de cette substitution reste délicat car il repose sur une comparaison des filières complètes de production, au périmètre strictement identique, en utilisant des méthodes d'analyse du cycle de vie (ACV) allant jusqu'à la fin de vie du produit. Outre les difficultés d'analyse, l'évaluation des coefficients de substitution varie selon les contextes industriels et le mix énergétique de chaque pays. Dans les études récentes sur la forêt française, le coefficient de substitution moyen pour le bois d'œuvre et le bois d'industrie peut être estimé à 1,6 tonne de CO₂ évitée par mètre cube employé. La plage de variation est néanmoins importante (0,59 à 3,47), soulignant ainsi les incertitudes liées aux méthodes d'analyse, à la diversité de produits et des technologies.

Avec ces hypothèses et la consommation actuelle de produits bois, cet effet de substitution peut être évalué à environ 20 MtCO₂eq, ce qui en fait un levier important de l'atténuation.

Pour évaluer globalement l'effet de substitution généré par l'emploi supplémentaire d'une certaine quantité de produits bois, il faudrait également prendre en compte la part de matériaux plus énergivores qui est effectivement remplacée par le supplément de produits bois employés. Ce surplus de produits bois peut en effet in fine ne pas remplacer à 100 % d'autres matériaux ou bien remplacer d'autres produits bois (si on remplace une fenêtre ancienne en bois par une fenêtre moderne en bois par exemple)...

Enfin, le résultat du calcul de l'effet de substitution évolue dans le temps car les matériaux que le bois remplace n'auront pas le même « coût carbone » dans quelques années, du fait de l'amélioration (ou non) de leur performance environnementale.

L'effet de substitution matériau est donc réel et significatif mais il reste délicat à évaluer et il ne constitue pas une propriété ou un avantage intrinsèque du bois qui pousserait la filière à « s'endormir sur ses lauriers ».

Substitution énergie

La substitution énergie désigne la quantité d'émissions de CO₂ évitées par l'usage de bois énergie en remplacement d'énergies fossiles, comme le fioul, le gaz, le charbon principalement. La production de chaleur à partir du bois évite d'injecter du carbone fossile dans la biosphère. Cet effet de substitution dépend cependant de l'impact climatique de la source d'énergie à laquelle se substitue le bois : la référence utilisée est aujourd'hui le gaz naturel, principale source de production de chaleur par combustion, mais si la part des énergies non carbonées dans la production de chaleur augmente, l'effet de substitution pourrait diminuer.

L'effet de substitution du bois énergie est en général inférieur à l'effet de substitution matériau. Le coefficient de substitution moyen généralement utilisé est de 0,5 tonne de CO₂ évitée par mètre cube de bois rond utilisé pour la production d'énergie, avec une fourchette de valeur de 0,37 à 0,64. Avec la consommation actuelle de bois énergie, cet effet de substitution peut être évalué à environ 20 MtCO₂eq.

¹¹⁶ La demi-vie correspond au nombre d'années nécessaires pour atteindre la disparition de la moitié du stock du produit concerné.

3.3. Le cas particulier du chauffage domestique au bois

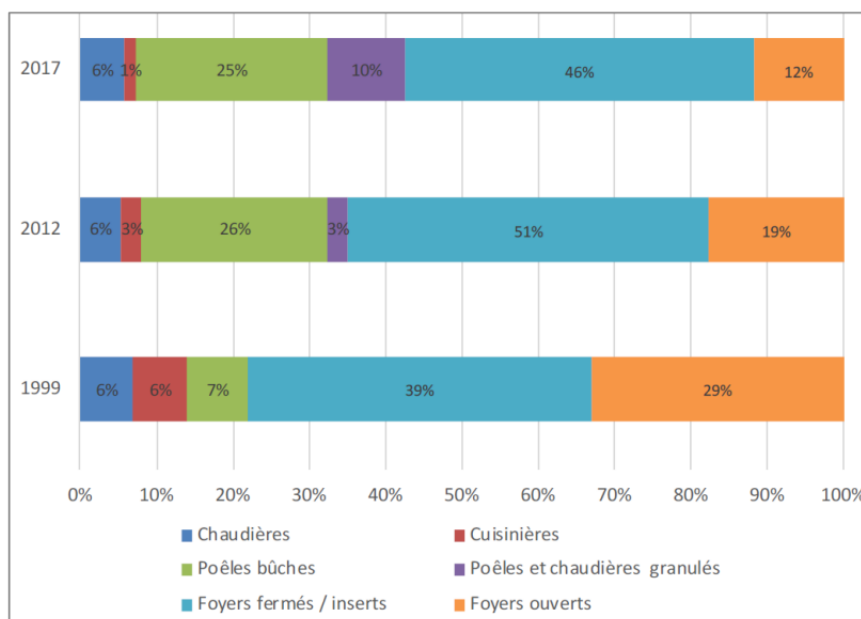
L'estimation de la consommation de bois énergie par les ménages n'est pas aisée du fait de l'autoconsommation directe, la pratique de l'affouage et l'existence de circuits non commerciaux. Elle nécessite des reconstitutions à partir d'enquêtes sur les ménages (cf. tableau ci-dessous).

Enquêtes ménages réalisées à l'échelle nationale par l'ADEME sur les années 1999, 2012 et 2017

Années	1999	2012	2017	unités
Totalité du Bois (bûches, granulés et autres combustibles) consommé (climat réel)	5,9	7,4	6,8	Millions d'utilisateurs
	NS	7,3	5,6	Mtep
		84,7	65,4	TWh
		33,2	25,7	Mm ³
dont Bûches	5,9	6,8	6,1	Millions d'utilisateurs
	6,8	6,8	5,1	Mtep
	79	80	59	TWh
	31,5	31,2	23,1	Mm ³
	50	49	37	M stères
dont Granulés	NS		Env. 0,7	Million d'utilisateurs
			0,5	Mtep
			6	TWh
		0,6 million d'utilisateurs	2,5	Mm ³
		0,5 Mtep	1,3	M tonnes
dont Autres combustibles (bûchettes, plaquettes)	NS	5 TWh	NS	Million d'utilisateurs
		2 Mm ³	0,04	Mtep
			0,5	TWh
			0,065	Mt (bûchettes)
			0,2	Mm ³ (plaquettes)
Consommation spécifique de bûches (climat réel)	8,6	7,3	6	Stères/ménage/an

Source : ADEME, Solagro, Biomasse Normandie, BVA, Étude sur le chauffage domestique au bois : Marchés et approvisionnement. 2018.

Évolution du parc d'appareils de chauffage au bois des particuliers au niveau national



Source : ADEME, Solagro, Biomasse Normandie, BVA, Étude sur le chauffage domestique au bois : Marchés et approvisionnement. 2018.

Dans ses bilans annuels, le SDES évalue la consommation primaire de bois-énergie pour le secteur résidentiel à partir de tels éléments (enquête auprès des ménages, ventes d'appareils de chauffage au bois...). Après avoir progressé dans les années 2000, cette consommation est quasi stable ces dernières années (après correction des variations climatiques) et le SDES indique que « *Le recul des ventes d'appareils de chauffage au bois entre 2013 et 2020 (à l'exception des poêles à granulés et à bûches) et la diminution régulière de la consommation de bois par ménage équipé d'un appareil de chauffage au bois, du fait notamment de l'amélioration de l'efficacité de ces derniers, expliquent cette tendance* ».

Figure 4.5.2.1 : consommation primaire de bois-énergie par secteur (données non corrigées des variations climatiques) et dépense associée

	2017		2018		2019		2020		2021	
	En TWh	En M€ ₂₀₂₁	En TWh	En M€ ₂₀₂₁	En TWh	En M€ ₂₀₂₁	En TWh	En M€ ₂₀₂₁	En TWh	En M€ ₂₀₂₁
Consommation primaire totale	107	2 323	107	2 211	107	2 278	100	2 276	114	2 612
Production d'électricité et de chaleur	17	406	19	449	19	481	19	417	21	466
Industrie	9	78	10	88	9	73	9	75	9	99
Résidentiel	76	1 765	74	1 603	74	1 648	69	1 721	79	1 970
Tertiaire	3	74	3	72	3	76	3	63	4	77
Agriculture-pêche	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0

Note : la consommation primaire de bois-énergie (hors liqueur noire) s'élève à 114 TWh en 2021, pour une dépense correspondante de 2,6 Md€.

Source : SDES, Bilan de l'énergie

Nota : La dépense prend en compte l'achat de bois hors des circuits commerciaux mais n'inclut pas l'auto-approvisionnement en bois (entre 30 et 40 % de la consommation de bois-bûche des ménages).

Cette consommation par les ménages représente les deux-tiers de la consommation primaire de bois-énergie, or elle reste particulièrement difficile à évaluer précisément¹¹⁷. De plus, la part provenant de forêt et celle provenant de haies, arbres épars, bosquets, vergers, vignes... sont encore plus délicates à cerner. Un ratio de 75 % provenant de forêt circule ; il est repris dans l'étude transition 2050 de l'ADEME, utilisant l'étude de 2018 sur le chauffage domestique au bois¹¹⁸, où on peut trouver les éléments suivants :

- 22,5 Mm³ de bois autoconsommé par les ménages dont 75 % provenant de forêt (16,9 Mm³) et 25 % hors forêt (3,6 Mm³)
- 64 % des volumes consommés par les utilisateurs de bûches proviennent de la récolte en forêt, soit près de 15 Mm³ (63 % en 2012) ; 23 % proviennent de l'entretien des vergers ou de haies, soit 5 Mm³ ; 13 % est du bois de récupération ou de rebut, soit 3 Mm³.

Pour autant d'autres études indiquent que 6,6 Mm³ sont récoltés dans les haies¹¹⁹, soit 3,5 MtMS, et 7,5 MtMS dans les vignes (tailles et renouvellement)¹²⁰, ce qui fait déjà 11 MtMS, soit environ 50 TWh potentiel en combustion. Même si une partie de ce bois est brûlée à l'air libre (cas des sarments et vieux ceps de vignes pour des raisons de prophylaxie) et qu'une autre partie est captée pour des utilisations non domestiques, il reste difficile de rapprocher 50 TWh récoltés et 8 TWh pour l'autoconsommation des ménages.

Le SDES fournit aussi des statistiques sur le prix du bois énergie à destination des particuliers ou des chaufferies professionnelles.

¹¹⁷ Dans l'étude Transition 2050, l'ADEME précise qu'il est courant d'accepter une marge d'erreur de 10 % sur la consommation de bois en résidentiel.

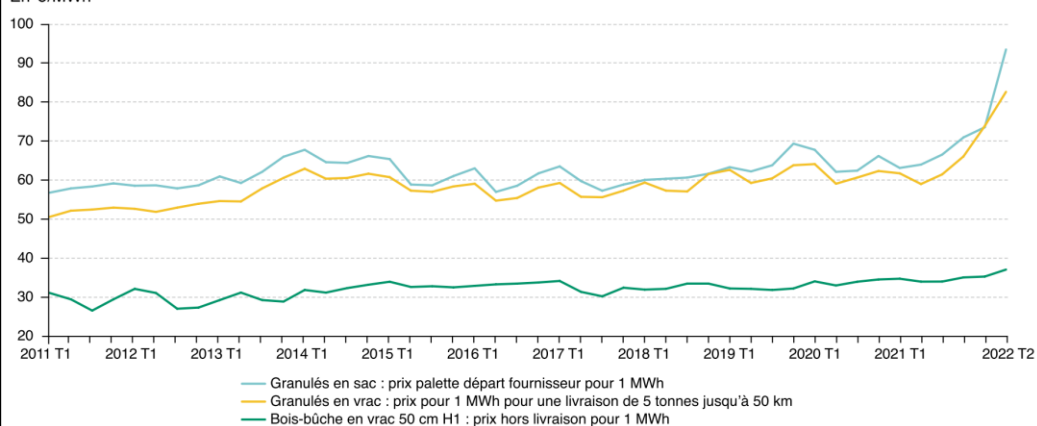
¹¹⁸ ADEME, Solagro, Biomasse Normandie, BVA, Étude sur le chauffage domestique au bois : Marchés et approvisionnement. 2018

¹¹⁹ Dassot Mathieu, Commagnac Loïc, Letouze Frédéric, COLIN Antoine. 2022. Stocks de bois et de carbone dans les haies bocagères françaises. 2022.

¹²⁰ Données de l'ONRB.

Figure 1.5.2.1 : prix TTC du bois-énergie : circuits commerciaux

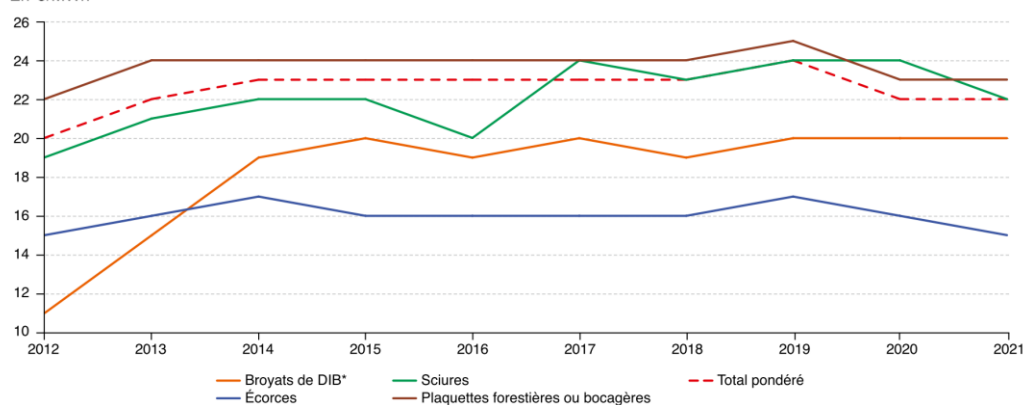
En €/MWh



Source : SDES, Bilan de l'énergie, d'après enquête CEEB-Insee-Agreste

Figure 1.5.3.1 : prix HTVA des combustibles bois avec livraison pour les chaufferies professionnelles

En €/MWh



* DIB : déchets industriels banals.

Note : indice pondéré calculé sur la base de la contribution des différents combustibles à la production thermique (projets Fonds chaleur) : plaquettes 71,5 %, broyats 11,4 %, sciures 11,3 %, écorces 5,8 %.

Source : Ademe, enquête Basic 2000 pour 2012, estimation CODA Stratégies à partir du CEEB pour 2013-2021

Evolution des indices de prix des bois vendus bord de route et des bois de recyclage vierges en l'état ou grossièrement fractionnés pour le transport entre 2012 et 2022 (base 100 en janvier 2012). CEEB



Source : Cahier du bois énergie n°88. Le bois International. Juillet 2022.

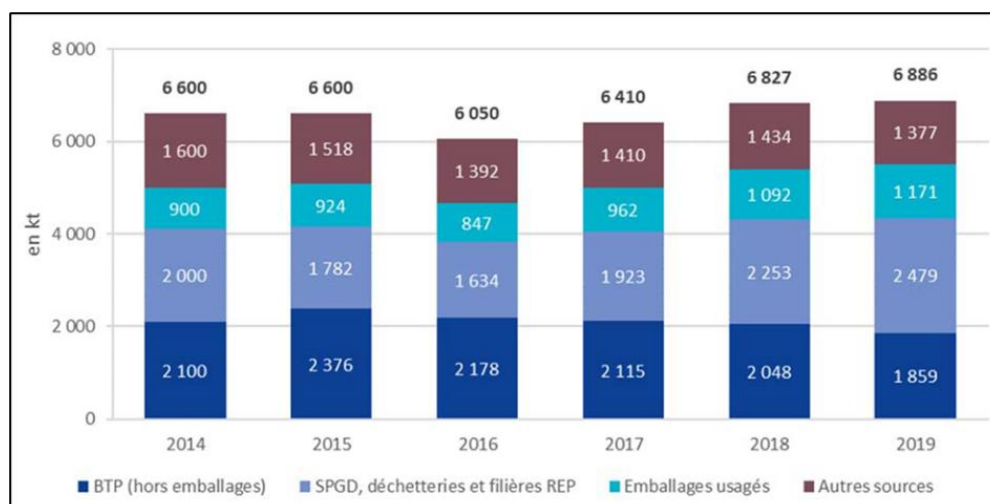
3.4. En fin de vie, les produits bois peuvent trouver une valorisation matière ou énergie

Les déchets bois de toute nature (transformation du bois, filières responsabilité élargie du producteur (REP) des papiers, meubles, bâtiments...) constituent un gisement dont la valorisation matière est souhaitable quand cela est possible (panneaux, papiers...) mais in fine, une valorisation énergétique reste beaucoup plus vertueuse qu'une mise en décharge.

Les flux de déchets sont difficiles à caractériser et quantifier. En 2015, le FCBA réalise, pour le compte de l'ADEME, l'étude « Évaluation du gisement de déchets de bois et son positionnement dans la filière bois / bois-énergie ». Les chiffres utilisés portaient sur 2012. Afin d'actualiser ces données établies, l'ADEME vient de lancer l'étude « Gisement des déchets de bois dans la filière bois / bois-énergie » dont les résultats sont attendus pour début 2024.

Le dernier bilan du recyclage¹²¹ indique que les déchets de bois¹²² collectés (autres que papiers cartons) représentent 6 886 kt en 2019. Environ 2 200 kt (33 %) ont une valorisation matière, soit en export (1 144 kt), soit dans la fabrication de panneaux en France (1 019 kt)¹²³. La valorisation énergétique concerne 39 % des déchets collectés (producteurs d'énergie) et les 28 % restants sont éliminés (principalement des déchets de bois mélangés à d'autres composants ou ayant subi des traitements). La collecte de palettes en fin de vie représente 1 755 kt en 2019, dont 95 % sont reconditionnées et remises sur le marché (donc non incluses dans les emballages usagés sur les graphiques suivants). Les 5 % restants sont inclus dans les déchets de bois collectés.

Collecte des déchets de bois en France par source (en kt), 2014-2019 (source FEDEREC¹²⁴)



La collecte devrait continuer à progresser sur les prochaines années, en particulier pour les déchets d'ameublement usagé : les éco-organismes se sont ainsi engagés à faire progresser la collecte séparée à 40 % du tonnage mis sur le marché en 2023, sachant qu'elle en est à 33 % en 2019. De plus, au moins 90 % des déchets collectés devront être valorisés (réemploi, recyclage et valorisation énergétique) à partir de 2022, contre 86 % en 2019. Enfin, la loi anti-gaspillage a instauré la mise en place à partir de 2022 d'une filière REP spécifique aux produits et matériaux dans le secteur du bâtiment.

De fait, l'offre de déchets devrait être plus importante, réduisant ainsi des tensions d'approvisionnement qui pourraient apparaître entre l'industrie des panneaux, l'énergie ou l'industrie papetière, au gré de la demande et des incitations publiques, mais aussi du classement des déchets bois¹²⁵. D'autres utilisations peuvent également se développer, en matière d'isolation notamment.

¹²¹ ADEME, Chloé DEVAUZE, Alima KOITE, Anaëlle CHRETIEN, Véronique MONIER. 2021. Bilan National du Recyclage 2010-2019 - Évolutions du recyclage en France de différents matériaux : métaux ferreux et non ferreux, papiers-cartons, verre, plastiques, inertes du BTP et bois. 99 p.

¹²² Les produits connexes de scierie n'entrent pas dans le périmètre du bilan national des déchets car il s'agit de coproduits.

¹²³ Il reste toutefois difficile de comparer les données Federec et celles de l'UIPP.

¹²⁴ Fédération Professionnelle des Entreprises du recyclage (FEDEREC). Le marché du recyclage en France en 2022.

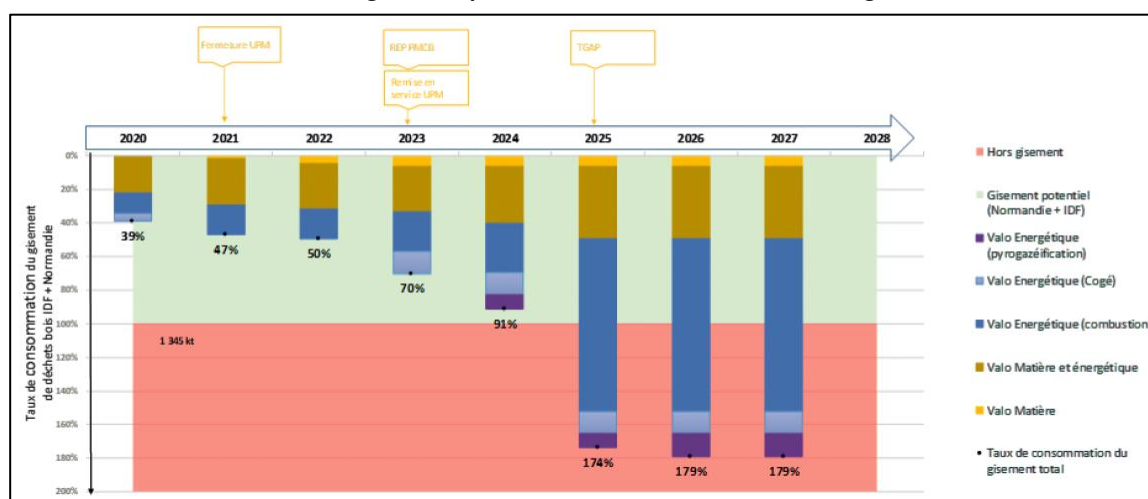
¹²⁵ Trois classes sont habituellement utilisées : classe A (bois non traités), classe B (bois traités non-dangereux) et classe C (bois traité dangereux). Les bois de classe C ne sont pas recyclés ou valorisés et doivent être incinérés.

À noter que ces chiffres de collecte ne prennent pas en compte les déchets de fabrication des industries de la seconde transformation du bois – y compris les usines de panneaux – qui sont valorisés in situ pour le process ou la production d'énergie.

Les derniers chiffres fournis par la FEDEREC font état de 7,3 Mt collectés en 2022, en hausse de 2 % par rapport à 2021, avec une progression de 23% des déchets de bois issus de la filière REP bâtiment. La valorisation matière est estimée à 57 % (4,2 Mt), soit + 10 % par rapport à 2021. La valorisation énergétique est stable à environ 2,3 Mt soit 31 % de la collecte. La FEDEREC indique également que « *Le déséquilibre structurel entre l'offre et la demande auquel s'expose le marché des déchets de bois commence à se manifester et devrait s'intensifier ces prochaines années* ». Dans une note de conjoncture de juillet 2022, la FEDEREC précisait « *Il y a une très forte demande des fabricants de panneaux en bois en France et en Europe de l'Ouest. Une partie [des grumes] est toujours exportée car les professionnels ont des contrats à honorer. Le démarrage de nouvelles installations consommant du bois énergie, en France et à l'étranger, demande davantage de matières que les entreprises ne sont capables d'en fournir* ».

Cette tension entre offre et demande est documentée dans le cahier bois énergie d'octobre 2022 du Bois International, avec les projets BCIAT¹²⁶ non encore réalisés à fin 2021 (+ 550 kt/an), deux projets lauréats de l'appel d'offres CRE 5-3 pour la cogénération à partir de biomasse, sans compter les 49 projets déposés pour l'appel à manifestation d'intérêt sur la pyrogazéification pour injection piloté par GRT-gaz qui envisagent d'avoir recours aux déchets de bois à hauteur d'environ 700 kt/an. À titre d'illustration, le programme Imp'Actes prédit une demande supérieure à l'offre dès 2024 pour les régions Normandie et Ile-de-France (cf. graphique ci-dessous) et même pour la moitié Nord de la France.

Évolution du taux de consommation du gisement potentiel de déchets de bois sur les régions Normandie et Ile-de-France



Source : Biomasse Normandie - programme Imp'Actes. In Cahier du bois énergie n°89. Le bois International. Octobre 2022.

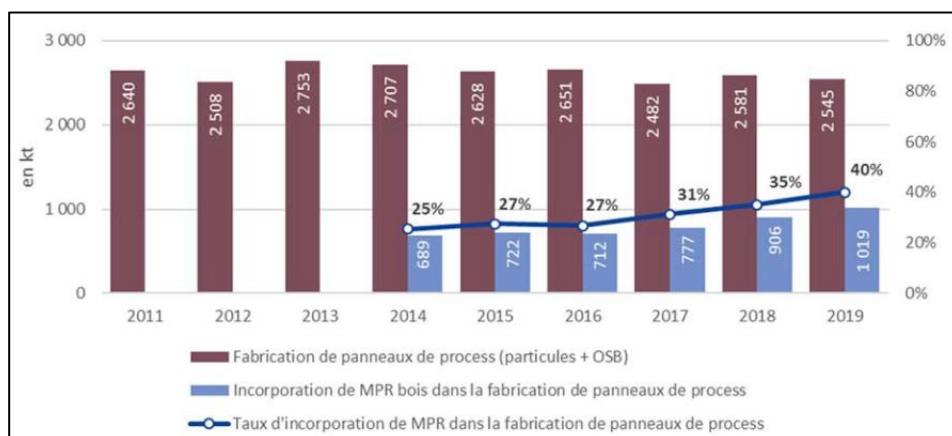
Dans le Plan déchets bois élaboré en 2017 par le Comité stratégique de filière, l'objectif est de recycler et valoriser 1,3 Mt de déchets bois supplémentaires en 2025, dont 400 kt à destination des usines de panneaux et 900 kt pour l'énergie. Cette trajectoire serait favorisée par la mise en place d'une nouvelle classification des bois récupérés en quatre classes (A, BR1, BR2, C)¹²⁷, en fonction de leur origine, ce qui permettrait une valorisation plus efficace (les trois classes A, B et C n'étaient pas en correspondance avec les réglementations sur la classification des déchets, les installations

¹²⁶ ADEME, Appel à projet biomasse, chaleur pour l'industrie, l'agriculture et tertiaire.

¹²⁷ Les travaux permettant de proposer cette nouvelle classification se sont déroulés entre 2018 et 2021. **Classe A** : biomasse pure pouvant présenter des teneurs naturelles variables de métaux lourds, voire de substances organo-halogénées à des niveaux de concentration de traces. – **Classe BR1** : déchets non dangereux respectant un cahier des charges de composition chimique avec des valeurs limites de concentration sur une liste déterminée de substances chimiques, dans l'objectif de permettre, pour ces déchets, leur recyclage notamment en panneaux à base de bois ; pour la valorisation énergétique en installation de combustion, les déchets de bois devront répondre à la définition réglementaire de la biomasse ou n'être plus considérés comme des déchets à la suite d'une procédure de sortie du statut de déchet. – **Classe BR2** : déchets non dangereux permettant le recyclage en panneaux et la valorisation énergétique en installations d'incinération ou de co-incinération de déchets, répondant aux dispositions des rubriques 2771 ou 2971 de la nomenclature des ICPE. – **Classe C** : déchets dangereux.

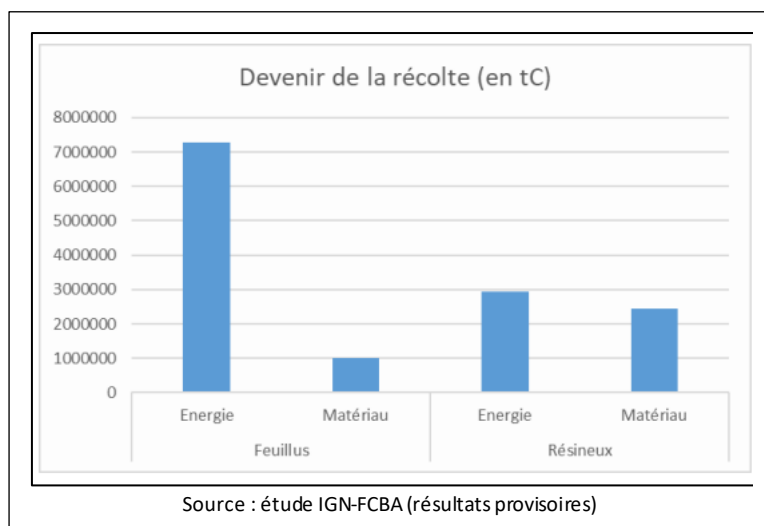
de combustion et le recyclage en panneaux à base de bois). Le plan mise aussi sur une amélioration du tri et une meilleure connaissance des gisements et flux notamment pour les déchets du bâtiment (DBAT) et les déchets des entreprises de seconde transformation du bois (DE2T)

Incorporation de déchets de bois dans la fabrication de panneaux de particules en France – 2011-2019.



