

Analyse du cycle de vie du bois énergie collectif et industriel

Synthèse

Janvier 2022



EXPERTISES

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'ensemble des membres du Comité Technique de l'étude pour leur contribution, de même que les 3 membres de la revue critique :

- Annie Levasseur (présidente) (École de technologie supérieure, Université du Québec) ;
- Kati Koponen (VTT Technical Research Centre of Finland) ;
- Hugues Imbeault-Tétreault (Groupe AGÉCO).

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, X. Logel, J. Lhotellier, B. De Caemel, C. Alexandre, S. Cousin, E. Vial, AL. Dubilly, M. Buitrago, M. Durand, E. Machefaux, J. Mousset. Janvier 2022. Analyse du Cycle de Vie du bois énergie collectif et industriel – Synthèse. **48 pages**

Cet ouvrage est disponible en ligne sur <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 17MAR001240

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : RDC Environment, Biomasse Normandie, FCBA

Coordination technique - ADEME : DUBILLY Anne-Laure et BUITRAGO Miriam

Direction/Service : Service Forêt Alimentation et Bioéconomie, Direction Bioéconomie et Energies Renouvelables

SOMMAIRE

INTRODUCTION	4
1. LOT 1 : ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE DIFFERENTES FILIERES BOIS ENERGIE ET COMPARAISON AVEC LA FILIERE GAZ.....	7
1.1. Introduction.....	7
1.2. Méthodologie	8
1.2.1. Description de la méthodologie d'analyse du cycle de vie	8
1.2.2. Unité fonctionnelle	8
1.2.3. Enjeux environnementaux	8
1.3. Scénarios étudiés	9
1.4. Principales données	12
1.4.1. Gestion sylvicole.....	12
1.4.2. Préparation du combustible.....	13
1.4.3. Combustion du combustible en chaufferie	14
1.4.3.1. Exploitation/Fonctionnement de la chaufferie	14
1.4.3.2. Cendres	15
1.5. Enseignements.....	16
1.5.1. Enjeux environnementaux pertinents pour le filières bois énergie	16
1.5.2. Étapes et émissions les plus contributrices aux enjeux environnementaux	16
1.5.3. Pistes pour diminuer l'impact environnemental des filières bois énergie	17
1.5.4. Différences de contribution aux différents enjeux environnementaux entre les différentes filières bois énergie	20
1.5.5. Intérêt environnemental de la filière bois énergie versus la filière gaz pour la production de chaleur pour le collectif ou l'industrie.....	26
1.6. Limites de l'approche mise en œuvre.....	27
2. LOT 2 : ÉVALUATION DU BILAN GES DE LA PRODUCTION DE CHALEUR A PARTIR DE PLAQUETTES FORESTIERES, ISSUES DE DIFFERENTS SCENARIOS SYLVICOLES INTEGRANT UNE RECOLTE ACCRUE DU BOIS EN FORET.....	29
2.1. Introduction.....	29
2.2. Scénarios étudiés	30
2.3. Méthodologie	32
2.4. Principales données et représentativité des scénarios étudiés	34
2.4.1. Principales données	34
2.4.2. Représentativité des scénarios étudiés	36
2.5. Enseignements.....	37
2.6. Limites	42
CONCLUSIONS	43
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	45

Introduction

Le bois énergie est au cœur des stratégies nationales de la transition énergétique.

L'UE s'est fixée l'objectif d'atteindre en 2030 au moins 33 % d'énergie renouvelable consommée (EnR)¹. La France contribue à cet objectif à travers la mise en place de la « *programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)*² ». L'un des objectifs de la PPE est notamment de multiplier par deux la quantité de chaleur et de froid d'origine renouvelable produite par rapport à 2012.

État des lieux de la production de chaleur à partir de biomasse pour les secteurs industriel et collectif.

La filière bois énergie est aujourd'hui la première EnR en France. En 2019, elle représente 36 % de la production primaire nationale d'énergies renouvelables, pratiquement exclusivement sous forme de chaleur ; seulement 8 % de sa production est électrique. Des objectifs très ambitieux pèsent sur la production de chaleur pour les secteurs collectifs et industriels.³

Dans le secteur collectif et industriel, les combustibles utilisés sont variés. L'estimation de la répartition des combustibles biomasse dans les installations financées par le Fonds Chaleur et les installations de cogénération de plus de 1200 MWh/an en 2018⁴ donne approximativement la répartition suivante : environ 45 % de plaquettes forestières ; 9,5 % de plaquettes bocagères ; 17 % de connexes de l'industrie de la transformation du bois ; 17 % de sous-produits industriels et agricoles ; 7 % de bois en fin de vie SSD (Sortie du statut de déchet) ; 4 % de bois déchet « adjuvanté » ; 0,5 % de granulés du bois et autres.

État des lieux de la forêt et de la commercialisation du bois récolté en forêt en France métropolitaine.

La forêt couvre aujourd'hui 16,9 millions d'hectares (Mha) en France métropolitaine, soit 31 % du territoire. Au cours du XX^e siècle, la surface forestière s'est accrue de 6 Mha. Cette dynamique d'expansion se poursuit aujourd'hui avec une augmentation d'environ 60 000 ha par an de surface de forêt depuis 2010. La forêt fournit un ensemble de biens et de services à la société grâce à son patrimoine biologique et à sa biodiversité : conservation des sols, protection contre les aléas naturels, filtrage des particules et des polluants, augmentation de la disponibilité et de la circulation de l'eau, service d'approvisionnement en matériaux et énergies, services socio-culturels (activités de promenade, de loisir et de tourisme), dimension patrimoniale, etc. Une gestion forestière durable et multifonctionnelle préserve ce faisceau de services et de valeurs.

La récolte totale du bois forestier pour l'ensemble des usages représente environ 60 % de l'accroissement naturel net de la forêt sur la période 2009-2017⁵.

En 2018, la récolte de bois commercialisé en France métropolitaine s'établit à 38,9 millions de m³, dont 20 millions de m³ de bois d'œuvre, 10,3 millions de m³ de bois d'industrie et 8,6 millions de m³ de bois énergie utilisé notamment dans le secteur industriel ou collectif⁶. Pour le secteur bois énergie domestique, il faut ajouter la récolte de bois autoconsommé (intégrant le bois forestier et hors forêt) estimé à 16,9 millions de m³. La part de bois de chauffage en provenance de la forêt est estimée à 64 %⁷.

La récolte du bois énergie en forêt correspond à des coupes de bois de faible diamètre ou qualité. Cela peut être issu, pour les peuplements de futaies⁸ : de travaux d'éclaircies, de coupes sanitaires, de la récolte de cimes dans les coupes finales destinées à la production de bois d'œuvre, de la récolte d'arbres de trop faible qualité pour une utilisation en bois d'œuvre, de coupes de relevé de couvert et d'ouvertures de cloisonnements. Pour les peuplements de taillis, il s'agit de coupes de balivage ou de coupes totales de peuplements matures ou dépérissant suivi d'un renouvellement des peuplements après les coupes. Enfin, cela peut correspondre, pour des peuplements hétérogènes sans potentiel de production de bois de qualité issu d'accrus naturels, à des coupes totales des peuplements suivi d'un renouvellement. La commercialisation de la récolte de bois énergie en forêt croît fortement (+200 % depuis 2008). Cette croissance est à destination principalement des collectivités et des industries, mais aussi de la filière chauffage au bois domestique, qui se professionnalise. Cette hausse s'explique notamment par le fait que la biomasse énergie est au cœur des stratégies européennes et nationales de transition

¹ Directive (UE) 2018/2001 du parlement européen et du conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, disponible à <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>

² <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe>

³ Chiffres clés des énergies renouvelables - Édition 2020, publiés par le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, disponible à <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-des-energies-renouvelables-edition-2020?rubrique=18>.

⁴ Étude ADEME, Compilation des consommations et prélèvements de biomasse par région et par nature de combustible – 2016, disponible à <https://www.ademe.fr/compilation-consommations-prelevements-biomasse-region-nature-combustible>

⁵ Selon l'Inventaire forestier national de l'IGN publié en 2019 <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique250>

⁶ Agreste Primeur, numéro 360, Décembre 2019

⁷ Étude ADEME, Étude sur le chauffage domestique au bois - 2018, disponible à <https://www.ademe.fr/etude-chauffage-domestique-bois>

⁸ Un lexique des termes de gestion forestière est disponible dans les annexes du rapport

énergétique. En revanche l'autoconsommation de bois bûches dans le secteur domestique s'est fortement réduite. Ainsi, **la quantité de bois récoltée en forêt utilisée pour l'énergie reste au global relativement constante.**

L'ADEME poursuit ses travaux afin de favoriser une production de chaleur renouvelable à haute valeur environnementale.

Dans cette objectif, l'ADEME a réalisé en 2005 une première évaluation environnementale du chauffage au bois dans les secteurs domestique, collectif et industriel⁹. En 2015, l'ADEME a réalisé une nouvelle étude dressant un état de l'art des principales difficultés méthodologiques rencontrées lors de la réalisation d'évaluations environnementales dans le domaine du chauffage au bois et mettant en pratique les différentes méthodologies existantes¹⁰. Elle a ainsi permis d'établir des recommandations sur les aspects associés à la comptabilisation des émissions biogéniques. Elle a également permis d'identifier les besoins de travaux de recherche additionnels. Cette nouvelle étude s'inscrit dans cette trajectoire permettant de proposer de nouvelles données et d'explorer des évolutions méthodologiques.

L'étude a été scindée en deux lots.

Le **lot 1** a pour objectif d'évaluer le bilan environnemental des principales filières bois énergie collectif et industriel afin :

- d'identifier, pour chaque filière, les étapes du cycle de vie les plus contributrices dans une perspective d'écoconception ;
- de préciser les conditions de production de chaleur pour le collectif ou l'industrie permettant d'optimiser l'intérêt environnemental, par rapport à la production en chaufferie alimentée par du gaz.

Ce premier lot évalue ces différentes filières selon la méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV) en utilisant le principe de neutralité carbone des émissions biogéniques¹¹ dans l'indicateur changement climatique.

Le lot 1 a été réalisé par RDC Environment avec le support technique de Biomasse Normandie.



Le **lot 2** a pour objectif d'évaluer les bilans des gaz à effet de serre (GES) de la production de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles intégrant une récolte accrue du bois. Cette deuxième partie constitue une première approche méthodologique permettant de mieux comprendre l'effet de l'augmentation de la récolte de bois sur les variations des stocks et puits de carbone forestiers (dans les forêts et les produits bois) liées au changements des pratiques de gestion forestière ou des changements d'usage des sols.

Elle est à considérer comme « exploratoire », permettant d'approfondir les limites de l'hypothèse de la neutralité carbone des émissions biogéniques et ainsi proposer des perspectives d'évolution. Il s'agit de dérouler la méthode sur quelques scénarios types de manière à analyser la faisabilité et les limites de la méthode. Les ordres de grandeur du bilan GES ainsi calculés, auxquels on ajoute les émissions fossiles estimées dans le lot 1, sont ensuite comparés, à ceux de la production de chaleur à partir de gaz.

Les résultats sont valables pour l'énergie produite dans ces scénarios intégrant une modification des pratiques de récolte de bois. **Ils présentent un fort niveau d'incertitude et sont spécifiques aux scénarios testés dans le cadre de cette étude, et ne sont pas généralisables à tous les MWh produits en France à partir de plaquettes forestières. Cette partie de l'étude ne s'applique pas non plus au bois énergie provenant des produits connexes, du bois en fin de vie ou déchet bois.**

La partie concernant le carbone biogénique a été réalisée par FCBA. L'intégration des résultats concernant le carbone fossile issue du lot 1 dans le lot 2 a été réalisée par RDC Environment.



L'ensemble de l'étude s'est appuyé sur un comité technique composé de : l'ADEME ; du ministère de la Transition Écologique et Solidaire ; du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation ; des représentants des organismes nationaux des filières bois énergie ; des experts indépendants spécialistes des questions de prise en compte du carbone biogénique, de la filière bois énergie et en ACV.

⁹ https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/34702_acv_bois_dom.pdf

¹⁰ <https://www.ademe.fr/etude-preliminaire-a-realisation-bilans-environnementaux-chauffage-bois>

¹¹ L'hypothèse postule un équilibre global entre les émissions de CO₂ engendrées par la combustion du bois d'une part, et les quantités de CO₂ absorbées lors de la croissance des arbres correspondant à ce bois consommé d'autre part, ce qui se traduit par une stabilité des stocks de carbone forestier.

Revue critique

La présente étude (lot 1 et lot 2) **a fait l'objet d'une revue critique externe** réalisée par un comité de revue, conformément à l'exigence de la norme ISO 14040 :2006. Le comité de revue a été constitué pour réunir des compétences scientifiques internationales sur les questions des impacts environnementaux (dont climatiques) du bois énergie. Il vient apporter un regard scientifique indépendant et une caution à la méthodologie utilisée. Le comité de revue critique est complémentaire au comité technique qui apporte des éléments d'appréciation précieux entre les travaux et les réalités de la filière et du terrain.

Les experts de la revue critique sont les suivants :

- Annie Levasseur (présidente) (École de technologie supérieure, Université du Québec) ;
- Kati Koponen (VTT Technical Research Centre of Finland) ;
- Hugues Imbeault-Tétreault (Groupe AGÉCO).

1. Lot 1 : Évaluation environnementale de différentes filières bois énergie et comparaison avec la filière gaz

1.1. Introduction

Cette première partie de l'étude permet d'apporter des réponses aux questions suivantes :

- Quels sont les enjeux environnementaux prépondérants pour les filières bois énergie ?
- Quelle est la contribution aux différents enjeux environnementaux de la production d'énergie à partir des différentes sources de biomasse suivantes ?
 - plaquettes forestières (sèches et humides),
 - granulés blancs d'origine française (issus de connexes de scierie),
 - connexes de l'industrie de première transformation du bois (écorces ou chutes issues de scierie ou papeterie),
 - déchets de bois « propre » (aussi appelé bois en fin de vie SSD (Sortie du statut de déchet)),
 - déchets de bois « adjuvanté » ;
- Quelles sont les pistes pour améliorer le bilan environnemental des filières bois énergie ?
- Quelles sont les différences de contribution aux enjeux environnementaux entre les filières bois énergie étudiées ?
- Quelles sont les limites de l'approche méthodologique de l'évaluation environnementale mise en œuvre ?
- Est-ce que la production de chaleur en vue d'alimenter un réseau de chaleur en chaufferie biomasse présente un intérêt environnemental par rapport à la production en chaufferie alimentée par du gaz et dans quelles conditions ?

Le présent chapitre débute par une présentation des scénarios étudiés et de la méthodologie. Il se poursuit ensuite par une présentation des principales données utilisées et se termine par la formulation de réponses aux questionnements repris ci-dessus (enseignements et limites).

1.2. Méthodologie

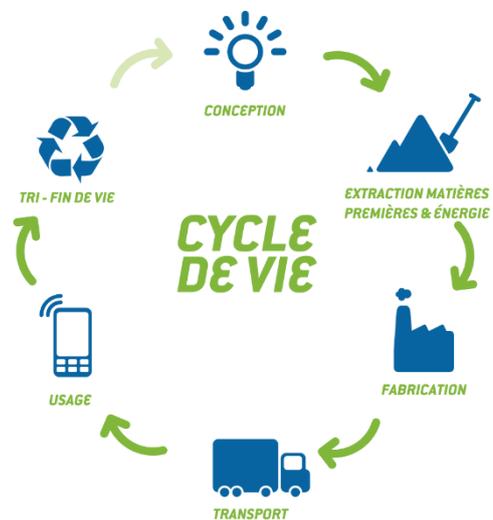
L'évaluation environnementale réalisée dans le cadre de cette étude est basée sur l'analyse du cycle de vie (ACV).

1.2.1. Description de la méthodologie d'analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie est un des outils le plus abouti en matière d'évaluation globale et multicritère des impacts environnementaux. Cette **méthode normée** par les normes ISO 14 040 : 2006 et 14 044 : 2006 permet de mesurer les effets quantifiables de produits (biens ou de services) sur l'environnement. C'est une méthode d'évaluation **multi-étapes** (production des matières premières, transport, fabrication du produit, distribution, utilisation et fin de vie) illustrée dans la Figure 1 et **multicritères** (impacts sur les écosystèmes, impacts sur les ressources et impacts sur la santé).

Utilisée comme outil d'écoconception, elle permet d'améliorer le bilan environnemental d'un produit lors de sa conception, en précisant les options les plus favorables et en identifiant les éventuels transferts de pollution d'une phase du cycle de vie à une autre et/ou d'un indicateur environnemental à un autre lorsque diverses solutions sont envisagées.

Figure 1. Illustration schématique des étapes du cycle de vie.



1.2.2. Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle définie pour cette partie est la suivante :

Produire 1 MWh_{th} d'énergie en sortie d'un système de production de chaleur.

1.2.3. Enjeux environnementaux

Chaque ACV peut constituer son propre panel d'indicateurs de catégorie d'impact relatifs aux différents enjeux environnementaux, en accord avec les objectifs visés.

Les enjeux environnementaux étudiés dans le cadre de cette étude sont ceux recommandés et diffusés par la Commission européenne dans le document « *Product Environmental Footprint Category Rules Guidance, Version 6.3, May 2018* »¹² :

changement climatique ;	eutrophisation de l'eau douce ;
appauvrissement de la couche d'ozone ;	eutrophisation marine ;
émissions de particules ;	utilisation des terres ;
rayonnement ionisant ;	épuisement de la ressource en eau ;
formation d'ozone photochimique ;	utilisation des ressources minérales et métalliques ;
acidification ;	utilisation des ressources fossiles.
eutrophisation terrestre ;	

Ces indicateurs d'impacts ont été sélectionnés par le JRC sur base des travaux en cours au niveau international (ex : UNEP SETAC) et européen.

Les indicateurs de catégorie d'impact potentiel relatifs à la toxicité ont fait l'objet de nouveaux développements et ont été publiés fin 2018 (EF 3.0.). Ces méthodes n'ayant fait l'objet d'aucune mise en œuvre sur des cas réels, ils ne seront pas étudiés dans la présente étude.

La détermination des enjeux environnementaux pertinents pour les filières bois énergie étudiées dans le cadre de ce projet a été réalisée en appliquant la méthode de normalisation/pondération du projet européen Product Environmental Footprint (PEF)¹³.

