

SOL & BOIS ENERGIE COLLECTIF ET INDUSTRIEL

RAPPORT FINAL



EXPERTISES

**Juin.
2023**

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les experts de l'ADEME pour leurs relecture et contributions

Miriam BUITRAGO - ADEME
Lucas SCHREPFER - ADEME
Nicolas TONNET – ADEME
Alice FAUTRAD - ADEME
Leslie MOULIN – ADEME
Théo PIPERIS - ADEME

CITATION DE CE RAPPORT

DURAND Maxime, EGLIN Thomas, ADEME, 2023. Sol et bois énergie collectif et industriel. 25 p.

Cet ouvrage est disponible en ligne <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'œuvre 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

Coordination technique - ADEME : Maxime DURAND et Thomas EGLIN

Direction/Service : Direction Bioéconomie et Energies Renouvelables / Planification Énergétique Prospective Impacts Territoires

SOMMAIRE

RÉSUMÉ.....	4
ABSTRACT	5
1. CONTEXTE DU PROJET	6
2. SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX IMPACTS SUR LES SOLS DU BOIS ENERGIE COLLECTIF ET INDUSTRIEL	8
3. EXEMPLE D'UN CAS-TYPE.....	15
4. LES PERSPECTIVES D'ÉVOLUTIONS SELON LES SCENARIOS ADEME TRANSITION(S) 2050	15
5. CONCLUSION / PERSPECTIVES	20
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	21
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	23

RÉSUMÉ

Le développement des énergies renouvelables (EnR) est un des moyens les plus importants pour sortir de l'utilisation des énergies fossiles, cause majeure du changement climatique. Le développement de ces énergies permet également d'implanter la production d'énergie sur le territoire, au plus proche des consommateurs, alors que le pays souffre d'une dépendance énergétique importante vis-à-vis des importations : pétrole, gaz et uranium. La France s'est ainsi engagée à ce que 32% de l'énergie consommée en France et 40% de l'électricité produite soit d'origine renouvelable en 2030, dans le but d'atteindre, en 2050, la neutralité carbone. Cependant les EnR présentent des impacts environnementaux, notamment sur les sols. Or, les sols font partie des grands enjeux planétaires, ressource limitée à l'échelle mondiale et non renouvelable à l'échelle d'une vie humaine, ils sont notamment indispensables à la sécurité alimentaire et à la préservation de la biodiversité.

Cette étude vise à évaluer les surfaces nécessaires au développement des productions d'EnR. Sur la base de la littérature et d'analyses de projets, elle propose des références surfaciques à la puissance installée ou à l'énergie produite, et les utilise pour évaluer les surfaces nécessaires à l'atteinte de la neutralité carbone à 2050 selon les scénarios proposés par l'ADEME dans Transition(s) 2050 (ADEME, 2021). Elle distingue des indicateurs liés au besoin de foncier, aux concurrences d'usage et à l'imperméabilisation des sols afin de préciser les enjeux par filières. L'analyse a permis d'identifier plusieurs enjeux pour les sols et leur usage au regard du déploiement des chaufferies collectives et industrielles, notamment :

- Les enjeux potentiels sur la qualité des sols durant les différentes étapes clés de la filière : de la production de bois à l'épandage des cendres de chaufferies.
- Les principaux enjeux concernent la mise en œuvre de bonnes pratiques de préservation des sols à la production et à la récolte de bois, avec des surfaces forestières concernées pouvant atteindre plusieurs millions d'hectares à l'horizon 2050 selon les scénarios Transition(s) 2050. Celles-ci doivent aller de pair avec une sylviculture permettant la production de bois d'œuvre et un usage des bois en cascade. Un plan national "Sols forestiers", en cours d'élaboration en 2023 dans le cadre de la mise en œuvre de la stratégie nationale pour la biodiversité à l'horizon 2030, devrait y contribuer.

Ce document est complété par des documents spécifiques à d'autres filières EnR (éolien terrestre, éolien en mer, solaire photovoltaïque, méthanisation et biocarburants) ainsi que par un document de synthèse « Sol et énergies renouvelables ».