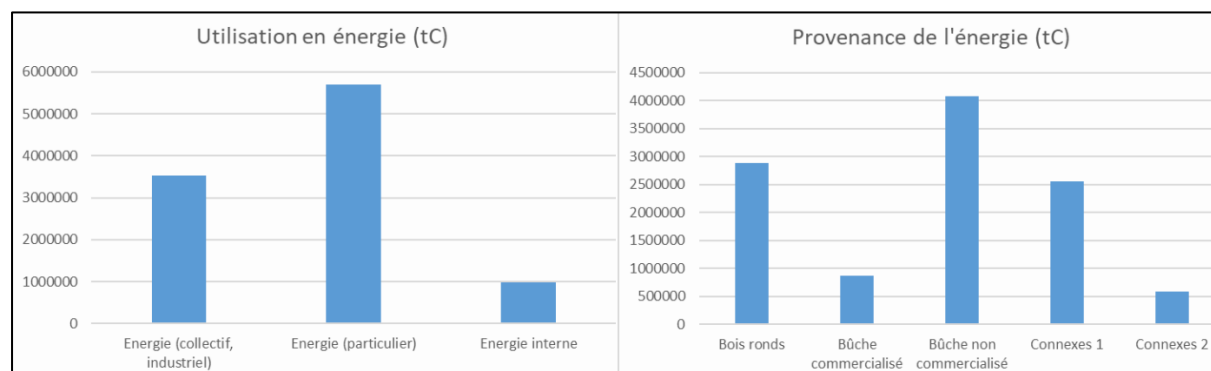
Source : UIPP

3.5. La filière bois énergie est indissociable des filières bois d'œuvre et bois d'industrie



Sur l'ensemble de la filière, avec les usages en cascades, une grande partie du bois récolté est finalement valorisé en énergie, après un temps de stockage plus ou moins long dans les produits bois (cf. 3.1). Actuellement, pour un m³ de bois récolté, environ 75 % finissent en bois énergie et 25 % dans des produits (dont 13 % dans les sciages, 7 % dans les panneaux et 5 % dans les papiers). Cette proportion est très différente entre les feuillus (88 % énergie – 12 % produit) et les résineux (55 % énergie – 45 % produits). Cela se retrouve dans la décomposition de

la récolte entre BO, BI et BE avec respectivement 17 % - 15 % - 68 % pour les feuillus et 61 % - 13 % - 26 % pour les résineux. Ces chiffres montrent bien l'enjeu d'une meilleure valorisation des feuillus en tant que BO (sachant que 62 % du volume de bois sur pied des forêts françaises est feuillu et 38 % résineux). Cela permettrait, outre la création de valeur (via des produits bois et une meilleure rémunération de la grume), une augmentation de la valorisation matière à longue durée de vie.



Source : étude IGN-FCBA (résultats provisoires)

Le ratio de destination de la récolte vers des produits bois à longue durée de vie (sciages et panneaux) est déterminant pour les simulations de disponibilités futures en bois énergie. D'une part, il détermine, par différence, la part du bois récolté qui va directement en bûches ou en plaquettes vers les usages énergie des ménages et des chaufferies (les volumes de bois destinés à la fabrication de la pâte à papier sont en général considérés comme constants, compte tenu des perspectives industrielles en France dans ce secteur). D'autre part, il conditionne le volume de produits connexes dont une partie est utilisée par les industries de la pâte à papier (stabilité attendue), une autre partie vers les industries des panneaux (en décroissance à capacité de production égale du fait de l'incorporation croissante de déchets de bois) et le reste vers la production d'énergie (autoconsommation pour production de chaleur ou d'électricité dans les usines de transformation, fabrication de granulés, ...).

Il est donc possible grâce à ce ratio de simuler, à partir d'un volume de récolte donné, la destination matière vers les produits de sciage, les panneaux et la pâte à papier, le solde étant destiné à la valorisation énergétique. C'est ce que réalise un « calculateur forêt-bois » utilisé pour simuler les productions de bois matériau/énergie et les bilans carbone dans les travaux de la SNBC.

Les hypothèses actuelles portent ce ratio de 25 % en 2025, à 30 % en 2030 et 38 % en 2050, avec en corollaire, une part du bois énergie respectivement de 68 %, 64 % et 56 % (la différence correspondant à la pâte à papier). La SNBC 2 tablait déjà sur une plus grande part de production de sciages et panneaux dans la récolte et une baisse de la part énergie. Une telle orientation, vertueuse, nécessite de profondes évolutions technologiques et industrielles (possibilité de produire des éléments en bois feuillus à des prix compétitifs) et des marchés (consommation de produits feuillus, sachant que les produits dans la construction sont aujourd'hui majoritairement résineux). Au-delà de ces facteurs limitants à lever, une part plus importante de la récolte valorisée en tant que BO générerait une augmentation des quantités de produits connexes (1 m³ de bois scié produit environ la moitié de connexes). Une valorisation matière de ces connexes supplémentaires ne pourra pas être trouvée dans la filière papier (stagnation attendue) et seule une valorisation dans la filière panneaux permettrait plus de stockage dans des produits à longue durée de vie. Pour autant, les usines de panneaux utilisent de plus en plus de bois déchet et une valorisation matière des connexes nécessiterait des augmentations de capacité très importantes, dont le réalisme reste à démontrer¹²⁸. L'étude d'I4CE de février 2022 « Puits de carbone : l'ambition de la France est-elle réaliste ? » aboutissait aux mêmes conclusions¹²⁹.

Cette augmentation de la valorisation matière doit être corrélée avec les perspectives d'augmentation des débouchés, notamment dans le secteur de la construction qui est le principal utilisateur. Plusieurs études récentes cherchent à évaluer cette demande à partir de paramètres socio-économiques (démographie, effets de mode, évolution des normes, capacités propres de la filière bois...).

Des projections conduisent à une évolution de la demande en bois pour la construction, résumée dans le tableau suivant.

¹²⁸ L'augmentation de la production de sciages selon le scénario le plus volontaire « neutralité carbone » de l'étude prospective bois construction (ADEME, CODIFAB, FBF, BIPE, FCBA. 2019) est de 4 Mm³ en 2035. Avec un rendement global de 50 %, cela génère 4 Mm³ de produits connexes (environ 2,6 Mt) soit près de 50 % de plus qu'aujourd'hui, représentant plus que toute la valorisation matière actuelle et la moitié de l'usage énergie actuel des produits connexes. L'étude prospective estime à environ 60 % l'augmentation de la consommation de panneaux nécessaire en 2035 dans le cadre du scénario « neutralité carbone », soit environ 1 Mm³. Avec les ratios de consommation actuels, cela représenterait une demande de déchets bois supplémentaire de 0,15 Mt et de produits connexes de 0,15 Mt également, à comparer aux 2,6 Mt supplémentaires générés par le sciage.

¹²⁹ « Toutefois, en ce qui concerne la réorientation massive du bois vers des usages à plus longue durée de vie, les frontières du réalisme sont probablement dépassées. D'un point de vue technique : la part des sciages dans la récolte totale passe de 10 % à 20 %, alors que cette part, essentiellement liée à la qualité des bois existants, semble difficile à modifier substantiellement d'ici à 2050. De plus, les sciages étant un débouché à forte valeur ajoutée, on peut supposer que l'on est déjà proche du potentiel maximum. Du point de vue du marché : l'augmentation de la production de panneaux prévue par la SNBC (+244 % entre 2015 et 2050) ne pourra pas être absorbée par la demande domestique et devra donc reposer sur des exportations massives. Même le scénario de demande le plus optimiste dans le secteur de la construction n'augmente la consommation de panneaux que de 80 %. D'autres secteurs pourraient absorber une partie du surplus, comme l'ameublement par exemple, mais on semble loin des augmentations nécessaires. Néanmoins, l'intégration à cette catégorie des isolants à base de bois, et notamment de la laine de bois, pourrait également permettre de développer les débouchés ».

Volumes de bois et de panneaux pour les différents horizons de projection pour le scénario Objectif neutralité carbone

Scénario Objectif Neutralité Carbone milliers de m ³	2015	2020	2035	2050
Bois	2 733	3 338	6 194	7 374
Panneaux	1 490	1 763	2 277	2 657
Total	4 223	5 101	8 471	10 032

Source : ADEME, CODIFAB, FBF, BIPE, FCBA. 2019.
Dans ce tableau, le bois correspond à du bois massif

L'étude relève toutefois dans son scénario « Neutralité Carbone » que la forêt française ne pourra pas fournir le marché intérieur en sciages résineux à partir de 2035, même en adoptant une sylviculture dynamique (D). Le tableau ci-dessous indique aussi les résultats d'une sylviculture en continuité avec la trajectoire actuelle (C).

Pour le bois d'œuvre résineux, le besoin en 2035 devrait avoisiner 6,5 Mm³, soit +100 % par rapport à 2015, alors que, dans une hypothèse de sylviculture dynamique, la disponibilité supplémentaire n'en couvrirait que la moitié. En particulier, il est attendu une forte croissance de la consommation de charpentes dont les volumes seraient multipliés par plus de trois entre 2015 et 2035.

En revanche, concernant le bois d'œuvre feuillu, un scénario sylvicole dynamique permettrait de satisfaire la demande, le problème étant une offre excédentaire de l'ordre de 1,5 Mm³. Les auteurs indiquent que l'usage du bois d'œuvre feuillu en structures a du potentiel mais qu'il ne devrait pas se développer au-delà de certaines niches pour lesquelles un surcoût est acceptable. Cette seule question pourrait faire l'objet de longs développements car les feuillus ne sont pas une catégorie homogène et la métropole dispose de nombreuses essences feuillues (et la Guyane est riche de centaines d'espèces). Cette diversité est un atout car chaque bois apporte des propriétés adaptées à certains usages mais c'est aussi un handicap dans une optique de massification de la transformation.

Écarts entre la disponibilité supplémentaire et la demande supplémentaire de bois

Milliers m3 Scénarios	2020						2035					
	BOR		BOF		BI		BOR		BOF		BI	
	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
T	-485	-104	-34	342	806	2442	631	2626	734	2538	4735	13262
V	-927	-546	-106	270	538	2174	-3379	-1384	82	1886	3570	12097
A	-510	-129	-113	263	835	2471	-1048	947	252	2056	4327	12854
ONC	-811	-430	-92	284	538	2174	-5489	-3494	-431	1373	3283	11810

Source : calculs FCBA

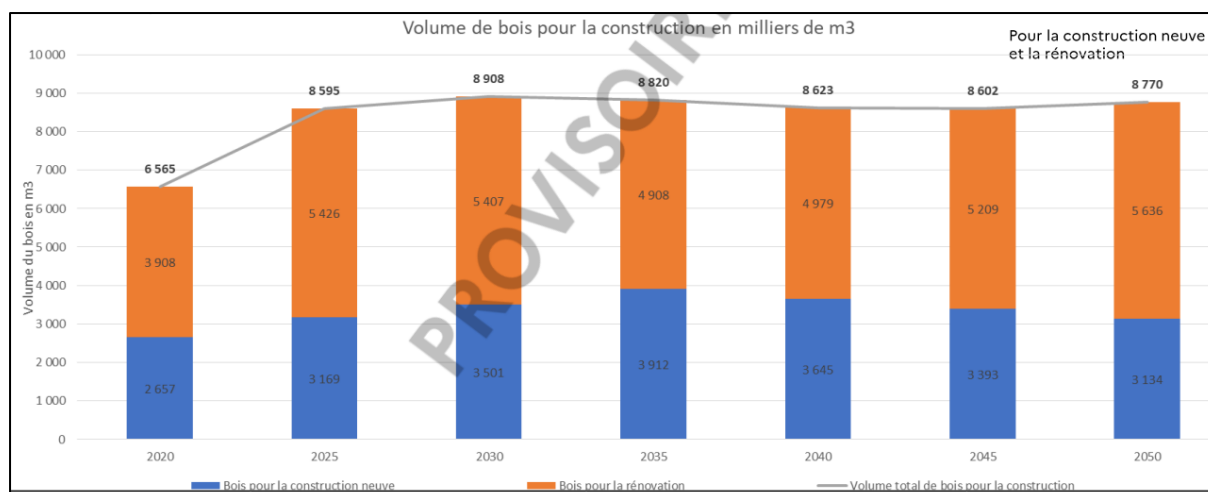
BOR : Bois d'œuvre résineux / BOF : Bois d'œuvre feuillus

Source : ADEME, CODIFAB, FBF, BIPE, FCBA. 2019.

L'étude met donc en évidence une distorsion entre la ressource forestière et les emplois actuels et futurs du bois qui devraient concerner majoritairement les résineux alors que nos forêts produisent principalement des feuillus.

L'étude IGN-FCBA en cours a également réalisé des projections de la demande en bois pour les marchés de la construction, illustrées par le graphique ci-dessous. La progression de la demande est soutenue mais un peu moins forte que dans l'étude précédente.

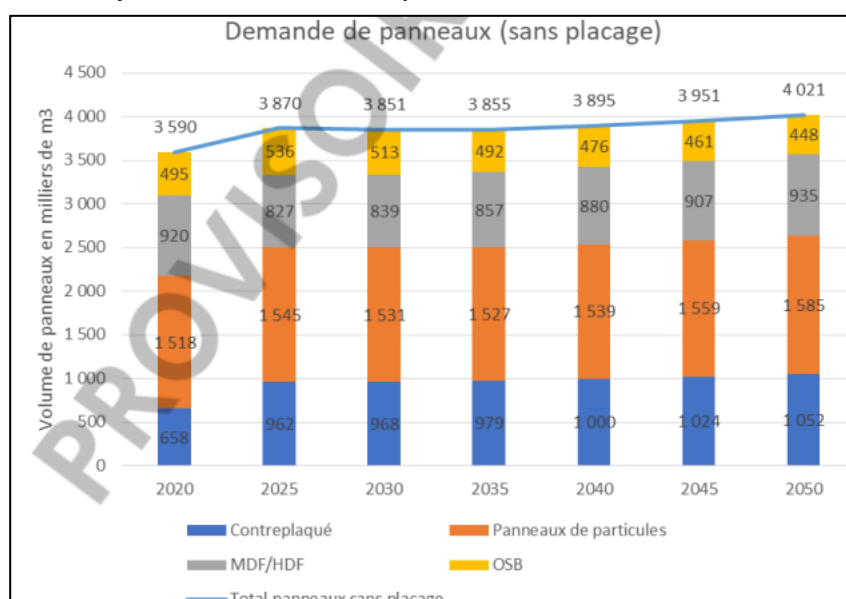
Projection de demande de bois pour la construction et la rénovation d'ici 2050



Source : FCBA (résultats provisoires)

La demande de panneaux montre une augmentation mesurée, comme dans l'étude de 2019, ce qui confirme qu'une augmentation de capacité de transformation est nécessaire pour absorber le volume supplémentaire de connexes (récolte accrue et plus de produits sciés) et se conformer au ratio de valorisation matière prévue par la SNBC, demanderait de pouvoir exporter une partie de la production, à moins que la production de meubles et d'isolants bois se développe considérablement.

Projection de la demande de panneaux à base de bois d'ici 2050



Source : FCBA (résultats provisoires)

Enfin, l'étude confiée par la filière au cabinet Carbone 4¹³⁰ scénarise également la demande de bois pour les différents débouchés et notamment celui de la construction. Les résultats ne sont pas encore diffusés.

3.6. In fine, quel potentiel pour la disponibilité supplémentaire en bois énergie ?

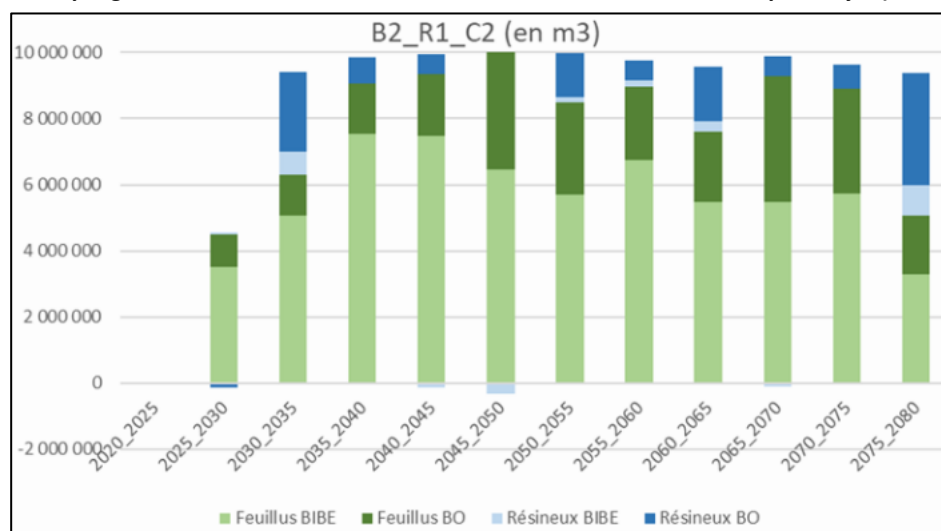
Par rapport à la situation connue aujourd'hui et documentée par le SDES, la disponibilité future supplémentaire en bois énergie dépend principalement de quatre paramètres : l'augmentation de la récolte, le ratio de destination de la récolte vers la production de sciages et de panneaux, le volume supplémentaire de déchets de bois collectés et la part de recyclage matière/énergie.

¹³⁰ <https://www.carbone4.com/company>

Augmentation de la récolte de bois en forêt

En première approche, toutes choses égales par ailleurs, une augmentation de 10 Mm³ de bois récolté destiné à la consommation et la transformation correspond à 7,5 Mm³ de bois pour l'énergie, en appliquant le ratio actuel de valorisation matière. Cela permettrait de produire environ 17 TWh supplémentaires si ce bois est utilisé pour fournir de la chaleur par combustion.

Récolte additionnelle par rapport à 2020 du scénario B2-R1-C2 (récolte de 63 Mm³ en 2030 puis stabilité, programme de reboisement atteint en 2030 et scénario climatique moyen)



Source : étude IGN-FCBA (résultats provisoires)

D'ailleurs, sans modification des caractéristiques d'usage des bois entre BO et BIBE, l'étude IGN-FCBA prévoit, dans le scénario d'une récolte portée à 63 Mm³ en 2030 et dans l'hypothèse de successions de crises dues au climat, une récolte supplémentaire où la part du BI-BE est importante. En considérant que la récolte additionnelle de BIBE affectée au secteur de la pâte est nulle, et que la répartition entre énergie et panneaux n'est pas modifiée, l'étude précise que la récolte additionnelle est principalement orientée vers l'énergie et dans une moindre mesure vers les panneaux (le scénario d'utilisation de la récolte diffère peu en 2035 et 2050).

Augmentation de la récolte de bois hors forêt

Une augmentation de la récolte en bois hors forêt (haies, agroforesterie) peut également être envisagée. La France totalise encore 750 000 km de haies, mais ce linéaire ne cesse de diminuer. En 15 ans, entre 2006 et 2021, la perte est évaluée à 15 % et 23 500 km/an ont disparu entre 2017 et 2021 (arrachages et dépérissements faute d'entretien des haies dégradées et vieillissantes). Les 3 500 à 4 000 km de haies plantés par an sont loin de compenser les pertes. Pour les agriculteurs, la gestion des haies est considérée comme contraignante et coûteuse. Les avantages diffus fournis par la haie (biodiversité, ressources en eau, etc.) et leur valorisation économique (production de biomasse énergie notamment) ne permettent pas d'emporter la décision d'en réinstaller ou de les entretenir.

Les pouvoirs publics cherchent à inverser cette tendance. Après France 2030 qui visait à planter 5 000 km de haies en deux ans, le « Pacte en faveur de la haie », présenté le 29 septembre 2023, a pour objectif de planter 50 000 km de haies d'ici à 2030 et de développer leur gestion durable, avec 110 M€ de dotation dès 2024. De fait, les projections de production de biomasse à partir des haies sont très ambitieuses et la SNBC table actuellement sur +4 TWh de bois énergie hors forêts en 2030 et +19 TWh en 2050 (contre 25,7 TWh en 2019), avec un linéaire total de haies atteignant 1,57 Mkm à horizon 2050, soit un doublement par rapport à aujourd'hui.

Une étude récente permet d'évaluer le prélèvement en bois des haies à environ 3,5 MtMS France entière (6,5 Mm³). En appliquant un taux de perte de 25 %, cela correspondrait à environ 12 TWh. Plus que doubler ce chiffre en 2050 paraît particulièrement ambitieux, d'autant que des haies nouvellement plantées ne produiront pas pleinement à cette échéance.

Compte-tenu de l'importance des freins à lever pour inverser une tendance bien ancrée, mais aussi de la difficulté technique et économique à assurer une gestion durable des haies, la mission considère que les gains de biomasse énergie espérés sont trop optimistes et qu'il serait plus réaliste de viser + 6 TWh par rapport à aujourd'hui, ce qui demanderait déjà des changements considérables du monde agricole en faveur de la haie.

D'autres ressources peuvent également être mobilisées en tant que bois « hors forêt ». L'agroforesterie reste peu développée et une production supplémentaire d'arbres qui seraient plantés dans ce cadre n'aura pas beaucoup d'incidence en 2050. Le bois issu de l'entretien ou du renouvellement des vergers (autour de 0,5 à 0,6 MtMS) et des vignes (0,4 à 0,5 tMS)¹³¹ apporte environ 1 MtMS, soit 4,5 TWh par an, et une production supplémentaire n'apparaît pas envisageable (sauf ponctuellement campagne d'arrachage de vignes).

Augmentation du ratio de valorisation matière

La réorientation d'une partie de la récolte actuelle vers le BO BI (plus de sciages ou de panneaux) au dépend du BE, si tant est que cela soit réalisable, ne va pas changer significativement la disponibilité en énergie bois. La baisse de BE sera en partie compensée par une production accrue de produits connexes qui ne pourront pas tous être valorisés en matière. Aujourd'hui, environ 52 % du bois d'œuvre se retrouvent dans les produits connexes et environ 25 % de ces connexes issus de scieries sont utilisés en matière, à part à peu près égale pour la fabrication de panneaux et celle de pâte. Un m³ de BO donne donc schématiquement 0,4 m³ utilisé en énergie. Ce ratio pourra être plus important si la valorisation matière des connexes ne suit pas l'augmentation du volume de connexes produits par une augmentation des volumes de bois d'œuvre transformés¹³².

Augmentation de la collecte et de la valorisation des déchets de bois

La collecte et la valorisation de déchets de bois est amenée à augmenter, sous l'effet notamment de la nouvelle filière REP Bâtiment, mais les taux de valorisation sont déjà élevés pour le bois (cf. 3.5), de l'ordre de 70 % (77 % pour les 2,2 Mt de déchet bois du bâtiment¹³³). Une partie de ces déchets trouve une valorisation matière dans la fabrication de panneaux (cf. 3.5) en France et à l'export. Avec une amélioration de la collecte, du tri et de la classification administrative, ce qui limiterait la partie actuellement non valorisée, un gisement supplémentaire d'environ 1 Mt pour l'énergie semble réaliste à termes, ce qui représenterait de l'ordre de 4 TWh. Ce volume pourrait augmenter en cas de préemption sur les usages matière (panneaux) actuellement estimés à environ 1 Mt en France et 1 Mt à l'export ((Belgique, Italie, Espagne).

À noter que le scénario actuel SNBC table sur une augmentation de la valorisation énergétique des déchets bois passant de 16,5 TWh en 2019 à 19 TWh en 2030 et 29 TWh en 2050. Le chiffre de 2019 semble élevé par rapport aux valorisations énergétiques issus des études et bilans des déchets (de l'ordre de 2,5 Mt soit environ 10 TWh). L'augmentation prévue en 2050 est également optimiste (plus de 3 Mt supplémentaires).

3.7. La prise en compte du bois-énergie dans les « run » de la SNBC

Le secteur forestier fait l'objet d'une analyse particulière dans les simulations de la future SNBC. Les hypothèses sur les principaux déterminants (surface, production biologique, mortalité, récolte, décomposition de la récolte selon différents usages matière et énergie, demi-vie des produits bois...) sont introduites dans un « calculateur forêt-bois » permettant de produire in fine les quantités matière et énergie, pouvant ensuite être converties en TWh ou en CO₂ équivalent (absorptions et émissions). La partie énergie prend en compte le bois directement utilisé pour l'énergie, en circuits commerciaux ou non, et tous les coproduits de transformation utilisés en énergie.

¹³¹ Source ONRB.

¹³² Il est également un peu plus important car d'autres coproduits sont également générés tout au long de la chaîne de transformation des sciages en produits finis. Une partie de ces coproduits ont une valorisation énergétique. Il faudrait disposer d'un diagramme de flux très détaillé pour les évaluer.

¹³³ ADEME, TERRA, TBC Innovations, ELCIMAÏ Environnement, Au-Dev-Ant, E. Parola. Étude de préfiguration de la filière REP Produits et Matériaux de Construction du secteur du Bâtiment. Mars 2021.

Pour autant, le bois-énergie comprend également du bois ne provenant pas de la forêt – le bois hors forêt – (haies, arbres isolés, bosquets, arbres en ville, vergers, vignes...) et des déchets de bois collectés (emballages, meubles, bâtiments...). Ces données ne sont pas fournies par le calculateur, qui se fonde sur l'inventaire forestier national de l'IGN, mais doivent être estimées à partir d'études spécifiques, notamment celles conduites par l'ADEME, Solagro ou Biomasse Normandie sur la consommation domestique de bois de chauffage, cette dernière étant largement majoritaire dans la consommation globale de bois-énergie.

In fine, les modélisations doivent être cohérentes avec les chiffres annuels du SDES, notamment celui de la consommation primaire de bois énergie. Or, la concaténation et la mise en cohérence de ces sources dans les différents « run » semblent délicate. Le tableau des sorties modèles distingue ainsi trois compartiments pour le bois énergies : « Bois énergie issu de la forêt, produits connexes de scierie énergie, déchets de bois », « Bois énergie issu de l'agroforesterie et des arbres hors forêt » et « Autres produits dérivés du bois boues de papeterie, liqueurs noires... ».

Pour le premier compartiment, les résultats du calculateur sont utilisés, en distinguant les usages énergie (« biomasse "fraîche" et coproduits » + « valorisation déchets bois ») et les usages matière (« sciages », « panneaux », « papiers »). Fournies en MtCO₂eq, ces quantités sont transformées en Mm³eq de bois, puis en TWh (avec 2,4 MWh PCI par m³ pour le bois et 1,9 MWh PCI par m³ pour les déchets bois¹³⁴). Le résultat de ce calcul est ensuite « corrigé » pour être en cohérence avec celui du SDES. Il faut pour cela connaître la part d'origine forestière de la consommation primaire de bois-énergie. Le SDES ne fournissant pas cette donnée, elle est extrapolée à partir des éléments de l'étude Transition 2050 de l'ADEME qui indique 79,4 TWh de biomasse forêt et 25,7 TWh de biomasse hors forêt (pour 2017) pour usage énergétique combustion, soit 105 TWh au total. Ce ratio de l'ADEME est appliqué aux résultats 2019 du SDES (118,9 TWh de biomasse solide¹³⁵) pour obtenir 89 TWh de bois-énergie issus de forêt. Les résultats du calculateur sont ensuite calés sur ce chiffre par règle de trois.

Le deuxième compartiment « Bois énergie issu de l'agroforesterie et des arbres hors forêt » a été initialement fourni via les sorties agricoles de MOSUT à hauteur de 43 TWh. Ce chiffre n'a pas été retenu et la valeur de 22,8 TWh a été fixée à partir d'autres sources.