¹² http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/PEFCR_OEFSR_en.htm

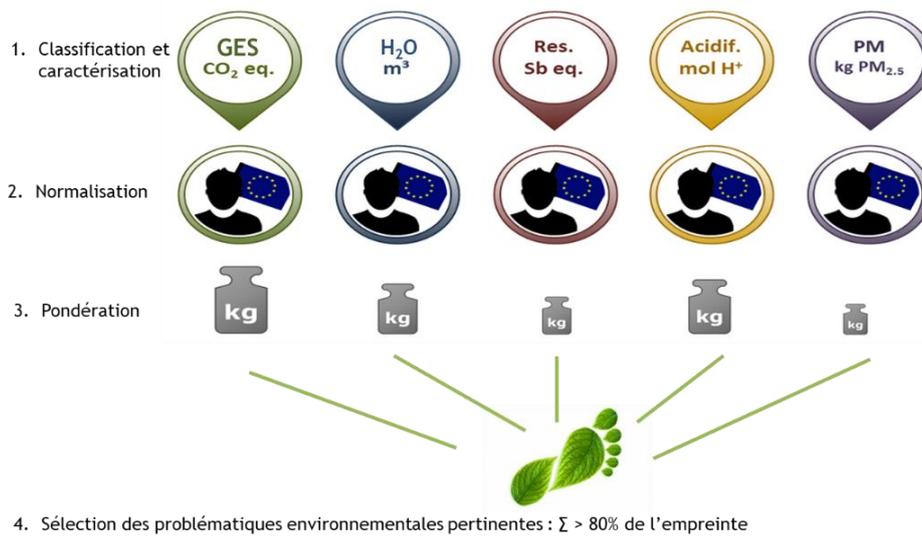
¹³ https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/ef_pilots.htm

Cette méthode consiste en quatre étapes :

1. Classification et caractérisation des contributions ;
2. Normalisation sur base de l'impact d'un équivalent habitant européen sur une année ;
3. Pondération des enjeux environnementaux ;
4. Sélection des problématiques environnementales pertinentes.

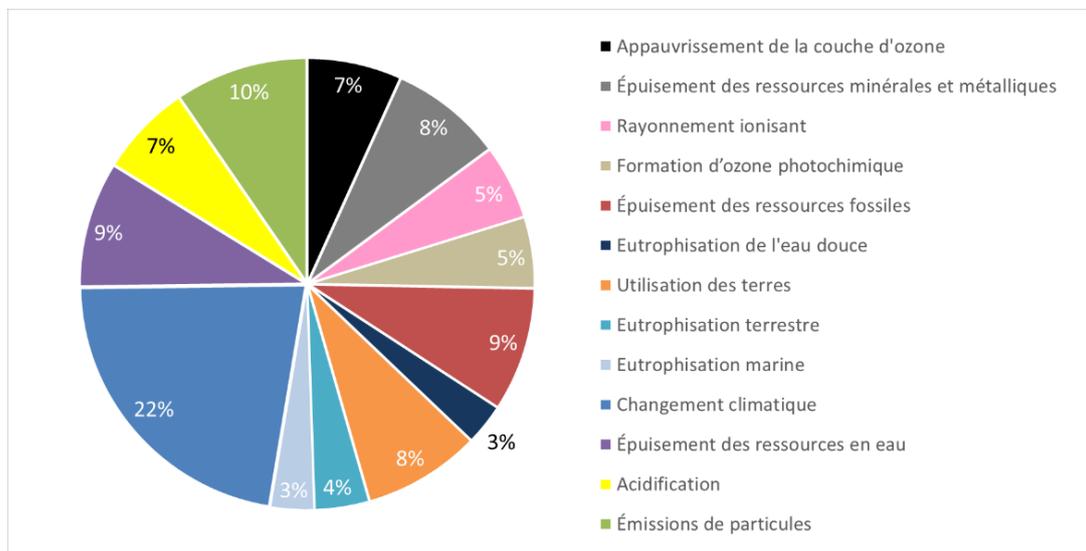
Les différentes étapes sont schématisées dans la figure ci-dessous.

Figure 2. Méthode utilisée pour la détermination des enjeux environnementaux pertinents.



Les facteurs de pondération sont présentés dans la figure ci-dessous.

Figure 3. Facteurs de pondération.



1.3. Scénarios étudiés

Six scénarios sont étudiés dans le cadre du lot 1 :

1. Production de chaleur à partir de plaquettes forestières sèches dans une chaufferie de faible puissance (0–0,5 MW) en vue d'alimenter un réseau de chaleur ;
2. Production de chaleur à partir de plaquettes forestières humides dans une chaufferie de moyenne puissance (0,5–5 MW) en vue d'alimenter un réseau de chaleur ;
3. Production de chaleur à partir de connexes de transformation du bois dans une chaufferie de puissance élevée (5–50 MW) utilisée directement sur le site en vue d'alimenter un processus industriel ;

4. Production de chaleur à partir de déchets de bois « propre » dans une chaufferie de puissance moyenne (0,5–5 MW) en vue d'alimenter un réseau de chaleur ;
5. Production de chaleur à partir de déchets de bois « adjuvanté » dans une chaufferie de puissance élevée (5–50 MW) en vue d'alimenter un processus industriel ;
6. Production de chaleur à partir de granulés blancs français issus de connexes de transformation du bois dans une chaufferie de faible puissance (0–0,5 MW) en vue d'alimenter un réseau de chaleur.

Ce nombre limité de scénarios a été défini en accord avec le COTECH en vue de répondre aux questionnements principaux de l'étude et de faciliter l'appropriation de ses résultats. Ils sont représentatifs de la filière en France métropolitaine.

En termes de représentativité, on peut noter que la présente étude considère que les chaufferies sont alimentées par un unique type de combustible. Dans la pratique, les chaufferies sont souvent alimentées par plusieurs types de combustibles. Concernant le scénario 6 : à dire d'expert, les granulés issus de connexes représentent 80 % de la filière granulé.

Les chaufferies de petites puissances représentent une part relativement élevée en termes de nombre de chaufferies en fonctionnement (~ 90 %) mais relativement faible en termes de quantité de chaleur produite (~ 5 %).

La répartition d'utilisation des différents combustibles est rappelée en Introduction, à la rubrique « État des lieux de la production de chaleur à partir de biomasse pour les secteurs industriel et collectif »

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques des scénarios étudiés.

Tableau 1. Description des scénarios étudiés.

		Scénario 1 (S1)	Scénario 2 (S2)	Scénario 3 (S3)	Scénario 4 (S4)	Scénario 5 (S5)	Scénario 6 (S6)		
	Source biomasse	Taillis de feuillus (châtaigner)	Taillis de feuillus (châtaigner)	Non définie	/	/	/		
	Type de produit récolté	BI/BE + 70%MB _{pl}	BI/BE + 70%MB _{pl}	Non défini	/	/	/		
	Type de gestion sylvicole	Exploitation et débardage	Exploitation et débardage	Non défini	/	/	/		
	Préparation	Broyage en bord de route	✓	✓	✗	✗	✗	/	
		Transport vers plateforme de préparation	✓	✗	✗	✗	✗	✗	/
		Broyage en plateforme	✗	✗	✗	✗	✗	✗	/
		Séchage	✓ - Naturel	✗	✗	✗	✗	✗	/
		Concassage	✗	✗	✗	✓	✓	✓	/
		Broyage rapide	✗	✗	✓	✓	✓	✓	/
		Criblage	✓	✗	✗	✗	✓	✓	/
	Séchage et granulation	/	/	/	/	/	/	✓ Combustible utilisé pour le séchage : écorce et broyat de palettes	
	Type de combustible obtenu	Plaquette forestière sèche	Plaquette forestière humide	Connexes de l'industrie de première transformation du bois (écorces ou chutes issues de scierie ou papeterie) utilisés directement sur le site	Déchets de bois « propre » (Broyat SSD criblé)	Déchets de bois « adjuvanté » (Broyat criblé sans SSD classés non dangereux)	Granulés blancs français issus de connexes de scierie (unité de production des granulés intégrée)		
	Taux d'humidité initial – final (%)	45 %-25 %	45 %-45 %	45 %-45 %	/-20 %	/-20 %	45 %-8 %		
PCI (MWh _{pci} /t _{brute})	3,04	3,61	2,44	3,98	3,98	4,86			
Masse volumique (t/map ¹⁴)	0,26	0,36	0,33	0,2	0,2	0,75			
Densité anhydre ¹⁵ (sans écorce) (t/m ³)	0,59	0,59	-	-	-	-			
	Transport vers la chaufferie	✓	✓	✗	✓	✓	✓		
	Puissance	0-0,5 MW	0,5-5 MW	5-50 MW	0,5-5 MW	5-50 MW	0-0,5 MW		
	Usage	Réseau de chaleur	Réseau de chaleur	Industriel	Réseau de chaleur	Industriel	Réseau de chaleur		
	Rendement	80 %	85 %	85 %	85 %	85 %	80 %		
	Dépoussiérage	Multi-cyclone (MC)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Électrofiltre (EF)	✗	✓	✓	✓	✓	✗	
		Filtre à manche (FAM)	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
	SNCR	✗	✗	✓	✗	✓	✗		
Autres traitements	✗	✗	✗	✗	✓	✗			
Devenir des cendres	Épandage	Épandage	Épandage	Épandage	Épandage	Épandage			

Note : BI : Bois d'industrie - BE : Bois énergie - MB : Menu bois

¹⁴ Mètre cube apparent de plaquette

¹⁵ Humidité = 0 %

Les scénarios de base S1, S2, S3 et S6 ont fait l'objet de variantes qui sont résumées dans le Tableau 2 ci-dessous. Certaines variantes pourraient être mises en œuvre dans plusieurs scénarios ; dans un souci de favoriser une meilleure appropriation de l'ensemble des résultats de l'étude, il a été décidé de privilégier le caractère illustratif plutôt qu'exhaustif de la démarche.

Tableau 2. Résumé des variantes étudiées pour chaque scénario.

Scénario	Étape		Cas de base	Variantes
S1	Préparation	Séchage	Naturel	Forcé
		Broyage	En bord de route	Sur plateforme industrielle
S2	Source biomasse/Type de produit récolté/Type de gestion sylvicole		Taillis de feuillus (châtaigner)/BI/BE + 70%MB _{pl} /Exploitation et débardage	Voir Tableau 3
	Transport vers la chaufferie		35 km (camion)	<ul style="list-style-type: none"> • 200 km (camion) • 500 km (camion)
	Émissions de la chaufferie (exercice théorique)		Valeurs du cas de base	<ul style="list-style-type: none"> • Supérieures à la réglementation • Conformes à la nouvelle réglementation
	SNCR		✗	✓
	Autres traitements		✗	✓ Unité de condensation
S3	Puissance		5-50 MW	> 50 MW : diminution des émissions de poussières et de NO _x
S6	Type de combustible obtenu/Transport vers la chaufferie		Granulés blancs français : 175 km (camion)	Granulés américains : 10 500 km (bateau) + 775 km (camion)
	Séchage et granulation		Combustible utilisé pour le séchage : écorce et broyat de palettes, en chaufferie	<ul style="list-style-type: none"> • Combustible utilisé pour le séchage : gaz naturel, en chaufferie • Combustible utilisé pour le séchage : écorce et broyat de palettes, en unité de cogénération
Scénario	Point méthodologique		Cas de base	Variantes
S2	Allocation réalisée entre BI et BO*		Affectation volumique	Affectation économique
S6	Prise en compte d'un impact pour les étapes de gestion sylvicole et de préparation du bois pour d'autres usages (hors « Séchage et granulation »)		Pas d'impact alloué aux connexes utilisés pour fabriquer les granulés	Prise en compte d'un impact

* La variante sur la mode d'affectation (économique plutôt que volumique) a été testée sur deux variantes du cas de base S2 (décrites dans le Tableau 3), à savoir les variantes qui produisent du BO.

1.4. Principales données

1.4.1. Gestion sylvicole

Les plaquettes forestières des scénarios 1 et 2 de l'étude proviennent de l'exploitation d'un taillis de feuillus de châtaigner. Des variantes ont été réalisées dans le scénario 2 pour analyser l'influence du type de sylviculture sur le bilan environnemental en lien notamment avec la consommation des énergies fossiles (ex : engins sylvicoles, mise à disposition des plants, fertilisation...) et l'utilisation des terres pour la production de bois.

Les étapes de gestion sylvicole étudiées dans S1 et S2 et les variantes du S2 pour la source de biomasse ainsi que les types de produit récolté et de gestion sylvicole sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3. Étapes de gestion sylvicole considérées.

		S1 et S2 de base	Variantes du scénario de base S2					
Sylviculture/Essence		Taillis de feuillus (châtaigner)	Futaie de résineux (douglas)	Récolte des menus bois en futaie de résineux (douglas)	Récolte des souches en futaie de résineux (douglas)	Futaie feuillus (chêne et hêtre)	Récolte des menus bois en Futaie feuillus (chêne et hêtre)	Taillis courte rotation (eucalyptus)
Produits récoltés		197 m ³ BI/BE 29 m ³ MB par ha – 20 ans	787 m ³ BO, 180 m ³ BI/BE et 203 m ³ MB par ha – 53 ans	290 m ³ MB par ha - 53 ans	188 m ³ de S par ha – 53 ans	838 m ³ BO 557 m ³ BI - BE 542 m ³ MB par ha – 170 ans	290 m ³ par ha - 170 ans	785 m ³ BE + MB par ha – 30 ans
Produits récoltés couverts par l'inventaire		BI/BE+70%MB	BI/BE	MB	Souches	BI/BE	MB	BE + MB
Étapes	Mise à disposition des plants et transport		x					x
	Plantation		x					x
	Fertilisation							x
	Éclaircie		x					x
	Exploitation	X	x			x		x
	Démembrement du houppier et évacuation	X	x			x		
	Débardage/ramassage	x	x	x	x	x	x	x
Devenir des souches		Arasage et destruction des souches	Arasage	Arrachage, mise en andain			Arasage et destruction des souches	
Informations additionnelles	Taux de mécanisation	30 %	93 %	/	/	/	4 %	100 %
	Débardage	100 % porteur	16 % skidder, 84 % porteur	100 % porteur	100 % porteur	16 % skidder, 84 % porteur	64 % skidder 36 % porteur	96 % porteur 4 % skidder
	Fertilisation	/	/	/	/	/	/	Pour rotation 30 ans 191 kg N/ha 234 kg P ₂ O ₅ /ha, 301 kg K ₂ O/ha

Les données liées à la gestion sylvicole ont été fournies sous forme d'inventaire agrégé par FCBA.

Selon l'observatoire des pratiques pour la récolte de bois énergie réalisé dans le cadre du projet GERBOISE¹⁶, la récolte de taillis simple de feuillu ou taillis sous futaie de feuillus est représentative de plus de 40 % du bois récolté pour les plaquettes en France. Les variantes futaie feuillus et futaies résineux sont également représentatives de la situation actuelle car, aujourd'hui, 32 % du bois récolté pour la plaquette est issu de la récolte du houppier et 26 % est issu d'éclaircie et dépressage. Aujourd'hui, la récolte des menus bois (MB) n'a jamais lieu seule et fait l'objet de recommandations. La récolte des souches n'est *quasi* jamais pratiquée, et le TCR n'est pas non plus représentatif des pratiques actuelles.

1.4.2. Préparation du combustible

L'ensemble des données liées à la préparation du combustible ont été fournies par Biomasse Normandie. Ces données ont été collectées auprès de différents professionnels du secteur. Une liste des acteurs consultés est fournie en annexe du rapport complet. Lorsqu'aucune donnée n'était disponible, les données utilisées se basent sur l'expertise de Biomasse Normandie. Les principales données utilisées sont présentées dans le tableau ci-dessous.

¹⁶ GERBOISE - enquête menée auprès des professionnels mobilisateurs de bois énergie - portant sur 1,5 millions de tonnes de bois énergie, soit près de 50 % de la récolte de bois énergie destinée à la production de plaquettes forestières (<https://www.ademe.fr/gerboise-gestion-raisonnee-recolte-bois-energie>).

Tableau 4. Principales données utilisées pour la préparation des combustibles.

		Consommation de diesel	Transport	Chaleur issue de biomasse	Électricité	
	Préparation	Broyage en bord de route	52,5 l/h	/	/	/
		Transport vers plateforme de préparation	-	40 km	/	/
		Séchage	/	/	/	/
		Concassage	52,5 l/h	/	/	/
		Broyage rapide	52,5 l/h	/	/	/
	Criblage	15,5 l/h	/	/	/	
	Séchage	/	/	2,6 MJ/kg anhydre	/	
Granulation	0,00065 l/kg anhydre	/		0,165 kWh/kg anhydre		
	Transport vers la chaufferie	/	35 km (S1, S2, S4 et S5) 175 km (S6)	/	/	

1.4.3. Combustion du combustible en chaufferie

Les données liées à la combustion ont été fournies en partie par Biomasse Normandie.

Le tableau suivant présente les émissions utilisées pour la modélisation de la combustion des différents types de combustibles en chaufferie. Deux méthodes ont été utilisées pour déterminer les émissions atmosphériques, à défaut d'avoir des mesures réelles et spécifiques par type de combustible et type de chaufferie :

1. Utilisation des valeurs limites d'émissions (VLE), c'est-à-dire les seuils réglementaires (S5) ;
2. Utilisation des facteurs d'émissions spécifiques (FE), issus des différents rapports (S1, S2, S3, S4, S6).

Tableau 5. Émissions utilisées dans la modélisation pour la combustion en chaufferie (avant traitement éventuel des fumées).

Polluant	Émission par type de chaufferie				
	Plaquettes 0–0,5 MW	Plaquettes et déchets de bois propre 0,5–5 MW	Connexes 5–50 MW	Granulés 0–0,5 MW	Déchets de bois adjuvanté 5–50 MW
Scénarios	S1	S2, S4	S3	S6	S5
Poussières (g/MWh _{PCI})	360	60	53	80	67
NO _x (g/MWh _{PCI})	720	526	415	266	537
SO _x (g/MWh _{PCI})	36	34	17	9	268
CO (g/MWh _{PCI})	134	134	134	234	100
Dioxines/furanes (ng/MWh _{PCI})	144	144	144	112	201
COVNM (g/MWh _{PCI})	17,3	5,8	8,6	5,4	-
Substances organiques (g/MWh _{PCI})	-	-	-	-	20
HCl - Chlorure d'hydrogène (g/MWh _{PCI})	-	-	-	-	20
HF - Fluorure d'hydrogène (g/MWh _{PCI})	-	-	-	-	2

Légende

	FE déterminés à partir des VLE sur base d'un facteur de conversion de 1 mg/Nm ³ = 1,343 g/MWh _{PCI}
	FE issus des rapports d'émissions de 110 chaufferies soutenue par le Fonds Chaleur de l'ADEME
	FE issus du CITEPA, données OMINEA 2018 ¹⁷ (pour une chaudière bois dans le secteur commercial et institutionnel de puissance < 50 MW). Le CITEPA ne fournit pas d'information différenciée par puissance.
	FE issus d'une campagne de mesure menée par l'ADEME sur 9 installations, datant de 2016 : https://www.ademe.fr/evaluation-performances-energetiques-environnementales-chaufferies-biomasse
	Biomasse Normandie sur base de différentes ACV réalisées par FCBA (2012) pour une chaudière de 50 kW, utilisant la base de données ecoinvent

1.4.3.1. Exploitation/Fonctionnement de la chaufferie

Le tableau ci-dessous présente des données de fonctionnement de la chaufferie dans les différents scénarios étudiés. Ces données sont issues de collecte auprès de différents professionnels du secteur et de l'expertise de Biomasse Normandie.

¹⁷ Ces données sont basées sur des données des années 90. Elles ont été utilisées à défaut de mieux et sur base du constat qu'il n'y a pas eu d'avancées technologiques majeures. Des campagnes de mesure sont actuellement en cours dans le cadre du projet ACIBIOQA. Elles pourront être intégrées lors d'un prochain exercice.

Tableau 6. Fonctionnement de la chaufferie.