ABSTRACT

The development of renewable energies (RE) is one of the most important ways to get away from the use of fossil fuels, a major cause of climate change. The development of these energies also allows the implementation of energy production on the territory while the country suffers from a significant energy dependence on imports: oil, gas and uranium. France is committed to ensuring that 32% of the energy consumed in France and 40% of the electricity produced is of renewable origin by 2030, with the aim of achieving carbon neutrality by 2050. However, renewable energies have environmental impacts, particularly on the soil. Soil is one of the major planetary challenges, a limited resource on a global scale and non-renewable on a human life scale. It is essential for maintaining human activities, food security, achieving carbon neutrality, the health of populations, and the preservation of biodiversity and ecosystems.

This study aims to evaluate the surface areas necessary for the development of wood energy for collective, tertiary and industrial heating systems. It proposes surface references to the energy produced, and evaluates the surface areas necessary to achieve the objective of carbon neutrality in 2050 according to the scenarios proposed by ADEME in Transition(s) 2050 (ADEME, 2021). The analysis identified several issues for the land and its use with regard to the deployment of collective and industrial heating systems, in particular:

- Potential soil issues during the different key stages of the sector: from wood production to the spreading of boiler room ash.
- The main issues concern the implementation of good soil conservation practices for wood production and harvesting, with forest areas concerned that could reach several million hectares by 2050 according to the Transition(s) 2050 scenarios. These must go hand in hand with silviculture that allows for timber production and a cascading use of wood. A national "Forest Soil" plan, being developed in 2023 as part of the implementation of the national Biodiversity Strategy 2030, should contribute to this.

This document is completed by specific documents for other renewable energy sectors (onshore wind, offshore wind, solar photovoltaic, methanisation and biofuels) as well as by a summary document "Soil and renewable energy".

1. Contexte du projet

Ce document vise à synthétiser la connaissance des incidences du bois énergie collectif et industriel sur les sols et d'en analyser les enjeux en France, au regard des perspectives de déploiement selon les scénarios ADEME Transition(s) 2050.

L'accélération du déploiement des énergies renouvelables, et en particulier du bois énergie est aujourd'hui clairement identifiée comme un des leviers indispensables pour la sortie des énergies fossiles. Le bois énergie est la première énergie renouvelable en France, il représente 33% de la production d'énergie renouvelable (MTECT, 2021). Le bois-énergie désigne l'utilisation du bois en tant que combustible, employé sous différentes formes (bûches, plaquettes, granulés, connexes des industries et produits bois en fin de vie) et dans différentes installations (domestiques, industrielles ou collectives, alimentant ou non des réseaux de chaleur). Dans ce document, on la regroupera en deux catégories : « domestique » et « industriel/collectif ». La filière bois énergie permet la production de chaleur et d'électricité. Les voies de développement de la filière sont axées sur la production de chaleur pour le domestique et sur la production de chaleur ainsi que d'électricité (en quantité moins importante que la chaleur) pour l'industriel/collectif.

Pour le chauffage domestique au bois, le bois bûche est la ressource principalement utilisée, ressource locale constituée à 64% de bois prélevé en forêt, à 23% de bois issu de l'entretien des vergers ou des haies et à 13% de bois de récupération/de rebuts (ADEME, 2022A). La consommation du bois bûche diminue en raison de l'amélioration du rendement des appareils, une meilleure isolation des logements et du développement des appareils à granulés (les granulés sont majoritairement constitués de produits connexes de scierie). Selon les scénarios ADEME Transition(s) 2050 (ADEME, 2021), la production de chaleur au niveau domestique est amenée à augmenter légèrement (+18%) ou à décroître (-65%) à l'horizon 2050 par rapport à 2020, par un fort développement d'appareils de chauffage plus performants et par l'électrification des usages.