Enfin, le troisième compartiment « Autres produits dérivés du bois boues de papeterie, liqueurs noires... » s'élève à 16,7 TWh.

Le total conduit, pour 2019 à 128,3 TWh. Ce chiffre interpelle alors que le SDES indique pour la même année de l'ordre de 118 TWh et 108 TWh hors liqueurs noires. Il semble bien que la réunion des différentes sources et leur mise en cohérence aient conduit à des doubles comptes s'agissant notamment des liqueurs noires. En outre, le ratio utilisé pour corriger les résultats du calculateur pour le bois issu de forêt se fonde sur un chiffre du SDES qui comprend les liqueurs noires¹³⁶ bien que celles-ci soient comptabilisées à part dans les « Autres produits dérivés du bois ». Il semble qu'il y ait ainsi de l'ordre de 10 TWh en trop en 2019. Pour mémoire, les derniers chiffres du SDES pour les années 2020, 2021 et 2022 indiquent une consommation primaire de bois-énergie de respectivement 108, 114 et 105 TWh (hors liqueurs noires).

Pour 2050, un calcul rapide peut être fait en retenant les hypothèses suivantes.

- Récolte utile accrue à hauteur de 63 Mm³ en 2030 puis stable.
- Ratio de valorisation énergétique entre 70 % (réorientation réussie vers plus de valorisation matière) et 75 % (statu quo).

¹³⁴ Ce choix peut être interrogé sachant que les déchets bois sont a priori plus secs et on s'attendrait à un PCI plus élevé que le bois brut.

¹³⁵ À noter que la biomasse solide comprend également les déchets renouvelables incinérés et les résidus agricoles et agroalimentaires (également incinérés) qui doivent être défalqués pour isoler le bois-énergie.

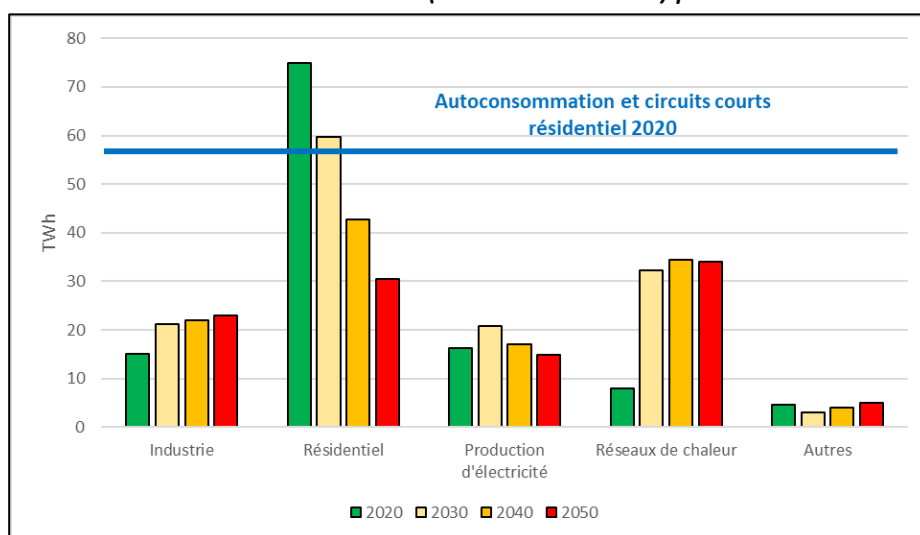
¹³⁶ Le bois-énergie : il comprend le bois-bûche (commercialisé ou autoconsommé) ainsi que tous les coproduits du bois destinés à produire de l'énergie : liqueur noire, écorce, sciure, plaquettes forestières et plaquettes d'industrie, briquettes reconstituées et granulés, broyats de déchets industriels banals, bois en fin de vie, etc. Source SDES.

- Un volume de bois hors forêt augmentant peu par rapport à aujourd'hui, même si le linéaire de haie inversait sa tendance (les nouvelles haies produiraient peu en 2050, le temps d'être installées). Une valeur de 7 Mm³ peut être retenue.
- Enfin, les déchets de bois, déjà fortement valorisés (dont 2 et 2,5 Mt sont aujourd'hui utilisés en énergie) vont sans doute augmenter un peu en volume collecté et on peut retenir un volume supplémentaire disponible pour l'énergie de 1 Mt.

Sous ces hypothèses, ce seraient de l'ordre de 135 TWh qui seraient disponibles en 2050. Cette estimation est inférieure à celle retenue dans le dernier scénario SNBC (145 TWh) et elle n'est pas obtenue avec les mêmes répartitions forêt / hors forêt / déchets bois.

Le scénario SNBC fait l'hypothèse d'une relative stabilité de la consommation de ces ressources pour produire de la chaleur jusqu'en 2030 - 2040, puis un usage accru pour la fabrication de biocarburant 2G et la pyrogazéification. Couplé avec des demandes de chaleur fortement accrue dans l'industrie et les réseaux de chaleur, cela implique de considérablement réduire les consommations domestiques qui représentent aujourd'hui près des deux tiers de la consommation. Sachant que cette consommation domestique est à 60 % issue d'autoconsommation et circuits non commerciaux, cela revient à miser d'une part sur le changement de mode de chauffage des 7 millions de ménage se chauffant au bois et d'autre part sur la possibilité de mobiliser la ressource dispersée correspondante pour assurer l'approvisionnement de chaufferies industrielles ou des réseaux de chaleur. Si le premier pari est déjà très ambitieux sociologiquement et économiquement, le second paraît irréalisable face au besoin de main d'œuvre et aux coûts de mobilisation.

Consommation de biomasse solide (essentiellement bois) prévue run 2 SNBC 3



Source : DGEC. Traitement mission.

3.8. La multiplicité des diagrammes de flux au sein de la filière forêt-bois

Comme les différents « run » de la SNBC, les études prospectives sur l'offre et la demande de produits bois (matériaux et énergie) se confrontent au défi d'avoir une description exhaustive des différents flux de matière, depuis la forêt jusqu'aux déchets bois en fin de vie (en volume, masse, équivalent énergie et équivalent carbone).

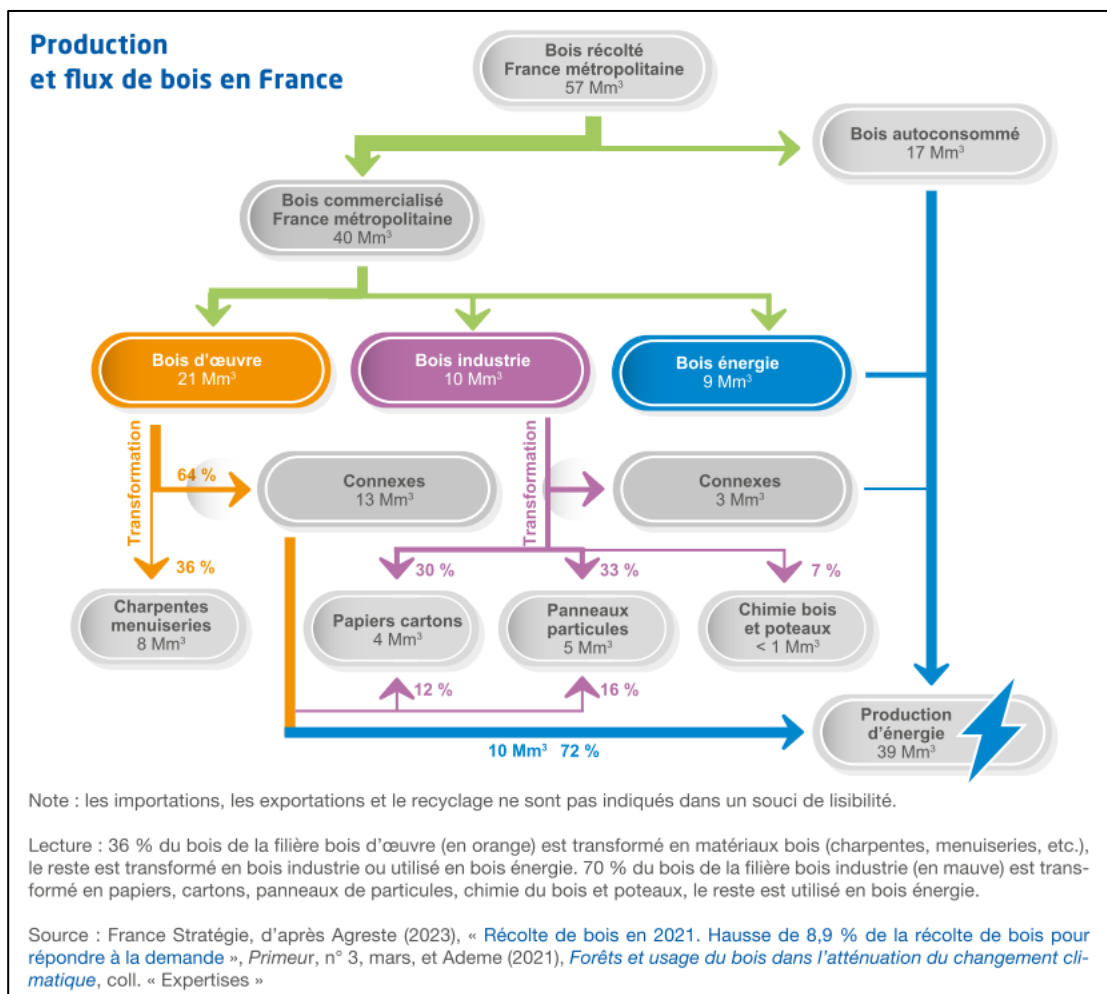
Force est de constater qu'une vision de référence, qui serait utilisable par tous les acteurs, n'existe pas. L'expertise et la consolidation des diagrammes existants en un seul, partagé par tous, apporterait une réelle plus-value collective.

Sur ce sujet, on peut noter le projet de recherche « BACCFIRE - Évaluation des contributions du carbone forestier et des produits Bois à l'Atténuation du Changement Climatique par construction de schémas de Filières génériques », financé dans le cadre de l'appel à projet GRAINE de l'ADEME en 2021 et coordonné par l'ONF.

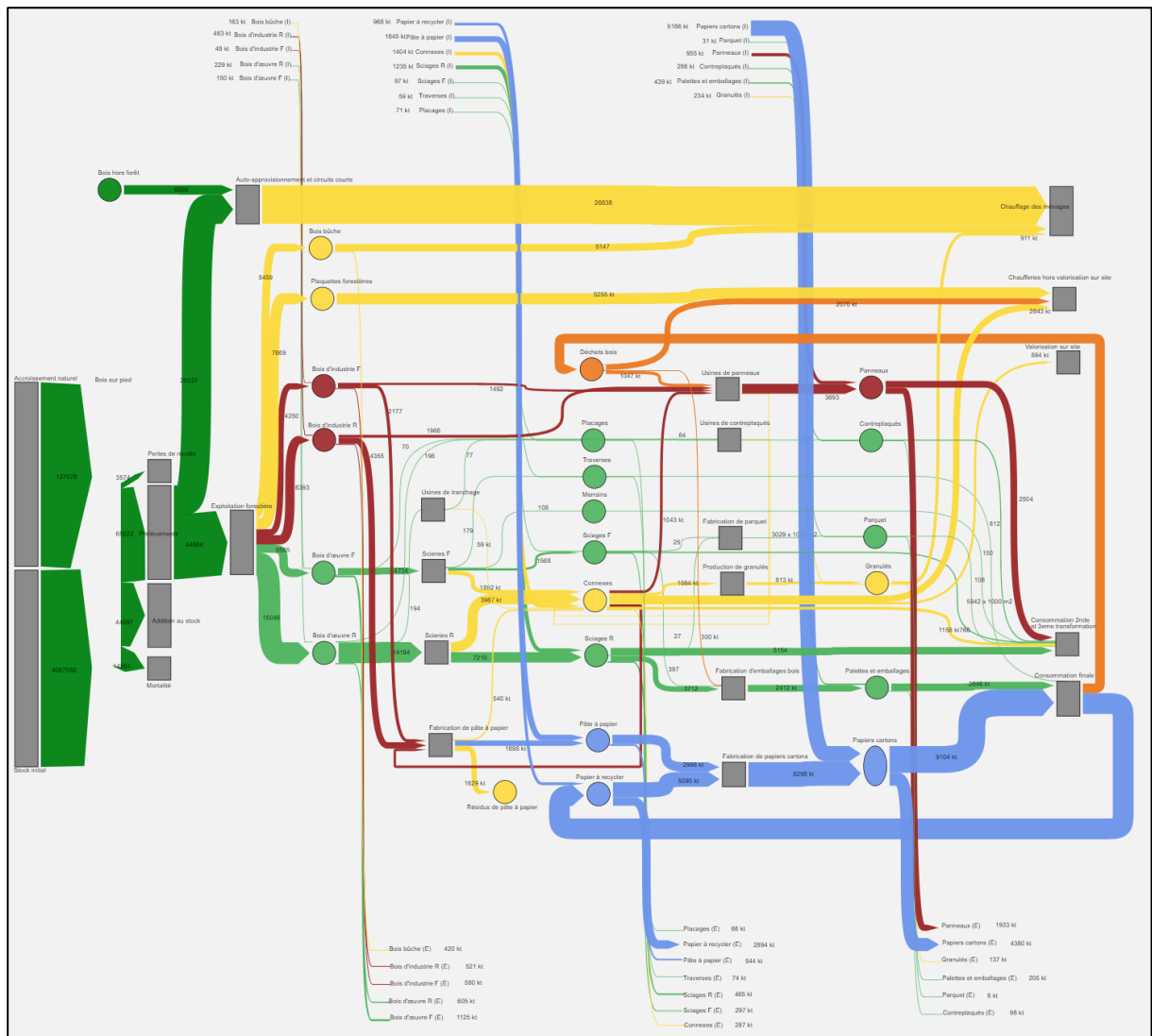
Il serait utile de recenser les différentes modélisations des flux de matière dans la filière forêt-bois, existantes ou en cours de développement, d'étudier leurs forces et faiblesses et de proposer la mise à disposition et la mise à jour, par un opérateur public à définir (FranceAgriMer, IGN via l'observatoire des forêts, ADEME... ?), selon une gouvernance ad hoc associant les professionnels, d'un diagramme de Sankey exhaustif et pouvant servir de référence pour les travaux de recherche et les simulations.

À titre d'illustration, sont reproduits ci-après quelques diagrammes de Sankey ou schéma des flux dans la filière.

France Stratégie



Projet AF filière



Étude FCBA-IGN

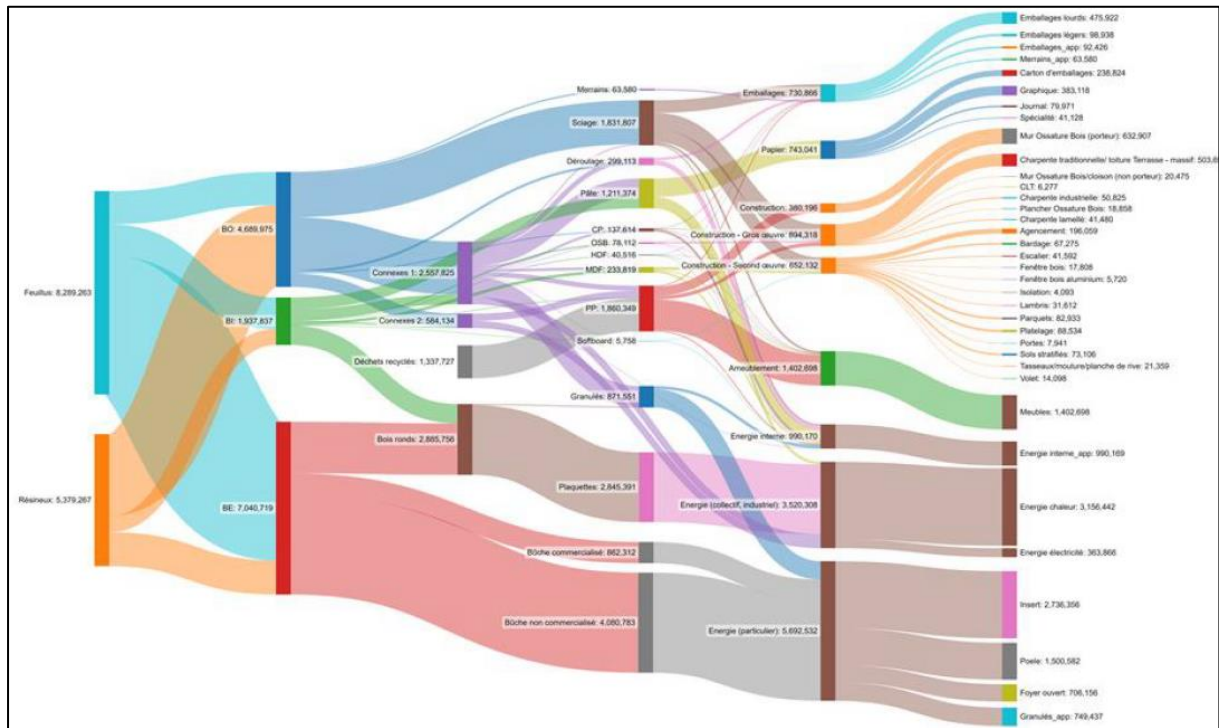
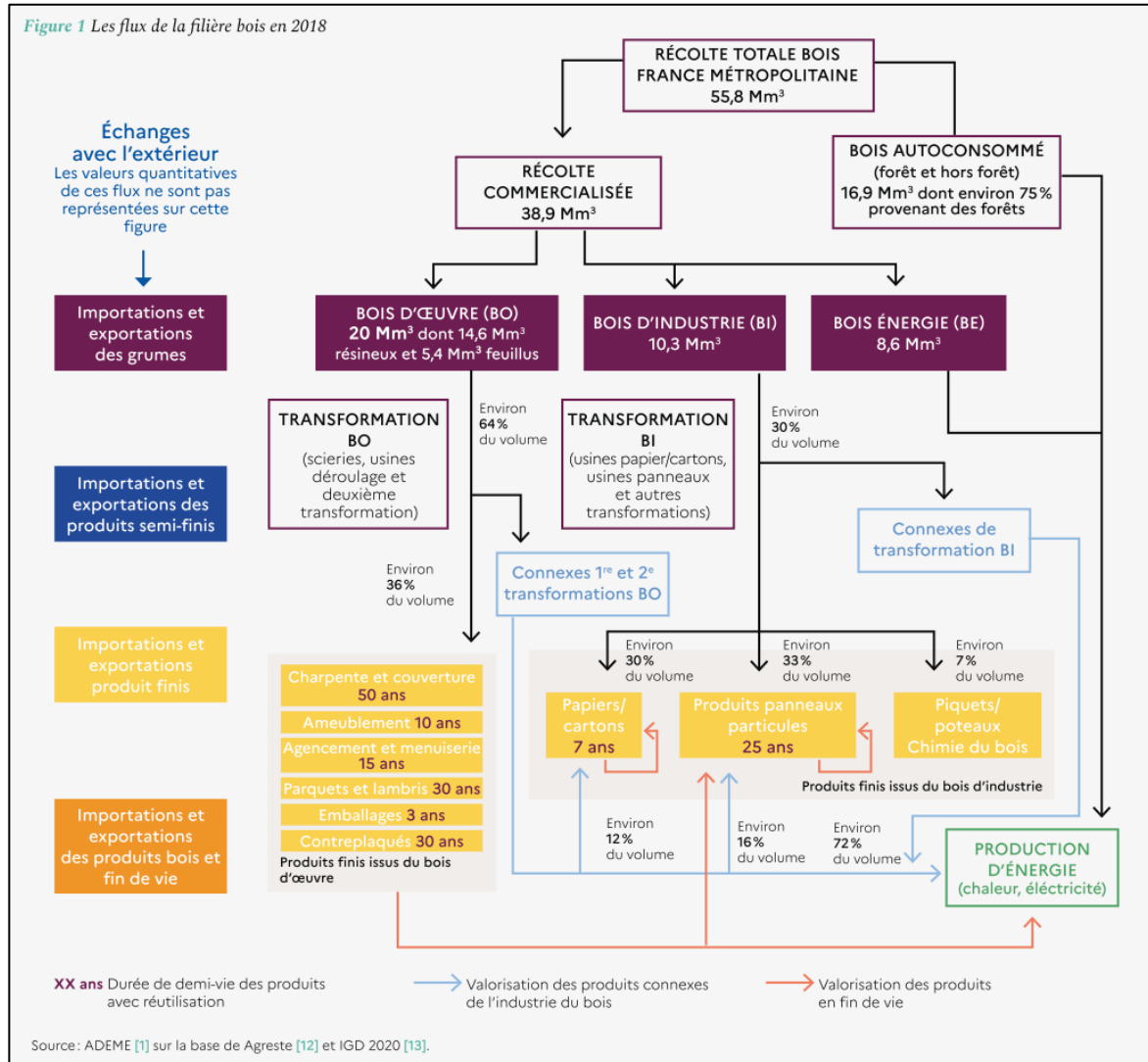
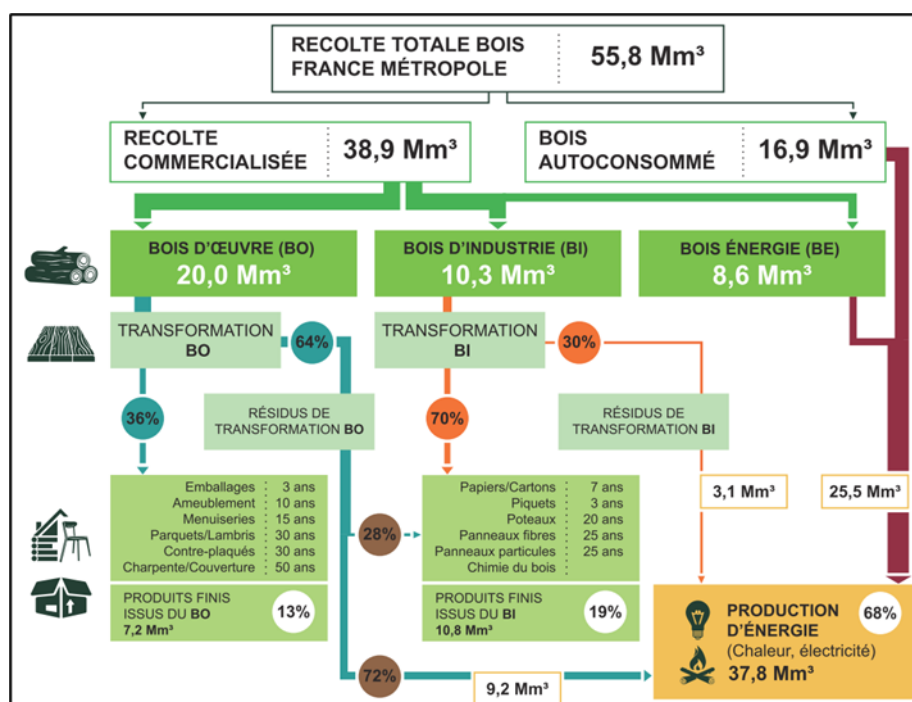


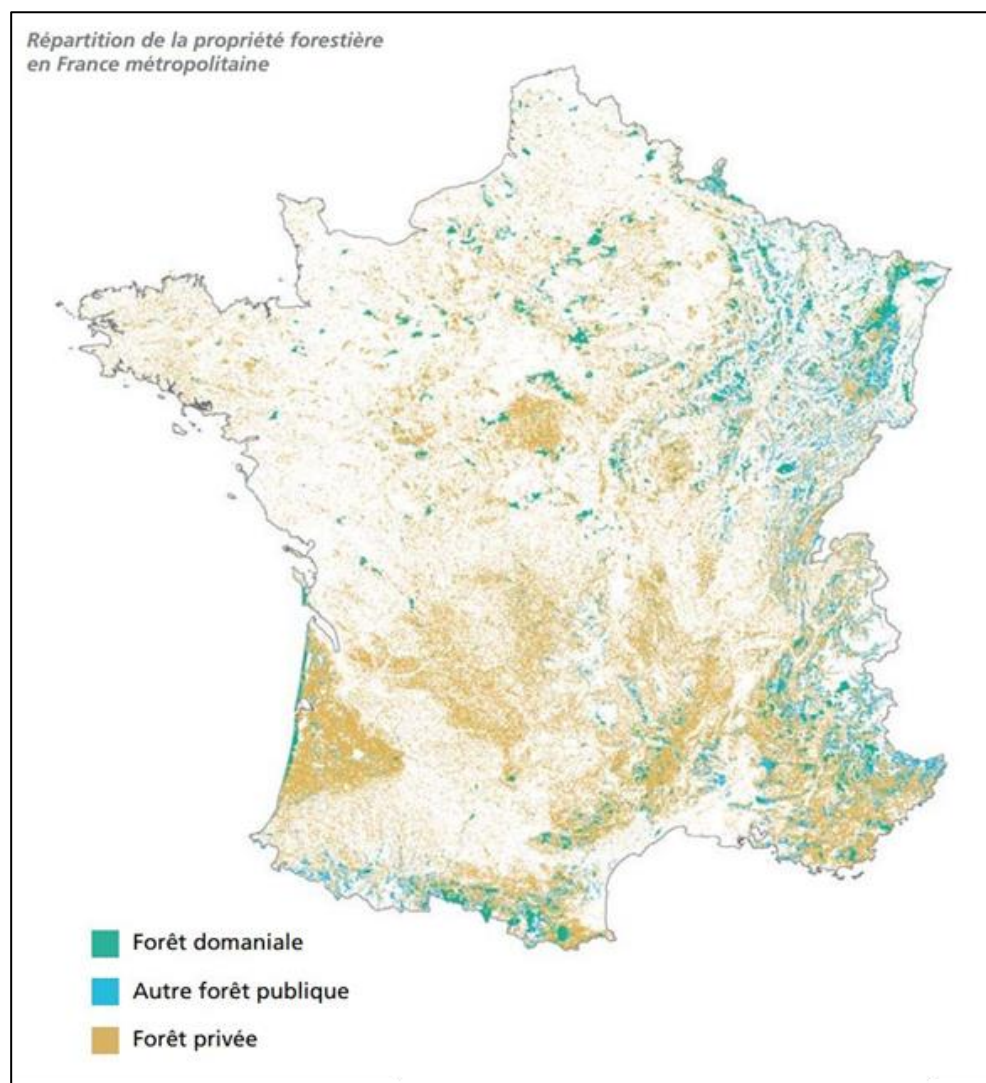
Figure 1 Les flux de la filière bois en 2018





4. Quelques éléments de cadrage sur la filière forêt-bois française

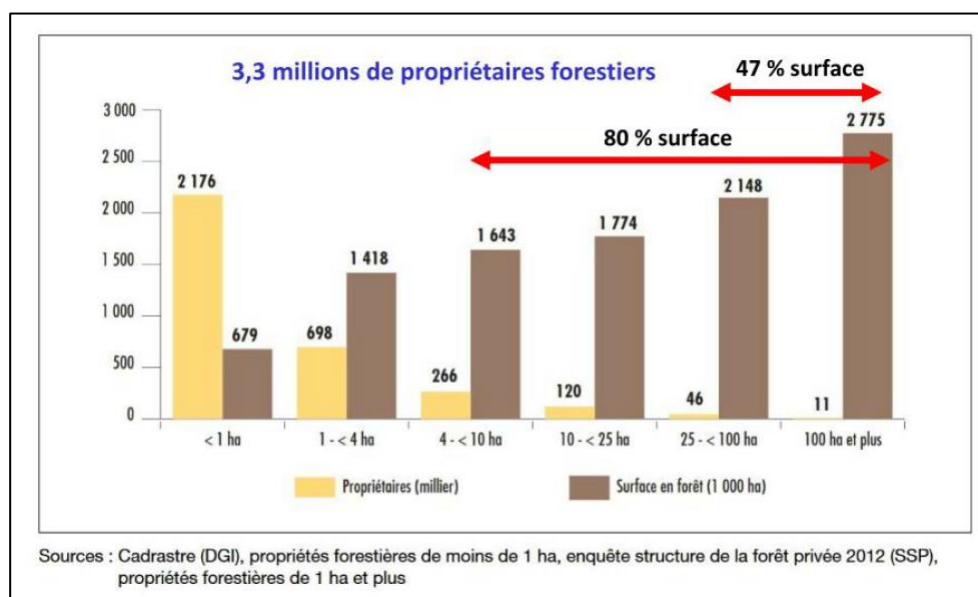
Répartition des forêts par type de propriété