Scénario		Réseau de chaleur		Industrie
		< 0,5 MW	0,5 à 5 MW	5 à 50 MW
		S1, S6	S2, S4	S3, S5
Caractéristiques des chaufferies : exploitation				
Rendement global (%)	Combustibles	80 ¹⁸	85	85
	Combustible sous la forme de granulés	90	-	-
Consommation d'électricité (kWh/MWh sortie chaufferie)		15	24	24

1.4.3.2. Cendres

Le taux de cendres correspond à la teneur en matières minérales contenues dans le combustible. Il correspond au ratio entre masse de cendres produites sur la masse du combustible anhydre. La quantité de cendres dans les différents scénarios est présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7. Quantité de cendres.

Combustible		Plaquettes forestières sèches	Plaquettes forestières humides	Produits connexes de scierie ou papeterie	Granulés	Broyats de bois en fin de vie	
						Déchets de bois propre	Déchets de bois adjuvanté
Scénarios		S1	S2	S3	S6	S4	S5
Taux de cendres	(%)	1,5	2,25	6	0,75	2	2
Dont sable/terre	(%)	0	0	1 à 5	0	0	0
Dont autres éléments minéraux	(%)	1,5	2,25	3	0,75	2	2

Les cendres sont classifiées en trois catégories et produites dans des proportions différentes :

- les cendres sous foyer (80 %) ;
- les cendres sous multi-cyclone (15 %) ;
- les cendres issues du filtre à manches (5 %).

Les cendres sous foyer, en mélange ou non avec les cendres sous multi-cyclone, sont considérées en cas de base comme étant épandues. Les cendres issues du filtre à manches sont considérées comme étant enfouies en installation de stockage des déchets dangereux (ISDD). Les caractéristiques chimiques des cendres sont issues de l'étude de caractérisation des cendres menée par l'ADEME¹⁹.

¹⁸ Pour les chaudières < 0,5 MW, la proposition d'un rendement de 80 % intègre le rendement théorique à puissance nominale (qui peut effectivement être au moins égal à celui d'une chaudière de puissance supérieure) mais également le fait qu'elles sont souvent surdimensionnées (et fonctionnent donc sur une durée à équivalent pleine puissance plus faible que les chaudières de puissance plus élevées, généralement dimensionnées plus justement) et exploitées par un technicien qui n'est pas un professionnel de l'énergie.

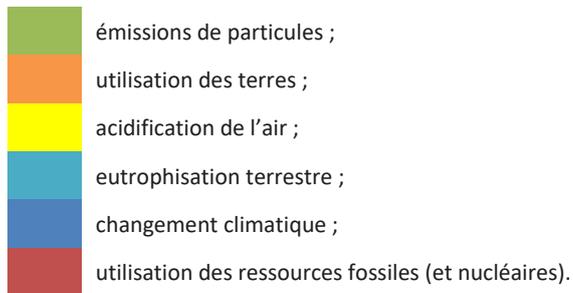
¹⁹ Résultats en cours de publication : étude ADEME « Campagne d'analyse des cendres de chaufferies biomasse 2019 ».

1.5. Enseignements

1.5.1. Enjeux environnementaux pertinents pour le filières bois énergie

Enseignement 1 : Les enjeux environnementaux pertinents sont principalement en lien avec les émissions de polluants atmosphériques.

Parmi les indicateurs d'impacts environnementaux étudiés dans le cadre de cette étude, les enjeux identifiés comme pertinents pour les filières bois énergie étudiées sont :



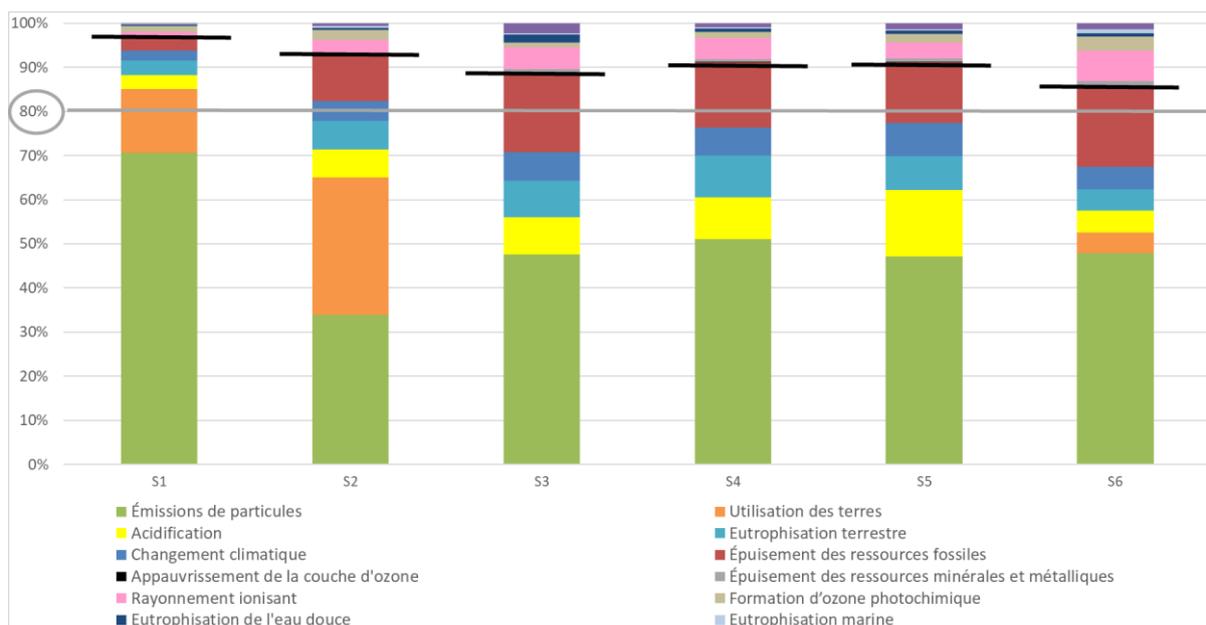
Ces derniers sont présentés dans la figure ci-dessous, pour les différents scénarios étudiés.

Les enjeux pertinents sont définis comme étant ceux dont la somme des contributions à l'empreinte totale atteint a minima 80 % de celle-ci (**ligne grise**) pour chaque scénario (voir 1.2 Méthodologie).

Étant donné que les enjeux pertinents diffèrent d'un scénario à un autre, et comme l'objectif recherché est de couvrir les enjeux pertinents pour l'ensemble des scénarios, avec les 6 enjeux ci-dessus, le minima de 80 % est dépassé pour l'ensemble des scénarios (**ligne noire**).

L'indicateur d'impact « utilisation des terres » est classé comme « III : recommandé, mais à appliquer avec prudence » selon la classification déterminée par le JRC. Il comporte donc des limites, en particulier pour l'application au système forestier productif. Plus d'informations sur cet enjeu environnemental sont disponibles dans le rapport complet de l'étude.

Figure 4. Contribution des différents enjeux à l'empreinte totale dans le scénarios S1 à S6.



1.5.2. Étapes et émissions les plus contributrices aux enjeux environnementaux

Enseignement 2 : L'exploitation de la chaufferie est l'étape la plus contributrice.

Pour les filières bois énergie S3-S6, l'exploitation de la chaufferie est l'étape la plus contributrice aux différents enjeux environnementaux. Pour S1 et S2, l'exploitation de la chaufferie et la gestion sylvicole sont les étapes les plus contributrices. Cette contribution résulte des émissions de polluants atmosphériques lors de la combustion et des consommations d'énergie nécessaires au bon fonctionnement de la chaufferie.

Au sein de la gestion sylvicole, la contribution aux enjeux environnementaux étudiés provient de la consommation d'énergie lors de la récolte, le débardage et l'utilisation de terres pour la production de bois.

Les différentes contributions sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 8. Contribution des différentes étapes du cycle de vie pour l'ensemble des enjeux environnementaux étudiés.

		S1	S2	S3	S4	S5	S6
	Gestion sylvicole	+++		0			
	Préparation	+					
	Transport vers la chaufferie	+					
	Exploitation de la chaufferie	+++					

Légende :

+++ : fortement contributeur (>80 %)

+ : faiblement contributeur (<10 %)

0 : non contributeur car non pris en compte en cas de base

Enseignement 3 : Les émissions de particules (PM) et d'oxydes d'azote (NO_x) sont les principales émissions contributrices.

Au regard des enjeux environnementaux liés à la pollution de l'air, il apparaît que les principaux flux contributeurs sont les émissions de particules (PM) et les émissions d'oxydes d'azote (NO_x), polluants que l'on trouve en sortie de cheminée des chaufferies.

Les flux sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 9. Flux élémentaires contributeurs et origines pour différents enjeux environnementaux.

Enjeux environnementaux	Origine des principales contributions	Flux élémentaires contributeurs (et % de contribution)					
		CO ₂	PM	NO _x	CO	SO _x	NH ₃
Changement climatique	Consommation lors de la gestion sylvicole Préparation du combustible Consommation de la chaufferie	x			x		
Acidification de l'air	Combustion de la biomasse à la chaufferie			x > 75 %		x	x
Eutrophisation terrestre	Combustion de la biomasse à la chaufferie			x > 99 %			x
Émissions de particules	Combustion de la biomasse à la chaufferie		x > 98 %	x < 1 %		x	x

Note : par exemple, les NO_x produits par la combustion de la biomasse à la chaufferie contribuent à plus de 75 % à la valeur totale de l'indicateur acidification de l'air.

1.5.3. Pistes pour diminuer l'impact environnemental des filières bois énergie

Enseignement 4 : Il est recommandé de maintenir de faibles distances d'approvisionnement des combustibles.

Au regard des différents enjeux environnementaux étudiés, l'accroissement de la distance d'approvisionnement de la biomasse (plaquette forestière ou granulés) engendre une augmentation des impacts.

L'accroissement des impacts est plus élevé pour les enjeux environnementaux sensibles aux transports tels que :

- les émissions de gaz à effet de serre du fait de la combustion de combustibles fossiles ;
- la consommation de ressources fossiles ;
- les émissions d'oxydes d'azote et de particules du fait de la combustion de ressources fossiles.

Les valeurs d'accroissement sont présentées dans le Tableau 10 ci-dessous.

Tableau 10. Différence de contribution à certains enjeux environnementaux entre le scénario de base et la/les variante(s) étudiée(s) de distance de transport du combustible vers la chaufferie.

Enjeux environnementaux	Différence de contribution entre le cas de base et la variante		
	S2 Cas de base : 35 km (camion)		S6 Cas de base : 175 km (camion)
	Variante : 200 km (camion)	Variante : 500 km (camion)	Variante : 10 500 km (bateau) + 775 km (camion)
Changement climatique	+ 43 %	+ 120 %	+ 450 %
Acidification de l'air	+ 6 %	+ 18 %	+ 61 %
Émissions de particules	+ 1 %	+ 3 %	+ 5 %
Utilisation des ressources fossiles (et nucléaires)	/	/	+ 94 %

Enseignement 5 : Le respect de la nouvelle réglementation (directive 2015/2193 dite « Medium Combustion Plant ») en termes d'émissions de PM et de NO_x engendre une diminution de contribution pour les enjeux environnementaux concernés située entre 20–30 %.

Le respect de la nouvelle réglementation repose par exemple pour :

- les émissions d'oxydes d'azote, sur la conception différente des foyers de combustion avec la mise en œuvre de systèmes de réduction à la source tels que des foyers dimensionnés bas NO_x, avec une zone de combustion additionnelle par rapport à un foyer de combustion standard ;
- les émissions de poussières, sur une optimisation et une adéquation de la conception des systèmes d'électrofiltre et de filtre à manche (emplacement, configuration, type, etc.). En effet, ces deux systèmes de filtration permettent d'atteindre les VLE (valeur limite d'émission).

Les solutions dites « émergentes » restent des dérivés de ces systèmes. L'élément clé réside plutôt dans la qualité de l'exploitation des systèmes et du suivi nécessaire pour confirmer la bonne utilisation de ces filtres.

Enseignement 6 : La mise en place d'une unité de condensation présente un intérêt mais nécessite la disponibilité d'une « source froide ».

La mise en place d'une unité de condensation permet une réduction entre 10–20 % de la contribution aux impacts environnementaux de par :

- l'amélioration significative du rendement thermique qui en résulte et qui permet ainsi de réduire les quantités de bois consommées pour la même énergie délivrée ;
- la dépollution des gaz de combustion résultant de la captation de poussières lors du changement d'état de la vapeur d'eau.

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. .

Enseignement 7 : La mise en place d'un traitement SNCR (technologie de traitement non catalytique sélective) présente un intérêt modéré de par des effets de transferts d'impacts entre enjeux environnementaux.

La mise en place d'un traitement SNCR engendre des transferts d'impacts entre enjeux environnementaux.

Les transferts d'impacts se matérialisent par :

- une réduction de la contribution à l'acidification de l'air du fait de l'abattement des émissions de NO_x ;
- une augmentation de la contribution au changement climatique, aux émissions de particules et à l'utilisation de ressources fossiles, du fait du recours à l'ammoniac et aux fuites observées en émissions.

La figure ci-dessous présente l'influence de la mise en place d'un SNCR par rapport à une chaufferie sans SNCR (représentée par le 100 %).

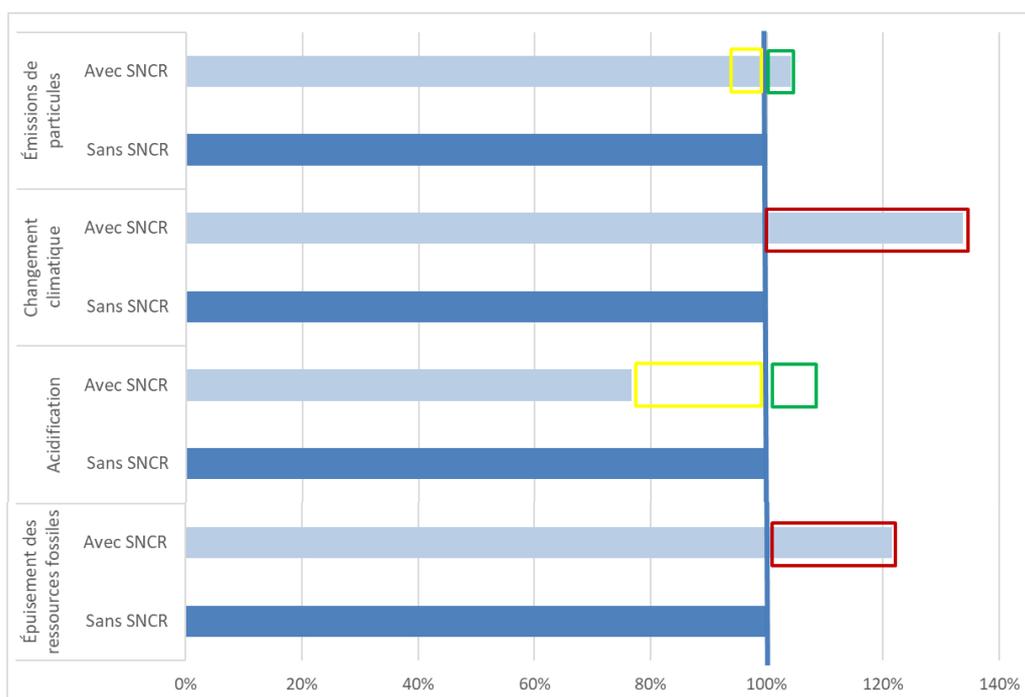
La contribution à l'acidification présente deux composantes évoluant de manière contraire :

- réduction de la contribution suite à l'abattement des émissions d'oxydes d'azote (en **jaune**) ;
- augmentation de la contribution suite à l'émission d'ammoniac résultant du processus (en **vert**).

Ces deux composantes résultent toutefois au global en une diminution de la contribution.

L'augmentation de la contribution aux autres enjeux est principalement liée à la production des réactifs nécessaires au fonctionnement du processus SNCR (en **rouge**).

Figure 5. Influence de la mise en place d'un système d'abattement des NO_x de type SNCR (sans SNCR = 100 %).



La mise en œuvre d'un SNCR nécessite un pilotage fin, et n'est pas réalisable sur des chaufferies à régime variable, telles que celles destinées à alimenter un réseau de chaleur, sous peine de voir les émissions d'ammoniac augmenter considérablement. La réalisation d'une analyse plus poussée reste toutefois nécessaire pour dégager des conclusions sur le traitement SNCR dans le cas d'autres types de chaufferies biomasse au-delà du scénario étudié.

1.5.4. Différences de contribution aux différents enjeux environnementaux entre les différentes filières bois énergie

Enseignement 8 : La comparaison entre les différentes filières bois énergie sur la base de l'exercice réalisé est délicate.

La comparaison des différentes filières bois énergie est délicate étant donné :

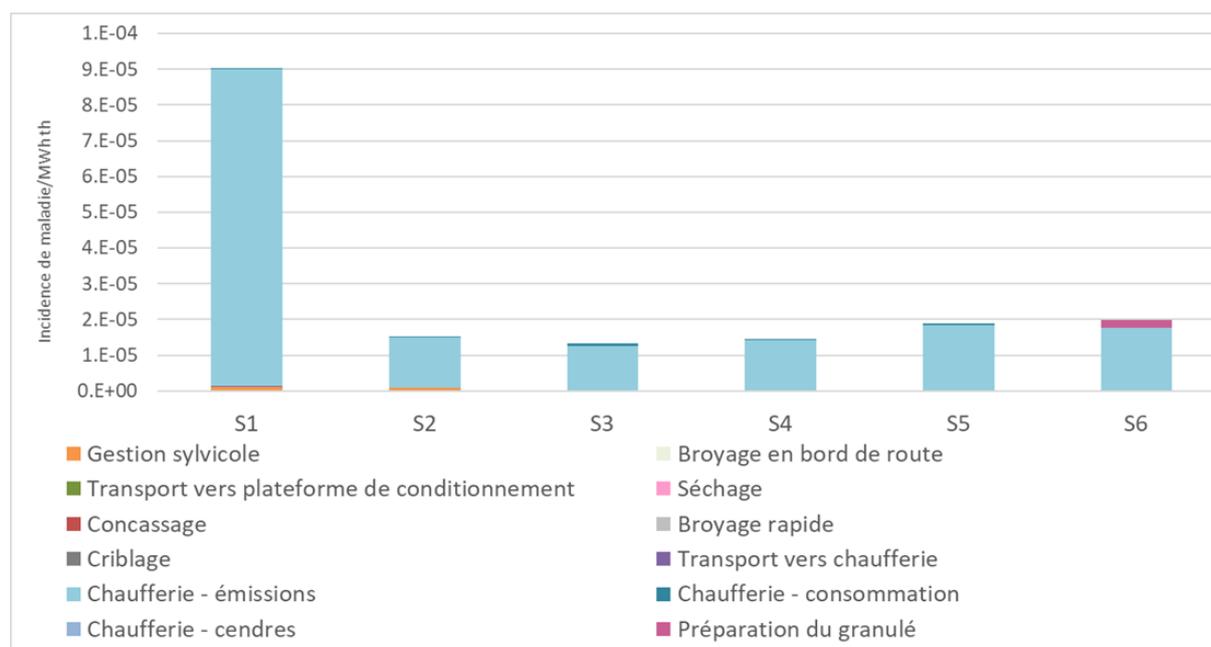
- les différents usages auxquels elles se réfèrent²⁰ :
 - besoins climatiques (chauffage de bâtiments résidentiels / tertiaires et de locaux d'entreprises),
 - processus industriels ;
- les différences en termes de puissance à délivrer ;
- la variabilité de la production et des différentes sources de biomasse suivant la localisation géographique en France métropolitaine ;
- l'utilisation de données d'émissions majoritairement spécifiques aux installations (à leurs puissances) plutôt qu'aux types de combustibles utilisés.