Au niveau industriel et collectif, les ressources utilisées pour la production de chaleur et d'électricité en 2022 sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Part des différentes ressources de bois énergie consommées (chaufferies en fonctionnement), selon le secteur (ADEME, 2022 pour les chaufferies collectives et industrielles suivies par l'ADEME ; source : MTE-DGEC, 2023 pour les installations dédiées à la production d'électricité)

	Chaufferies collectives et industrielles (<12 GWh/an)	Chaufferies industrielles (> 12 GWh/an)	Installations de production d'électricité
Plaquettes forestières (bois prélevé directement en forêt)	74 %	57%	36,4%
Déchets verts et bois issu de coupes hors forêts	3 %	2%	0,5%
Connexes des industries du bois	12 %	18%	13,6%
Produits bois matériaux fin de vie	10 %	12%	
Sous-produits agricoles	1 %	3%	
Sous produits industriels et autres	~	8%	49,5
Granulé	~	-	

Selon les 4 scénarios ADEME Transition(s) 2050, la production de chaleur et la production d'électricité issues du bois énergie, devraient augmenter fortement à l'horizon 2050 par rapport à aujourd'hui (+65% à +185% et +90% à +184%, respectivement) dans les secteurs collectifs et industriels. De plus, pour répondre à cette demande, plusieurs ressources sont plus ou moins mobilisées :

- La consommation de bois/de plaquettes forestières peut être doublée ou être divisée par deux, selon le recours ou non à des cultures lignocellulosiques sur terres agricoles (jusqu'à 500 000 hectares) ;
- L'utilisation de produits connexes à l'industrie du bois peut doubler ou rester du même ordre de grandeur (par rapport à l'actuel) ;
- Le bois hors forêt (bocage, haies, ...), aujourd'hui majoritairement utilisé pour le chauffage domestique est amené à être sollicité par la filière collective et industrielle;
- Les déchets bois seront principalement orientés dans d'autres filières.¹

Au regard des dynamiques attendues, nous allons focaliser notre analyse sur les potentiels impacts du développement des filières collectives et industrielles.

La production de chaleur issue de biomasse (filieres collective et industrielle) en France pourrait être multipliée par un facteur 2 à 3 d'ici 2050 avec des quantités pouvant atteindre les 70 TWh/an dans les scénarios les plus ambitieux (ADEME, 2021), alors qu'elle est d'environ 24 TWh/an en 2020 (CIBE, 2021) :

- en 2021, 7 146 installations en fonctionnement représentant une puissance chaudière de 8 092 MW dont 661 MW de puissance électrique, avec :
 - 1 108 installations de puissance supérieure à 1 MW représentant 7 754 MW,
 - 6 038 installations de puissance comprise entre 50 kW et 999 kW représentant 1 148 MW.

Le déploiement de cette filière induit une augmentation des besoins en bois (production et récolte), une augmentation du nombre de chaufferies et du nombre de réseaux de distribution de la chaleur ainsi qu'une augmentation du retour au sol des cendres produites. L'évolution de la filière aura donc autour de ces axes des impacts sur les sols que ce soit en termes d'emprise ou de qualité, qu'il s'agit d'évaluer et d'anticiper. En effet, les sols et les forêts font partie des grands enjeux planétaires, ils remplissent de nombreuses fonctions écologiques nécessaires au bon fonctionnement des écosystèmes et de nos sociétés : recyclage et fourniture de nutriments pour les plantes, régulation du cycle de l'eau, stockage de carbone, habitat pour la biodiversité,.... Les sols sont une ressource limitée et non renouvelable à l'échelle d'une vie humaine : plusieurs centaines à plusieurs milliers d'années sont nécessaires pour reconstituer un sol. C'est dans ce cadre que la *LOI n°2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets* pose l'objectif de Zéro Artificialisation Nette (ZAN) à l'horizon 2050, en passant par une réduction de moitié de la consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers d'ici 2030. Et pour faire face à des possibles changements d'occupation des sols ou à des possibles modifications des pratiques sylvicoles induisant des impacts sur les sols et les écosystèmes, il est important d'articuler les objectifs de préservation des sols et de déploiement des énergies renouvelables.