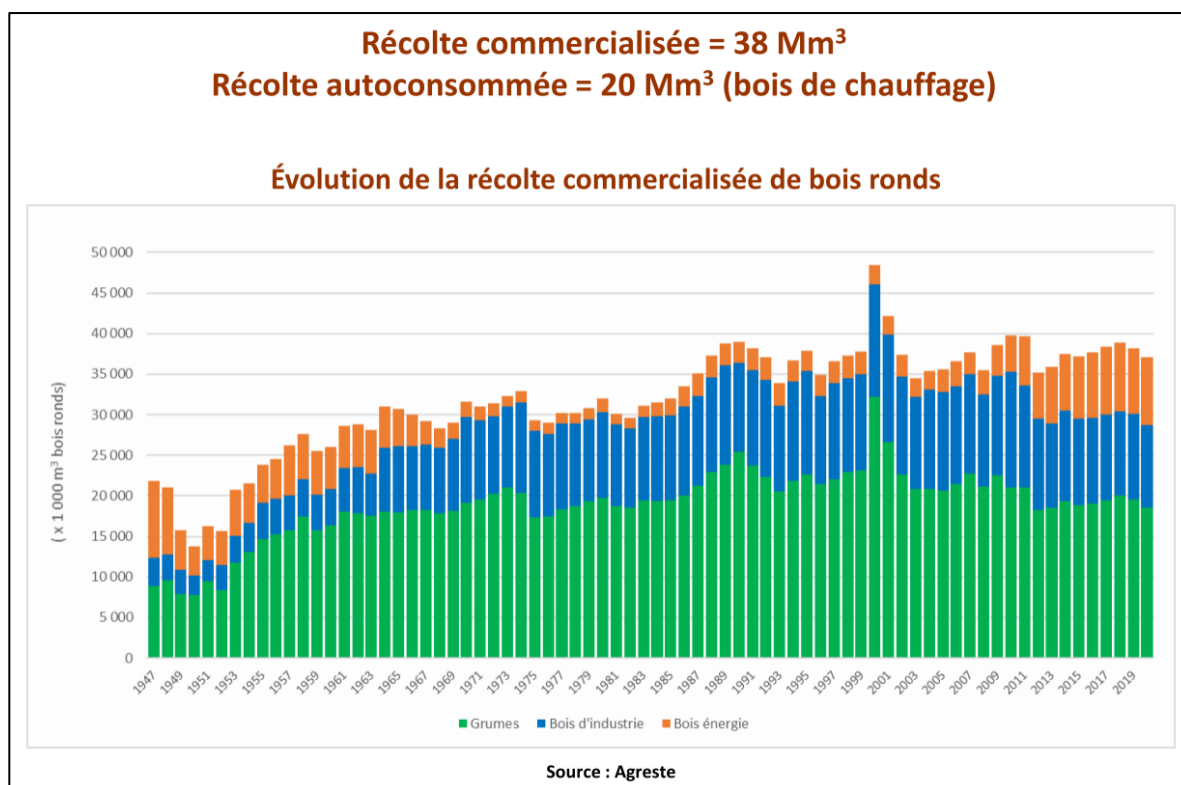
Source : IGN

- 17,1 Mha
- 31 % du territoire
- + 80 000 ha / an
- 75 % forêts privées
- 16 % forêts des collectivités (ONF)
- 9 % forêts domaniales (ONF)
- 64 % feuillus
- 36 % conifères
- 13 % plantations
- + 90 Mm³/an
- Documents de gestion durable :
100 % forêts publiques et 30 % des forêts privées

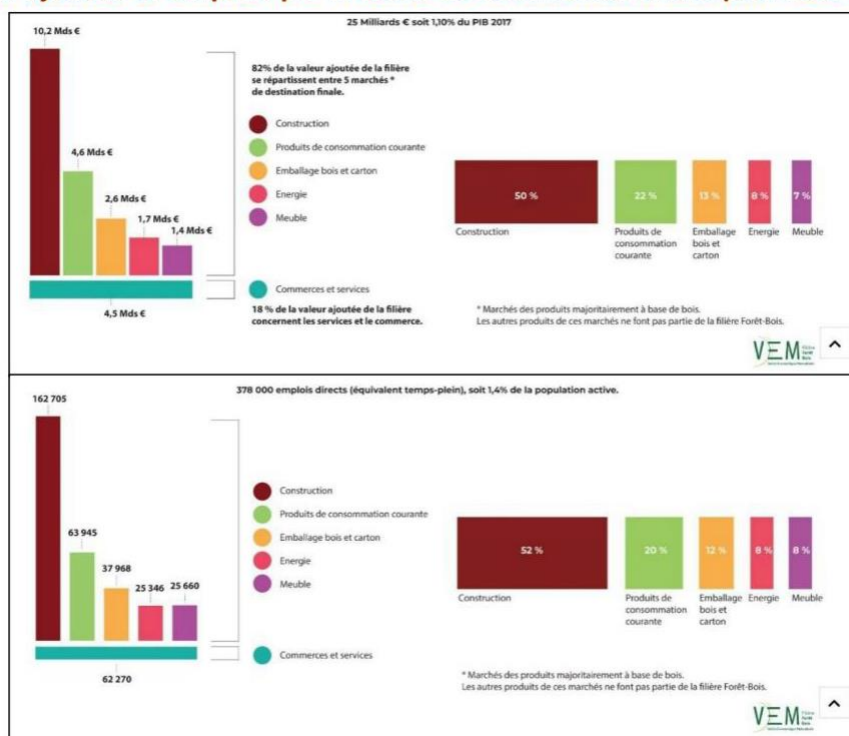
Répartition du nombre de propriétaires et des surfaces de forêt privées



Évolution de la récolte commercialisée de bois ronds depuis 1950



Valeur ajoutée et emplois par marché de destination finale (données 2017)



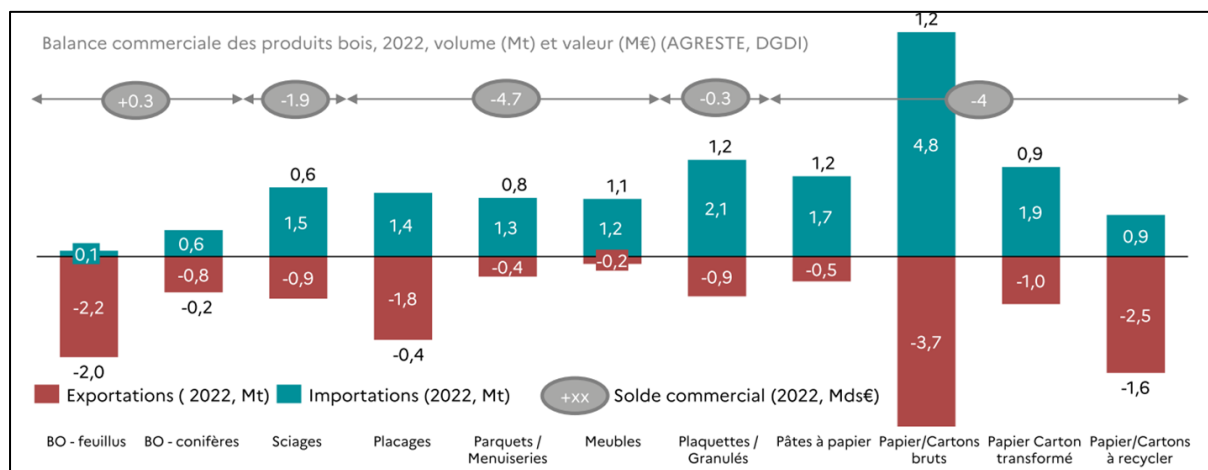
Extrait de la Veille économique mutualisée de la filière forêt-bois.

Déficit commercial de la filière bois : 8,6 Md € en 202, un des plus gros postes de déficit du commerce extérieur de la France (équivalent à 10 % du déficit net global)

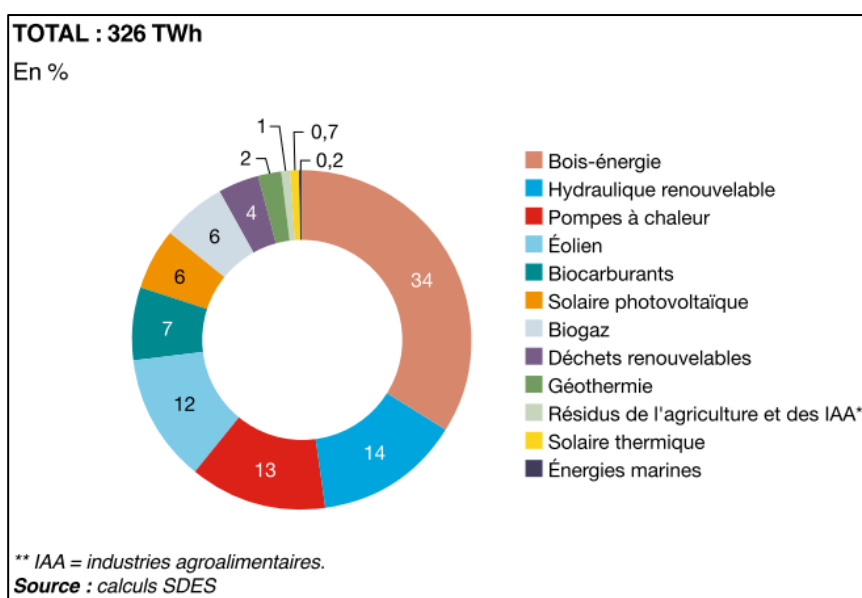
Meubles	- 3,4 Md€
Pâtes, papiers, cartons	- 2,5 Md€
Autres produits industriels	- 1,2 Md€
Sciages résineux	- 0,8 Md€
Panneaux	- 0,5 Md€
Autres (liège, charbon de bois, pellets...)	- 0,5 Md€
Bois brut feuillus	+ 0,2 Md€
Bois brut résineux	+ 0,0 Md€
Sciages feuillus	+ 0,1 Md€

Source : Douanes et MASA-SSP

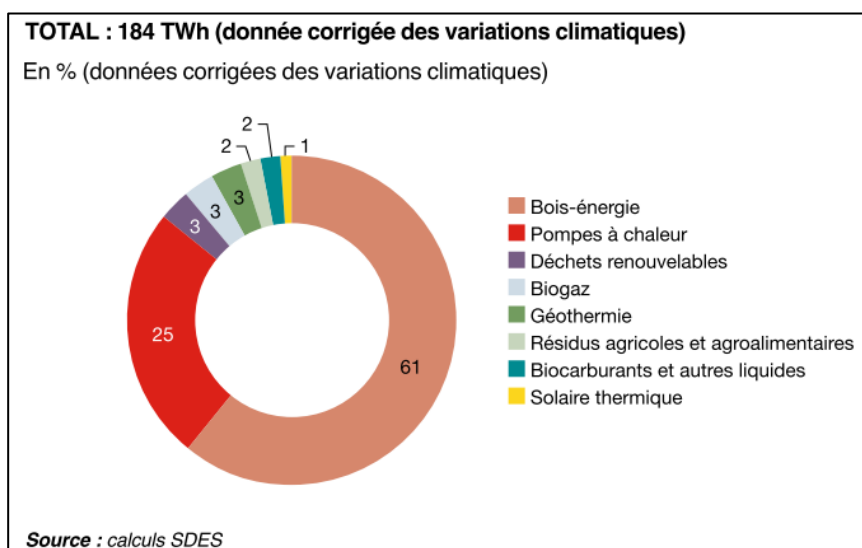
Importations et exportations 2022 pour les principaux produits bois



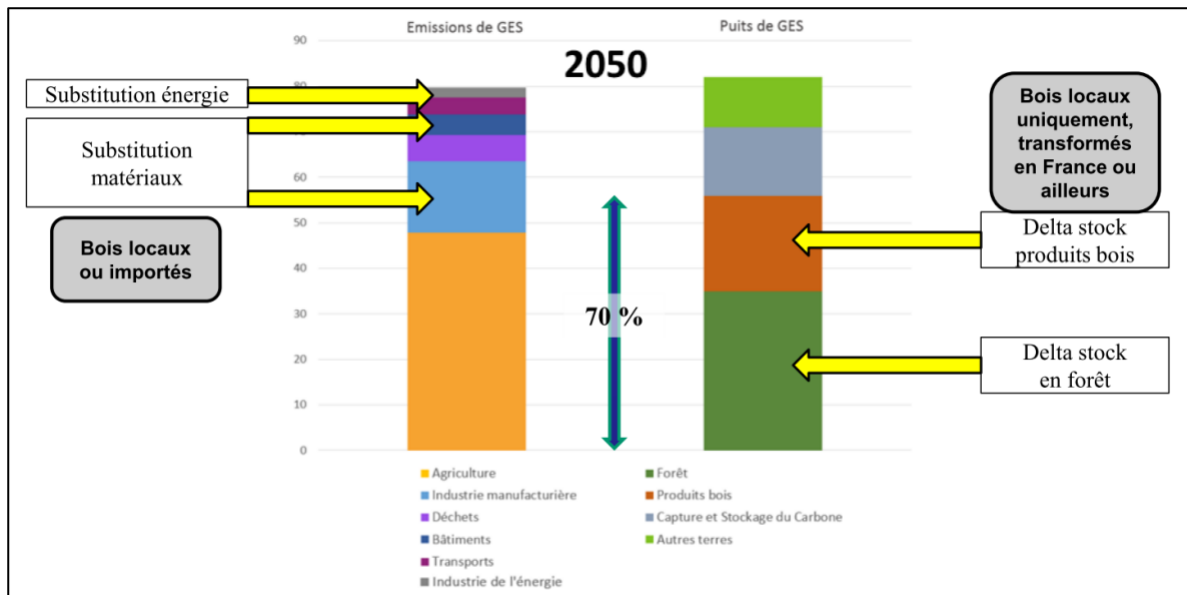
Production primaire d'énergies renouvelables par filière en 2022



Consommation primaire d'énergies renouvelables pour usage de chaleur en 2022 par filière



Hypothèses de neutralité carbone en 2050 dans la SNBC 2



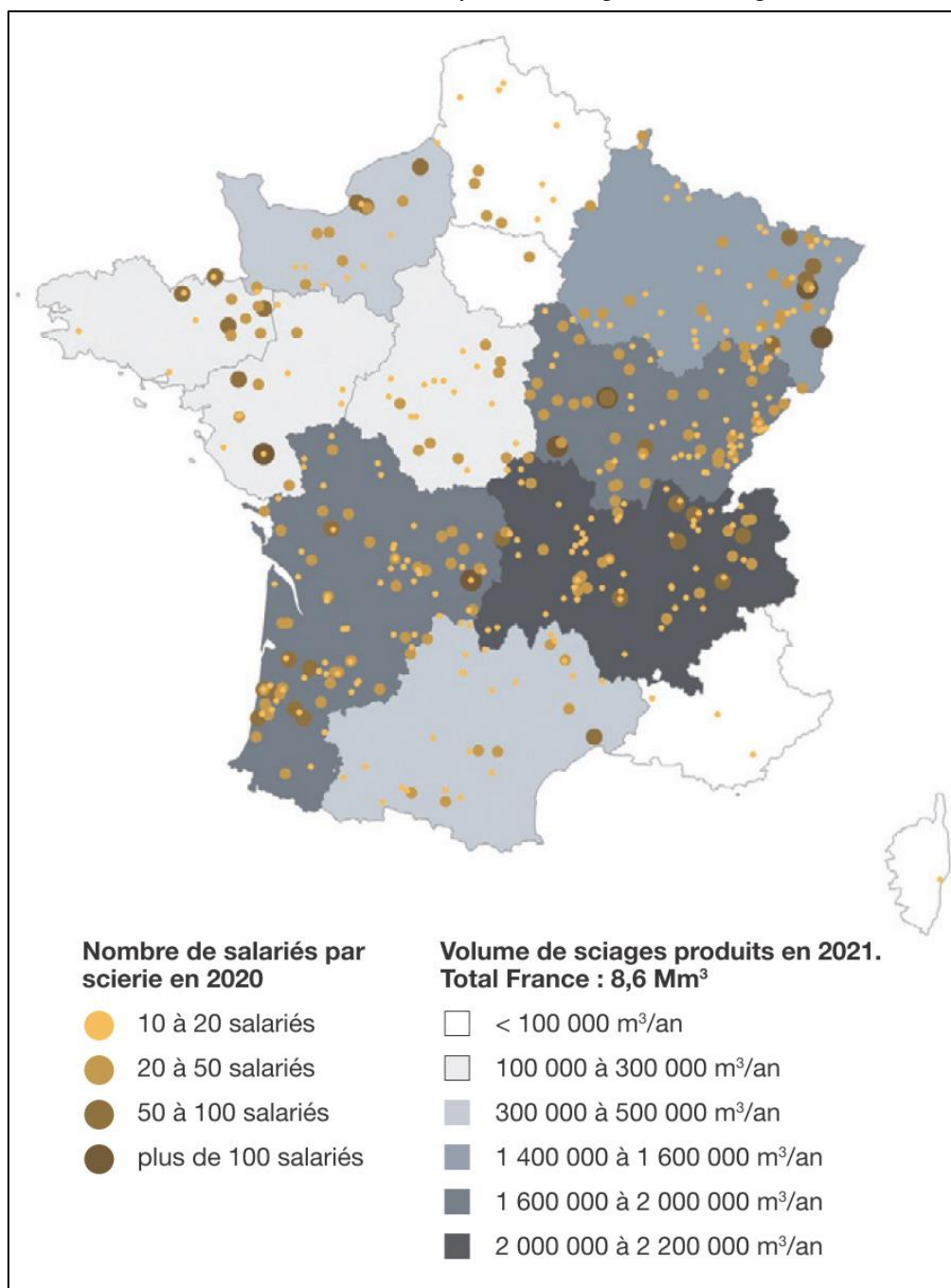
Source : DGE

Plan d'action de France Nation Verte (rôle de la forêt et du bois marqué par une étoile)



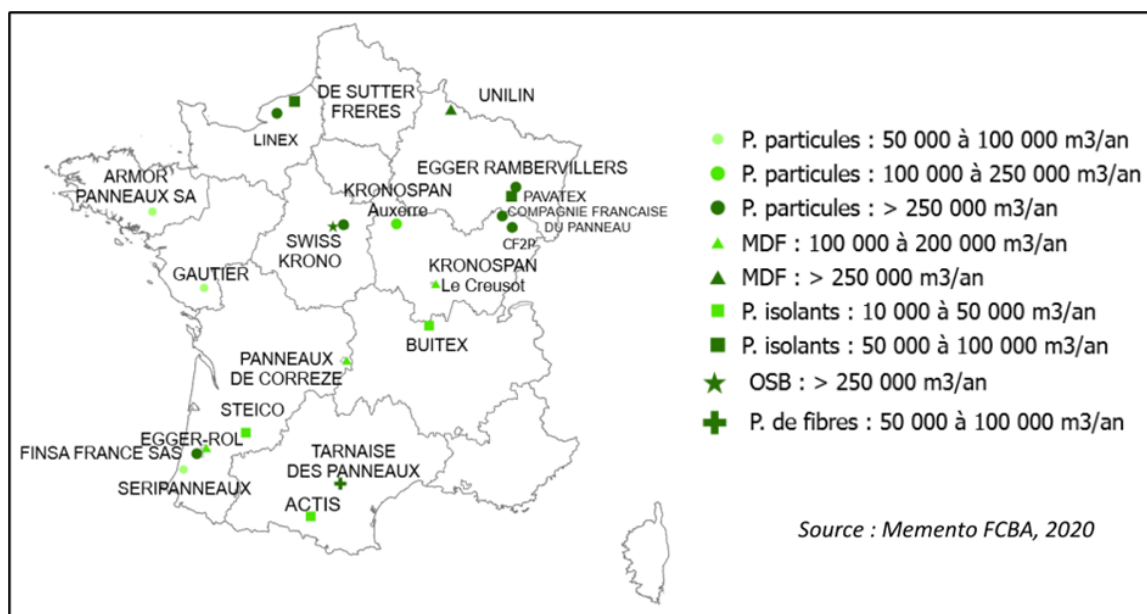
Source : SGPE

Localisation des scieries et production régionale de sciages

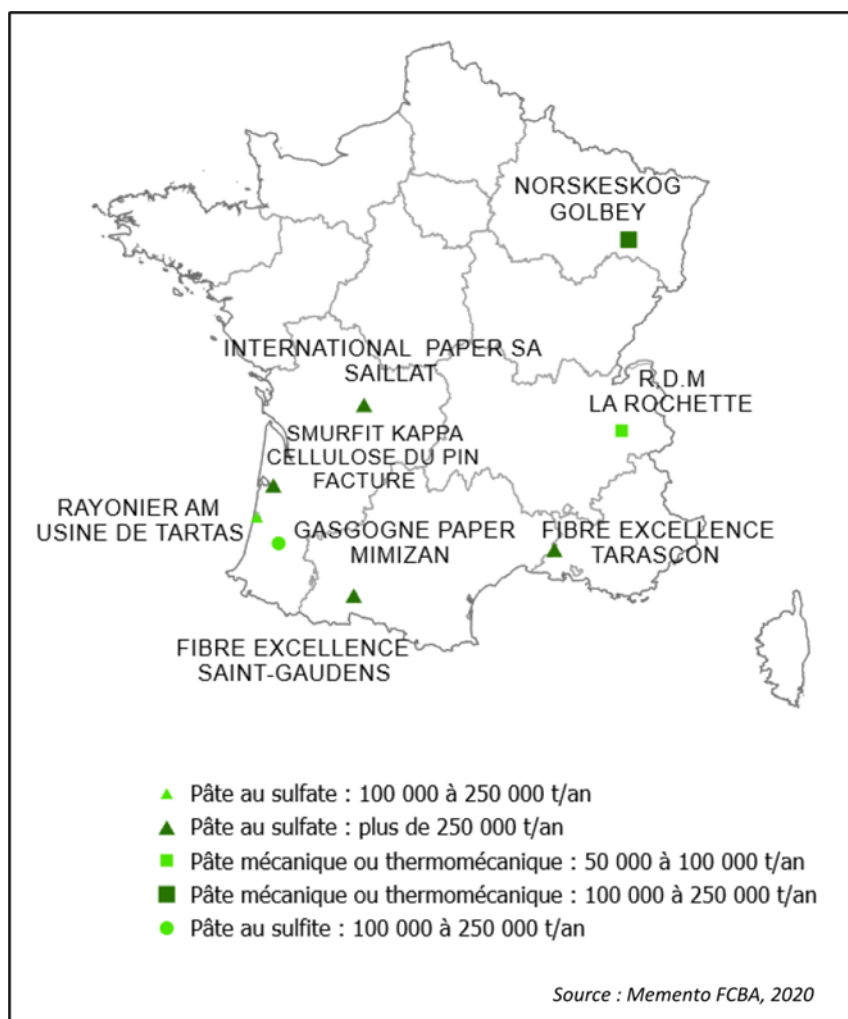


Source : FCBA – Memento 2022

Localisation et taille des usines de productions de panneaux



Localisation et taille des usines de productions de panneaux



Annexe 9. Les objectifs de décarbonation endossés par la France sont particulièrement ambitieux et contraignent fortement les scénarios envisagés

Le paquet « Fit for 55 » dont la discussion arrive à son terme conduit à renforcer considérablement les objectifs déjà ambitieux souscrits par la France dans le cadre européen.

Cette annexe liste les principaux objectifs qui en sont issus (généraux ou spécifiques) susceptibles d'avoir un impact sur la biomasse énergie. Viser simultanément tous ces objectifs conduit à des hypothèses très fortes sur les leviers de la transition : maîtrise de la consommation, développement des énergies renouvelables, décarbonation du mix et donc recours à la biomasse énergie.

Un échantillon des indicateurs proposés pour le suivi de l'atteinte de ces objectifs par la planification écologique est donné en deuxième partie, et illustre à quel point les projections sont en rupture par rapport aux tendances.

1. Objectifs

Pour atteindre l'objectif de -55 % d'émissions de GES européen en 2030,

- L'objectif de réduction des émissions ETS (système de quotas carbone européen) passe de -43 % à -62 % par rapport à 2005, impactant directement le secteur industriel français.
- L'objectif de réduction des émissions de GES pour les secteurs non concernés par les ETS passe de -30 % à -40 % par rapport à 1990 pour l'Union européenne.
Pour la France l'objectif passe de -37 % à -47,5 % en 2030 par rapport à 1990.

L'Union européenne se fixe également un objectif d'absorption de CO₂ par les puits de carbone naturels de 310 Mt CO₂e par an en 2030. Pour la France l'objectif est fixé à 34 Mt CO₂e de réduction nette par an d'ici à la fin 2030, ce qui rejaillit sur les modes d'exploitation de la biomasse (cf. partie « Offre »). En 2021, l'absorption nette était de 17 MtCO₂e.

Pour les renouvelables, la nouvelle directive « RED III » prévoit que :

- L'objectif de part des renouvelables dans la consommation d'énergie européenne passe de 32 % en 2030 à 42,5 %, voire 45 % si c'est possible.
Pour la France l'objectif (33 %) devrait s'accroître dans une proportion similaire (~42/44 %).
- Le secteur des transports devra soit réduire son intensité carbone de 14,5 % d'ici 2030 soit atteindre une part de 29 % de renouvelables dans sa consommation finale d'énergie. Un sous-objectif combiné de 5,5 % de biocarburants avancés et de carburants renouvelables d'origine non biologique (les « RFNBO »), comme l'hydrogène vert, est également fixé. Il est contraignant. Dans cette part de 5,5 %, 1 % devra obligatoirement être réservé aux RFNBO.
- L'accord fixe un objectif indicatif d'au moins 49 % d'énergies renouvelables dans les bâtiments en 2030 qui va conduire à un usage accru de biogaz et de biomasse chaleur.
- Dans le secteur du chauffage et refroidissement, une augmentation contraignante d'intégration des renouvelables de 0,8 point de pourcentage par an, au niveau national, est prévue jusqu'en 2026. Elle passe à 1,1 point de pourcentage de 2026 à 2030.

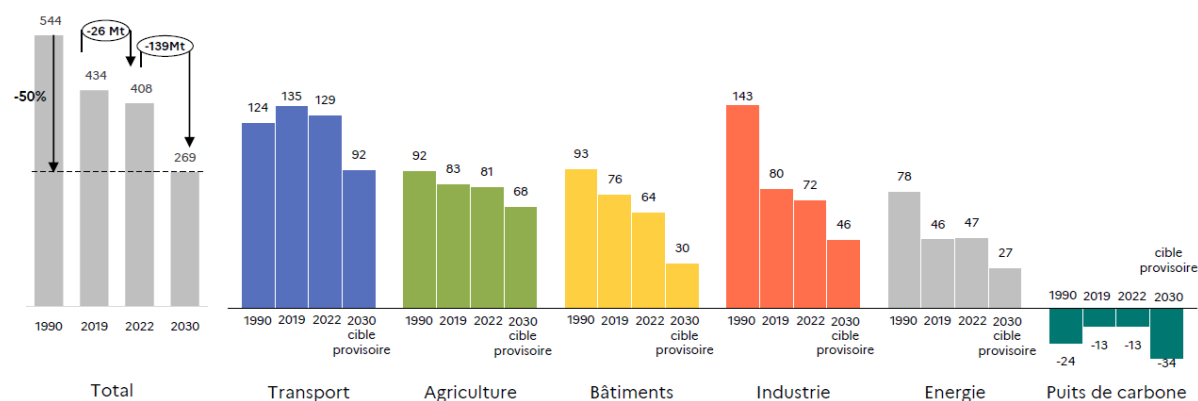
Pour l'aviation, l'accord en trilogue oblige les fournisseurs de carburant à fournir une part minimum de 2 % de carburants durables (« SAF ») à partir de 2025, 6 % en 2030, 20 % en 2035, 34 % en 2040, 42 % en 2045 et 70 % en 2050.