²⁰ L'étude complète étudie également un usage en cogénération. Ces résultats sont disponibles dans le rapport complet de l'étude, et n'ont pas été transcrits dans cette synthèse.

Enseignement 9 : Les bonnes performances relatives aux émissions de polluants atmosphériques des chaufferies de puissance comprises entre 1 et 50 MW mettent en avant l'intérêt de technologies mises en œuvre dans ces installations.

En ce qui concerne la contribution à l'émission de particules dans l'air (figure ci-dessous), les chaufferies ne disposant pas de systèmes d'abattement des émissions (électrofiltre et filtre à manche) sont très désavantagées de par le taux de poussières émises (S1 vs. S2). Il s'agit en général de chaufferies de faible puissance (0–0,5 MW pour S1 vs. 0,5–5 MW pour S2). Notons que dans le scénario S1, les plaquettes sont sèches (séchage naturel), alors qu'elles sont humides dans le scénario S2.

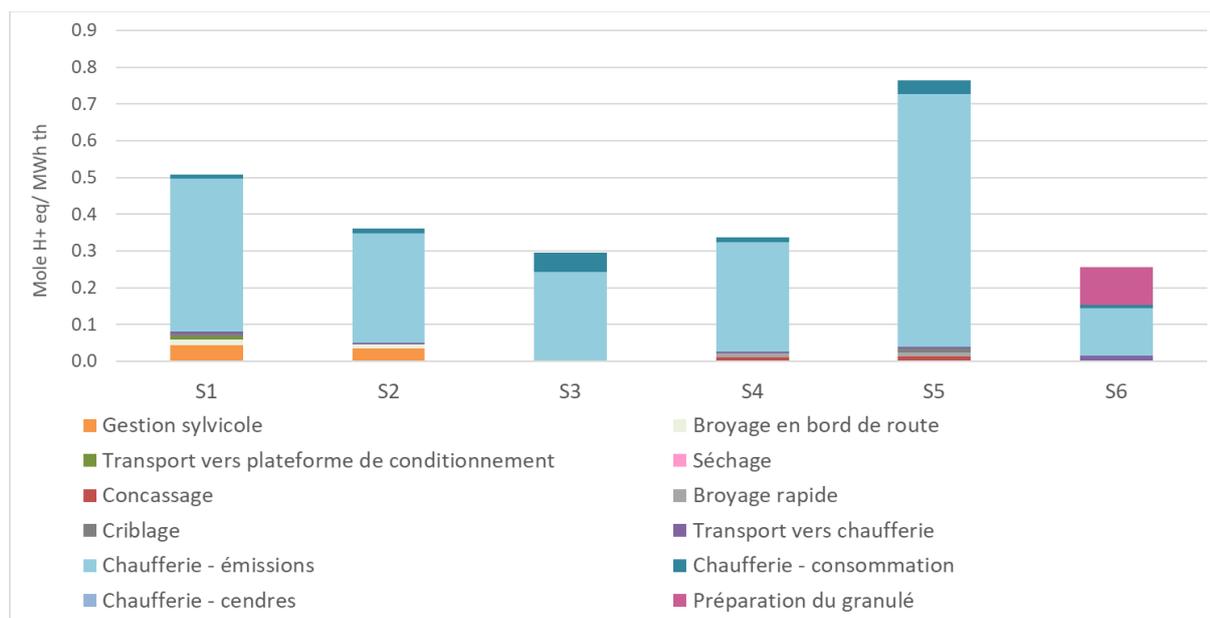
Figure 6. Contribution des différentes filières à l'émission de particules pour la production d'1 MWh_{th} – Détails par étape du cycle de vie.



Scénario	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Émissions de particules – incidences de maladie/MWh _{th}	9,0 E-05	1,5 E-05	1,3 E-05	1,45 E-05	1,9 E-05	2,0 E-05

En ce qui concerne la contribution à l'acidification de l'air (Figure 7), les chaufferies disposant de systèmes de réduction primaires (foyer bas NO_x) ou secondaires (SNCR) des émissions d'oxydes d'azote (S3) sont avantagées par rapport à celles n'en disposant pas (S2). Il s'agit généralement de chaufferies de plus grosse puissance utilisées pour des processus industriels. L'utilisation de déchets de bois adjuganté (S5) pour alimenter une chaufferie présente une contribution plus élevée à l'indicateur acidification de l'air de par la composition plus riche en soufre considérée pour ceux-ci.

Figure 7. Contribution des différentes filières à l'acidification de l'air pour la production d'1 MWh_{th} – Détails par étape du cycle de vie.



Scénario	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Acidification de l'air – moles H ⁺ /MWh _{th}	0,51	0,36	0,30	0,34	0,76	0,26

Enseignement 10 : La contribution de l'étape de gestion sylvicole est différenciante entre filière bois énergie pour certains enjeux environnementaux.

Le type de biomasse mobilisée, et par conséquent la gestion sylvicole associée ou non, est un élément de différenciation entre filières pour les enjeux environnementaux suivants :

- contribution au changement climatique, via la combustion de ressources fossiles utilisées lors de la gestion sylvicole (Figure 8 et Figure 9) ;
- utilisation de ressources fossiles et nucléaires (Figure 10).

En effet, la contribution de l'étape de gestion sylvicole peut être de 15 à 30 %, pour les filières bois énergie utilisant des plaquettes forestières (S1 et S2), tel que présenté en orange sur les figures ci-dessous pour ces deux enjeux environnementaux. Cette contribution provient des étapes de débardage et d'exploitation forestière.

La contribution au changement climatique est présentée de deux façons ci-dessous :

- Bilan GES global (intégrant carbone fossile et biogénique) avec une comptabilité totale des absorptions/émissions de CO₂ biogéniques (Figure 8). Les absorptions de CO₂ sont égales aux émissions de CO₂ biogéniques (issues de la combustion ou la dégradation du bois lors du séchage) et donc les émissions de CO₂ biogéniques s'annulent.
- Sans représenter les émissions biogéniques de CO₂ lors de la combustion et dégradation du bois car considérées neutres en carbone (Figure 9).

Comme on le voit sur les Figure 8 et Figure 9, les contributions de dioxyde de carbone biogénique (captation et émission) sont d'un ordre de grandeur supérieures aux émissions fossiles.

Figure 8. Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWh_{Pci} (exprimée en kg éq CO₂) – Bilan GES global avec comptabilité totale absorptions/émissions biogéniques.

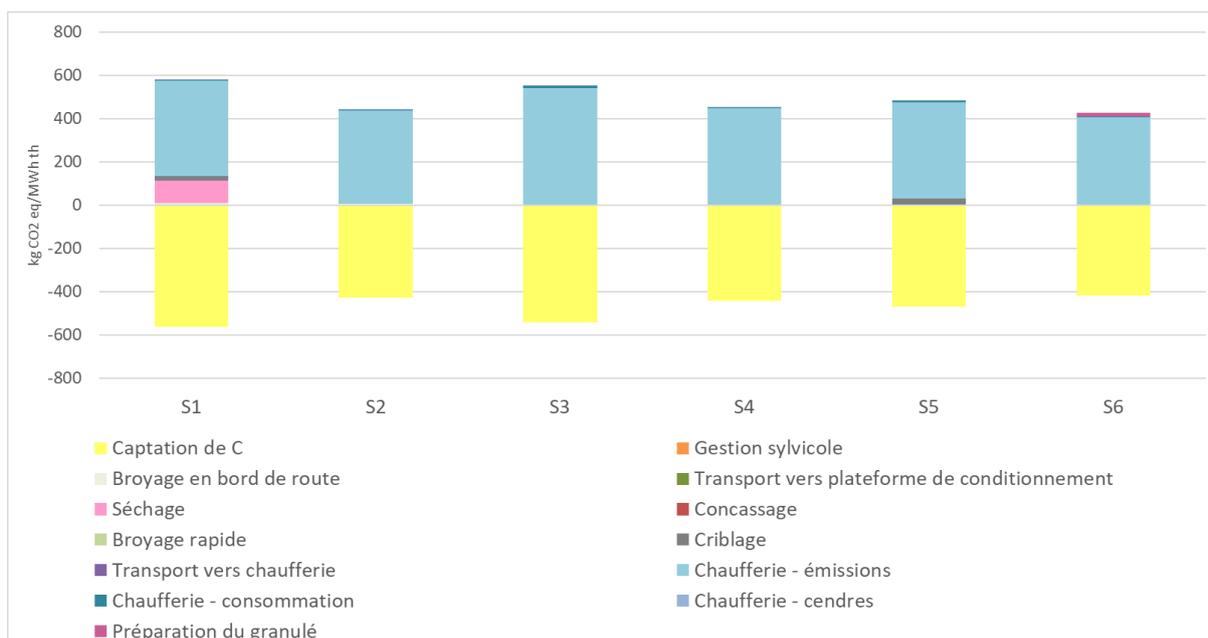
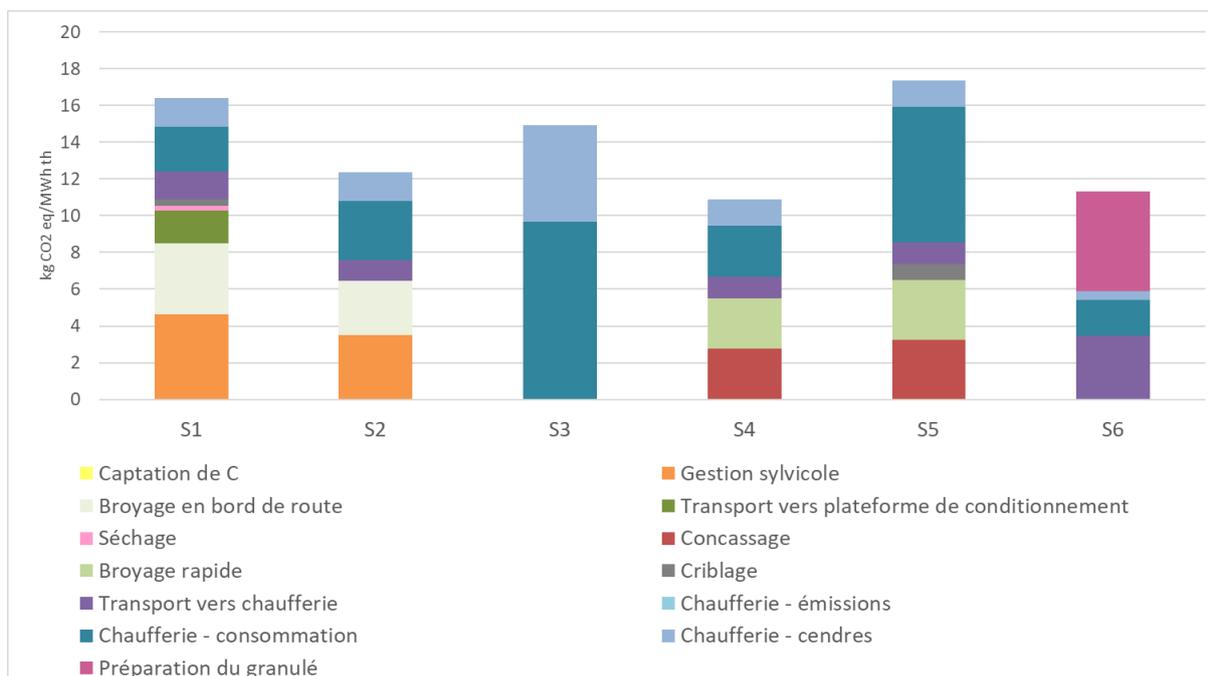


Figure 9. Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWh_{Pci} (exprimée en kg éq CO₂) – hypothèse de neutralité carbone biogénique.



Scénario	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Changement climatique – kg éq CO ₂ /MWh _{th}	16,4	12,3	14,9	10,9	17,4	11,3

Figure 10. Contribution des différentes filières à l'utilisation de ressources fossiles et nucléaires pour la production d'1 MWh_{th} – Détails par étape du cycle de vie.



Scénario	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Utilisation de ressources fossiles et nucléaires – MJ éq/MWh _{th}	455	500	540	456	602	824

Enseignement 11 : Le type de biomasse mobilisée pour la production des plaquettes forestières a une influence pour certains enjeux environnementaux.

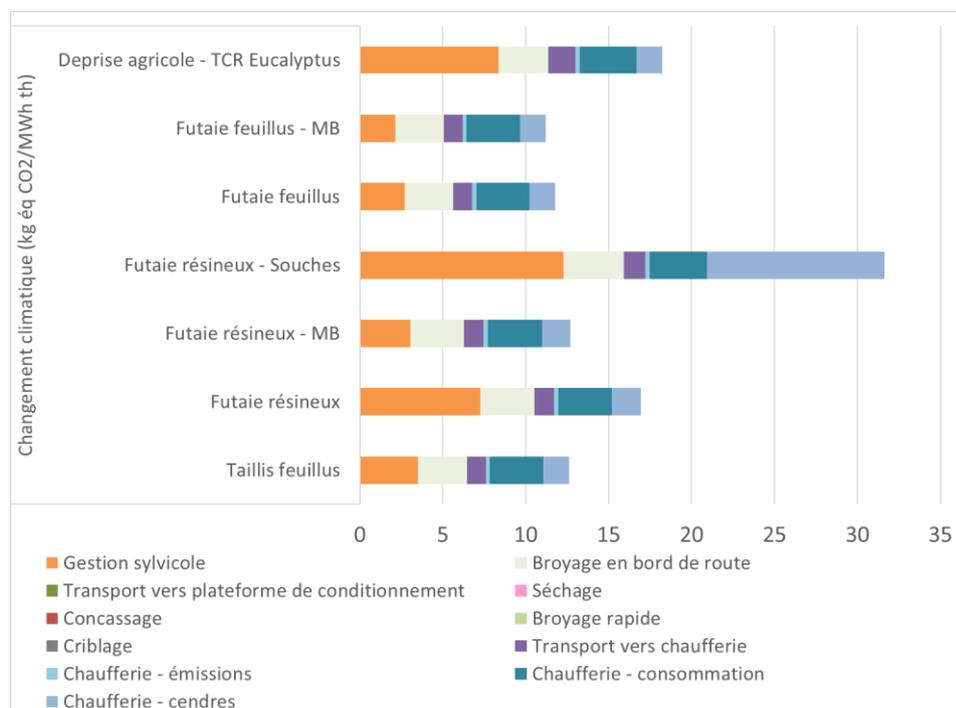
Des variantes concernant le type de sylviculture et donc de biomasse mobilisée pour la production de plaquettes forestières ont été étudiées pour le S2 (taillis feuillus sur les figures ci-dessous). Lorsque l'on regarde l'ensemble du cycle de vie, la gestion sylvicole, tel que présentée en orange sur les figures ci-dessous, représente :

1. Entre 20–45 % de la contribution au changement climatique (Figure 11) ;
2. Entre 10–30 % de l'utilisation des ressources fossiles et nucléaires (Figure 12).

Suivant les filières d'approvisionnement de la biomasse, le résultat de l'évaluation pour ces deux indicateurs peut varier de façon significative (voir figures ci-dessous). Les étapes sylvicoles considérées ne sont pas les mêmes pour chaque filière d'approvisionnement (voir

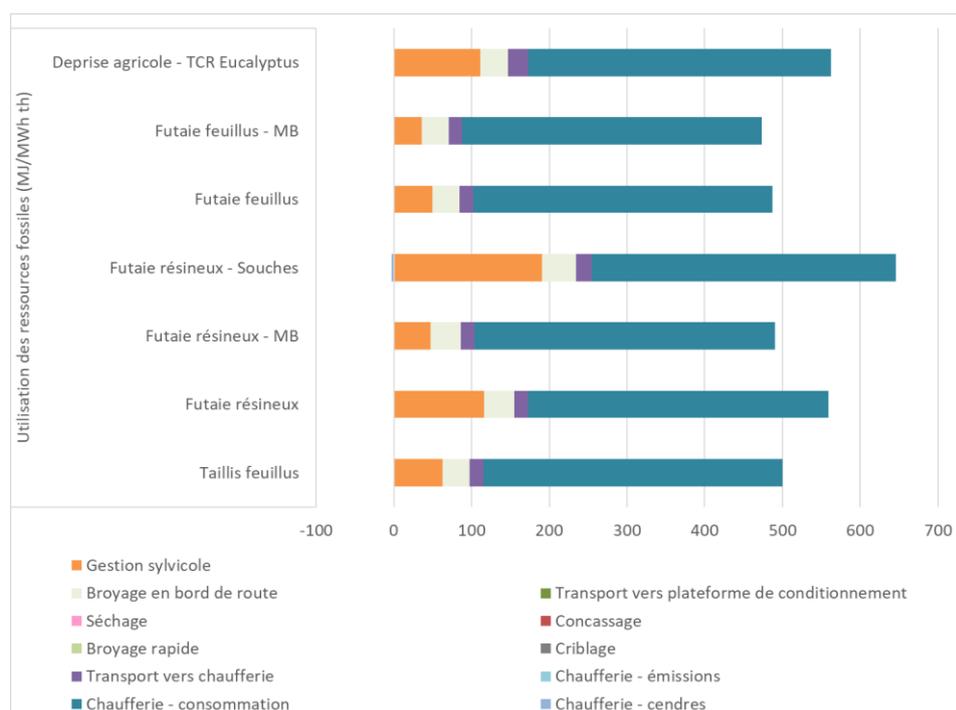
Tableau 3). Comme on le voit dans la Figure 11, les scénarios de TCR et d'utilisation des souches ont une contribution au changement climatique plus élevée. Pour les TCR, cela peut s'expliquer par une étape de sylviculture intégrant des étapes de plantation et de fertilisation. Pour l'utilisation des souches, cela peut s'expliquer par l'étape de récolte des souches qui est plus énergivore, et un taux de cendres plus élevé impliquant une gestion plus conséquente.

Figure 11. Contribution au changement climatique des différentes filières de production de la biomasse utilisée pour produire les plaquettes forestières (kg CO₂ éq/MWh_{PCI}).



	TCR	Fut. Feuill. MB	Fut. Feuill.	Fut. Rés. Sou.	Fut. Rés. MB	Fut. Rés.	Taillis
Changement climatique – kg éq CO ₂ /MWh _{th}	18,2	11,2	11,8	31,6	12,7	16,9	12,3

Figure 12. Contribution à l'utilisation de ressources fossiles et nucléaires des différentes filières de production de la biomasse utilisée pour produire les plaquettes forestières (MJ éq/MWh_{PCI}).



	TCR	Fut. Feuill. MB	Fut. Feuill.	Fut. Rés. Sou.	Fut. Rés. MB	Fut. Rés.	Taillis
Utilisation de ressources fossiles et nucléaires – MJ éq/MWh _{th}	562	473	487	642	489	558	500

1.5.5. Intérêt environnemental de la filière bois énergie versus la filière gaz pour la production de chaleur pour le collectif ou l'industrie

Rappel de la méthodologie

Les inventaires considérés pour la filière gaz proviennent de la base de données ecoinvent. Ces inventaires intègrent l'ensemble des étapes du cycle de vie, pour les modes de production actuels :

- L'amont, c'est-à-dire l'exploration, la production, le regroupement et la transformation du gaz. Les impacts associés sont imputables au gaz distribué en France quel que soit le mode de distribution.
- L'aval, c'est-à-dire l'éventuelle liquéfaction (puis regazéification), le transport international et la distribution finale du gaz à l'utilisateur.