¹ Dans les scénarios Transition(s), les biocarburants avaient été visés mais en 2023, il existe déjà de fortes tensions sur cette ressource.

2. Synthèse des principaux impacts sur les sols du bois énergie collectif et industriel

Les potentielles sources d'impacts sont :

- La construction des chaufferies ;
- La production et la récolte de biomasse (plaquette forestière majoritairement) ;
- L'épandage de cendres.

2.1. La construction des chaufferies

La plupart des chaufferies biomasse viennent en substitution d'une chaufferie fossile et n'augmentent donc pas nécessairement l'emprise au sol. Par ailleurs, les chaufferies biomasse collectives et industrielles relevant d'un nouveau besoin sont implantées majoritairement dans des zones déjà urbanisées, et ne se développent généralement pas sur de nouvelles surfaces de type NAF (Naturelle, Agricole et Forestière). Cependant il est toutefois possible de quantifier leur emprise au sol et les potentiels impacts qu'elles présentent.

Tableau 2 : Potentiels impacts sur les sols des chaufferies collectives et industrielles

	Impacts potentiels	Quantification	Evitement et réduction
Installation de l'unité : créations de routes et de voies d'accès, passage d'engins chantiers, pose de l'unité et du système de raccordement.	Changement d'affectation des sols	Niveau d'intensité variable selon la précédente occupation du site. Généralement installée sur site déjà urbanisé.	<ul style="list-style-type: none"> • Privilégier des sites d'implantation déjà artificialisés • Gestion de chantier : utilisation de routes et d'infrastructures déjà existantes, plan de circulation, éviter les méthodes « lourdes » d'aménagement de terrain.
	Dégradation du sol, en particulier de son intégrité physique	Variable selon les méthodes constructives utilisées et de l'intégrité physique initiale du sol.	
	Emprise sur les sols	15 ha/TWh de chaleur produite (ADEME, 2022A) ²	<ul style="list-style-type: none"> • Eviter les revêtements des voies d'accès et des plateformes techniques, ou privilégier des revêtements perméables.
	L'artificialisation des sols comprend l'imperméabilisation. Elle peut être causée par l'installation des infrastructures, des voies d'accès ainsi que par le changement d'affectation des sols.	Correspond à la surface d'emprise.	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionnement de l'unité / éco-conception.

² 7146 installations représentant une puissance chaudière de 8092 MW permettant la production de 24 TWh (CIBE, 2021) et occupant une surface totale de terrain de 360 hectares en 2021 ($\frac{360 [ha]}{24 [TWh]} = 15 [\frac{ha}{TWh}]$).

2.2. La production et la récolte de biomasse

NB : Ne seront traités dans cette partie que les impacts sur les sols de la production et la récolte de biomasse agricole et forestière bien que les installations visées soient alimentées également par d'autres types de ressources (connexes de scierie, bois fin de vie et bois déchets...)

2.2.1. Les ressources agricoles et forestières

2.2.1.1. Issues directement de forêts

Les **plaquettes forestières** représentent les fragments ou copeaux de bois obtenus par déchiquetage. Elles sont le résultat du broyage mécanisé de bois issu de l'exploitation forestière de qualité trop faible pour une valorisation matière (arbre entier de faible diamètre ou de trop fort diamètre : tronc, branches, menus bois ; bois ronds de trop fort diamètre ; bois trop tordu, souches dans certains cas). Elles constituent de loin la source d'approvisionnement la plus importante des installations collectives et industrielles de chauffage, alors que le **bois bûche** représente la première source des appareils de chauffage domestique au bois. (ADEME, 2018).

Les **rémanents** sont des résidus d'exploitation forestière laissés sur le **parterre de coupe**, après prélèvement des compartiments d'intérêt pour le bois d'œuvre, le bois industrie (grumes, surbilles de tiges) et du bois bûche. Ils regroupent les cimes et branches de diamètre inférieur à 7 cm (menus bois) et, par extension, les chutes de découpe, le feuillage et les souches, et certaines tiges et branches de diamètre supérieur à 7 cm non valorisés (ADEME, 2018).