La France s'est également dotée d'objectifs nationaux qui figurent soit dans la partie législative du code de l'énergie, soit dans les documents relatifs à la SNBC/PPE en cours. Ils recourent souvent les objectifs européens.

2. Indicateurs

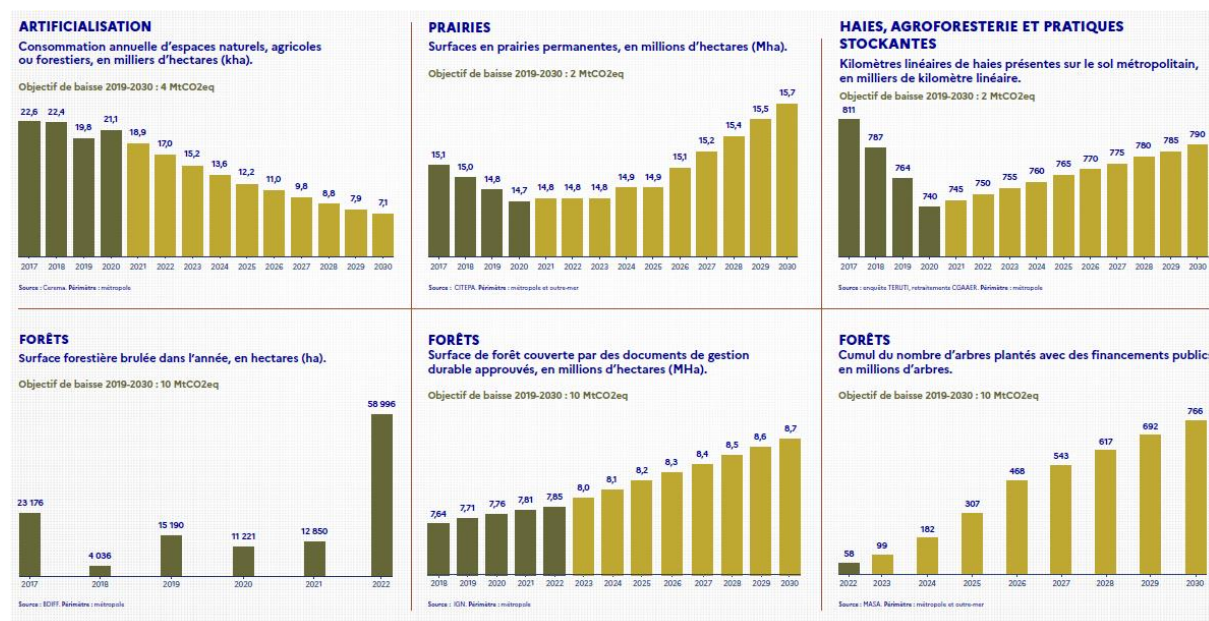
Réduction des émissions de GES et répartition des efforts par secteur.

Le schéma ci-dessous représente la répartition par secteur de l'effort de réduction des émissions de GES françaises d'ici 2030 dans les premiers scénarios produits par la DGEC et le SGPE. La référence est en 1990, première barre de chaque série. L'écart entre les deux barres suivantes représente l'évolution court terme (2019 à 2022). La dernière barre de chaque série illustre le chemin à parcourir dans les 8 prochaines années, au regard des 32 précédentes.



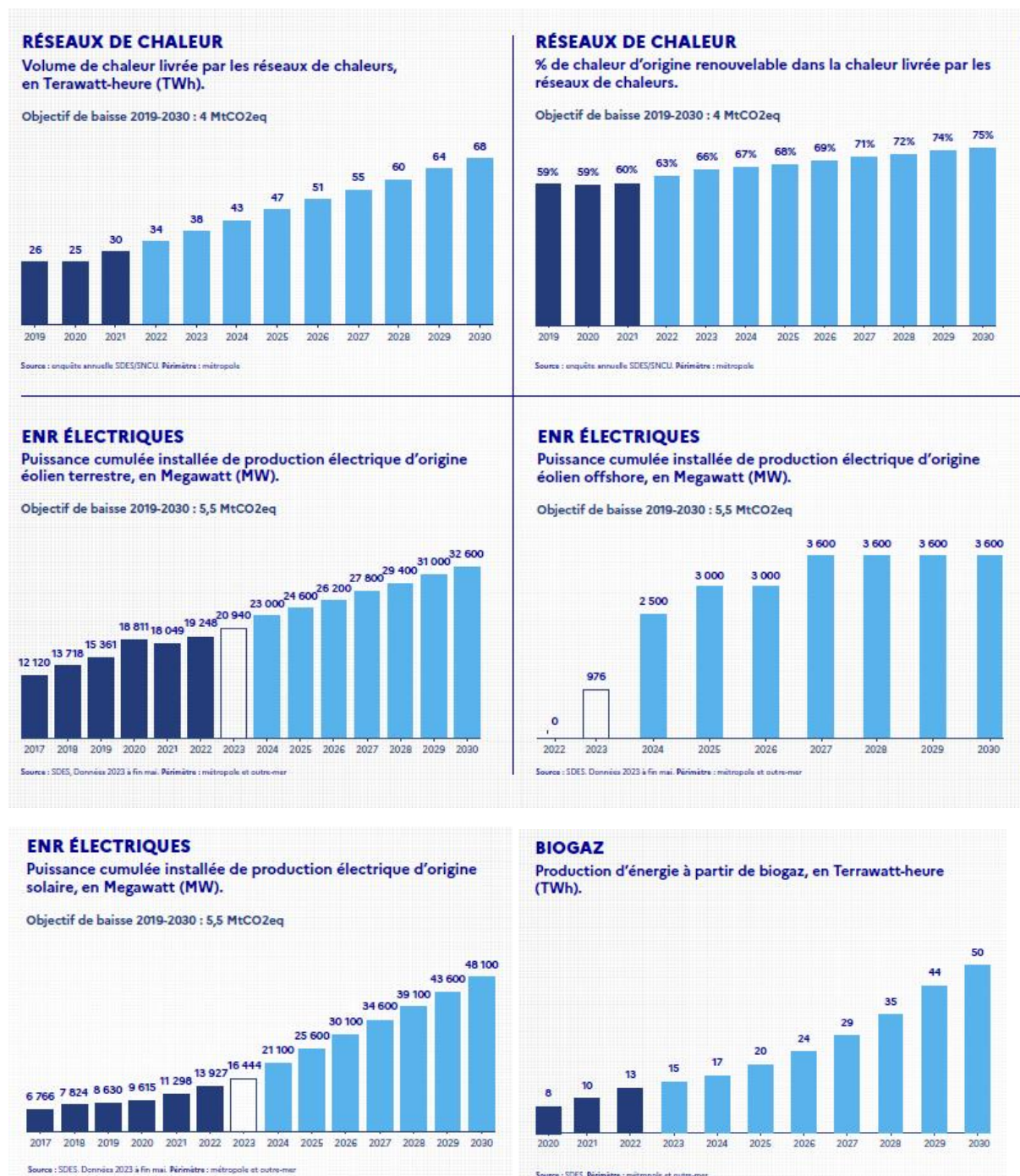
Puits carbone

Ci-dessous des indicateurs proposés par le SGPE pour le suivi du puits de carbone et l'évolution attendue de ses différentes composantes :



Energies renouvelables

Ci-dessous des indicateurs proposés par le SGPE pour le suivi du développement des énergies renouvelables :



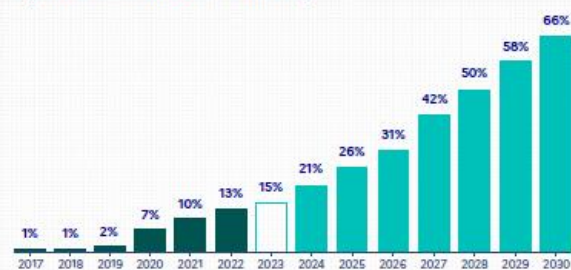
Transports

Enfin, quelques-uns des indicateurs proposés par le SGPE pour le suivi des consommations dans les bâtiments et les transports et la pénétration des renouvelables dans ces secteurs :

VOITURES ÉLECTRIQUES

Part des voitures électriques dans les ventes totales de véhicules neufs, en moyenne annuelle. Pour 2023, part à fin mai.

Objectif de baisse 2019-2030 : 11 MtCO₂eq

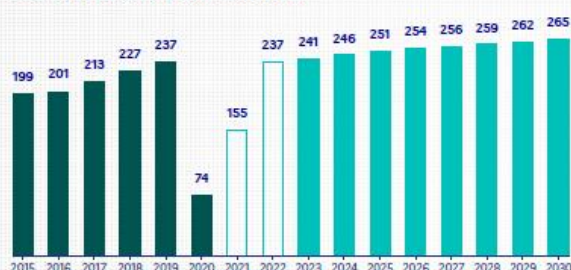


Source : SDES. Périmètre : métropole et outre-mer. Données mensuelles.

MAÎTRISE DE LA DEMANDE (AÉRIEN)

Traffic intérieur aérien métropole, en milliards de passagers kilomètre transportés.

Objectif de baisse 2019-2030 : 2 MtCO₂eq

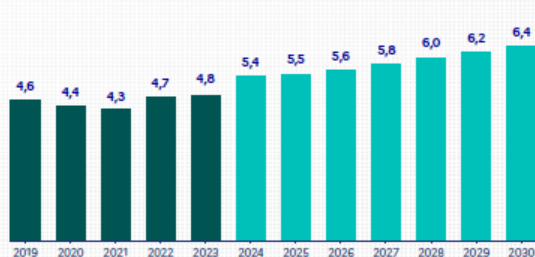


Source : DGAC, Données 2021, 2022 : estimation SGPE sur reprise progressive du trafic après crises sanitaires. Périmètre : métropole et outre-mer.

BIO-CARBURANTS

Volume de biocarburants incorporés aux carburants fossiles de la période de fin juin N-1 à fin mai N, en millions de mètres cubes (Mm3).

Objectif de baisse 2019-2030 : 3 MtCO₂eq



Source : carbufrs.bstgouv.fr. Périmètre : métropole.

Bâtiments

L'essentiel des progrès du bâtiment devra résulter de la rénovation à un rythme accéléré.

RÉNOVATION ET SOBRIÉTÉ RÉSIDENTIEL

Nombre de rénovations globales aidées sur le pilier «performance» de Ma Prime Rénov', en milliers.

Objectif de baisse 2019-2030 : 8 MtCO₂eq



Source : ANAH. Périmètre : métropole et outre-mer.

Annexe 10. Estimation de la disponibilité en biomasse

Usages non alimentaires de la biomasse	2020	2030	2050	coefficient TWh/tMS	2020	2030	2050
	ktMS	ktMS	ktMS		TWh PCI Ep	TWh PCI Ep	TWh PCI Ep
Biogaz							
Fumier méthanisé	700	2 400	6 500	2,0	1	5	13
Lisier méthanisé	100	500	1 300	2,0	0	1	3
Résidus de culture méthanisés	800	7 100	5 000	2,0	2	14	10
CIVE méthanisée	400	6 400	15 000	2,8	1	18	42
Herbe méthanisée	0	0	0	2,0	0	0	0
Fourrages méthanisés	0	0	0	2,0	0	0	0
total méthanisation	2 200	16 400	27 800		4	38	68
Biocarburants							
Résidus de culture utilisés en carburant 2G	0	400	10 000	2,0	0	1	20
Biocarburants 1 G	ns	ns	ns		11	15	30
produits lignocellulosiques forestiers et déchets bois en 2G	0	500	4 800	2,0	0	1	10
cultures lignocellulosiques*	0	0	0	2,0	0	0	0
total biocarburants	0	900	14 800		11	17	60
Combustion							
Résidus de culture utilisés en combustion	800	400	100	4,5	4	2	1
Bois hors forêt (haies, bosquets, vergers, vignes...)	2 800	3 100	3 600	4,5	13	14	16
Bois forêt (BO, BI, BE, produits connexes, liqueur noire...)	20 700	23 500	17 800	4,5	93	106	80
Déchets bois	2 000	2 500	2 100	4,5	9	11	10
cultures lignocellulosiques*		300	2 700	4,5	0	1	5
Total combustion	26 300	29 700	26 400		118	134	112
Pyrogazeification							
Bois forêt (BO, BI, BE, produits connexes, liqueur noire...) et déchet bois	0	500	2 700	2,0	0	1	5
TOTAL Biomasse	28 500	47 500	71 700		133	190	245

La mission s'est attachée à produire une estimation des potentiels de production d'énergie à partir de la biomasse. Même si le tableau mentionne des données pour 2030, la mission ne s'est intéressée qu'aux valeurs en 2050, estimant que pour 2030 le pas de temps était insuffisant pour permettre des évolutions importantes des pratiques agricoles et forestières.

Afin de faciliter la comparaison avec les documents élaborés par la DGEC, la mission a repris, dans la mesure du possible, les estimations de production de biomasse, en tMS, issues de sorties des modèles, notamment celles données par MoSUT pour la biomasse agricole. Toutefois, elle s'est heurtée à des incohérences ou à des données manquantes et elle a alors procédé à sa propre estimation (chiffres en rouge) suivant les hypothèses détaillées ci-dessous.

Pour le **biogaz**, le choix des coefficients de transformation de la biomasse en énergie est fondamental. Les valeurs retenues sont assez variables d'une publication à l'autre et les unités utilisées ne sont pas toujours parfaitement explicitées. La mission a décidé de tout calculer en énergie primaire PCI. Le coefficient de transformation retenu est de 2, excepté pour les CIVE pour lesquelles des travaux récents ont révisé à la hausse le potentiel méthanogène.

Les quantités de biomasse produites ont été recalculées pour les CIVE, en partant du constat que la sole en CIVE d'hiver, les seules envisageables en 2050, était contrainte par la sole en culture de printemps, sole estimée à 2,5 Mha (au demeurant cohérente avec la valeur retenue par la DGEC, 2,55Mha). Le rendement de 6 tMS/ha a été retenu (proposition INRAE) mais il n'est pas atteignable avec régularité sans un minimum de fertilisation minérale.

Concernant la méthanisation des herbes et des fourrages, d'une part les volumes proposés étaient minimes, d'autre part la mission estime qu'il n'est pas sérieux de les envisager. Les bonnes années de production fourragère les éleveurs feront des stocks en prévision des années à venir. Quant à la valorisation des surfaces libérées par la réduction de l'élevage, la mission considère que les difficultés logistiques seront trop grandes.

Enfin, la mission a préféré valoriser les résidus de culture en biocarburants 2G plutôt qu'en biogaz, ces substrats ayant un potentiel méthanogène faible et ne pouvant être introduits qu'en petite proportion dans la ration des méthaniseurs, exceptées les fanes de betteraves et de pommes de terre, dont le volume est lié à la sole réservée à ces productions. Quoi qu'il en soit, l'affectation pour des biocarburants ou pour du biogaz ne modifie pas le résultat final en énergie, les facteurs de transformation étant identiques (2 TWh/MtMS).

On constate ainsi un écart d'environ 20 TWh avec les estimations retenues par la DGEC.

Concernant les **biocarburants**, la mission souligne la problématique spécifique aux biocarburants 1G. Dans les tableaux de bilan, il y a eu confusion entre la consommation constatée (36 TWh en 2020) et la production nationale, puisque pour ces produits la France est largement importatrice, tant en biocarburants qu'en matières premières utilisées pour les produire. La mission a estimé, au regard des informations qu'elle a pu obtenir, que la part nationale de production de biocarburants devait être de l'ordre de 11 TWh. Conformément à sa recommandation 1, elle a considéré que cette production nationale pourrait atteindre 30 TWh en 2050, soit une quasi autosuffisance sur la base de la consommation actuelle. Si cette prévision est en accord avec celle retenue par la DGEC, la mission souligne toutefois qu'elle nécessiterait un doublement de la sole en colza (+1 Mha) et une augmentation de 25 % (+100 Kha) de celle en betterave. Ce développement de cultures dédiées, outre l'écueil de la concurrence avec les usages alimentaires (à relativiser puisque ces cultures conduisent également à la production de tourteaux qui permettraient de diminuer les importations de soja), appellera des arbitrages sur la répartition de la sole en céréales, la SAU française n'étant pas extensible.

La mission a également décidé de ne pas produire des biocarburants 2G à partir des cultures lignocellulosiques, préférant les valoriser en combustion directe. Il s'agit d'une divergence majeure avec les simulations de la DGEC qui au demeurant reposent sur une hypothèse irréaliste aux yeux de la mission : la production de 30 TWh de biocarburants 2G à partir des cultures lignocellulosiques

nécessiterait 15 Mt de MS soit 1,25 Mha soit plus du double de la surface envisagée par l'INRAE¹³⁷ pour ces cultures. La mission quant à elle considère que le potentiel de développement de ces cultures est restreint et que, quant à choisir, sur les terres pouvant accueillir des cultures lignocellulosiques (terres fertiles, avec une bonne réserve utile, facilement mécanisables), il est préférable de produire du colza destiné aux biocarburants 1G.

Les estimations de la mission en matière de biocarburants sont ainsi inférieures de 20 TWh à celles de la DGEC.

En matière de **combustion**, la mission s'est heurtée à de nombreuses difficultés, les périmètres des différentes sources de données disponibles n'étant pas toujours cohérents. S'agissant des ressources en bois, des doubles comptes ont été décelés, portant notamment sur les liqueurs noires de papeterie. Ainsi, le ratio utilisé pour corriger les résultats du calculateur pour le bois issu de forêt se fonde sur une valeur du SDES qui comprend les liqueurs noires bien que celles-ci soient comptabilisées à part dans les « autres produits dérivés du bois ». Le bois hors forêt apparaît également surestimé¹³⁸ sauf à considérer qu'il englobe aussi les déchets bois.

Pour les prévisions 2050, outre les correctifs précédents, la mission a conservé une valorisation matière de 75 % environ en 2030 et l'a baissée à 72,5 % en 2050 alors que le run 2 table plutôt sur un coefficient de l'ordre de 70 % (en appliquant ce coefficient de 70 %, l'estimation mission baisserait d'environ 3 TWh). Pour faciliter les comparaisons, la mission a conservé les hypothèses de répartition du bois entre combustion, pyrogazéification et biocarburant 2G en 2030 et 2050. La mission affecte des cultures lignocellulosiques comme combustibles. Pour la combustion, les estimations de la mission et de la DGEC sont donc comparables mais ne valorisent pas les mêmes ressources.

Au total et à l'échéance 2050, les estimations en énergie de la mission sont inférieures de 50 TWh à celles de la DGEC (292 TWh hors énergie produite à partir des déchets) mais surtout la différence porte presque totalement sur les biocarburants et le biogaz, ce qui est déterminant et accroît la divergence en termes d'équilibre entre les différents vecteurs.

Précisions sur les modalités de conversion m³/tMS pour la biomasse ligneuse :

	Mm ³	Mm ³	Mm ³	ktMS		
Bois hors forêt (haies, bosquets, vergers, vignes...)	5,5	6,0	7,0	2 847	3 120	3 640
Bois forêt (BO, BI, BE, produits connexes, liqueur noire...)	39,8	47,3	45,7	20 670	24 570	23 751
Déchets bois (Mt et non Mm ³)	2,5	3,3	3,5	2 000	2 640	2 800
Total	48	57	56	25 517	30 330	30 191

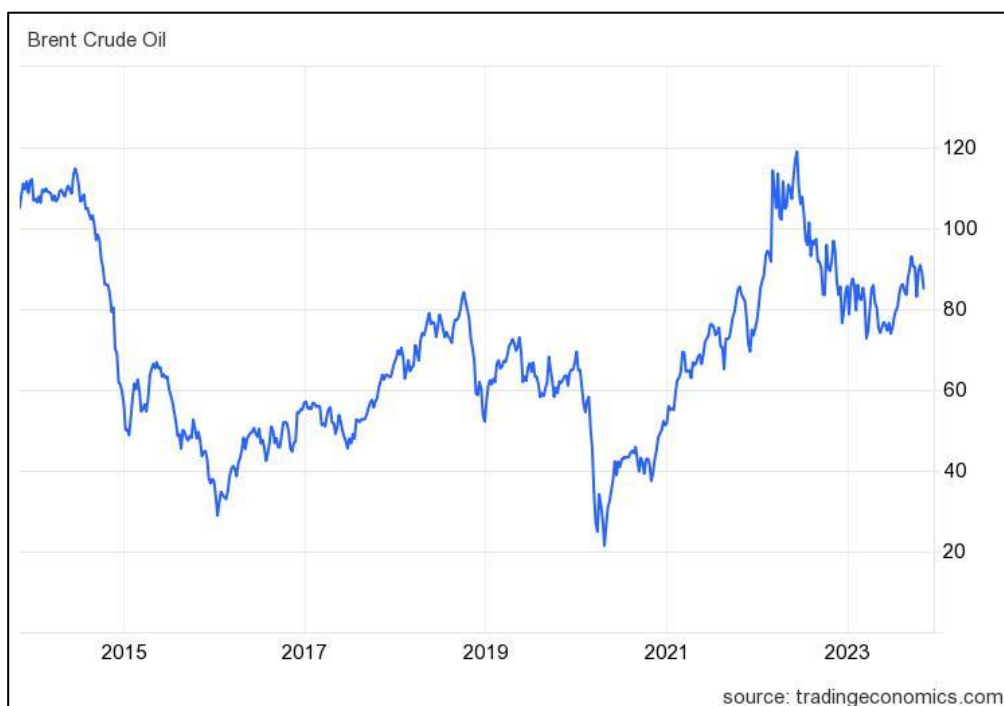
¹³⁷ MoSUT n'a pas fourni d'informations sur les cultures lignocellulosiques. La DGEC s'est donc appuyée sur une hypothèse de l'INRAE ; 600 000 ha de cultures lignocellulosiques étaient valorisées en combustion et en biocarburants 2G, respectivement 12 et 18 TWh, sans préciser qu'à quantité d'énergie produite équivalente la surface mobilisée était double pour les biocarburants 2G.

¹³⁸ À noter : les chiffres de l'ONRB concernant le bois issu des vignes ont été revus à la baisse suite à une erreur détectée par la mission : de 7,3 MtMS combustion (chiffre repris dans l'étude de France Stratégie) à 0,45 MtMS.

Annexe 11. Incidence des prix de la biomasse

1. La volatilité des prix de l'énergie

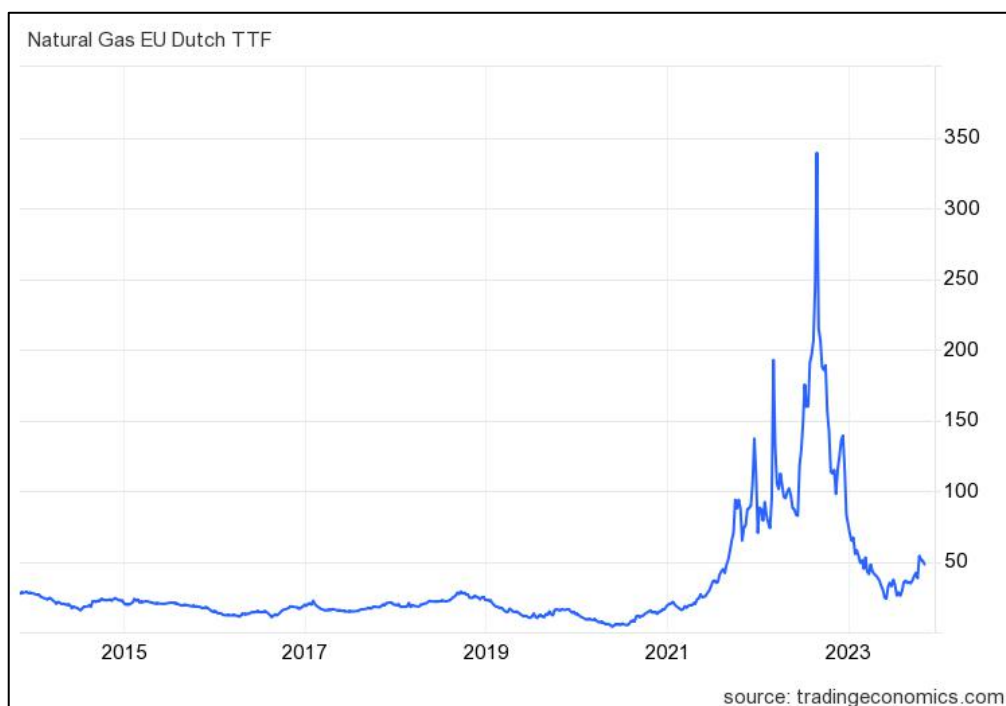
Évolution du prix du pétrole brut (baril Brent – US\$) depuis dix



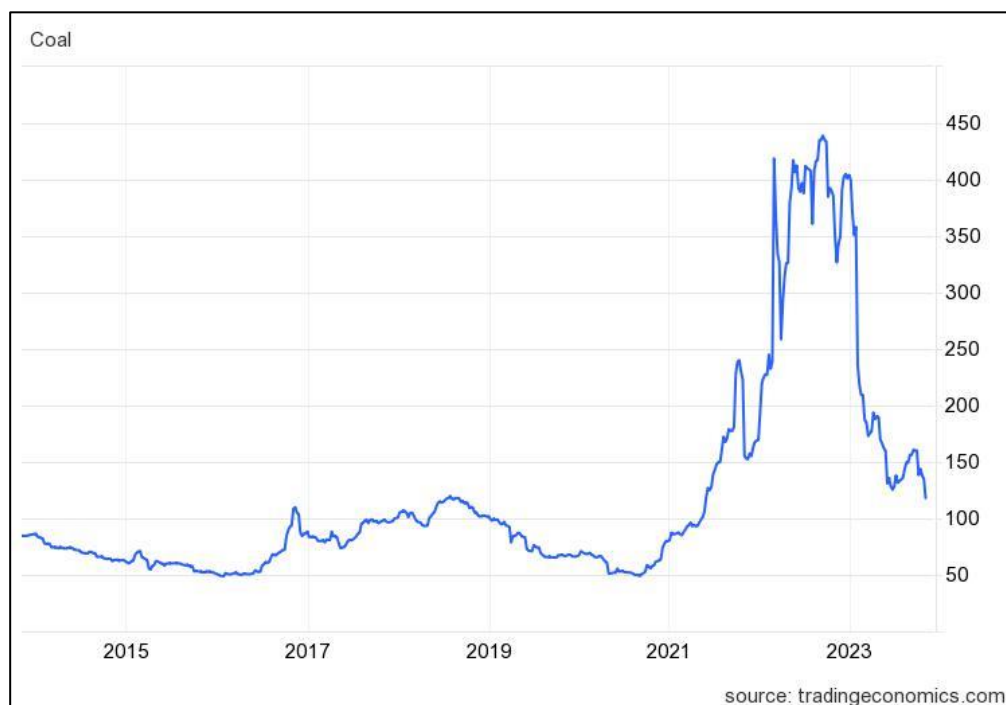
Évolution du prix du gaz naturel aux USA (MMBtu – US\$) depuis dix ans