Dans le cadre de cette étude, une analyse de sensibilité à partir de publications récentes faisant état des fuites de méthane a été réalisée afin de détailler et déterminer les fuites par étape du cycle de vie et ainsi améliorer les inventaires issus d'ecoinvent. En effet, le ratio de méthane relargué dans l'atmosphère est un paramètre essentiel dans le calcul des impacts du gaz naturel. Le taux de fuite considéré va de quelques dixièmes de pourcent à 5 %, pour l'amont et l'aval hors distribution. Une variante sur le mix de provenance du gaz a également été considéré, se basant sur des projections pour l'Europe de l'IEA dans son World Energy Outlook (2019) pour 2030.

Enseignement 12 : Comparativement à une alimentation de la chaufferie au gaz naturel, le bois énergie collectif et industriel présente des émissions de GES, et une consommation de ressource fossile moindre, mais présente des émissions de particules plus élevées.

Les systèmes de réduction des émissions de polluants atmosphériques pour la filière bois énergie et le taux de fuite de méthane pour la filière gaz sont les paramètres devant faire l'objet de la plus grande attention pour diminuer la contribution de ces deux filières aux enjeux environnementaux.

La filière de production de chaleur à partir de bois dans le secteur collectif et industriel présente un intérêt environnemental important par rapport au gaz pour le changement climatique²¹ et l'utilisation des ressources fossiles et nucléaires tels que présentés dans les figures ci-dessous.

Concernant les émissions de particules, le gaz présente de meilleures performances tels que présentés en vert dans le tableau et la figure ci-dessous. La filière bois énergie doit poursuivre les efforts engagés afin de limiter ces émissions.

Tableau 11. Comparaison des contributions des filières gaz naturel et bois énergie à différents indicateurs environnementaux.

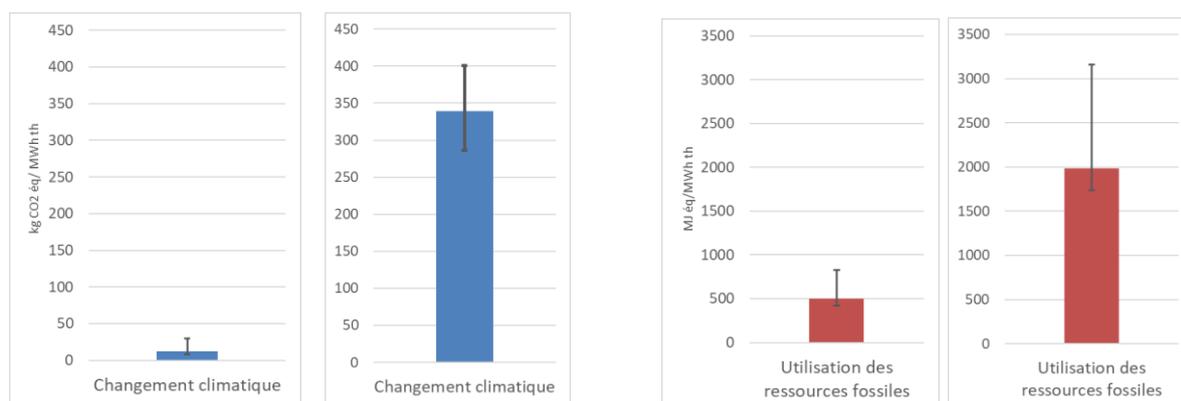
Enjeux environnementaux	Filière alimentée par du gaz naturel	Filière alimentée par du bois
Émissions de particules	-	+
Acidification de l'air	~	~
Changement climatique ²¹	+	-
Utilisation des ressources fossiles (et nucléaires)	+	-

Légende :

- : moins contributeur + : plus contributeur ~ : contribution équivalente

²¹ avec hypothèse neutralité carbone des émissions CO₂ de combustion du bois. Les résultats du lot 2 complètent l'analyse concernant l'indicateur changement climatique.

Figure 13. Positionnement des filières bois énergie par rapport aux filières gaz naturel pour quatre enjeux environnementaux.

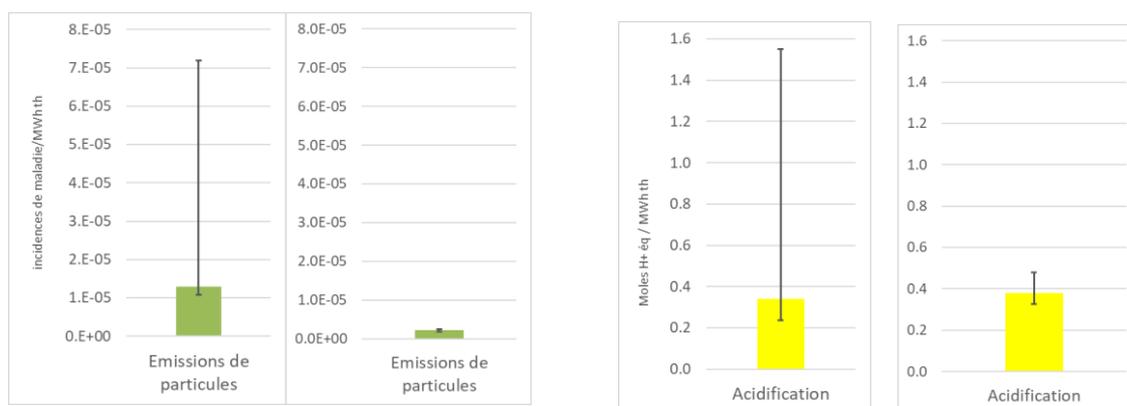


**Impact sur le changement climatique :
Filière Bois énergie* < Filière Gaz naturel**

**Impacts sur l'utilisation de ressources fossiles
Filière Bois énergie < Filière Gaz naturel**

Max	Type de biomasse – plaquettes forestières avec un itinéraire de gestion sylvicole plus complexe	Fuites de méthane élevées	Max	Type de biomasse - Granulés	Mix d'approvisionnement plus défavorable	
	Min	Type de biomasse - Déchets		Haut rendement	Fuites de méthane faibles	Min
Max	30 kg CO ₂ éq/MWh _{th}	400 kg CO ₂ éq/MWh _{th}	Max	825 kg MJ éq/MWh _{th}	3160 MJ éq/MWh _{th}	
Min	11 kg CO ₂ éq/MWh _{th}	290 kg CO ₂ éq/MWh _{th}	Min	447 kg MJ éq/MWh _{th}	1740 MJ éq/MWh _{th}	

* avec hypothèse neutralité carbone des émissions CO₂ de combustion du bois. Les résultats du lot 2 complètent l'analyse concernant l'indicateur changement climatique



**Impact sur les émissions de particules
Filière Bois énergie* > Filière Gaz naturel**

**Impacts sur l'acidification
Filière Bois énergie ~ Filière Gaz naturel**

Max	Dépassement des normes d'émissions lors du démarrage des chaufferies ou en cas de sous-dimensionnement des installations (régime de fonctionnement éloigné du plein régime)		Max	Dépassement des normes d'émissions lors du démarrage des chaufferies ou en cas de sous-dimensionnement des installations (régime de fonctionnement éloigné du plein régime)	
	Min	Chaufferie avec des systèmes performants d'abattement des particules		Min	Foyer bas NOx ou SNCR
Max	7,2 E-5 incidence de maladie/MWh _{th}	2,5 E-6 incidence de maladie/MWh _{th}	Max	1,55 moles H+ éq/MWh _{th}	0,48 moles H+ éq/MWh _{th}
Min	1,1 E-5 incidence de maladie/MWh _{th}	1,9 E-6 incidence de maladie/MWh _{th}	Min	0,24 moles H+ éq/MWh _{th}	0,32 moles H+ éq/MWh _{th}

* Hors chaudière de faible puissance, lié au niveau d'incertitude des niveaux actuels d'émissions atmosphériques des petites chaufferies.

1.6. Limites de l'approche mise en œuvre

Limite 1 : Absence de prise en compte de l'influence de la modification des pratiques sylvicoles sur d'autres enjeux environnementaux en lien avec la qualité des écosystèmes et sols forestiers.

Le développement de la filière bois énergie peut conduire à une modification des pratiques sylvicoles ayant une influence sur la qualité des écosystèmes et les sols forestiers.

Cette influence n'est pas quantifiée dans le cadre de cette étude.

Le projet GERBOISE²² qui a servi de base pour la réalisation du guide « Récolte durable de bois pour la production de plaquettes forestières »²³ donne des recommandations pour minimiser les impacts des récoltes de bois énergie sur les enjeux environnementaux suivants :

- la fertilité minérale des sols ;
- la biodiversité ;
- le tassement des sols ;
- l'érosion des sols ;
- la préservation des eaux et zones humides en forêt.

Néanmoins, il n'est pas possible actuellement de réaliser une quantification robuste intégrable dans une approche du cycle de vie de ces enjeux. L'intégration de ces enjeux dans les ACV devra faire l'objet d'approfondissements.

Limite 2 : Présentation des résultats sous l'hypothèse de la neutralité carbone des émissions biogéniques.

L'ensemble des résultats proposés dans le lot 1 autour du changement climatique sont présentés en prenant en compte l'hypothèse de neutralité des émissions de combustion. Cela signifie qu'on ne comptabilise pas les émissions de gaz à effet de serre (GES) issues de la combustion ou dégradation du bois (du carbone biogénique) en considérant qu'en situation d'équilibre, ces émissions sont captées lors de la croissance des arbres. Le lot 2 de l'étude permet de compléter cette méthode d'évaluation dans le cas d'une augmentation de la récolte de bois en forêt.

²² <https://www.ademe.fr/gerboise-gestion-raisonnee-recolte-bois-energie>

²³ <https://www.ademe.fr/recolte-durable-bois-production-plaquettes-forestieres>

2. Lot 2 : Évaluation du bilan GES de la production de chaleur à partir de plaquettes forestières, issues de différents scénarios sylvicoles intégrant une récolte accrue du bois en forêt

2.1. Introduction

La contribution à l'atténuation du changement climatique du développement de la filière bois énergie fait l'objet de multiples débats scientifiques au niveau international depuis plusieurs années. Le développement de la filière bois énergie peut conduire à une modification des pratiques sylvicoles due à une augmentation de la demande en bois. Le principe de neutralité carbone des émissions de combustion du bois est basé sur un équilibre entre les émissions de CO₂ engendrées par la combustion du bois et les quantités de CO₂ absorbées lors de la croissance des arbres. Ce principe ne permet pas d'évaluer l'impact (positif ou négatif) d'une modification des pratiques sylvicoles sur les dynamiques de stockage de carbone forestiers. Le principe de neutralité carbone ne permet pas non plus de tenir compte des dynamiques temporelles des processus de stockage et déstockage du carbone selon l'année où cette séquestration ou émission a lieu.

Lorsque l'exploitation de la forêt atteint une forme de régime permanent (maintien du niveau de prélèvement de bois et de la surface des forêts), alors les stocks de carbone des forêts tendent à l'équilibre sur le long terme. Le puits forestier²⁴ est amené à s'annuler à long terme car l'augmentation de stock de carbone est limitée. Lorsqu'il y a une augmentation de la récolte, on perturbe cet équilibre. Toute modification de gestion aura un effet sur le niveau de stockage de carbone dans les écosystèmes car différents niveaux de prélèvements/pratiques arriveront à différents stades « d'équilibre », indépendamment que l'analyse soit menée à l'échelle d'une parcelle ou à des échelles plus larges (massif, région, nationale). Par ailleurs, les effets du changement climatique sur les forêts peuvent perturber cet équilibre en augmentant la mortalité ou en impactant l'accroissement biologique (voir 2.6 Limites). La gestion forestière représente une solution pour maîtriser une partie des risques, grâce au contrôle de la densité et de l'âge des peuplements, à l'adaptation des essences aux conditions de stations qui évoluent et au suivi de l'état sanitaire.

En France, les stocks de carbone en forêt ne sont pas encore arrivés à l'équilibre. En effet, la forêt française est un puits de carbone aujourd'hui car le prélèvement de bois est inférieur à l'accroissement biologique net²⁵ de la forêt. Ceci est lié en partie au fort rythme d'augmentation de la surface forestière. Cependant, le changement climatique et l'augmentation du niveau de récolte du bois peut conduire à modifier les dynamiques de stockage de carbone dans les forêts (le puits *in situ*). De nombreuses études internationales²⁶ et nationales²⁷ ont mis en évidence qu'une augmentation des prélèvements de bois peut réduire de façon significative les puits de carbone des écosystèmes forestiers, même s'ils peuvent rester positifs à l'échelle nationale dans des pays comme la France (c'est-à-dire que les stocks augmentent toujours, mais de façon moins importante). Ceci révèle la nécessité de développer, dans ce type de situation, des approches dépassant le cadre de l'hypothèse de neutralité carbone pour intégrer les variations de stocks et puits des écosystèmes forestiers liées à une augmentation des prélèvements.

Dans ce contexte, le lot 2 propose une approche de quantification des bilans de gaz à effet de serre (GES) de la production de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles dans un contexte de récolte accrue de bois. Cette approche prend en compte l'impact des variations de carbone dans les forêts et les produits bois associé aux changements de pratiques sylvicoles ou d'occupation des sols. Les ordres de grandeur du bilan GES biogénique ainsi calculés, auxquels on ajoute les émissions fossiles estimées dans le lot 1, sont ensuite comparés à ceux de la production de chaleur à partir de gaz naturel, utilisant également les données du lot 1.

Ainsi cette deuxième partie permet, en utilisant une approche à la parcelle, pour quelques scénarios donnés :

²⁴ Le puits forestier correspond à l'augmentation des stocks de carbone dans les réservoirs forestiers *in situ* (biomasse aérienne et racinaire vivante et morte, litière, matière organique des sols) et *ex situ* (produits bois). Un puits de carbone est tout système qui absorbe plus de carbone qu'il n'en émet. Une captation de CO₂ suivi d'une émission de CO₂ par dégradation/combustion du bois permet de « recycler » le carbone mais ne génère pas un puits de carbone. Il faut absorber du CO₂ mais il faut aussi que le carbone reste stocké en dehors de l'atmosphère.

²⁵ En soustrayant la mortalité.

²⁶ « [Review of literature on biogenic carbon and life cycle assessment on forest bioenergy](#) », The Research Agency of the Forestry Commission, 2014; « [Carbon accounting of forest bioenergy : Conclusions and recommendations from a critical literature review](#) » JRC, 2014

²⁷ Étude « [Filière forêt bois et atténuation du changement climatique](#) » INRAE/IGN, 2020 ou étude BICAFF « [Bilan Carbone de la ressource forestière française : Projections du puits de carbone de la filière forêt-bois française et incertitude sur ses déterminants](#) » CNRS, INRAE 2017

- d'évaluer l'impact (positif ou négatif) de la production et récolte accrue de bois dans un nombre limité de scénarios types (voir 2.2 Scénarios étudiés) – pour alimenter les installations de combustion de biomasse – sur le stockage de carbone forestier, par rapport à un scénario de référence ;
- d'apporter des éléments pour sélectionner les pratiques sylvicoles permettant d'augmenter la production de bois énergie tout en limitant la diminution ou en augmentant les stocks moyens de carbone en forêt ;
- d'évaluer la part potentielle de l'impact des GES d'origine biogénique par rapport aux émissions d'origine fossile selon les calculs du lot 1.

Deux échelles de temps sont étudiées (30 ans et 100 ans) pour tenir compte des dynamiques temporelles des processus de stockage et déstockage de carbone dans les réservoirs forestiers. L'échelle de temps considérée dans l'analyse est en effet un élément important. Pour éclairer les décisions, la contribution des actions à l'atténuation du changement climatique à court terme doit être mise en regard avec leur contribution à moyen et long terme. Les horizons de temps de la forêt (plusieurs décennies voire siècles) s'articulent avec ceux du changement climatique (objectif de neutralité carbone en 2050).

Cette approche est considérée comme « **innovante et exploratoire** » et **devra faire l'objet d'approfondissements**. Les résultats **présentent un fort niveau d'incertitude** et sont uniquement valables pour l'énergie produite dans ces scénarios intégrant une modification des pratiques de récolte de bois. L'étude ne permet pas d'évaluer l'impact des changements d'usages du bois, pour une récolte constante en forêt. **Les résultats sont spécifiques aux scénarios testés dans le cadre de cette étude et ne sont pas généralisables à tous les MWh produits en France à partir de plaquettes forestières. Cette partie de l'étude ne s'applique pas non plus au bois énergie provenant des produits connexes, du bois en fin de vie ou déchet bois.**

2.2. Scénarios étudiés

Le lot 2 de l'étude s'est attaché à définir un certain nombre de scénarios projet, sur lesquels se sont concentrées les analyses. Trois cas-types de scénarios projets ont été étudiés, modélisant une augmentation de la récolte de bois forestier sur des forêts existantes soit par une remise en gestion (cas-type 1), soit par des récoltes accrues de produits annexes à la récolte de bois d'œuvre sur des parcelles déjà gérées (cas-type 2), ou en modélisant une augmentation de la surface forestière en réalisant des plantations sur des terres arables non boisées en déprise agricole (cas-type 3). Trois scénarios sont étudiés pour chaque cas-type, et sont présentés sur la

Figure 15.

Les scénarios projets sont comparés à des scénarios de référence. Les scénarios de référence sont définis comme l'évolution de la forêt sans augmentation de la récolte, en partant de la situation actuelle de la forêt définie pour chaque scénario, soit l'évolution naturelle du taillis sans exploitation (cas-type 1), soit les produits annexes à la récolte de bois d'œuvre ne sont pas récoltés et se décomposent en forêt (cas-type 2), soit une colonisation lente de la parcelle par un boisement spontané sur des terres non boisées en déprise agricole (cas-type 3).

Toutes les situations sylvicoles et essences n'ont pas été analysées, faute de données disponibles et par souci de converger sur un nombre d'analyses raisonnable. Ce type d'approche pourrait donc se décliner dans d'autres situations/essences de manière à élargir le panel des résultats.

Chaque scénario a fait l'objet de variantes, de manière à apporter la compréhension de l'influence des variables clés qui le définissent. La représentativité des scénarios ainsi que les données utilisées pour les scénarios projets, ces variantes et les scénarios de référence considérés sont décrits dans la rubrique 2.4 « Principales données et représentativité des scénarios étudiés ».