2.2.1.2. Issues hors des forêts :

La gestion des haies permet également de produire des **plaquettes bocagères**³. Les produits d'élagage, les plaquettes issues des refus de compostage, les bois d'alignement, les sous-produits agricoles et agroalimentaires (ex : **pailles** de céréales, anas de lin, coques de tournesol) et les **cultures lignocellulosiques** de type « switchgrass » ou « miscanthus » peuvent être également utilisées en combustion.

2.2.2. Les surfaces totales nécessaires à la production de la biomasse

Les ressources agricoles et forestières présentées manifestent des impacts sur les sols que ce soit en termes d'occupation ou de qualité. En effet les besoins de biomasse issues de forêt et/ou de cultures dédiées sont amenés à augmenter à proportion variable selon le scénario d'évolution. Dans ce sens, une estimation d'énergie primaire (TWh) a été effectuée pour chaque source de biomasse (bois forêt, bois hors forêt, culture lignocellulosique, déchets bois, produits connexes de scierie, ...), cette estimation permet de mettre en lumière un besoin en plaquettes forestières et un besoin en cultures dédiées, ressources qui présentent les plus grands enjeux sur les sols pour la filière bois énergie collectif et industriel.

Des estimations ont été réalisées sur les surfaces forestières et agricoles nécessaires pour produire un térawattheure d'énergie primaire de « bois forêt » selon différents choix de cultures sylvicoles ou agricoles, et sont présentées dans le Tableau 3 ci-après.

³ Un « Label Haie » a été mis en place pour certifier la gestion durable des haies et des plaquettes qui en sont issues (<https://labelhaie.fr/>), avec notamment le soutien de l'ADEME.

Tableau 3 : Surface équivalente à un térawattheure d'énergie primaire de plaquettes forestières selon différents choix de cultures sylvicoles ou agricoles (issus du rapport « Analyse du cycle de vie du bois énergie collectif et industriel » ADEME (2022C)), les éléments à destination énergétique peuvent être des menus bois récoltés, des portions d'arbres ou des arbres entiers variant selon le scénarios choisis. Facteur de conversion : 1[TWh énergie primaire] = 377 192,28 [m³ de bois]

Système de production	Volume total récolté par ha et par an sur une révolution (m ³ /ha/an)	% de la récolte pour l'énergie	Volume total récolté par ha et par an destiné au bois énergie (m ³ /ha/an)	Surface équivalente à un térawattheure d'énergie primaire destiné à l'énergie (ha/TWh)
Taillis - fertilité haute	11	70 %	7,7	49 000
Taillis - fertilité moyenne	6,3	70 %	4,4	85 000
Futaie résineux - fertilité haute	15,4	39 %	6,0	63 000
Futaie feuillue - fertilité haute	11,1	62 %	6,8	55 000
Mix France*	5,7	45,7 %	2,6	145 080
Culture lignocellulosique	/	100 %	/	20 000

* Les hypothèses sur les 4 premiers choix de sylvicultures sont basées sur les essences les plus productives en France (le douglas pour les résineux et le châtaigner pour le taillis), hypothèses non représentatives du niveau de production de l'ensemble du territoire français et supposant un approvisionnement ciblé sur ces systèmes sylvicoles. Le scénario « Mix France » est une estimation du niveau de récolte actuel moyen en France. La production annuelle en France varie de 2,2 à 7 m³/ha/an selon la région choisie avec une valeur moyenne de 5,7 m³/ha/an (IGN, 2019). En prenant en compte un taux de récolte destiné à l'énergie de 45,7% (SER, FBF, 2021), le volume total récolté par hectare et par an destiné au bois énergie est de 2,6 m³/ha/an, la surface équivalente à un térawattheure d'énergie primaire destiné à l'énergie est de 145 080 ha/TWh d'énergie primaire.