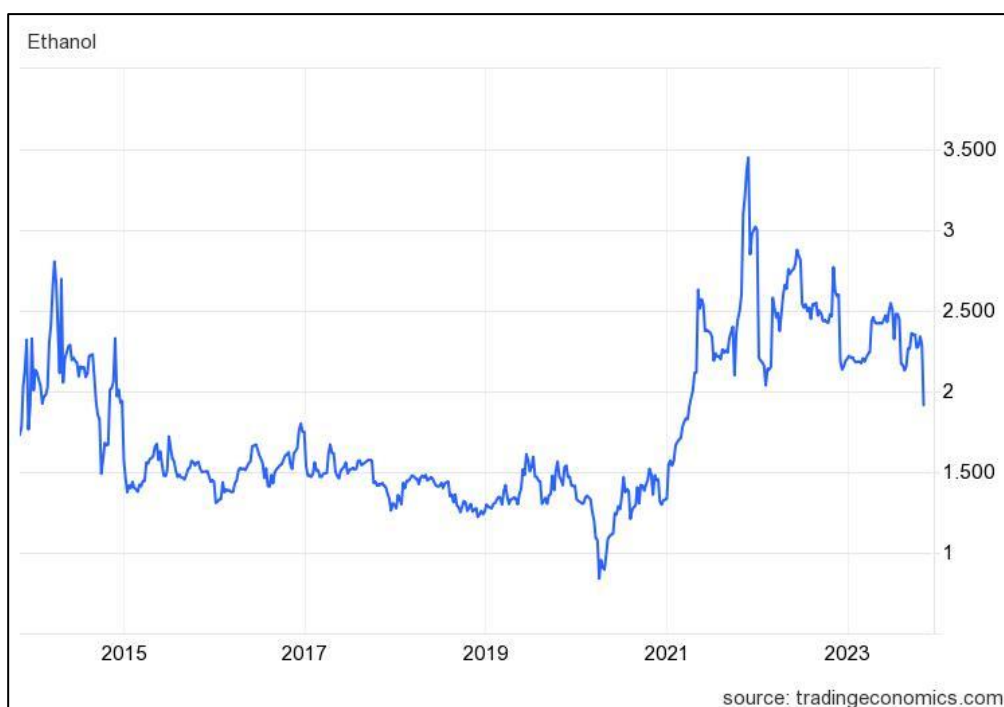
Évolution du prix du gaz naturel en Europe (MWh – euro) depuis dix ans



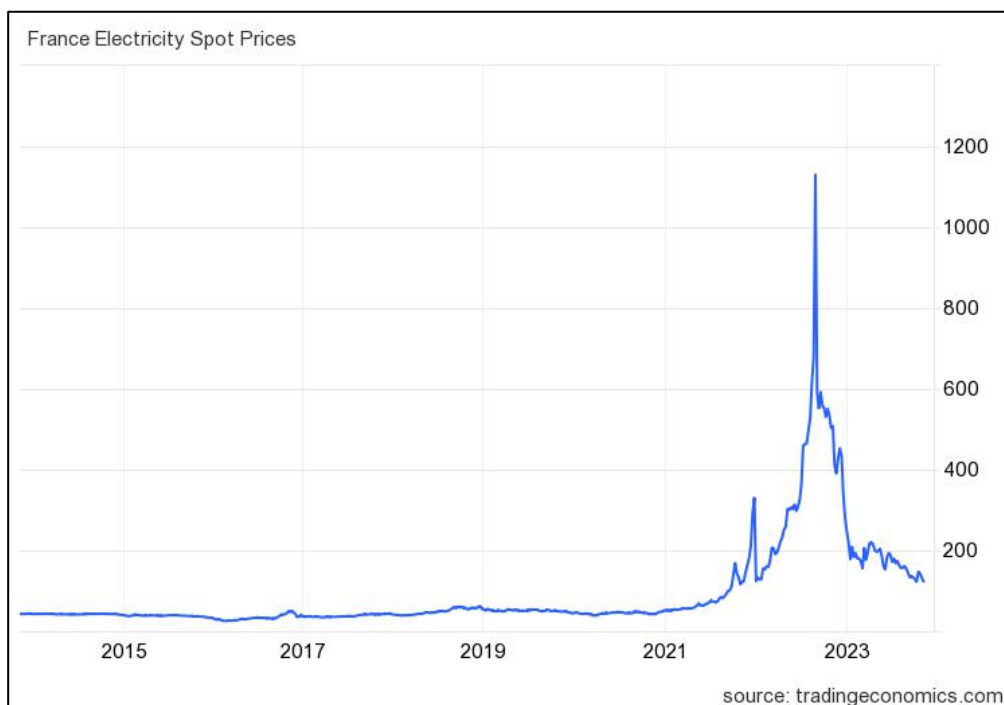
Évolution du prix du charbon (tonne – US\$) depuis dix ans



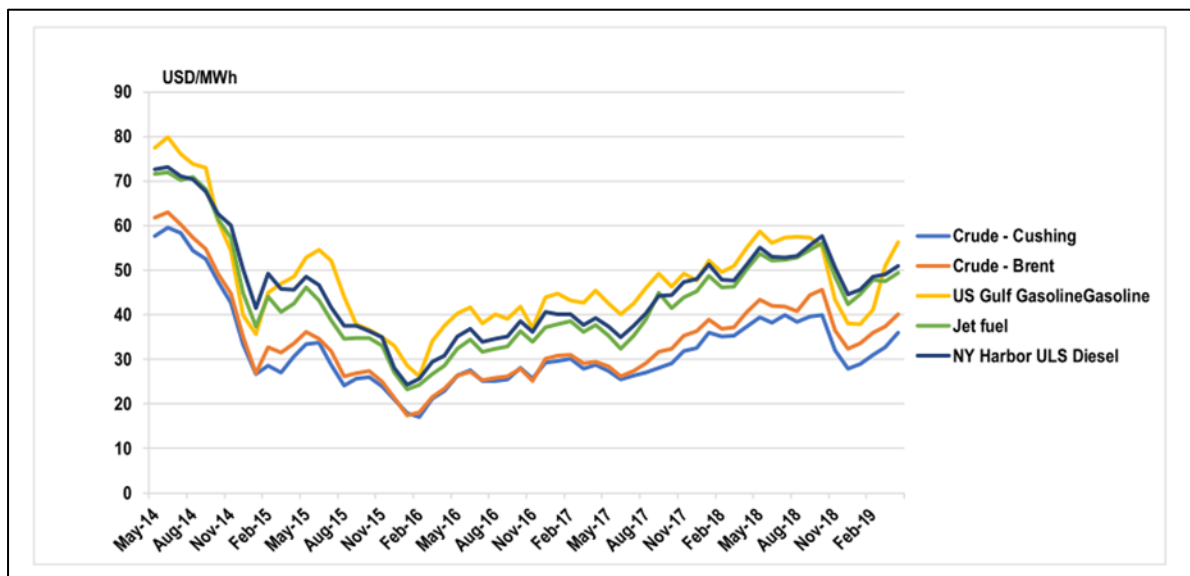
Évolution du prix de l'éthanol (gallon – US\$) depuis dix ans



Évolution du prix spot de l'électricité France (MWh – euro) depuis dix ans



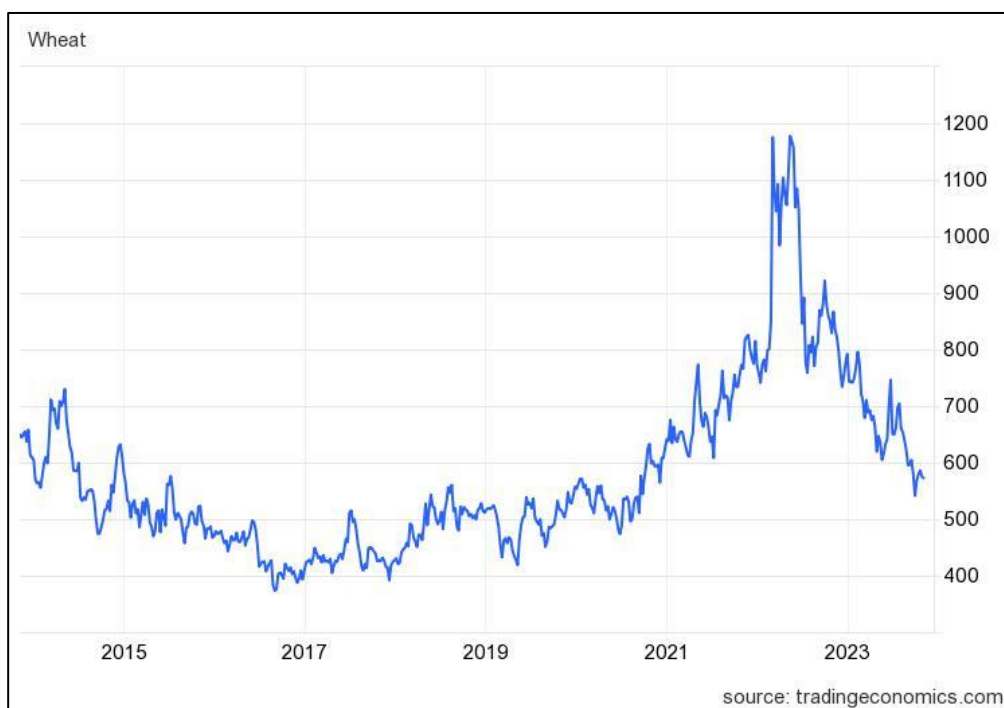
Variation des prix du pétrole brut, de l'essence, du diesel et du carburant pour l'aviation (US\$ / MWh)



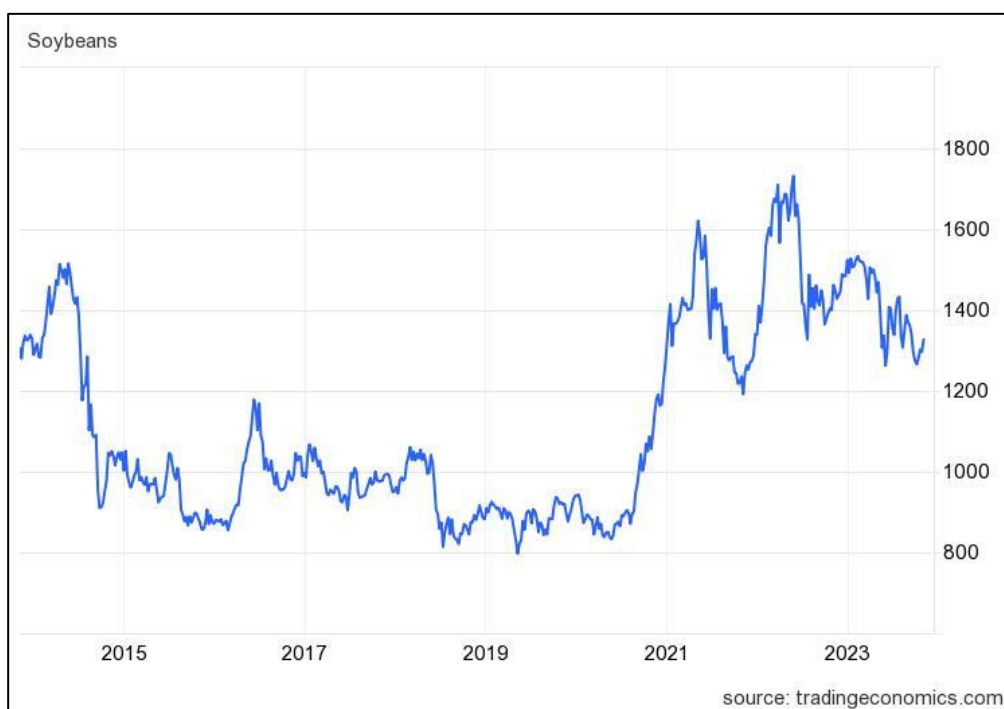
Source : IEA Bioenergy. Advanced Biofuels - Potential for Cost Reduction. 2020.

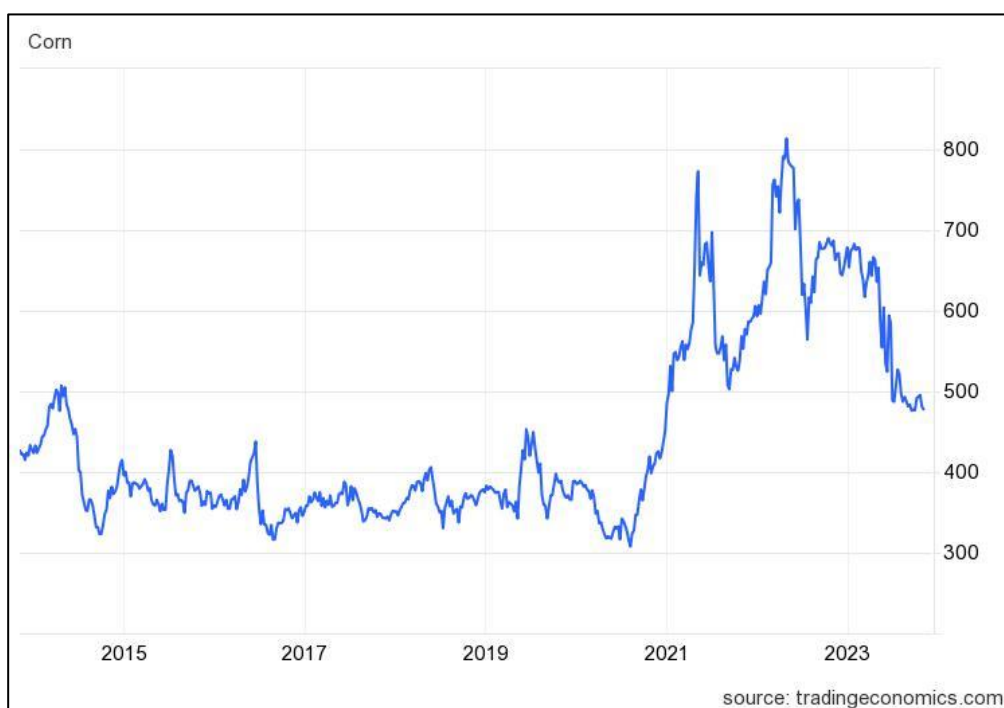
2. Volatilité du prix de la biomasse

Évolution du prix du blé (boisseau – US\$) depuis dix ans



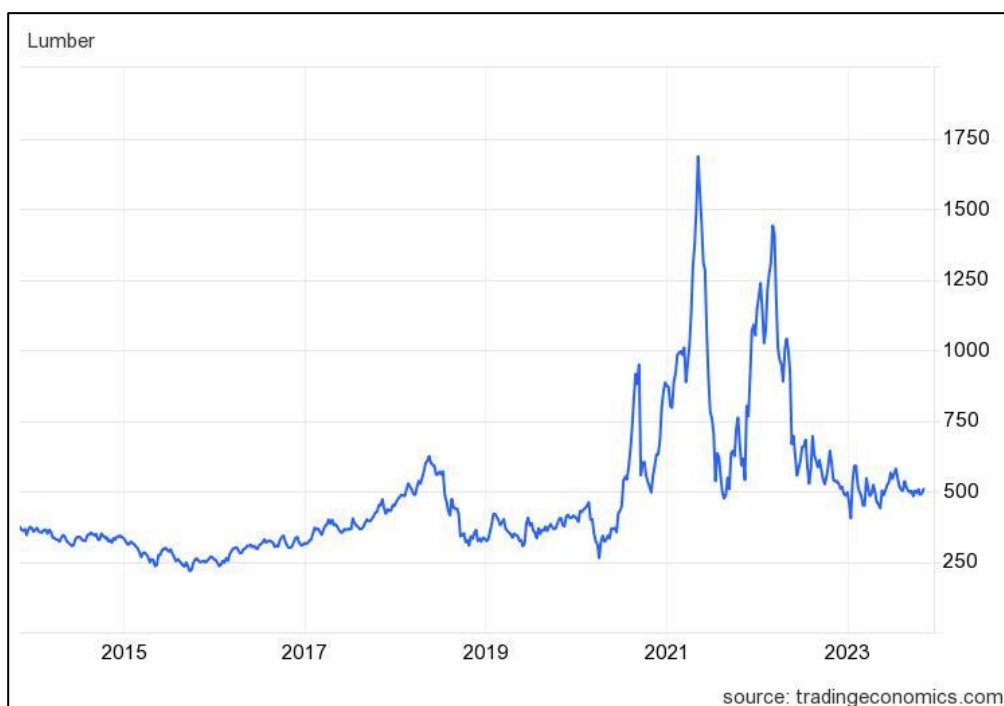
Évolution du prix du soja (boisseau – US\$) depuis dix ans





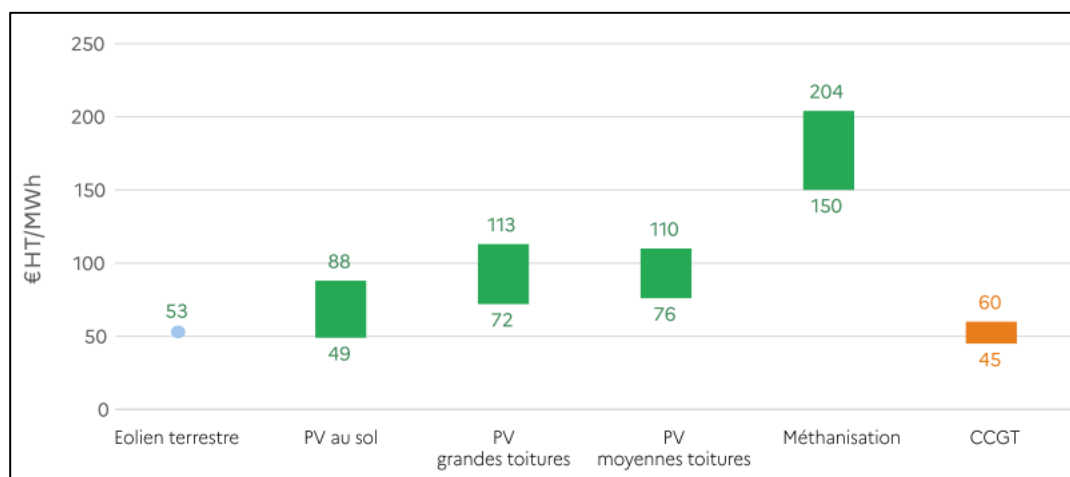
Évolution du prix du maïs (boisseau – US\$) depuis dix ans

Évolution du prix du bois de charpente (1000 board feet) – US\$) depuis dix ans



3. Production d'électricité

**Comparaison entre le LCOE de l'électricité renouvelable et celui des centrales au gaz en 2020
(€/MWh HT)**



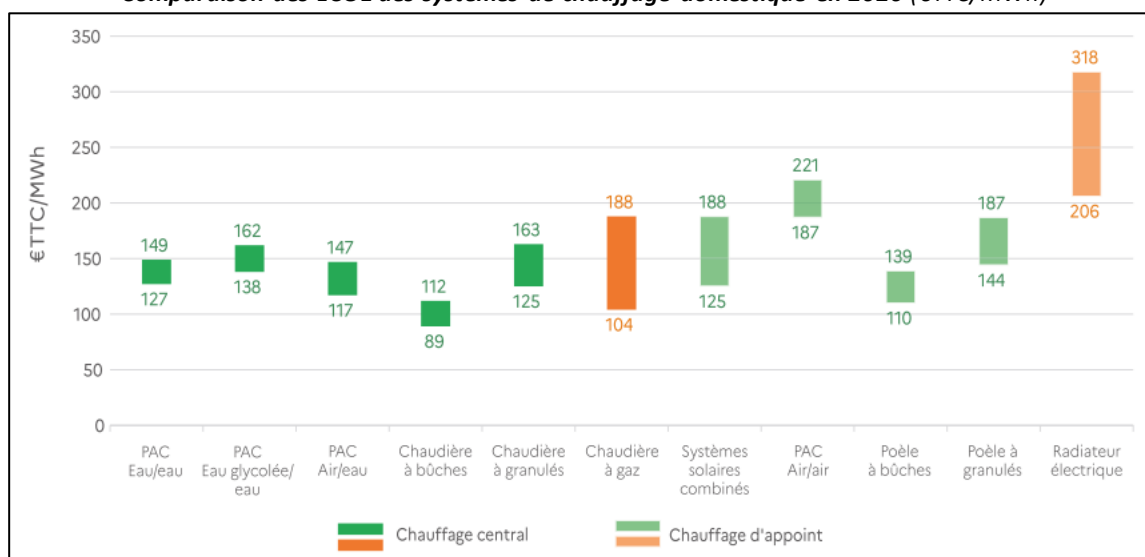
ADEME : Brice ARNAUD, Jean-Michel PARROUFFE, Stefan LOUILLAT, In Numeri : Laurence HAEUSLER, Siessima TOE, Chaimae ELMOUJARRADE. Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France. Mars 2022

Nota :

- Pour les centrales au sol, le maxima correspond à une centrale d'une puissance inférieure à 2,5 MWc située dans le Nord de la France (88 €/MWh) et le minima à une centrale d'une puissance supérieure à 10 MWc en zone méditerranéenne (49 €/MWh).
- Pour les installations sur grande toiture, le maxima correspond à une installation d'une puissance comprise entre 100 et 500 kWc dans le Nord de la France (113 €/MWh) et le minima à une installation d'une puissance comprise entre 500 kWc et 2,5 MWc en zone méditerranéenne (72 €/MWh).
- Pour les installations sur moyenne toiture (36 à 100 kWc), le maxima correspond à une installation dans le Nord de la France (110 €/MWh) et le minima à cette même installation en zone méditerranéenne (76 €/MWh).
- Pour la méthanisation, le minima (150 €/MWh) correspond au LCOE des installations de méthanisation de puissance supérieure à 300 kWc et le maxima (204 €/MWh) à celles de puissance inférieure ou égale à 100 kWc.
- Pour les centrales à cycle combiné au gaz, le minima (45 €/MWh) correspond au LCOE calculé avec le prix du gaz à sa valeur de 2020 (9,3 €/MWh) et le maxima (60 €/MWh) au LCOE calculé avec un prix du gaz doublé par rapport à sa valeur de 2020 (18,6 €/MWh).

4. Production de chaleur

Comparaison des LCOE des systèmes de chauffage domestique en 2020 (€TTC/MWh)



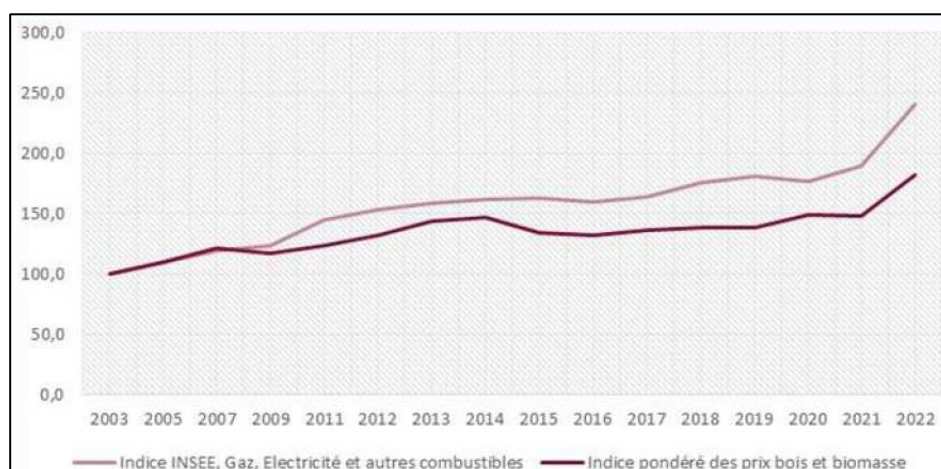
ADEME : Brice Arnaud, Jean-Michel Parrouffe, Stefan Louillat, In Numeri : Laurence Haeusler, Siessima Toe, Chaimae Elmoujarrade. Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France. Mars 2022

Nota : Les minima des LCOE sont calculés avec le prix des énergies à leur valeur de 2020, et les maxima avec un prix des énergies augmenté de 50 % pour l'électricité et le bois, et 100 % pour le gaz par rapport aux valeurs de 2020. La seule exception concerne les systèmes solaires combinés où le minima est calculé avec un productible représentatif de la zone méditerranéenne et le maxima avec un productible représentatif du Nord de la France.