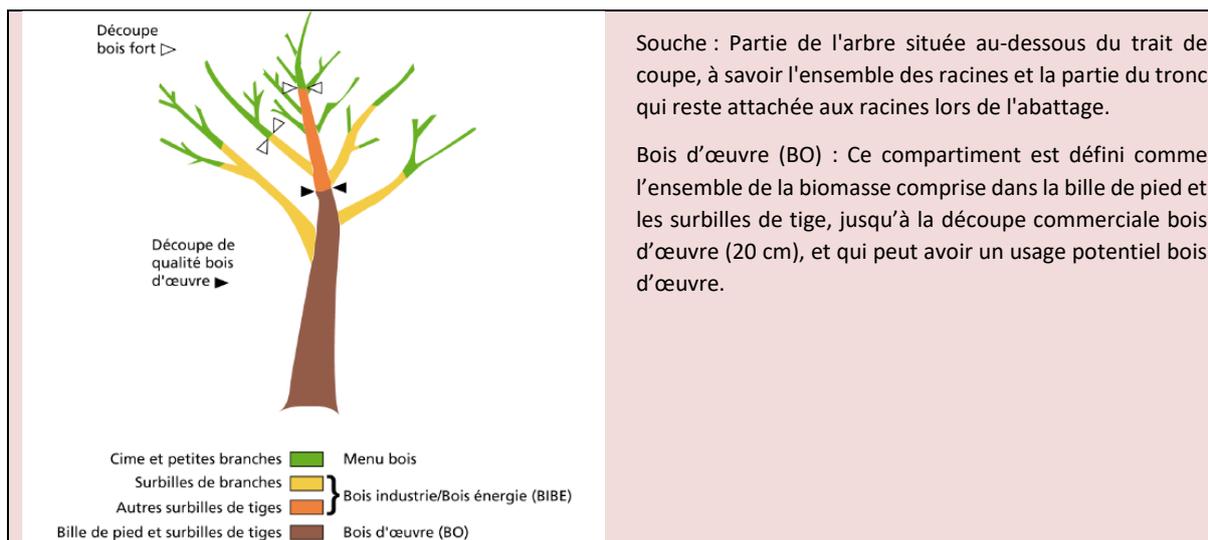
Lexique sur la segmentation de l'arbre

L'ensemble de ces définitions et la figure ci-dessous proviennent du rapport (Colin et al., 2009).

Figure 14 : Localisation dans l'arbre des principales classes et compartiments de bois : bois d'œuvre, bois d'industrie / bois énergie, et menus bois

Bois fort tige (ou bois fort) : Il s'agit du volume de la tige ou du tronc depuis la base de l'arbre jusqu'à la découpe 7 cm (bille de pied, surbille de tiges, autres surbilles de tige).

Houppier : Désigne l'ensemble des parties aériennes d'un arbre, à l'exception du tronc soit les surbilles de branches et les menus bois selon la Figure 14. Le houppier désigne donc la cime de l'arbre, les branches et les rameaux.



Souche : Partie de l'arbre située au-dessous du trait de coupe, à savoir l'ensemble des racines et la partie du tronc qui reste attachée aux racines lors de l'abattage.

Bois d'œuvre (BO) : Ce compartiment est défini comme l'ensemble de la biomasse comprise dans la bille de pied et les surbilles de tige, jusqu'à la découpe commerciale bois d'œuvre (20 cm), et qui peut avoir un usage potentiel bois d'œuvre.

Bois d'industrie et bois énergie (BIBE) : Ce compartiment est défini comme la somme de trois composantes :

- (1) La biomasse de la tige comprise entre la découpe commerciale bois d'œuvre et la découpe bois fort (7 cm) ;
- (2) La biomasse de la tige de dimension bois d'œuvre mais dont l'usage potentiel ne peut être le bois d'œuvre en raison de limites sur la qualité du bois ;
- (3) La biomasse comprise dans les branches jusqu'à la découpe bois fort (7 cm).

Menu bois (MB) : Ce compartiment est défini comme l'ensemble de la biomasse de la tige et des branches comprise dans les bois de diamètre inférieur à 7 cm.

Lexique de gestion sylvicole

Éclaircie : Réduction de la densité d'un peuplement non arrivé à maturité en vue d'améliorer la croissance et la forme des arbres restants.

Futaie : Peuplement forestier composé d'arbres issus de régénération naturelle ou artificielle à partir de graines (opp. à taillis) destinés à atteindre un plein développement avant d'être récoltés.

Taillis : Peuplement issu des rejets de souches et drageons (opp. à futaie). Ne concernent que les peuplements feuillus, les résineux ne rejetant pas de souche sauf rare exception. Peuplements composés d'arbres de petit diamètre que l'on coupe périodiquement. Ce type de régime forestier est essentiellement utilisé pour produire du bois de chauffage.

Conversion d'un taillis par des coupes d'amélioration: Opération sylvicole qui consiste à passer d'un taillis (ou taillis sous futaie) à une futaie feuillue par régénération naturelle à partir des essences en place.

Transformation d'un taillis: Opération sylvicole qui consiste à remplacer le peuplement existant par un nouveau peuplement avec une ou plusieurs essences principales n'existant pas dans le peuplement initial. Dans les cas étudiés les nouveaux peuplements constitueront des futaies. Exemple : coupe d'un taillis de châtaignier suivie d'un reboisement en douglas

Taillis à Courte Rotation (TCR) : Il s'agit d'espèces qui rejettent de souche telles que le peuplier, le saule, le robinier ou l'eucalyptus qui sont exploitées avec des rotations de 5 à 10 ans pour les TCR.

Figure 15. Les scénarios projet étudiés.

		Cas-type 1	Cas-type 2	Cas-type 3
		Mise en gestion d'un taillis (châtaigner) non exploité	Récolte accrue de produits annexes à la récolte de bois d'œuvre	Plantation sur déprise agricole (non boisée)
Scénarios projet	Exploitation en taillis		Menus bois (futaie douglas/chêne) 	Futaie feuillus (chêne) 
	Amélioration en futaies feuillus		Houppier (douglas) 	Futaie résineux (douglas) 
	Transformation plantation (douglas/chêne)		Souches (douglas) 	Taillis à courte rotation (TCR, eucalyptus) 
S. ref	Évolution naturelle sans exploitation de ce système de taillis		Les produits annexes ne sont pas récoltés, et se décomposent en forêt	Boisement spontané

2.3. Méthodologie

La méthode retenue pour évaluer les variations de carbone forestier s'attache à comparer à l'échelle d'une parcelle forestière un scénario projet récoltant plus de bois et un scénario de référence. La différence de stock entre les deux situations s'assimile à un flux de carbone :

- une **réduction de stock** par rapport à la référence se traduit par un **flux positif** (augmentation de la quantité de carbone atmosphérique) ;
- une **augmentation de stock** par rapport à la référence par un **flux négatif** (réduction de la quantité de carbone atmosphérique).

Elle se décompose en quatre étapes.

Étape 1

Le scénario à analyser (scénario projet) est défini, ainsi qu'un scénario de référence associé.

Étape 2

Pour le scénario projet et pour le scénario de référence, la courbe d'évolution dans le temps du stock de carbone en forêt est tracée. On y suit la croissance des arbres, leur coupe et la repousse. Quand le scénario implique des débouchés produits matériaux pour le bois récolté, on suit également la courbe des stocks carbone dans les produits. Sur ces courbes, on définit un instant initial « t_0 » qui correspond au moment de la prise de décision d'une exploitation renforcée, pour produire plus de bois pour l'énergie et pour le matériau. Il s'agit donc du moment où le scénario projet commence à être différent du scénario de référence, et donc où la décision de changer la gestion sylvicole de la forêt dans le but d'augmenter la récolte de bois commence à avoir un impact sur le climat.

Étape 3

À deux horizons temporels définis à partir de t_0 , à savoir **30 ans et 100 ans**, on recueille les grandeurs suivantes :

- Différentiel de stock de carbone moyen en forêt, entre le scénario projet et le scénario de référence, pendant la période considérée (30 ou 100 ans) ;
- Différentiel de stock de carbone moyen dans les produits entre le scénario projet et le scénario de référence, pendant la période considérée (30 ou 100 ans).

Étape 4

On rapporte cette variation de stock à la récolte additionnelle totale cumulée en bois (delta de récolte entre le scénario de référence et scénario projet) sur la période considérée – que ce soit du bois récolté pour l'énergie ou pour les produits (allocation volumique) – de manière à obtenir des ratios tC/m³ bois récolté.

On considère que les variations de carbone se concrétisent en molécules de CO₂. Du ratio tC/m³ découle ensuite le résultat du bilan CO₂ biogénique par m³ de bois énergie exprimées en kgCO₂/m³ ; il s'agit d'émissions de CO₂ à l'échelle de la parcelle²⁸

²⁸ À l'échelle du massif, ce flux de carbone entre le réservoir forestier et l'atmosphère correspond à une émission si dans la situation initiale la forêt se trouvait dans une situation d'équilibre, ou à une réduction du puits par rapport à la référence lorsque la situation initiale

lorsque le scénario projet conduit à une perte de stock par rapport à la référence, ou d'une séquestration de CO₂ lorsque le scénario projet conduit à une augmentation des stocks forestiers.

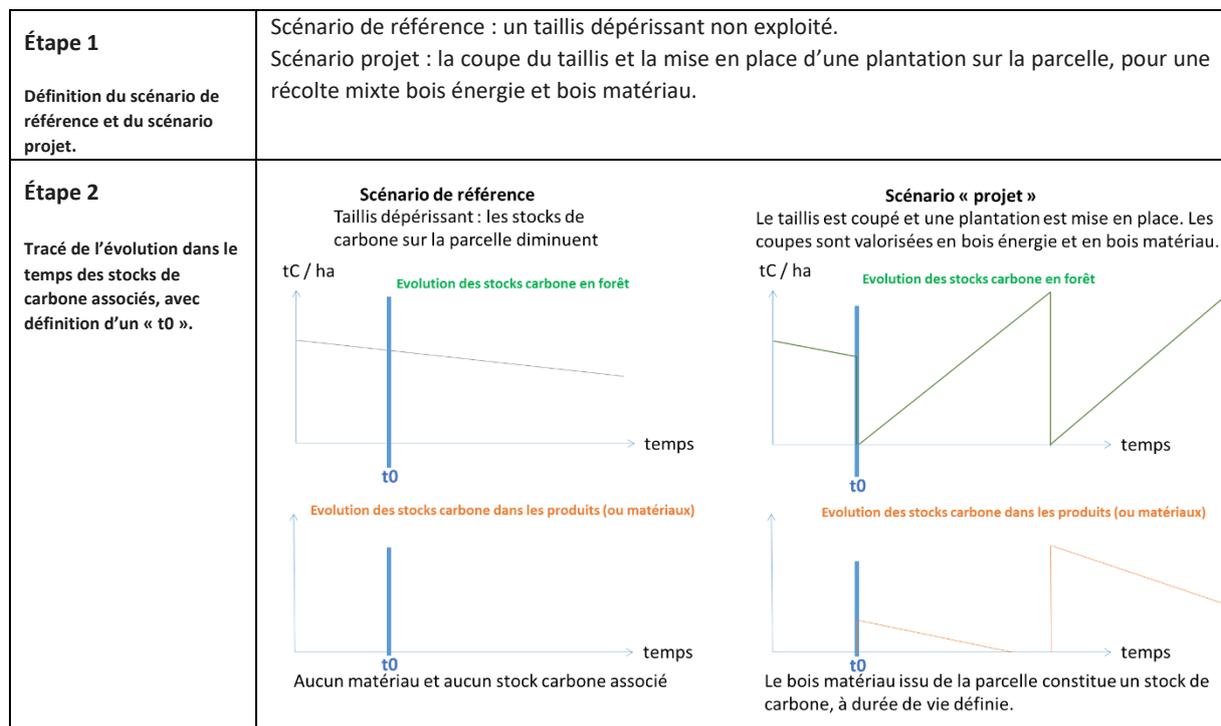
En résumé, l'impact biogénique (positif ou négatif) par m³ de bois additionnel récolté est calculé :

$$\frac{\text{Stock de carbone moyen (pendant 30 ou 100 ans) scénario de référence (forêt et produits bois)} - \text{Stock de carbone moyen (pendant 30 ou 100 ans) scénario projet (forêt et produits bois)}}{\text{Volume de bois additionnel récolté (pendant 30 ou 100 ans)}}$$

Le bilan GES est ensuite exprimé par unité d'énergie produite, en kgCO₂/MWh, en convertissant les m³ de bois consommés en quantité d'énergie produite.

La méthodologie pour les étapes 1 à 4 est illustrée sur un exemple dans la figure ci-dessous.

Figure 16. Illustration schématique de la méthodologie pour la comptabilisation du carbone biogénique, pour l'horizon de temps à 30 ans sur un exemple de scénario analysé dans l'étude.



correspond à une forêt en croissance. L'émission ou la réduction d'un puits de carbone conduit à une augmentation de la quantité de carbone dans l'atmosphère par rapport à la référence.

<p>Étape 3 (pour 30 ans)</p> <p>On recueille à 30 ans l'écart des moyennes de variation de stock entre le scénario projet et le scénario de référence.</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Scénario de référence</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Scénario « projet »</p> </div> </div> <p>Dans cet exemple simplifié, l'écart est négatif sur les stocks en forêt (moyenne moins élevée dans le scénario projet), mais il est positif dans les produits (moyenne plus élevée dans le scénario projet).</p>
<p>Étape 4</p> <p>On formule les facteurs d'émissions.</p>	<ul style="list-style-type: none"> On rapporte la somme des écarts aux m³ récoltés sur la parcelle entre t₀ et t₀ + 30 ans en calculant ainsi les kgCO₂/m³. On convertit en kgCO₂/MWh, pour les m³ récoltés pour un usage bois énergie, grâce à une masse volumique du bois et au rendement de l'installation de chaufferie.

Enfin, à ces résultats sont intégrés les résultats de la première partie de l'étude, centrée sur les émissions de gaz à effet de serre fossiles associées à l'ensemble du cycle de vie et intégrant l'utilisation d'énergie pour la sylviculture, le transport du bois, la transformation éventuelle en plaquettes, granulés ou autres, jusqu'à la production d'énergie et la gestion de cendres. Cela permet de déterminer le facteur de contribution global au changement climatique (biogénique et fossile) pour les différentes filières plaquettes pour l'énergie.

2.4. Principales données et représentativité des scénarios étudiés

2.4.1. Principales données

Les données associées aux scénarios projet sont principalement issues des modèles forestiers et sont présentées dans le Tableau 12.

Tableau 12. Modèles de croissance utilisés pour les différentes essences étudiées.

Essence	Modèle de croissance
Châtaigner	Modèle dendrométrique développé par le CNPF-IDF (Lemaire, 2008)
Douglas	Modèle OASIS (Cailly and Cavaignac, 2016).
Chêne	Modèle FAGACEE paramétré en utilisant les itinéraires recommandés par l'ONF (Le Moguédec et Dhôte, 2012)
Eucalyptus	Modèle dendrométrique développé par FCBA (Bouvet, 2013)

Les données associées aux scénarios de référence sont issues : (1) pour les taillis, de dire d'experts, sur la base des analyses des données sur les stocks de carbone à l'ha de l'IGN dans les peuplements de châtaigner, auxquelles différents niveaux de déperissement ont été appliqués ; (2) des modèles de décomposition du bois mort pour les scénarios de référence des produits annexes à la récolte du bois d'œuvre ; (3) des hypothèses de croissance des boisements spontanés utilisées dans la méthodologie du Label bas-carbone, et en plus pour le scénario TCR un modèle de croissance d'un taillis de bouleau, utilisé en sensibilité.

Les essences testées sont traditionnellement exploitées et sont celles pour lesquelles nous disposons de modèles de croissance. L'élargissement des essences traitées viendrait consolider la représentativité des situations modélisées.

Les compartiments de carbone considérés pour le stockage dans les réservoirs forestiers sont la biomasse aérienne, la biomasse souterraine, le bois mort et les produits bois. **Les modèles utilisés dans cette étude n'intègrent pas le compartiment du sol.** La variation des stocks de carbone dans ce compartiment est donc estimée de manière déportée, pour les scénarios présentant le risque de variation significative le plus important. Cette estimation se base sur une revue de la littérature. Celle-ci montre que les coupes conventionnelles (récolte uniquement du bois fort) n'engendrent pas ou peu de perte de carbone dans les sols. En revanche la récolte de l'arbre entier (intégrant les menus bois et/ou souches) aurait une incidence négative sur les stocks de carbone des sols.

Selon la bibliographie, le renouvellement par régénération naturelle ne modifie pas le stock de carbone du sol. En revanche, une coupe mettant le sol à nu associé à un travail du sol et un renouvellement par plantation peut avoir des incidences négatives à court terme, même si à long terme les stocks se reconstituent. Cet effet n'a pas pu être pris en compte dans l'étude par manque de références quantifiées.

Cas-type 1 : « Mise en exploitation d'un taillis non exploité »

Cette mise en exploitation est comparée à un scénario de référence sans mise en gestion du taillis. Trois scénarios de mise en exploitation ont été étudiés et sont détaillés ci-dessous.

- **Exploitation en taillis :**

Mise en exploitation d'un taillis de châtaignier en croissance, principalement pour l'énergie.

Dans le scénario projet on modélise une exploitation maintenant un système de taillis (récolte du bois fort et 70 % de menus bois).

Variabilité liée à deux analyses de sensibilité : (1) sur le niveau de productivité du taillis variant de 10 m³/ha/an avec une durée de révolution de 20 ans, et 5,5 m³/ha/an avec une durée de rotation de 35 ans ; (2) sur l'utilisation du bois récolté variant de 70 % énergie/30 % matériau ou 30 % énergie/70 % matériau.

Le scénario de référence correspond à un taillis sans exploitation qui continue sa croissance à un rythme plus faible que le scénario projet (entre 3,14 m³/ha/an et 1,6 m³/ha/an selon fertilité) puis subit un dépérissement de 35 % du stock.

- **Amélioration vers la futaie :**

Conversion d'un taillis « bien venants » de châtaignier en futaie par sélection des arbres d'avenir.

Dans le scénario projet on modélise un accroissement de 9 m³/ha/an et une durée de révolution de 50 ans (récolte du bois fort et 70 % de menus bois).

Le scénario de référence correspond à un taillis sans éclaircie qui continue sa croissance à un rythme plus faible (3,14 m³/ha/an) puis subit un dépérissement de 35 % du stock.

- **Transformation par plantation :**

Transformation d'un taillis de châtaignier capitalisé par plantation d'une futaie résineuse.

Variabilité liée à deux analyses de sensibilité : (1) sur la productivité de l'essence plantée, variant de 19 à 13 m³/ha/an pour du douglas et 9 m³/ha/an pour du chêne ; (2) sur le niveau de dépérissement du taillis non exploité dans le scénario de référence, variant d'une stabilité des stocks (accroissement égal à mortalité) à 50 % de perte de stock.

Pour cette famille de scénarios, les éventuelles variations de carbone dans les sols ne sont pas considérées. La revue de la bibliographie ne nous a pas permis de quantifier les éventuels impacts d'une récolte partielle (70 %) des menus bois. Le scénario de transformation du taillis par plantation pourrait avoir une incidence négative à court terme liée à la coupe totale associée à un travail du sol.

Cas-type 2 : « Récolte accrue de produits annexes à la récolte de bois d'œuvre »

Les trois scénarios de récolte sont détaillés ci-dessous. Ces scénarios sont comparés à des scénarios de référence où les menus bois, houppiers, ou souches ne sont pas récoltés et se décomposent en forêt.

- **Menus bois :**

Récolte des menus bois (inférieurs à 7 cm) sur des futailles de douglas ou du chêne.