2.2.3. La qualité des sols

Pour répondre à l'augmentation de la demande de bois énergie, l'utilisation d'un volume plus important de plaquette forestière se profile (la production de plaquette a presque triplé au cours des dix dernières années, ADEME, 2018), entraînant une hausse de la récolte de rémanents et de menus bois. Ceux-ci ont une teneur élevée en minéraux. Leur retour au sol participe au maintien de la fertilité des sols forestiers et offre un abri à de multiples organismes vivants. Un prélèvement important de ces éléments présente de potentiels impacts sur les fonctions écologiques du sol ainsi que sur sa biodiversité. De plus, l'accroissement de la récolte de bois peut entraîner une augmentation des interventions aussi bien dans le cadre d'une sylviculture orientée bois d'œuvre que pour les itinéraires adaptés à la production de bois-énergie. Cette augmentation du nombre et de types d'interventions peut être due à l'utilisation de machines additionnelles et à la mise en place de nouvelles opérations (travail du sol, amendement, etc.).

Tableau 4 : Les potentiels impacts sur les sols de la récolte de biomasse à destination du bois énergie collectif et industriel

Potentiels impacts	
Paramètres physico-chimiques et fertilité du sol	<p>Modification des paramètres physico-chimiques des sols (UICN France, 2015). Diminution de la quantité d'éléments minéraux nutritifs comme l'azote et le phosphore indispensables à toutes les formes de vie végétales de la forêt (UICN France, 2015). La carence en éléments nutritifs comme le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le potassium (K), le phosphore (P) et l'azote (N) a des effets marqués et prolongés pendant plus de 15 ans sur la fertilité du sol et la production du peuplement (ADEME (2018)). Le retour est progressif et d'autant plus lent que le sol est sensible à l'export de nutriments ; des récoltes fréquentes entraînent un risque important de baisse de productivité (ADEME (2018)).</p> <p>Un passage plus fréquent d'engins peut, en fonction du type de sol et de son état hydrique, accroître les impacts associés sur la physique du sol associés : scalpage, orniérage, liquéfaction, tassement et compactage du sol. Entraînant des répercussions sur l'écosystème forestier, diminution de l'action microbienne et biologique du sol, perte de porosité, modification des flux d'eau, des dommages parfois irréversibles même à long terme.</p>
Humidité du sol	<p>Diminution de la rétention d'humidité (UICN France, 2015). En mettant en comparaison un sol nu (prélèvement de la totalité de la litière) et un sol avec litière (sol témoin) : le sol nu est toujours nettement plus sec que le sol témoin et après une sécheresse, les sols témoins réagissaient aux précipitations suivantes contrairement aux sols nus qui voient leur humidité réaugmenter très lentement (ONF, 2017).</p>
Matière organique	<p>La récolte de menus bois et de souches entraîne une perte de matière organique du sol très rapide, les stocks initiaux sont généralement reconstitués après 10-15 ans (ADEME, 2018, ADEME, 2014)</p>
Biodiversité des sols	<p>La diminution de la quantité de bois mort au sol entraîne une perte d'habitat essentiel pour de nombreux micro-organismes, notamment fongiques et bactériens, de même qu'un habitat pour les organismes saprophytes et les cortèges ectomycorhiziens (UICN France, 2015). En modifiant la quantité et le profil de bois morts, ces évolutions impactent l'habitat d'une partie importante de la biodiversité forestière (ADEME, 2018). Modification des espèces végétales : certaines espèces ne se maintiennent pas tandis que d'autres trouvent des conditions favorables (UICN France, 2015).</p> <p>L'export de menus bois diminue à court terme la diversité des communautés d'insectes saproxyliques à l'échelle de la parcelle (ADEME (2018)). Plusieurs études dans des forêts boréales ont observé les impacts de l'exportation des rémanents (au sens large) sur la faune et flore du sol : diminution de l'abondance des espèces, mais aussi des communautés fongiques, ainsi que la mésofaune du sol (UICN France, 2015).</p> <p>L'exportation totale de la litière et des rémanents impacte très rapidement (dès 3 ans) la diversité taxonomique et fonctionnelle des biocénoses des sols pour la majorité des communautés suivies : communautés fongiques, communautés bactériennes, communautés de la macrofaune et de la mésofaune. L'exportation seule des menus bois a également un impact négatif sur la faune du sol mais dans une moindre mesure (Saint-André et al. 2019).</p>