Évolution des prix des combustibles bois livrés pour les particuliers
(en euro TTC, par stère pour les bûches et en c euro TTC par tonne pour les autres)

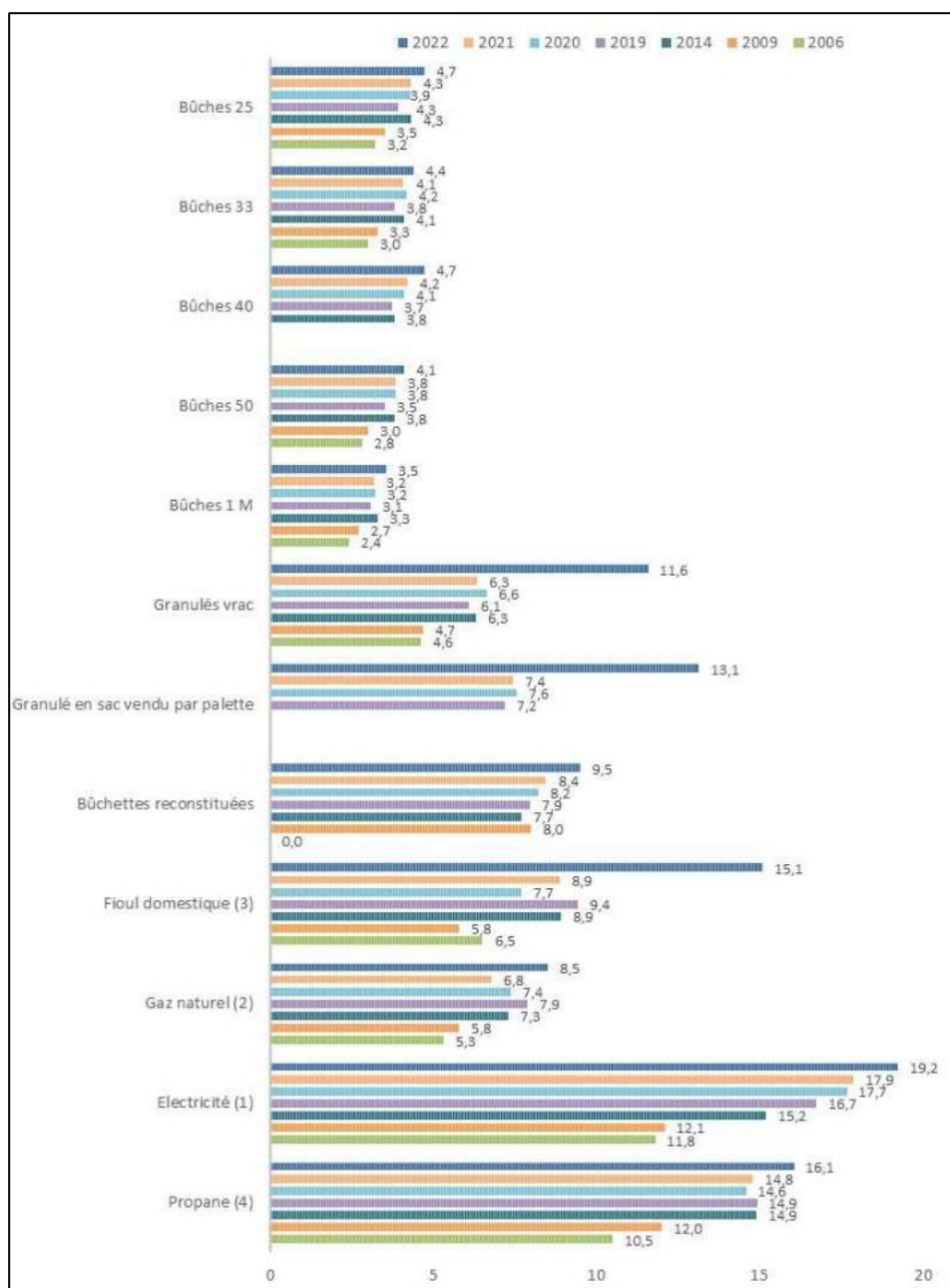


Comparaison entre l'évolution des prix des combustibles bois et biomasse et l'ensemble de l'énergie consommée par les ménages
(en euro, TTC, par KWh PCI livré)



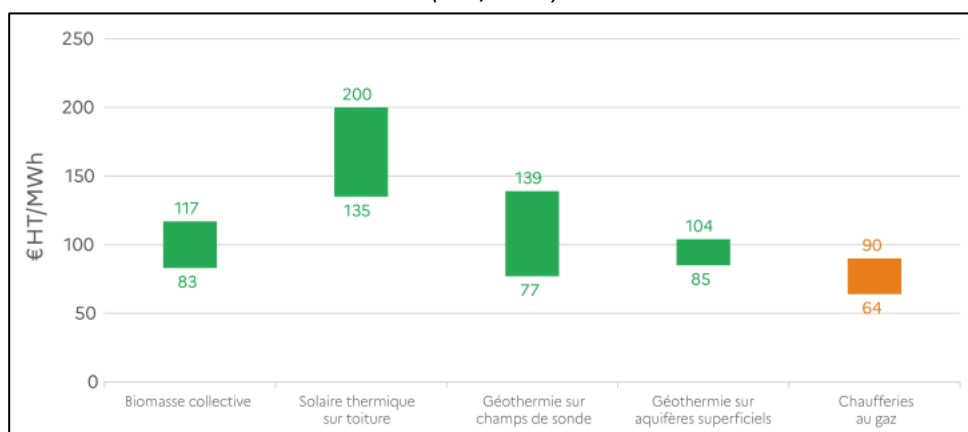
Source : Jean Claude Migette, Marie Calvin, CODA Stratégies. 2023. Enquête sur les prix des combustibles bois pour le chauffage domestique, tertiaire, industriel et collectif en 2022-2023 : Synthèse

Comparaison du prix du combustible bois dans le cadre d'un usage pour chauffage domestique principal
(en centimes d'euro TTC par KWh PCI livré)



Source : Jean Claude Migette, Marie Calvin, CODA Stratégies. 2023. Enquête sur les prix des combustibles bois pour le chauffage domestique, tertiaire, industriel et collectif en 2022-2023 : Synthèse

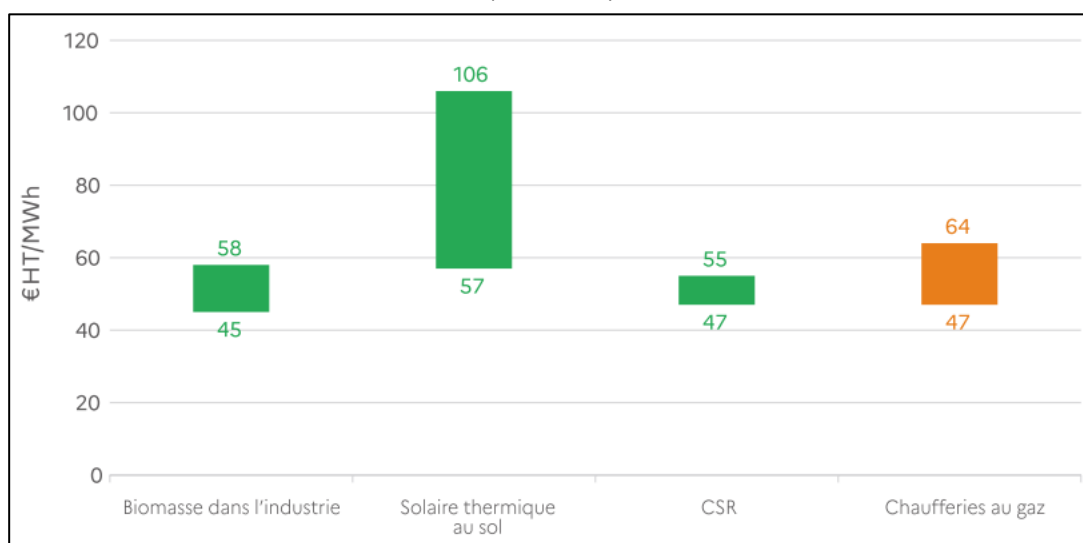
Comparaison des LCOE des filières EnR et des chaufferies gaz dans le collectif et le tertiaire en 2020
(€/HT/MWh)



ADEME : Brice ARNAUD, Jean-Michel PARROUFFE, Stefan LOUILLAT, In Numeri : Laurence HAEUSLER, Siessima TOE, Chaimae ELMOUJARRADE. Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France. Mars 2022

Nota : pour le solaire thermique sur toiture, le minima (135 €/HT/MWh) correspond à une installation de plus de 50 m² en zone méditerranéenne et le maxima (200 €/HT/MWh) à une installation de moins de 50 m² dans le Nord de la France. Pour les installations de géothermie sur champs de sondes, le minima (86 €/HT/MWh) correspond au LCOE des installations de 250 kW et le maxima (122 €/HT/MWh) au LCOE d'installations de 40 à 130 kW. Les minima et maxima des installations de géothermie sur aquifères superficiels (85 à 104 €/HT/MWh) correspondent aux LCOE des installations de 90 à 500 kW. Enfin, pour les chaudières biomasse et à gaz, les minima (83 €/HT/MWh et 64 €/HT/MWh) correspondent au LCOE d'une installation de 500 à 3000 kW, et les maxima (117 €/HT/MWh et 90 €/HT/MWh) au LCOE d'une installation de moins de 500 kW.

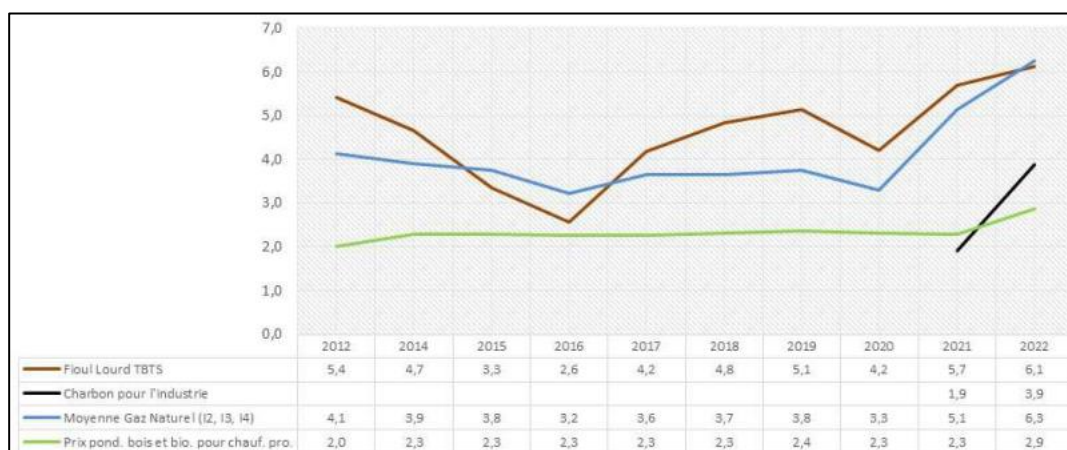
Comparaison des LCOE des filières EnR et des chaufferies gaz dans l'industrie en 2020
(€/HT/MWh)



ADEME : Brice ARNAUD, Jean-Michel PARROUFFE, Stefan LOUILLAT, In Numeri : Laurence HAEUSLER, Siessima TOE, Chaimae ELMOUJARRADE. Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France. Mars 2022

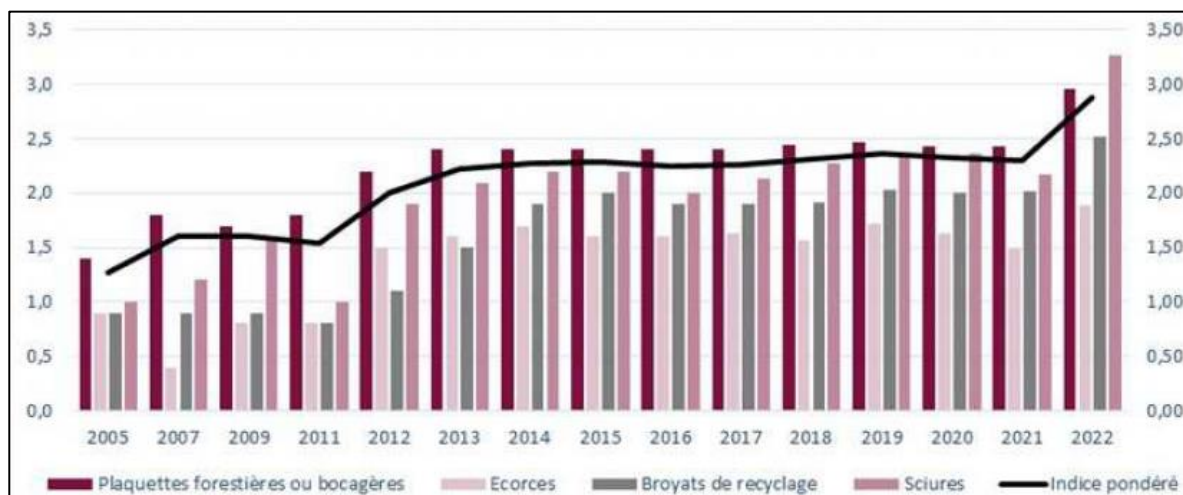
Nota : Les minima de la biomasse dans l'industrie (45 €/HT/MWh) et des chaufferies au gaz (47 €/HT/MWh) correspondent au coût des installations de plus de 3 MW et les maxima (58 €/HT/MWh et 64 €/HT/MWh), au coût des unités de 3 MW et moins. Les minima et maxima des systèmes solaires thermiques au sol correspondent au LCOE d'une installation de plus de 5000 m² en zone méditerranéenne (55 €/HT/MWh) et au LCOE (108 €/HT/MWh) d'une installation de 1000 à 5000 m². Pour les installations de valorisation des combustibles solides de récupération (CSR), les minima (47 €/HT/MWh) correspondent au LCOE des installations de plus de 20 MW et les maxima (55 €/HT/MWh) au LCOE des installations de moins de 20 MW.

Évolution comparée des prix du gaz naturel, du fioul et des combustibles biomasse pour les usages collectifs et industriels (livrés, HT, c€/kWh)

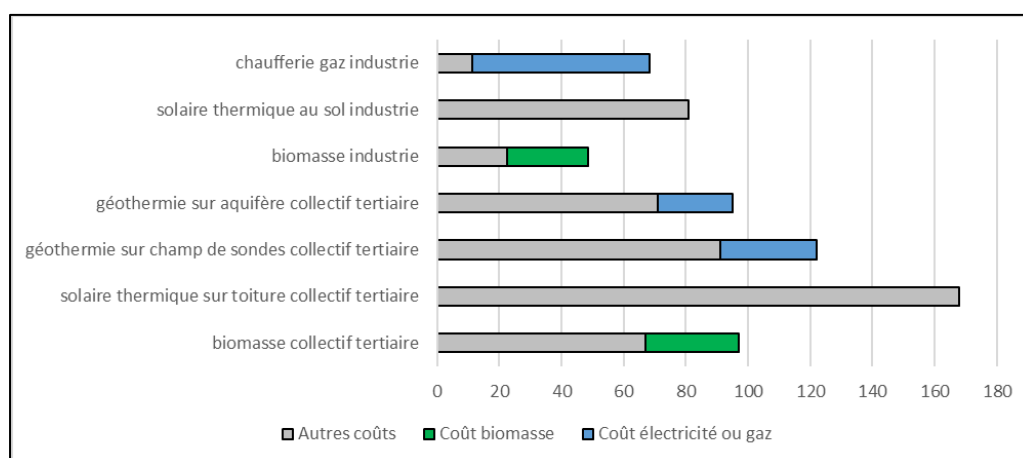


Source : Jean Claude Migette, Marie Calvin, CODA Stratégies. 2023. Enquête sur les prix des combustibles bois pour le chauffage domestique, tertiaire, industriel et collectif en 2022-2023 : Synthèse

Évolution du coût livré des combustibles pour les chaufferies professionnelles sur le moyen terme (centimes d'euro HT par kWh PCI)



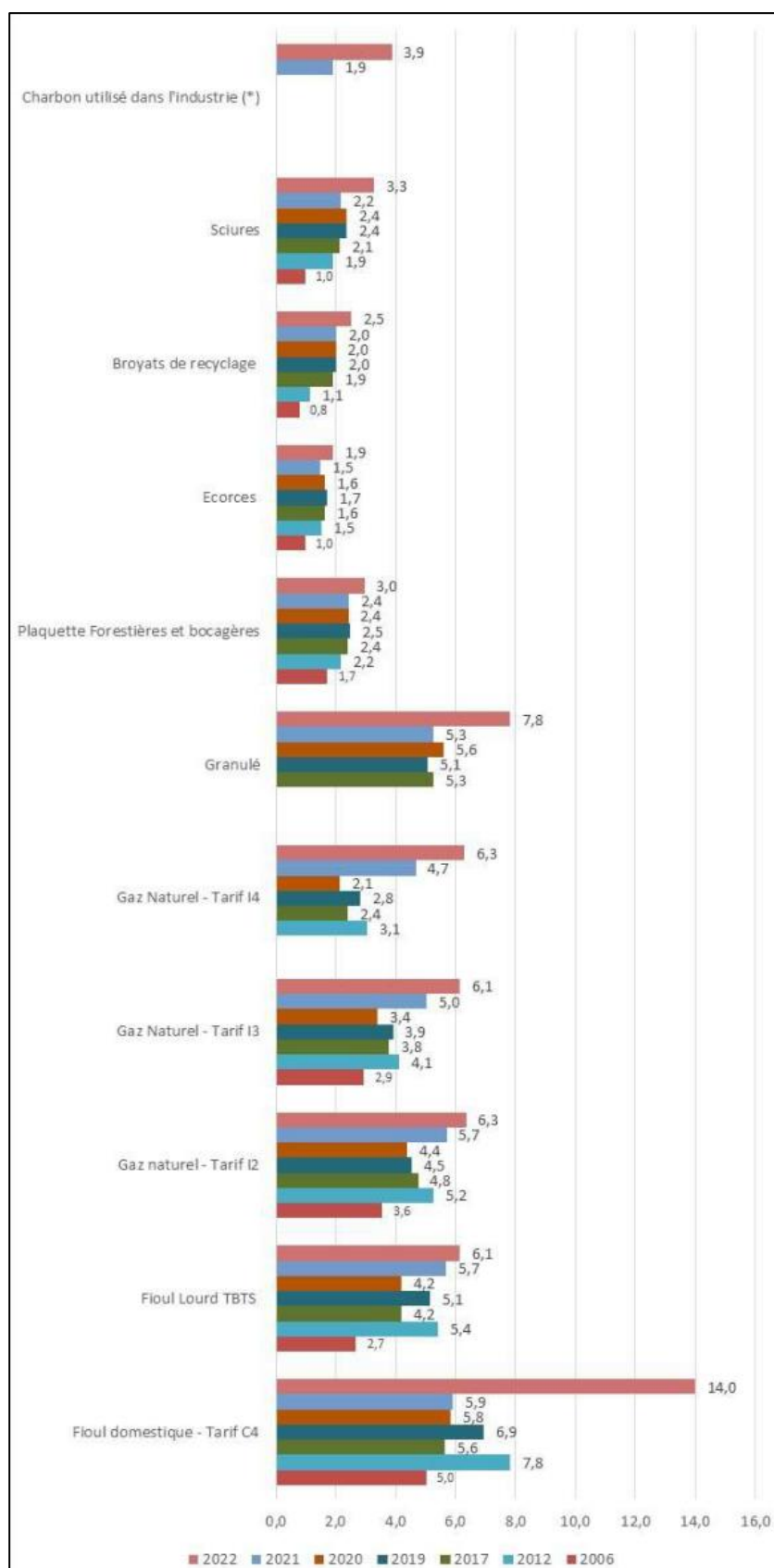
Source : Jean Claude Migette, Marie Calvin, CODA Stratégies. 2023. Enquête sur les prix des combustibles bois pour le chauffage domestique, tertiaire, industriel et collectif en 2022-2023 : Synthèse



Comparaison des prix de production de chaleur renouvelable selon différents procédés, avec identification du coût de la biomasse (€ / MWh)

Source : Mission, d'après ADEME : Brice Arnaud, Jean-Michel Parrouffe, Stefan Louilliat, In Numeri : Laurence Haeusler, Siessima Toe, Chaimae Elmou-jarrade. Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France. Mars 2022

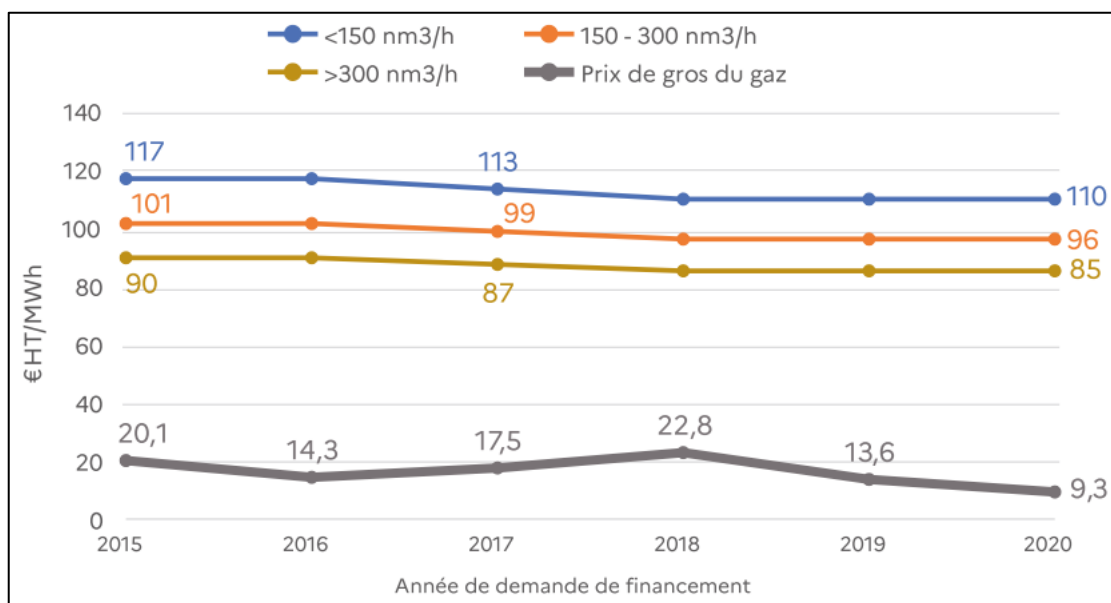
Comparaison du prix du combustible bois pour les collectivités et l'industrie
(centimes d'euro hors TVA par kWh PCI livré)



Source : Jean Claude Migette, Marie Calvin, CODA Stratégies. 2023. Enquête sur les prix des combustibles bois pour le chauffage domestique, tertiaire, industriel et collectif en 2022-2023 : Synthèse

5. Injection de biométhane

Comparaison LCOE injection biométhane et prix de gros du gaz de 2015 à 2020
(€/HT/MWh)

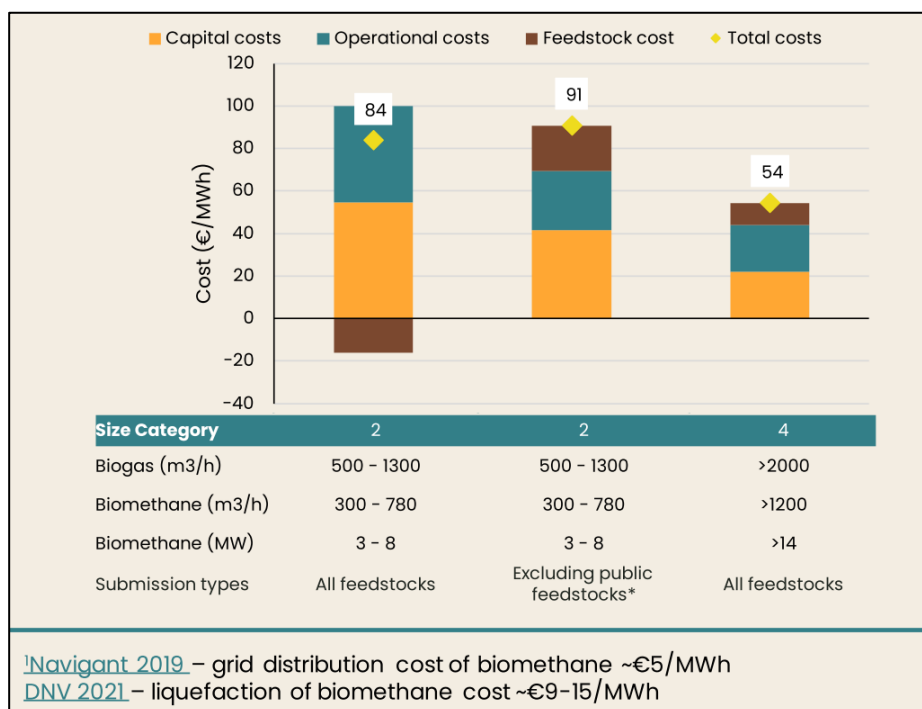


ADEME : Brice ARNAUD, Jean-Michel PARROUFFE, Stefan LOUILLAT, In Numeri : Laurence HAEUSLER, Siessima TOE, Chaimae ELMOUJARRADE. Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France. Mars 2022

Note : Le calcul du LCOE tient compte d'un coefficient de réfaction de 90 %, qui traduit le fait que 90% des coûts de production sont imputables à l'activité de production d'énergie et 10 % aux autres activités.

Une étude récente du Biomethane Industrial Partnership au niveau européen a collecté des données sur un échantillon d'installations représentant environ 10 % de la production de biométhane de l'UE. Les coûts de production sont présentés dans le graphique ci-dessous.

Coût total de production et de valorisation du biométhane

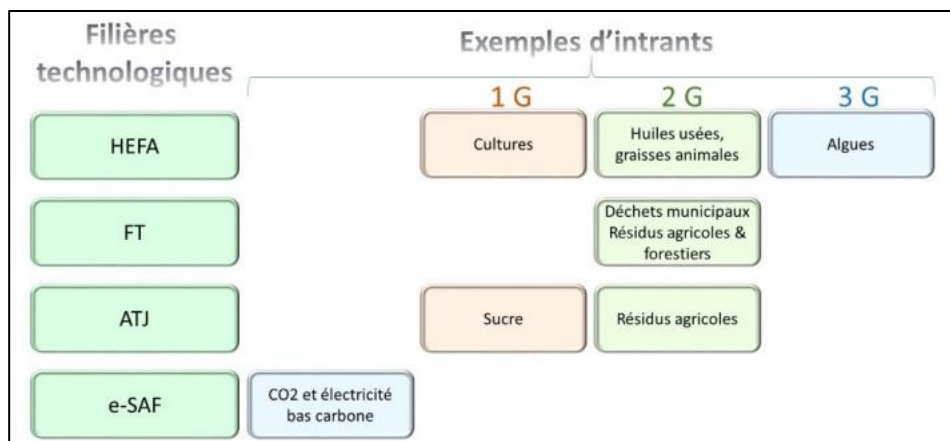


Source : Biomethane Industrial Partnership (BIP Europe). Insight into the current cost of biomethane production from real industry data. Task force 4.2. Octobre 2023

Cette étude précise que les coûts doivent être plus élevés pour la plupart des producteurs ayant une capacité inférieure à 3 MW. Des économies d'échelle sont claires dans la chaîne d'approvisionnement du biométhane, mais aussi dans les coûts d'investissement, avec une division de plus de deux entre les catégories 3-8 MW et > 14 MW. Un coût de connexion au réseau et d'injection de ~5€ MWh de biométhane pourrait être ajouté, de même que ~12€ MWh de biométhane pour le bioGNL. Par ailleurs, les coûts associés à la gestion du digestat sont importants et semblent ne pas être entièrement pris en compte dans cette analyse (certaines données communiquées indiquent de 0 à 55 €/MWh de biométhane pour le transport et le stockage du digestat).

6. Production de biocarburants

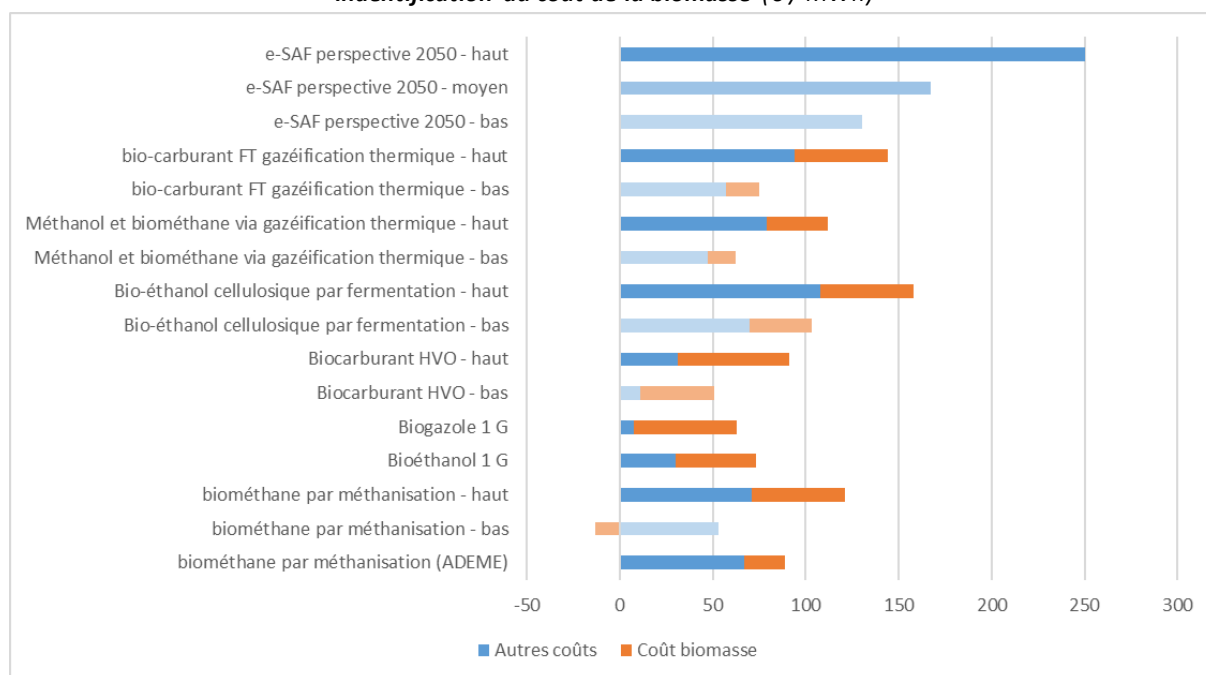
Typologie des procédés et ressources pour la production de SAF



Source : Académie des technologies. La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables. Février 2023

Nota : La technologie HEFA (Hydroproceed Ester and Fatty Acids) est mûre et déployée à l'échelle industrielle, notamment par les sociétés Neste et TotalEnergies. En France, la voie Fischer-Tropsch est portée par le projet français « BioTfuel » et sa suite « BioTjet » et la voie Alcohol to Jet (ATJ) par le projet « Futurol ».

Comparaison des coûts de production de biométhane et de biocarburants selon différents procédés, avec indetification du coût de la biomasse (€ / MWh)



Source : Mission, d'après IEA Bioenergy. Advanced Biofuels - Potential for Cost Reduction. 2020. – Académie des technologies. La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables. Février 2023. (chiffres sur les e-SAF) – ENEA Consulting, Vincent Feuillette. Enjeux et technologies des biocarburants en Europe. Mars 2013. (biocarburants 1 G) – ADEME – APCA. Analyse technico-économique de 84 unités de méthanisation agricoles, synthèse des résultats du programme PROdige. 2022.

Nota : la production d'e-SAF perspective 2050 – moyen repose sur un Capex de 3 € par l/an, une électricité à 30 €/KWh et du CO₂ à 150 €/t. Ces valeurs sont respectivement de 2,7 €/l/an, 20 €/KWh, 100 €/t pour l'hypothèse basse et de 4 €/l/an, 50 €/KWh et 250 €/t pour l'hypothèse haute.