Variabilité liée à l'analyse de sensibilité concernant le taux de dégradation du menu bois laissés en forêt dans le scénario de référence (durée de demi-vie variant entre 3 et 7 ans) et à l'essence (résineux/feuillus).

- **Houppier et tige de faible diamètre :**

Récolte d'houpier et tige de faible diamètre dans une plantation de douglas lors des éclaircies et coupes finales, c'est-à-dire de l'ensemble du compartiment BI/BE et 70 % des menus bois.

Le scénario de référence correspond à la dégradation des houppiers/tiges de faible diamètre en forêt avec durée de demi-vie de 5 ans.

- **Souches :**

Récolte de souches dans une plantation de douglas.

Variabilité liée à l'analyse de sensibilité concernant le taux de dégradation des souches en forêt dans le scénario de référence (avec demi-vie variante de 6 à 14 ans).

Pour les scénarios menus bois et souches, une perte de 5 %²⁹ du carbone du sol ont été prise en compte en analyse de sensibilité sur la modélisation à 100 ans (non prise en compte dans les résultats à 30 ans). La revue de la bibliographie ne nous a pas permis de quantifier les éventuels impacts d'une récolte partielle (70 %) des menus bois ou ses éventuelles impacts sur le court terme.

Cas-type 3 : « Plantation sur déprise agricole »

Cette mise en exploitation est comparée à un scénario de référence de boisement spontané.

- **Futaie de feuillus :**

Plantation de chêne avec accroissement moyen de 9 m³/ha/an et durée de révolution 170 ans.

Récolte de bois matériau et bois énergie.

Scénario de référence boisement spontané 1 m³/ha/an.

- **Futaie de résineux :**

Plantation de douglas avec accroissement moyen de 19 m³/ha/an et durée de révolution de 53 ans.

Récolte de bois matériau et bois énergie.

Scénario de référence boisement spontané 1 m³/ha/an.

- **Mise en place d'un taillis à courte rotation (TCR) :**

Plantation d'eucalyptus³⁰ avec accroissement moyen de 22 m³/ha/an et coupes tous les 10 ans.

Récolte exclusive pour l'énergie.

Variabilité liée à l'analyse de sensibilité concernant le niveau d'accroissement du scénario de référence boisement spontané, variant entre 1 m³/ha/an et 3 m³/ha/an.

Pour cette famille de scénarios, les éventuelles variations de carbone dans les sols entre le scénario de référence et le scénario projet ne sont pas considérées, car sur les deux scénarios une forêt sera développée³¹.

Notons que toutes les variantes n'ont pas été étudiées pour l'ensemble des scénarios. Par exemple : le niveau de dépérissement a été étudié pour la transformation mais pas sur la remise en exploitation des taillis ou l'amélioration ; la variabilité sur le taux de dégradation du bois mort a été étudié pour le scénario menus bois mais pas pour le scénario houpier ; la variabilité sur le niveau d'accroissement du boisement spontané a été évalué pour les TCR mais pas pour les autres scénarios de plantation.

2.4.2. Représentativité des scénarios étudiés

Des éléments de représentativité actuelle et de disponibilités futures sont présentés ci-dessous pour les cas-type retenus :

Cas-type 1 : « Mise en exploitation d'un taillis non exploité »

²⁹ L'étude Achat et al. (2018), montre une perte de 5 % du carbone du sol sur 100 ans pour le douglas pour la récolte en arbre entier par rapport au standard.

³⁰ Essence non présente aujourd'hui en France mais qui pourrait être utilisée si le TCR se développe.

³¹ Le développement d'une forêt (que ce soit par boisement spontané ou par plantation) sur une ancienne terre agricole cultivée conduit à une augmentation de carbone dans les sols. Si le développement de la forêt a lieu sur une prairie, l'augmentation de stock n'est pas attendue car les stocks de carbone des sols des prairies sont similaires à ceux des forêts.

Aujourd'hui plus de 43 % du bois récolté pour la plaquette est issu de la récolte de taillis simple feuillu ou taillis sous futaie de feuillus.³² Le système de taillis est un système sylvicole ancien créé par l'homme pour s'approvisionner notamment en bois de chauffage. Cependant, il y a des surfaces dans les forêts privées où cette exploitation n'a plus suite dû notamment au recours aux énergies fossiles. Les études de disponibilité en bois montrent que la remise en gestion de ces parcelles générerait une disponibilité en bois estimée importante mais quantifiée conjointement avec le compartiment BI/BE issu des futaies.³³

Cas-type 2 : « Récolte accrue de produits annexes à la récolte de bois d'œuvre »

Aujourd'hui, la récolte des menus bois n'a jamais lieu seule, mais dans le cadre d'une récolte pour l'énergie d'un arbre ou d'un houppier entier. Elle fait l'objet de recommandations (taux maximal de récolte à 70 % sur zone moyennement sensible). Selon les études de disponibilité, le potentiel de récolte additionnelle des menus bois n'est pas négligeable³⁴. Cependant, les conditions de récolte des menus bois doivent être analysées au cas par cas selon la fertilité du sol mais aussi selon les contraintes techniques d'exploitation.

Aujourd'hui, 32 % du bois récolté pour la plaquette est issu de la récolte du houppier³² et 26 % est issu des éclaircies et dépressage. L'étude de disponibilité en bois montre également une augmentation de la disponibilité des houppiers et éclaircies des futaies liée à une augmentation de la disponibilité de bois d'œuvre mais quantifié conjointement avec le compartiment BI/BE des coupes de taillis³³. La disponibilité additionnelle se situerait essentiellement en forêt privée. La forêt publique est déjà soumise à des plans d'aménagements forestiers et ce compartiment BI/BE issu des éclaircies ou houppiers en coupe finale sont déjà récoltés aujourd'hui. La récolte du BI/BE est traditionnellement réalisée soit pour le matériau soit pour l'énergie. Un scénario de référence utilisation matière (afin d'analyser le bilan de l'utilisation énergétique versus utilisation matière) ou utilisation en bois bûche traditionnel utilisé dans le secteur domestique (afin d'analyser le bilan de l'utilisation bois bûche versus plaquettes pour le secteur collectif/industriel) reste en dehors du périmètre de l'étude.

La récolte des souches n'est *quasi* jamais pratiquée sauf exceptions (ex : pin maritime dans les Landes). L'étude de disponibilité réalisée à l'échelle nationale ne réalise pas des évaluations sur la récolte de souches³³. Dans une logique prospective, il semble intéressant de tester ce scénario uniquement sur des plantations de résineux où éventuellement la pratique pourrait se développer davantage.

Cas-type 3 : « Plantation sur déprise agricole »

La surface forestière augmente significativement chaque année en France liée notamment à la déprise agricole. Le boisement de ces terres par action de l'homme n'est pas cependant très représentatif de pratiques actuelles mais c'est un scénario mis en avant par des politiques publiques notamment dans le cadre du Label bas-carbone³⁵. Dans une logique prospective, il semble intéressant de rassembler de premiers éléments sur l'impact de cette pratique sur le carbone en forêt et dans les écosystèmes.

2.5. Enseignements

Enseignement 1 : Les variations de carbone dans les écosystèmes associés à la récolte accrue de bois en forêt influent de façon significative le bilan GES de la production d'énergie à partir de plaquettes forestières. L'impact induit par une augmentation de la récolte sur les stocks de carbone ou le puits de carbone forestier³⁶ doit donc être pris en compte dans l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre associées au bois énergie.

Au regard du bilan GES total (biogénique + fossile) de la production d'énergie à partir de plaquettes forestières issues d'une augmentation de la récolte de bois, la gestion sylvicole a une influence significative sur les résultats et engendre une grande variabilité telle que présentée sur la figure ci-dessous.

Cette variabilité est fonction :

- du système de gestion sylvicole mis en œuvre :

³² GERBOISE - enquête menée auprès des professionnels mobilisateurs de bois énergie - portant sur 1,5 millions de tonnes de bois énergie, soit près de 50 % de la récolte de bois énergie destinée à la production de plaquettes forestières.

³³ L'étude de disponibilité en bois ADEME/FCBA/IGN 2016 ne permet pas de différencier le potentiel de récolte du compartiment BI/BE issue des taillis du compartiment BI/BE issu des futaies.

³⁴ En fonction des conditions de récolte, la disponibilité additionnelle totale en MB à l'horizon 2035 s'établirait entre 4 et 8 Mm³ par an dans le scénario gestion dynamique de l'étude ADEME/FCBA/IGN 2016.

³⁵ Voir « méthode boisement » du Label bas-carbone: <https://www.ecologie.gouv.fr/label-bas-carbone#e3>

³⁶ Un puits de carbone est tout système qui absorbe plus de carbone qu'il n'en émet. Une captation de CO₂ suivi d'une émission de CO₂ par dégradation/combustion du bois permet de « recycler » le carbone mais ne génère pas un puits de carbone. Il faut absorber du CO₂ mais il faut aussi que le carbone reste stocké en dehors de l'atmosphère.

la mise en gestion d'un taillis en **bleu**,

la récolte accrue de produits annexes à la récolte de bois d'œuvre en **jaune**,

la plantation sur déprise agricole en **vert** ;

- de l'horizon de temps considéré :

en couleur foncée l'horizon à 30 ans (court-terme),

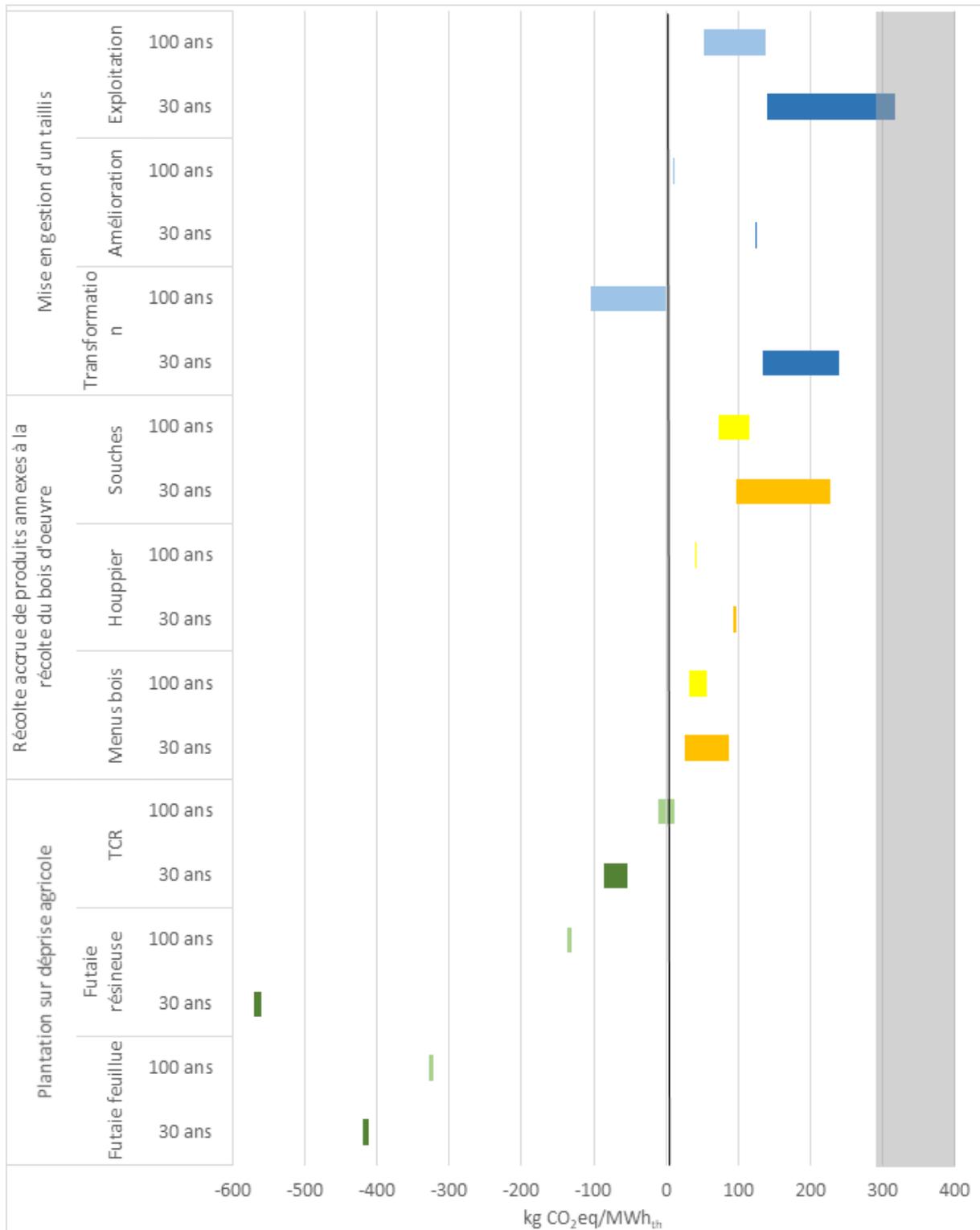
en couleur claire l'horizon à 100 ans (moyen-terme) ;

- du scénario de référence considéré.

Au sein de ce bilan GES total (illustré à la Figure 11), la contribution des GES d'origine fossile est faible (entre 11 et 32 kgCO₂ éq./MWhth selon le scénario sylvicole, voir le Tableau 13) par rapport à la contribution des GES d'origine biogénique.

Figure 17. Bilan GES³⁷ (biogénique et fossile) de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles, permettant une augmentation de la récolte du bois énergie.

³⁷ Ici, un bilan GES supérieur à zéro représente une augmentation de carbone dans l'atmosphère par rapport à la situation de référence (soit par une réduction des puits de carbone soit par une émission de GES). Un bilan GES inférieur à zéro réduit la quantité de GES atmosphérique par un renforcement des puits de carbone dans le réservoir forestier par rapport à la référence.



Note : La zone grisée correspond à la fourchette d'émissions GES de la filière gaz naturel (voir section 1.5.5 Figure 13). Le maximum de cette fourchette correspond à la variante avec des fuites de méthane élevées, et le minimum correspond à un haut rendement de la chaufferie gaz et à de faibles fuites de méthane³⁸.

³⁸ Facteur d'émission entre 290 kg CO₂ eq/MWh_{th} et 400 kg CO₂ eq/MWh_{th}. La valeur du facteur d'émission disponible dans la Base Carbone ADEME est de 242 kg CO₂ eq/MWh_{th}. Dans le cadre de cette étude, une analyse de sensibilité à partir de publications récentes faisant état des fuites de méthane a été réalisée afin de détailler et déterminer les fuites par étape du cycle de vie et ainsi améliorer les inventaires issus d'écoinvent. En effet, le ratio de méthane relargué dans l'atmosphère est un paramètre essentiel dans le calcul des impacts du gaz naturel. Le taux de fuite considéré va de quelques dixièmes de pourcent à 5 %, pour l'amont et l'aval hors distribution. Une variante sur le mix de

Tableau 13. Bilan GES (biogénique et fossile) de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles, permettant une augmentation de la récolte du bois énergie.

Valeurs en kg CO ₂ éq./MWh _{th}			GES fossile	Bilan GES total (fossile + biogénique)	
				min	max
Mise en gestion d'un taillis	Transformation	30 ans	12.3	134	239
		100 ans	12.3	-105	3
	Amélioration	30 ans	12.3	125	
		100 ans	12.3	11	
	Exploitation	30 ans	12.3	139	317
		100 ans	12.3	52	138
Récolte accrue de produits annexes à la récolte du bois d'œuvre	Menus bois	30 ans	11.2-12.7	26	88
		100 ans	11.2-12.7	32	57
	Houppier	30 ans	16.9	96	
		100 ans	16.9	42	
	Souches	30 ans	31.6	97	228
		100 ans	31.6	72	115
Plantation sur déprise agricole	Futaie feuillue	30 ans	16.9	-406	
		100 ans	16.9	-318	
	Futaie résineuse	30 ans	16.9	-553	
		100 ans	16.9	-128	
	TCR	30 ans	18.2	-85	-54
		100 ans	18.2	-10	12

Note : Les valeurs *en grisé et italique* sont des approximations car ces situations sylvicoles (du lot 2) n'ont pas été étudiées dans le lot 1. Pour le scénario d'amélioration d'un taillis remis en gestion, les valeurs du scénario d'exploitation en taillis ont été utilisées. Pour le scénario de plantation d'une futaie feuillue sur déprise agricole, les valeurs pour la plantation d'une futaie résineuse ont été considérées.

Bien que des fortes incertitudes soient associées aux calculs (notamment l'évolution des stocks de carbone en forêt dans le scénario de référence et les impacts sur le carbone du sol), les résultats pour les cas-types étudiés montrent que :

- À court terme (30 ans), le bilan GES de la production d'énergie à partir de plaquettes issues des scénarios d'augmentation de récolte sur la forêt existante est dégradé. Le scénario le plus défavorable du point de vue du bilan GES correspond à la remise en gestion des taillis en maintenant un système d'exploitation en taillis suivi du scénario de récolte de souches et du scénario transformation. Inversement, le scénario le plus favorable du point de vue du bilan GES correspond à la plantation sur déprise agricole.

- À plus long terme (100 ans), le bilan GES de la production d'énergie à partir de plaquettes issues des scénarios d'augmentation de la récolte sur des forêts existantes s'améliore. L'impact sur les GES atmosphériques à 30 ans est toujours supérieur à celui à 100 ans. En effet, à 100 ans, les stocks de carbone dans les écosystèmes après la récolte accrue du bois présente une reconstitution plus importante et les stocks dans le scénario de référence plafonnent ou se réduisent. Ainsi, pour les stratégies d'augmentation des prélèvements du bois dans les forêts existantes, le bilan GES est meilleur pour les horizons de temps longs.

A contrario, pour les plantations sur terres non boisées en déprise agricole, l'impact sur les GES atmosphérique à 100 ans se dégrade (car les stocks dans le scénario de référence continuent à augmenter alors que dans le scénario plantation les stocks plafonnent à l'issue des récoltes de bois), mais le facteur d'émission reste proche de zéro (Taillis à courte rotation), ou nettement négatif (résineux ou feuillus).

Les résultats pour les cas-types étudiés (figure ci-dessus) montrent que le bilan GES biogénique à 30 ans et à 100 ans de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières, sur une parcelle donnée, dans un contexte d'augmentation

provenance du gaz a également été considérée, se basant sur des projections pour l'Europe de l'IEA dans son World Energy Outlook (2019) pour 2030.

de la récolte de bois, peut être négatif ou positif, et varie sur une plage importante et influe de manière significative sur le bilan GES total.

Il ressort également que le bilan GES total de ces exemples reste plus faible que celui de la production de la même quantité d'énergie à partir de gaz naturel, sauf dans un cas spécifique. En effet, ce résultat s'observe pour l'ensemble des scénarios étudiés intégrant une augmentation de la récolte de bois, sauf pour le résultat à 30 ans du scénario concernant la nouvelle gestion d'un taillis existant en maintenant un système d'exploitation en taillis. Dans ce dernier cas, on trouve un recouvrement entre les bilans GES totaux pour la production d'1 MWh de chaleur en chaufferie alimentée par du bois et par du gaz. Ces résultats sont évalués pour une parcelle et un type de sylviculture/essence donnée et ne peuvent donc pas être appliqués au niveau national du fait de la variabilité des sylvicultures, essences et contextes pédoclimatiques en France. Ces travaux ne permettent donc pas pour l'instant de proposer une mise à jour du facteur d'émission moyen du bois énergie en France qui prendrait en compte l'impact moyen sur les puits de carbone.