L'exportation supplémentaire de bois, et ainsi de matière organique et de minéraux, a potentiellement des impacts sur les différentes strates de la forêt, et donc au niveau de l'écosystème forestier dans sa globalité. La récolte des rémanents et des souches pourrait ainsi diminuer la disponibilité, la diversité des habitats et la biodiversité associée au bois mort, ce dernier hébergeant près de 25 % de la biodiversité forestière. Ces conséquences en cascade pourraient modifier la composition faunistique de la forêt par répercussion sur le réseau trophique mais également la composition floristique en favorisant une flore de milieux ouverts, extra-forestière et la biodiversité associée.

Cette exportation supplémentaire peut également avoir un impact sur la fertilité du sol, qui dépendra des compartiments récoltés et de la sensibilité du sol aux exportations de minéraux. Ceci peut être

atténué par le ressuyage (séchage) des rémanents sur la parcelle (laisser le feuillage sur place) et l'adaptation des pratiques de récolte à la sensibilité des sols. Limiter la récolte des rémanents et menus bois permettra non seulement de limiter les différents impacts mentionnés, mais également de limiter l'augmentation de passages d'engins et donc de réduire les effets engendrés.

En ce qui concerne les impacts sur la physique des sols causés par une augmentation des interventions en forêt, certaines recommandations sont mises en avant (ONF, 2021) :

- Classer les parcelles/zones selon leur sensibilité potentielle ;
- Réfléchir au réseau de cloisonnement optimal vers les places de dépôts et adapter le réseau existant, largeur entre deux cloisonnements optimale (sans réseau c'est plus de 60% de surface supplémentaire qui risque d'être circulée) ;
- Laisser sur place les rémanents et menus bois pour constituer une protection physique, poser un tapis de bois sur les sols les sensibles ;
- Choisir des périodes de chantier adéquates, lorsque l'état du sol est favorable (grande portance quand le sol est gelé ou sec).
- Adapter le nombre de produits (grumes, billons de sciage, bois de trituration) pour limiter le nombre de passages d'engins de débardage
- Choix d'un matériel adapté à la sensibilité du sol : augmenter le nombre de roues et la largeur des pneus, utiliser des tracks pour les sols sensibles, utiliser des câbles aériens pour le débardage si possible....

Afin de préserver les fonctionnalités et la biodiversité des sols, ce développement doit se faire dans une logique de gestion durable des forêts prenant en compte l'ensemble des impacts décrits dans cette étude et en respectant certains points : éviter au maximum l'exploitation de peuplement jusqu'alors non exploités, ne pas s'engager vers une exportation de bois conduisant à un appauvrissement en matière minérale et organique des sols forestiers ainsi qu'à une surexploitation des différentes catégories de bois mort, éviter d'augmenter les interventions en forêt, raisonner la mécanisation en privilégiant des machines ayant les caractéristiques techniques permettant de limiter au maximum les impacts au sol tout en mettant en place les bonnes pratiques décrites dans des documents dédiés⁴.