Pour les e-SAF, le Capex actuel est plutôt de l'ordre de 8 € par l/an (Académie des technologies), le coût de l'électricité de 100 €/MWh (France – industries) et celui du CO₂ de 500 €/t (Académie des technologies) ; sous ces hypothèses, le coût de production atteindrait plus de 500 €/MWh.

Les coûts de production des carburants de deuxième génération pour l'aviation ont fait l'objet de plusieurs études ces dernières années, avec des fourchettes de prix variées, mais qui donnent des ordres de grandeurs et permettent des comparaisons entre procédés. Quelques résultats sont présentés ci-dessous.

Comparaison des coûts de production actualisés de différents types de biocarburants pour le transport aérien

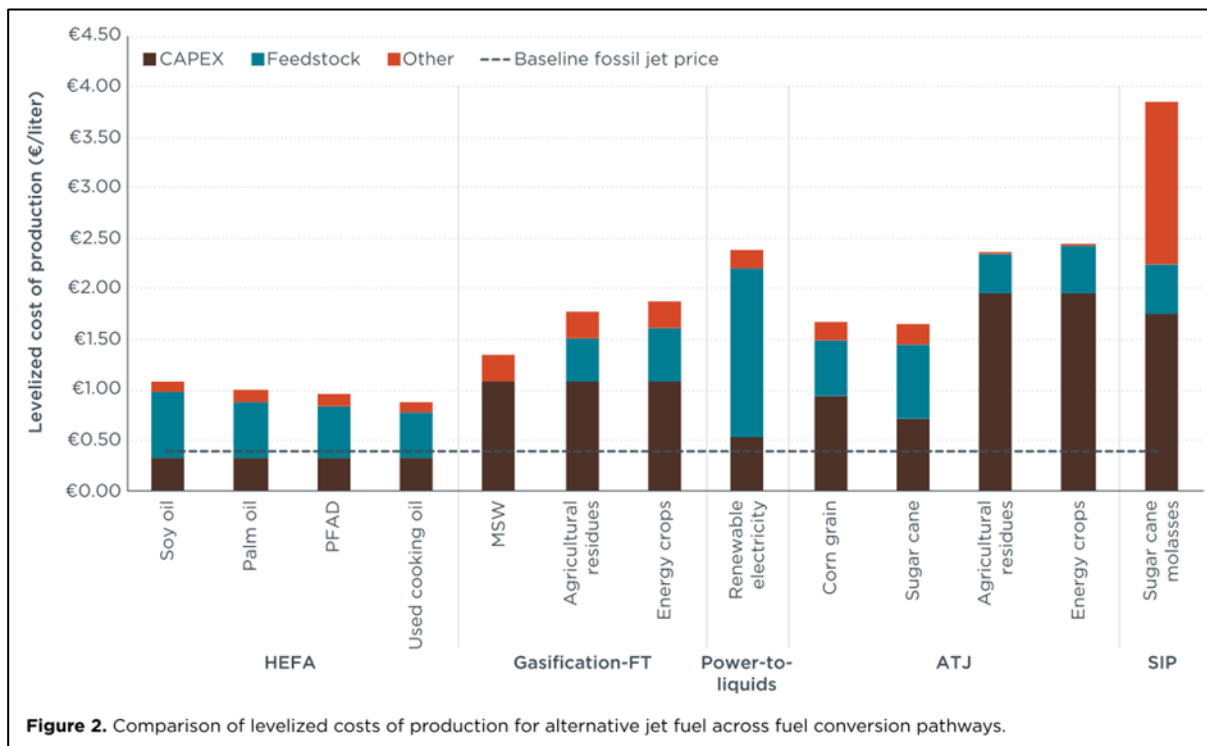
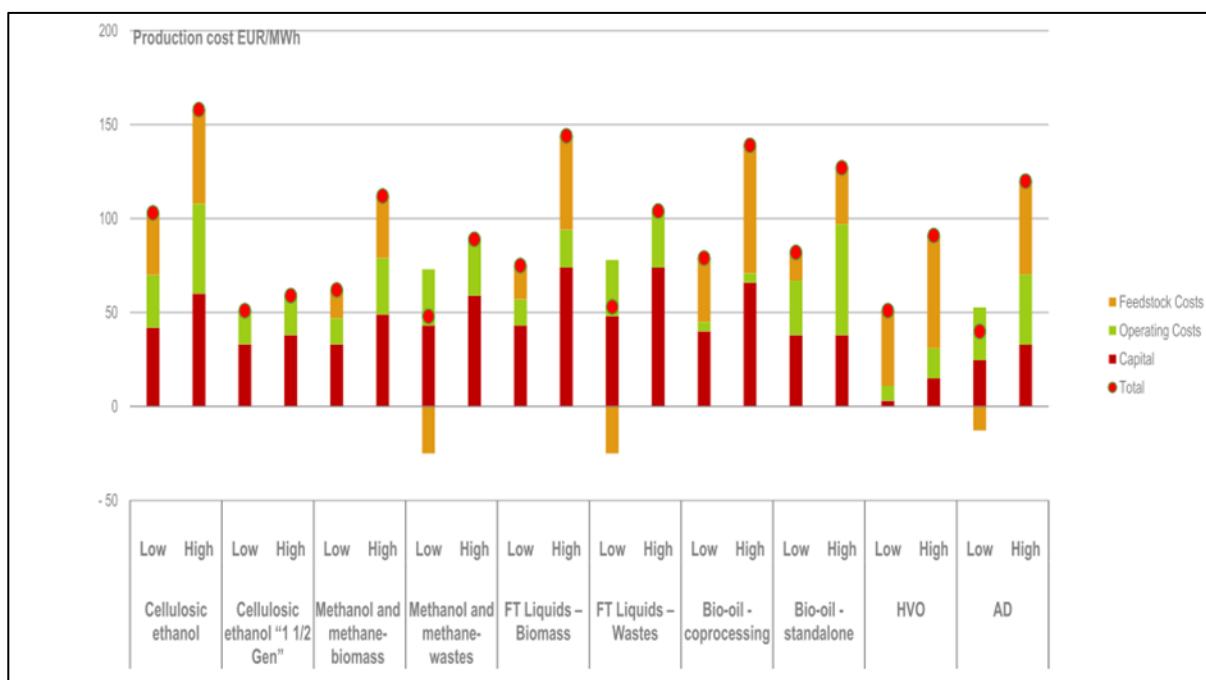


Figure 2. Comparison of levelized costs of production for alternative jet fuel across fuel conversion pathways.

Source : Nikita Pavlenko, Stephanie Searle, and Adam Christensen. The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union . The Internal Council on Clear Transportation, working paper 2019-05. Mars 2019.

Nota : HEFA = hydroprocessed esters and fatty acids – Gasification-FT = gasification Fischer Tropsch – ATJ = Alcohol-to-jet – SIP = Synthesized isoparaffins (ou DSHC = direct sugars-to-hydrocarbons).

Coûts de production courants de différentes filières de biocarburant pour le transport aérien



Source : IEA Bioenergy. Advanced Biofuels - Potential for Cost Reduction. 2020.

Coûts de production potentiels d'ici 15 ans de différentes filières de biocarburant pour le transport aérien

Table 17. Potential costs of biofuels production after reductions.

		Cellulosic ethanol	Methanol/ Methane Biomass	Methanol/ Methane Waste	FT Liquids - Biomass	FT Liquids Waste	Bio-oil	HVO	AD Methane
Current costs	Lo	103	62	48	75	53	79	51	40
	Hi	158	112	89	144	104	139	91	120
With process improvements	Lo	76	46	36	64	40	75	51	40
	Hi	122	102	80	125	94	132	91	120
Lower cost of capital	Lo	71	42	29	56	32	66	50	34
	Hi	112	94	68	112	79	119	88	113

Source : IEA Bioenergy. Advanced Biofuels - Potential for Cost Reduction. 2020.

Comparaison des coûts des biocarburants avancés avec les prix des biocarburants conventionnels et des combustibles fossiles



Source : IEA Bioenergy. Advanced Biofuels - Potential for Cost Reduction. 2020.

L'ensemble de ces évaluations montrent que les biocarburants avancés ne sont actuellement pas compétitifs par rapport aux combustibles fossiles qu'ils visent à remplacer. Ces coûts pourront sans doute diminuer à moyen terme avec l'expérience et les améliorations des procédés, mais il est probable qu'ils resteront plus élevés et que l'écart devra être comblé par un soutien public ou par une forte augmentation des coûts des énergies fossiles (prise en compte d'un coût carbone).

À titre d'exemple, sur un billet long courrier de 1 000 €, le coût du carburant représente aujourd'hui de l'ordre de 40 %. En supposant que les coûts des biocarburants ou e-carburants soient seulement de trois fois supérieurs au prix actuel du kérosène, le prix du billet passerait à 1 800 €, soit pratiquement un doublement.

En tout état de cause, l'achat de la biomasse représente une part importante des coûts de production et cela sera d'autant plus vrai dans le futur avec la baisse des coûts d'investissement et d'exploitation. De plus, avec les demandes croissantes sur la biomasse, il n'est pas sûr que le niveau de prix actuels soit pérenne. Les courbes de prix présentées au chapitre 1 montrent d'importantes

fluctuations qui risquent de s'amplifier en cas de déséquilibre offre/demande et de concurrence avec d'autres usages de la biomasse.

À titre d'exemple, les déchets bois ont longtemps été considérés comme de faible valeur, voire à prix négatif, et des projets se sont construits sur cette base. Pour autant, la part croissante de déchets bois utilisées dans la fabrication de panneaux et la multiplication de projets utilisant cette matière première pour produire de la chaleur, ont changé la donne.

Dans ce contexte, la proximité de sources de matières premières sera certainement un avantage, sans compter la rationalisation des coûts de mobilisation. Les projets recherchent ainsi une localisation garantissant un minimum de concurrence pour les ressources locales et ils essayent parallèlement de contractualiser à long terme l'approvisionnement pour le sécuriser. Certaines entreprises recherchent également l'intégration verticale de leur chaîne d'approvisionnement pour un meilleur contrôle. Ainsi, le groupe de bioénergie Drax au Royaume-Uni a investi dans des usines de granulés de bois dans le sud des États-Unis, Neste et d'autres sociétés fabricant du bio-SAF ont acquis des entités de collecte d'huiles de cuisson usagées, UPM développe des chaînes d'approvisionnement en cultures énergétiques en Amérique du Sud...

Si la production de biocarburant 1G et la production de CH₄ par méthanisation sont en phase industrielle mature, ce n'est pas le cas de la production de carburants 2G. Le tableau suivant indique les phases de maturité pour différents procédés de production de carburant aérien.

TRL et échelle de production actuels de carburants pour l'aviation

Route	Technology status	Largest plant, kt-year ⁻¹ ^a
Hydroprocessed esters and fatty acids-synthetic paraffinic kerosene (HEFA-SPK)	Commercial (TRL 8)	1653 (planned)
Alcohol-to-jet SPK (ATJ-SPK)	Demonstration (TRL 6-7)	82 (planned)
Hydroprocessing of fermented sugars-synthesized isoparaffins (HFS-SIP)	Prototype (TRL 5, lignocellulosic sugars), pre-commercial (TRL 7, conventional sugars)	81 (operational)
Fischer-Tropsch-SPK (FT-SPK)	Demonstration (TRL 6)	225 (planned)
Pyrolysis	Demonstration (TRL 6)	138 (planned) ^b
Aqueous phase reforming (APR)	Prototype (TRL 4-5, lignocellulosic sugars), demonstration (TRL 5-6, conventional sugars)	0.04 (operational) ^c
Hydrothermal liquefaction	Demonstration (TRL 5-6)	66 (planned)
Power-to-liquid FT (PtL FT)	Demonstration (TRL 5-6)	8 (planned) ^e

^a Here, ton refers to a generic ton of liquid fuel and not specifically to jet fuel
^b Pyrolysis oil
^c Bio-crude
^d Blue-crude

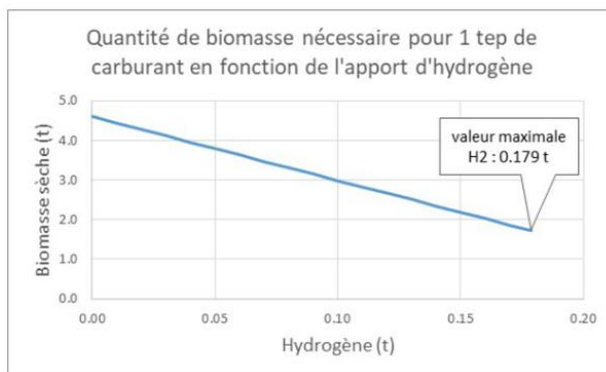
Source : Paul Bardon, Olivier Massol. Decarbonizing aviation with sustainable aviation fuels: Myths and realities of the roadmaps to net zero by 2050. IFPEN Economic Papers n°156. Octobre 2023.

Utiliser avec efficacité la biomasse pour la fabrication de carburants 2G

Un procédé thermochimique du type gazéification et Fischer Tropsch peut valoriser 50 % du carbone de la biomasse utilisée (sans apport d'hydrogène), soit deux fois plus qu'un procédé ATJ/2G. Pour la biomasse lignocellulosique, la voie biochimique devra consommer 2 à 3 fois plus de biomasse par rapport à la voie thermochimique pour le même service fourni. Il est probable que la filière ATJ/2G ne se développe que dans des niches d'opportunité, sans apporter une contribution importante à la montée en échelle de la production de SAF.

Chaîne de rendement idéalisée	
Voie bioSAF	Voie e-bioSAF
1 tonne de biomasse sèche ≈ 0,45 tep de bioénergie)	1 tonne de biomasse sèche ≈ 0,45 tep de bioénergie
↪ 0,22 tonne de biocarburant sans apport H ₂ (rendement de conversion 50 %)	↪ 0,45 tonne de biocarburant avec apport H ₂ (rendement de conversion 100 %)
↪ 0,135 tonne de bioSAF (sélectivité 60 %)	↪ 0,27 tonne de e-bioSAF (sélectivité 60 %)
Rendement de conversion bioSAF/bioénergie : 30 %	Rendement de conversion e-bioSAF/bioénergie : 60 %

En considérant un modèle rustique, la simple conservation massique du carbone et de l'hydrogène montre que sans apport d'hydrogène le rendement de conversion énergétique de la bioénergie en carburant est inférieur à 40 % alors qu'il monte à 100 % avec un apport en hydrogène dont la masse est de 17,9 % de la masse du carburant. La masse de biomasse à mobiliser pour produire 1 tonne de carburant décroît de plus d'un facteur 2 grâce à cet apport d'hydrogène. L'apport d'une tonne d'hydrogène exogène coûtera 40 MWh et économisera donc 83 MWh de biomasse.



En résumé, avec une installation optimisée pour la production d'e-bioSAF, on aura quantitativement une consommation énergétique de 40 MWh/tH₂ et une sélectivité kérosène de 60 % ; la production d'une tonne d'e-bioSAF mobilisera 0,25 tH₂ (soit de l'ordre de 10 MWh en électricité) et 3,6 tonnes de biomasse sèche (soit 1,6 tep de bioénergie).

Cependant la majorité du besoin en carburant durable pour l'aviation sera assurée par la production de « kérosène de synthèse » à partir d'hydrogène et de CO₂ capturé dans l'air. De manière transitoire, le CO₂ peut aussi être capté dans les rejets industriels au prix d'une performance de décarbonation deux fois moindre. La production

d'1 Mt de kérosène de synthèse mobilisera alors 37 TWh d'électricité dont 85 % pour l'électrolyse, 4 à 5 GW d'électrolyseurs à haute température, 5 Mt de CO₂ et un capital de 6 à 8 milliards d'euro.

Sous ces hypothèses, il sera alors nécessaire de clarifier les arbitrages d'usage de la biomasse et de l'électricité (notamment avec les exportations) dans le cadre d'une mise en cohérence des politiques énergétiques et industrielles.

Le coût de production de carburant durable pourrait converger vers 2 €/litre soit un coût d'abattement direct du carbone proche de 300 € par tonne de CO₂.

Extraits de : La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables. Académie des technologies. Février 2023

Analyse du potentiel de bioénergie

Dans son étude d'impact pour la proposition de directive ReFuelEU, la Commission européenne considère un potentiel de bioénergie en augmentation de 82 % entre 2015 (140 Mtep) et 2050 (255 Mtep).

Mais les études plus académiques concluent à une croissance nulle de la bioénergie disponible.

L'étude de « Material Economics¹³⁹ » quantifie pour 2019 l'usage de la biomasse en Europe : 13 EJ pour l'alimentation, 4 EJ pour les biomatériaux et 6 EJ (144 Mtep) pour les bioénergies. Les perspectives pour les bioénergies en 2050 se situent dans la fourchette de 3,9 à 7,7 EJ, soit 90 à 185 Mtep, restant donc à un niveau significatif, mais sans croissance notable.

¹³⁹ Material Economics). EU Biomass Use In A Net-Zero Economy - A Course Correction for EU Biomass. 2021

L'étude de l'Imperial College¹⁴⁰ conclut aussi à une stabilité de la biomasse disponible pour la bioénergie entre 2030 et 2050.

Sur la seule part de biomasse agricole, l'analyse de France Stratégie conclut à une disponibilité maximale de 125 TWh/an, soit 50 % de la référence SNBC 2.

Le volume de bioénergie en 2050 a donc une part robuste égale à sa valeur actuelle et une part significativement plus hypothétique au-delà de cette valeur.

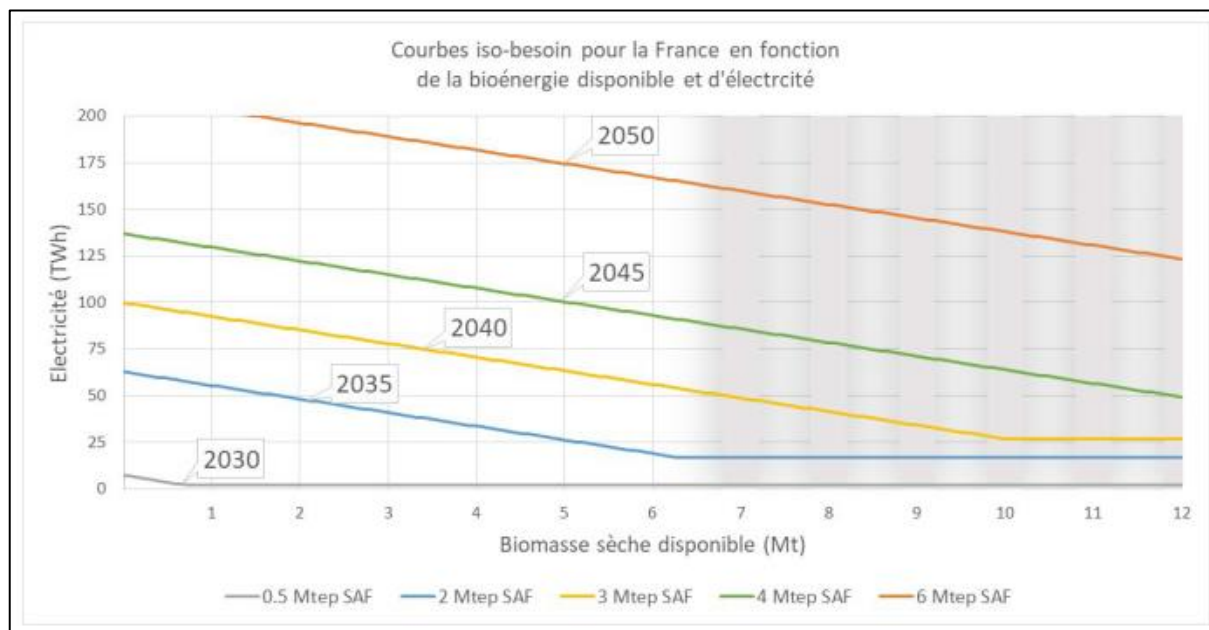
Face à une demande en bioénergie qui excède les ressources disponibles, la compétition entre les secteurs de l'économie imposera la mise en place de politiques publiques qui fixeront le cadre de fonctionnement des marchés pour ce qui concerne l'accès à la biomasse.

La biomasse peut contribuer pour une vingtaine de pourcents à la production de « biokérosène » pour l'aviation, mais ceci nécessite la sécurisation d'un taux de mobilisation de la biomasse au profit du secteur aérien dans le cadre d'une politique publique rationalisant sur le long terme l'affectation de la bioénergie aux différents secteurs économiques.

Compte tenu de l'incapacité de la biomasse à assurer seule la croissance de la production de SAF au-delà de 2030-35 et des incertitudes importantes qui pèsent sur la disponibilité de la biomasse, il est important d'engager au plus tôt la montée en échelle industrielle des technologies synergiques propres aux e-bioSAF et aux carburants de synthèse e-SAF.

Extraits de : La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables.
Académie des technologies. Février 2023

L'étude récente de l'Académie des technologies a produit un graphique intéressant reliant les objectifs d'utilisation de carburants d'aviation durables, à différentes échéances, à la disponibilité en biomasse pour produire des biocarburants et en électricité pour produire des e-carburants en complément. Ce graphique est reproduit ci-dessous.



Source : Académie des technologies. La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables. Février 2023

Nota : les points dans la zone grisée impliquent une mobilisation de la bioénergie au profit du seul secteur de l'aviation supérieure à 10 % de la bioénergie disponible¹⁴¹.

¹⁴⁰ Imperial Collège London Consultant – Calliope Panoutsou et Kyriakos Maniatis. Sustainable biomass availability in the UE, to 2050. Août 2021.

¹⁴¹ Dans son étude d'impact en support à la proposition ReFuelEU, la Commission européenne a défini les objectifs d'incorporation de SAF en 2050 sur la base d'un taux de prélèvement de 10 % du potentiel de bioénergie (255 Mtep) envisagé.

Ce qui permet de donner un ordre de grandeur de la consommation électrique nécessaire dans la prochaine décennie en fonction de la biomasse disponible, selon le tableau suivant.

besoin en électricité		2030	2035	2040
biomasse mobilisée	6,7 Mtbs	2 TWh	17 TWh	51 TWh
biomasse mobilisé	4,0 Mtbs	2 TWh	34 TWh	71 TWh

pour une production SAF égale à	0,5 Mtep	2 Mtep	3 Mtep
---------------------------------	----------	--------	--------

Source : Académie des technologies. La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables. Février 2023

En cumulant les SAF oléochimiques, les e-bioSAF et les e-SAF, le tableau ci-dessous précise les quantités relatives d'électricité bas carbone et de biomasse qu'il est nécessaire de réserver à la production de SAF

Production de SAF en France		Electricité à disponibilité 80 % (e-bioSAF et e-SAF)			
e-SAF + e-bioSAF + SAF oléochimique		25 TWh	50 TWh	80 TWh	100 TWh
Biomasse e-bioSAF	2.0 Mtbs	1.4 Mt	2.0 Mt	2.9 Mt	3.4 Mt
	4.0 Mtbs	1.8 Mt	2.4 Mt	3.3 Mt	3.8 Mt
	6.7 Mtbs	2.3 Mt	3.0 Mt	3.8 Mt	4.3 Mt
	8.0 Mtbs	2.6 Mt	3.2 Mt	4.0 Mt	4.6 Mt
Rappel du besoin en SAF		2030	2035	2040	
France		0.5 Mt	2 Mt	3 Mt	

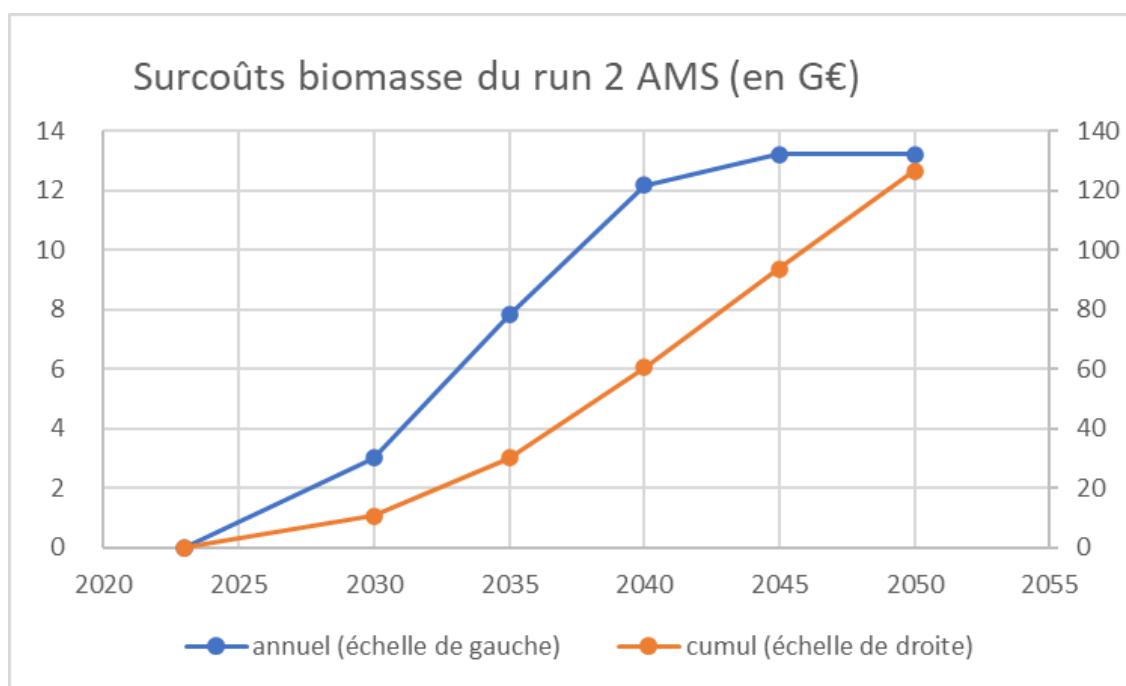
Source : Académie des technologies. La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables. Février 2023

7. Évaluation des surcoûts liés aux besoins de biomasse énergie exprimés dans le « run 2 »

Sur la base des surcoûts unitaires évalués dans les chapitres précédents on peut estimer un ordre de grandeur des surcoûts liés aux besoins de biomasse exprimés.

Les hypothèses retenues ici sont extrêmement simplificatrices :

- les hypothèses de consommation de produits énergétiques issus de la biomasse sont celles du scénario AMS run 2 continental ;
- on chiffre le coût annuel supplémentaire par rapport à la situation de 2023 ;
- on considère que la biomasse utilisée directement sous forme de chaleur est sans surcoût, que la production d'électricité à partir de biomasse solide reste approximativement constante à son niveau de 2023 et donc ne provoque pas de surcoût ;
- in fine, seules les quantités totales de biogaz et biocarburants produites engendrent un surcoût. Les trajectoires de prix des énergies fossiles sont simplifiées mais cohérentes avec le cadrage de la SFEC (40 €/MWh pour le gaz, 80€/MWh pour le carburant fossile raffiné) ;
- pour les biocarburants, on considère que les biocarburants 1G qui représentent environ 40 TWh en 2023 sont progressivement remplacés par des biocarburants 2G, avec un reliquat de 10TWh de biocarburants 1G en 2050 ;
- les coûts de production sont déduits des chapitres précédents : 100 €/MWh pour le biogaz, 150 €/MWh pour les biocarburants 2G. On considère que les biocarburants 1G ne présentent pas de surcoût significatif ;
- les conditions économiques sont réputées constantes sur la période (pas de prise en compte de variations de prix de la biomasse, de prix du CO₂, et pas d'actualisation).



Enfin, l'ensemble de ces surcoûts est exprimé en LCOE, c'est à dire que les dépenses d'investissements sont lissées et amorties sur la vie de l'équipement avec les dépenses de fonctionnement. Dans les faits, il faudrait d'abord investir dans les installations de production ce qui risque de déplacer une bonne partie des soutiens de l'État vers la phase d'investissement, en début des courbes.