Cette approche de quantification est considérée comme « innovante et exploratoire » et devra faire l'objet d'approfondissements. En effet, l'interprétation des résultats doit se faire en tenant compte des limites de l'étude relatives aux données et à la méthodologie.

Par ailleurs, cette approche permet d'apporter des éléments pour confirmer les pratiques sylvicoles permettant d'augmenter la production de bois énergie tout en limitant la diminution ou en augmentant les stocks moyens de carbone en forêt. Par exemple, créer des systèmes forestiers productifs dans les zones de déprise agricole non boisée, tout en respectant les bonnes pratiques pour préserver la biodiversité et le paysage, peut générer des gisements de bois énergie intéressants. Les résultats confirment les recommandations actuelles sur les pratiques de gestion forestière : l'intérêt de favoriser des systèmes bois énergie croisés avec une production de bois matériau, la nécessité de prendre en considération les spécificités des parcelles (stock de carbone initial, fertilité et productivité, état sanitaire), ainsi que l'enjeu des stocks de carbone dans les sols.

La définition et la modélisation du scénario de référence joue fortement sur les résultats.

L'évolution des stocks de carbone dans le scénario de référence par rapport auquel on compare le scénario projet étudié a une influence importante sur les résultats. Ainsi, selon que le taillis soit très dépérissant ou à l'équilibre, l'impact d'une transformation de ce taillis varie de plus ou moins 40 %. Pour le cas-type 2, le taux de dégradation du bois mort fait varier les résultats de plus ou moins 50 %. Pour ce qui est des scénarios de déprise agricole, selon le dynamisme du boisement naturel par rapport auquel on compare la plantation de TCR, les résultats peuvent varier de +400 % à l'horizon de temps 30 ans et à 100 % à l'horizon de temps 100 ans.

Enseignement 2 : Les résultats confirment les recommandations actuelles sur les pratiques de gestion forestières : l'intérêt de favoriser des systèmes bois énergie croisés avec une production de bois matériau, la nécessité de prendre en considération les spécificités des parcelles (stock de carbone initial, fertilité et productivité), ainsi que l'enjeu des stocks de carbone dans les sols.

L'analyse développée montre qu'elle peut éclairer les choix sur les pratiques de gestion forestière. Ainsi l'étude permet de confirmer les recommandations suivantes sur les pratiques sylvicoles :

- La **complémentarité des usages** énergie et matériau est un élément clé à préserver :

La complémentarité des usages est aujourd'hui pratiquée également pour des raisons économiques car le bois d'œuvre a un prix plus élevé que le bois énergie. Les systèmes de futaie produisant du bois d'œuvre présentent un niveau plus élevé de stockage de carbone en forêt par rapport aux systèmes d'exploitation en taillis. Favoriser l'usage en matériau permet également d'augmenter les stocks de carbone dans les produits bois et donc de « compenser » en partie la réduction de stocks de carbone dans les écosystèmes liée à la récolte accrue dans les forêts existantes. Ainsi, la variante qui optimise les débouchés en matériaux, sur le scénario de remise en gestion d'un taillis, permet de diminuer l'impact de la mise en exploitation de 30 %. Le stock de carbone dans les produits bois permet également d'améliorer le bilan GES de la conversion et transformation d'un taillis. En corollaire, les systèmes d'exploitation en taillis dédiés uniquement à l'énergie sur les forêts existantes, génèrent un bilan GES plus mitigé que des alternatives incluant des débouchés matériaux.

- La **restauration des forêts dépérissantes** est une piste intéressante pour engendrer des débouchés de bois énergie à impact climatique réduit :

Plus les taillis sont dépérissant et en mauvaise santé, plus leur remise en gestion est intéressante d'un point de vue carbone à condition de développer des peuplements en bonne santé. À l'inverse, la transformation des taillis capitalisés en bonne santé présente un bilan GES plus mitigé à court terme, même si le bilan à long terme reste positif. Il faut donc rester attentif à l'utilisation de techniques pour limiter la perte de stock carbone dans les écosystèmes à court terme avant la reconstitution des peuplements. Notons également l'importance du choix de l'essence adaptée à la station pour assurer des peuplements en bonne santé.

- **Il est plus intéressant de remettre en exploitation les parcelles qui promettent une plus grande productivité des peuplements forestiers :**

Plus les conditions pédoclimatiques sont favorables à la productivité forestière, plus la récolte de bois à l'ha est importante, et donc plus l'impact des variations de carbone dans les écosystèmes rapportés au m³ de bois prélevé est faible. A l'inverse, dans les parcelles présentant un stock initial important mais un plus faible potentiel de production, la reconstitution des peuplements après les coupes sera plus lente et leur remise en gestion présente un bilan GES moins favorable. Cette recommandation doit toutefois être confrontée à la question de la résilience de ces parcelles « moins productives » face au changement climatique.

- **Le maintien de la fertilité et de la teneur en carbone des sols, ainsi que la préservation de la biodiversité, sont des enjeux importants à approfondir.**

Les scénarios intégrant une récolte du houppier (sans récolter les menus bois) sont plus favorables d'un point de vue carbone que les scénarios de récolte de menus bois et souches, notamment à long terme, du fait des impacts potentiels sur le carbone du sol. Les récoltes de menus bois et de souches peuvent aussi générer des impacts sur stockage de carbone dans les arbres car elles peuvent altérer la fertilité des sols et donc à terme la séquestration liée à la croissance forestière. Cet effet n'a pas été pris en compte dans l'étude. Les résultats des scénarios sur la récolte de menus bois et souches doivent s'accompagner des recommandations données par d'autres études soutenues par l'ADEME (projet GERBOISE) afin de limiter leurs impacts sur la fertilité des sols et la biodiversité.

- Créer des **systèmes forestiers productifs dans les zones de déprise agricole** à bonne fertilité peut libérer des gisements de bois énergie intéressants.

Un bilan GES positif des plantations sur déprise agricole est d'autant plus intéressant que la croissance du boisement spontané est faible. Dans ces situations, la création des systèmes de futaies est à favoriser par rapport aux Taillis à Court Rotation (TCR), car les systèmes forestiers ainsi créés favoriseraient la séquestration de carbone en forêt et permettraient des valorisations en bois matériau ainsi qu'en bois énergie.

2.6. Limites

Ces travaux sont une nouvelle étape vers une meilleure compréhension des impacts du carbone biogénique associés au développement de la filière bois énergie. Ils comportent des limites qui appellent à d'autres travaux scientifiques pour continuer d'avancer sur cet enjeu central.

Concernant les données utilisées :

- L'incertitude liée à l'évolution des stocks de carbone dans les scénarios de référence reste une limite importante.
- L'étude ne retient que quelques cas-types de gestion sylvicole/essences contrastés, **qui ne reflètent pas la diversité réelle des situations de récolte des plaquettes forestières en France**. Une meilleure connaissance des pratiques sylvicoles associées à la récolte de plaquettes forestières reste un préalable indispensable pour diversifier les situations forestières considérées, étoffer la compréhension de l'enjeu climatique associé à la récolte accrue du bois énergie et documenter et promouvoir plus de pratiques favorables d'un point de vue du bilan GES. Les essences modélisées dans l'étude étant particulièrement productives, la modélisation d'un plus grand nombre d'essences améliorerait la représentativité des calculs.
- La question de l'impact du changement climatique sur les forêts selon les pratiques sylvicoles devrait être approfondie. En effet, le changement climatique peut bouleverser les stocks de carbone en forêt en impactant la vitesse de croissance des peuplements et la mortalité liée à des événements extrêmes (sécheresses, tempêtes, incendies, invasions biologiques, etc.). Cet effet a été partiellement intégré par la modélisation des dépérissements pour le scénario de référence des taillis lorsqu'ils arrivent à un fort niveau de capital sur pied. À l'inverse, dans les scénarios projet intégrant des mises en gestion et des plantations, on ne modélise pas de dépérissement alors que ce dernier pourrait être également présent. Il est nécessaire d'améliorer les connaissances scientifiques sur le niveau de dépérissement des forêts selon les pratiques de gestion sylvicole. Selon les territoires, l'adaptation active pourra être nécessaire, du fait d'un dépérissement et d'une mortalité importante, de l'absence de régénération naturelle ou pour un enjeu économique. Cependant, dans d'autres cas, laisser certaines surfaces en libre évolution (sans intervention) peut aussi faire partie des options d'adaptation contribuant à diversifier les modes de gestion.

- L'impact des différentes pratiques sylvicoles sur la biodiversité, et la qualité des sols (nutriments et stockage du carbone) est un enjeu important, bien qu'il n'ait pu être considéré de façon satisfaisante dans l'étude. Il est nécessaire d'améliorer les connaissances scientifiques sur ces sujets permettant une quantification des impacts pour pouvoir les intégrer dans des études ACV.

Concernant la méthodologie utilisée :

La question posée par ce volet de l'étude est complexe et des possibilités méthodologiques complémentaires pourront être explorées pour progresser sur le sujet. Deux limites peuvent notamment être citées :

- L'analyse à la parcelle doit être étendue à des échelles plus larges (massif/régionale/nationale) afin d'éviter les effets de seuil de la modélisation à l'échelle de la parcelle appliquée à 30 et 100 ans, dépendant notamment de la durée de rotation. Dans le rapport complet de l'étude, des bilan GES calculés sur les stocks moyens sur la durée de la rotation (approche nommée « à l'infini ») sont également calculés pour éviter l'effet de seuil liée à la durée de rotation. Des analyses à des échelles plus larges permettrait de prendre en compte la diversité des sylvicultures/essences et situations de départ à l'échelle des massifs et d'annualiser les résultats.
- La répartition des impacts entre les multiples types de produits récoltés (matériau et énergie) dans une parcelle reste un élément important à approfondir. Seule l'allocation volumique a été étudiée dans le lot 2. L'allocation économique dans les ACV attributionnelles lorsque les produits ont des caractéristiques économiques distinctes, comme c'est le cas pour le bois d'œuvre et le bois énergie, serait tout à fait pertinente. L'élargissement du système³⁹ dans le cadre des ACV conséquentielles reste également à explorer. En effet, la filière bois énergie est une filière interconnectée à une multitude d'enjeux. Elle évolue dans un ensemble de paramètres de contexte qui n'ont pas tous été pris en compte dans ces premiers travaux. Par exemple, des analyses de cycle de vie conséquentielles, en prenant en compte des mécanismes du marché, devrait être développées pour évaluer l'effet du développement de la filière bois énergie industriel et collectif sur les autres usages du bois (bois domestique, bois trituration, bois d'œuvre) et les importations de bois.

Conclusions

Cette étude a permis d'évaluer le bilan environnemental des principales filières bois énergie collectif et industriel, dans une perspective d'écoconception et de réaliser une analyse comparative par rapport à la filière de production d'énergie à partir de gaz naturel. S'inscrivant dans un contexte de fort développement du bois énergie collectif et industriel, elle a permis d'actualiser les connaissances, compte tenu de l'évolution des technologies des chaufferies et de l'évolution continue de la méthodologie d'évaluation environnementale. Elle s'appuie sur des données et des méthodologies validées par la communauté scientifique, et a été conduite en concertation avec des représentants de la filière, pour assurer sa cohérence avec les réalités de celle-ci.

Le bois est en France une ressource renouvelable qui s'inscrit directement dans les principes de l'économie circulaire soutenue dans les politiques publiques. Il s'agit d'une alternative importante permettant de réduire la dépendance du pays aux ressources fossiles non renouvelables, et de soutenir une économie locale.

L'analyse de cycle de vie a permis de confirmer des pistes d'amélioration pour limiter les impacts associés aux émissions de polluants atmosphériques des chaufferies bois. En effet, le respect des valeurs limites d'émissions de particules et de NOx fixées par la directive 2015/2193 dite « Medium Combustion Plant » entraîne une amélioration des impacts des installations (1 à 50 MW) de production de chaleur à partir de biomasse pour les enjeux de qualité de l'air. Les bonnes performances relatives aux émissions de polluants atmosphériques de ces installations mettent en avant l'intérêt de technologies qui y sont mises en œuvre. L'étude nous permet également de confirmer la nécessité de poursuivre les efforts d'écoconception pour les installations de plus petites puissances (< 1 MW). C'est pourquoi, cet enjeu est actuellement étudié dans le cadre de

³⁹ On étudie les impacts d'un système { bois énergie + bois matériau } puis on élargit les frontières du système en intégrant un matériau non-bois de substitution, de manière à annuler la question du matériau dans le système d'évaluation. La méthode de l'élargissement du système est utilisée lorsque l'ACV a pour ambition d'inclure les interactions avec d'autres systèmes, notamment dans les ACV conséquentielles.

projets de recherche accompagnés par l'ADEME⁴⁰ et est considéré dans les règles d'attribution des aides du Fonds Chaleur opéré par l'ADEME.

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) de la filière bois énergie collectif et industriel, en considérant une neutralité carbone des émissions biogéniques de combustion du bois, sont liées notamment à la consommation d'énergie tout au long du cycle de vie (sylviculture, transport, préparation du combustible, consommation chaudière et gestion de cendres). Les émissions de GES ainsi calculées, sont plus faibles que celles de la filière de production d'énergie à partir de gaz naturel. Pour maintenir ce faible niveau d'impact, il est recommandé de maintenir de faibles distances d'approvisionnement des combustibles.

L'étude comporte également un volet exploratoire permettant d'approfondir l'effet d'une augmentation de la récolte de bois pour une production de plaquettes forestières sur les dynamiques de stockage de carbone forestier. **La gestion sylvicole a une influence significative sur le bilan GES de la production d'énergie issue de ce combustible. Le maintien des pratiques de gestion sylvicole durables favorisant le stockage de carbone dans les forêts et les produits bois et d'une façon plus générale préservant la biodiversité et la qualité des sols restent des enjeux importants.** Ceux-ci sont encadrés par la réglementation forestière et accompagnés par un ensemble d'outils promouvant des bonnes pratiques, qui continuent à être renforcés. L'intégration de ces enjeux dans l'évaluation environnementale de la filière bois énergie reste un sujet à approfondir et est aujourd'hui traité par des projets de recherche.

Cette étude s'inscrit ainsi dans une dynamique de soutien et d'amélioration continue de la performance environnementale de la filière bois énergie collectif et industriel.

⁴⁰ L'ADEME a retenu en 2019 le projet de recherche ACIBIOQA (Amélioration des Connaissances des Installations BIOmasse sur la Qualité de l'Air). Ce projet de 3 ans vise à approfondir les connaissances en émissions des petites chaufferies, sur des polluants classiques et des polluants moins bien référencés comme les particules semi-condensables.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1. Description des scénarios étudiés.	11
Tableau 2. Résumé des variantes étudiées pour chaque scénario.	12
Tableau 3. Étapes de gestion sylvicole considérées.	13
Tableau 4. Principales données utilisées pour la préparation des combustibles.	14
Tableau 5. Émissions utilisées dans la modélisation pour la combustion en chaufferie (avant traitement éventuel des fumées).	14
Tableau 6. Fonctionnement de la chaufferie.	15
Tableau 7. Quantité de cendres.	15
Tableau 8. Contribution des différentes étapes du cycle de vie pour l'ensemble des enjeux environnementaux étudiés.	17
Tableau 9. Flux élémentaires contributeurs et origines pour différents enjeux environnementaux.	17
Tableau 10. Différence de contribution à certains enjeux environnementaux entre le scénario de base et la/les variante(s) étudiée(s) de distance de transport du combustible vers la chaufferie.	18
Tableau 11. Comparaison des contributions des filières gaz naturel et bois énergie à différents indicateurs environnementaux.	26
Tableau 12. Modèles de croissance utilisés pour les différentes essences étudiées.	34
Tableau 13. Bilan GES (biogénique et fossile) de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles, permettant une augmentation de la récolte du bois énergie.	40

FIGURES

Figure 1. Illustration schématique des étapes du cycle de vie.	8
Figure 2. Méthode utilisée pour la détermination des enjeux environnementaux pertinents.	9
Figure 3. Facteurs de pondération.	9
Figure 4. Contribution des différents enjeux à l'empreinte totale dans le scénarios S1 à S6.	16
Figure 5. Influence de la mise en place d'un système d'abattement des NO _x de type SNCR (sans SNCR = 100 %).	20
Figure 6. Contribution des différentes filières à l'émission de particules pour la production d'1 MWh _{th} – Détails par étape du cycle de vie.	21
Figure 7. Contribution des différentes filières à l'acidification de l'air pour la production d'1 MWh _{th} – Détails par étape du cycle de vie.	22
Figure 8. Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWh _{PCI} (exprimée en kg éq CO ₂) – Bilan GES global avec comptabilité totale absorptions/émissions biogéniques.	23
Figure 9. Mise en perspective des filières bois énergie pour l'enjeu « changement climatique » et la production d'1 MWh _{PCI} (exprimée en kg éq CO ₂) – hypothèse de neutralité carbone biogénique.	23
Figure 10. Contribution des différentes filières à l'utilisation de ressources fossiles et nucléaires pour la production d'1 MWh _{th} – Détails par étape du cycle de vie.	24
Figure 11. Contribution au changement climatique des différentes filières de production de la biomasse utilisée pour produire les plaquettes forestières (kg CO ₂ éq/MWh _{PCI}).	25
Figure 12. Contribution à l'utilisation de ressources fossiles et nucléaires des différentes filières de production de la biomasse utilisée pour produire les plaquettes forestières (MJ éq/MWh _{PCI}).	25
Figure 13. Positionnement des filières bois énergie par rapport aux filières gaz naturel pour quatre enjeux environnementaux.	27
Figure 14 : Localisation dans l'arbre des principales classes et compartiments de bois : bois d'œuvre, bois d'industrie / bois énergie, et menus bois.	30
Figure 15. Les scénarios projet étudiés.	31
Figure 16. Illustration schématique de la méthodologie pour la comptabilisation du carbone biogénique, pour l'horizon de temps à 30 ans sur un exemple de scénario analysé dans l'étude.	33
Figure 17. Bilan GES (biogénique et fossile) de la production d'1 MWh de chaleur à partir de plaquettes forestières issues de différents scénarios sylvicoles, permettant une augmentation de la récolte du bois énergie.	38

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols, etc., nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



Analyse du cycle de vie du bois énergie collectif et industriel - Synthèse

Résumé. L'objectif de cette étude est d'évaluer le bilan environnemental des principales filières bois énergie collectif et industriel afin d'identifier, pour chaque filière, les étapes du cycle de vie les plus contributrices dans une perspective d'écoconception et de définir dans quelles conditions la production de chaleur pour le collectif ou l'industrie présente un intérêt environnemental par rapport à la production en chaufferie alimentée par du gaz.

Pour atteindre ces objectifs, l'étude s'appuie sur la méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie normée ISO 14040 et ISO 14044.

Au total 5 types de sources biomasses pour alimenter les chaufferies sont étudiés dans cette étude.

L'étude comporte également un volet exploratoire permettant d'approfondir l'effet d'une augmentation de la récolte de bois pour une production de plaquettes forestières sur les dynamiques de stockage de carbone forestier.

Elle s'inscrit ainsi dans une dynamique de soutien et d'amélioration continue de la performance environnementale de la filière bois énergie collectif et industriel.