2.3. L'épandage de cendres

Les arrêtés ICPE 2910 A et B « déclaration » et « enregistrement » autorisent depuis 2013 l'épandage des cendres de « sous équipement de combustion », sous réserve du respect de teneurs seuils en éléments traces organiques et métalliques. Le mode de valorisation des cendres biomasse le plus développé est l'épandage de cendre sur sols agricoles, cependant les caractéristiques et la qualité des cendres dépendent de nombreux facteurs (LBI, 2017) :

- Le type d'intrants, purs ou en mélange (type de biomasse...), et leurs caractéristiques (essence et proportion d'écorce pour le bois...);
- Le conditionnement appliqué à ces intrants : broyage, criblage, déferraillage, ajout d'adjuvants dans le cas des biomasses agricoles ;
- Le type de traitement thermique (combustion, pyrolyse...);
- L'équipement de combustion : four à grilles, lit fluidisé... ;
- La taille de l'installation, la température de combustion ;
- Le mode de traitement des fumées : multi cyclone, filtre à manches, dépoussiéreur électrostatique ;
- Les modalités de récupération des cendres : mélange ou non des cendres sous foyer et cendres multicycloniques, cendres humides ou sèches ;
- La conduite de l'installation ;
- Les techniques de post-traitement (mélanges, broyage, extraction chimique...).

Les éléments présents dans les cendres de bois peuvent être regroupés en quatre catégories principales (LBI, 2017) :

⁴ Récolte durable de bois pour la production de plaquettes forestières ADEME, 2020a ; PRATICSOLS Guide sur la praticabilité des parcelles forestières, ONF, 2021 ; Bois énergie et biodiversité forestière UICN France, 2015 ; Bois énergie : l'approvisionnement en plaquettes forestières ADEME, 2012 ; Guide pratique : Mieux intégrer la biodiversité dans la gestion forestière Marion Gosselin & Yoan Paillet, 2017 ; Les rendez-vous techniques n°54 hiver 2017, ONF, 2017.

- Les éléments majeurs, à l'origine de leur valeur agronomique : éléments fertilisants et neutralisants (K_2O , P_2O_5 , MgO , CaO), carbone organique ;
- Les éléments traces métalliques (ETM), présents dans le bois comme dans toutes les matières vivantes : oligoéléments (bore, cuivre, zinc...) captés par l'arbre dans le sol, mais aussi d'éléments plus indésirables quand ils sont en quantité trop importante (plomb, arsenic, mercure, cadmium...);
- Les composés traces organiques (CTO) : compte tenu du mode d'obtention par combustion, les teneurs en CTO sont en général faibles dans les cendres ;
- Les macroéléments indésirables dont la teneur peut varier dans de fortes proportions : mâchefers (cendres fondues) éléments métalliques (clous, agrafes...), éléments minéraux (terre, sable...) ; la fraction supérieure à 4 mm pouvant provoquer des désordres sur les équipements d'épandage (épandeurs à chaux notamment).

Les cendres présentent un intérêt agronomique pour les sols et les cultures en raison de leurs teneurs en éléments fertilisants et neutralisants (ADEME, 2021b) :

- La valeur neutralisante des cendres se manifeste principalement par des teneurs élevées en chaux et en magnésie :
 - Chaux : 240 à 500 kg CAO/tonne MB de cendre ;
 - Magnésie : 20 à 40 kg MGO/tonne MB de cendre ;
- La valeur fertilisante des cendres est évaluée par leurs teneurs en potasse et en phosphate :
 - Potasse : 30 à 75 kg K_2O /tonne MB de cendre ;
 - Phosphore 13 à 22 kg P_2O_5 / tonne MB de cendre.

Cet épandage doit toutefois être conforme à des seuils réglementaires de l'arrêté du 3 août 2018, l'autorisation d'épandre sur les terres agricoles est alors subordonnée au respect de 2 obligations :

- Les cendres sous foyer doivent respecter des teneurs maximales en éléments traces métalliques (ETM) et en composés traces organiques (CTO)
- Les quantités d'ETM et de CTO épandues par m^2 de sol sont limitées par période de 10 ans.

Les estimations du gisement de cendres épandables sur sols agricoles par an sont présentées dans le Tableau 5 ci-dessous. Cela représenterait environ 5 kg MB épandables par MWh d'énergie primaire.

Tableau 5 : Flux de cendres sous foyer et d'ETM selon la quantité d'énergie primaire utilisée pour les chaufferies bois collectives et industrielles (ADEME, 2021b)

Energie primaire (en TWh/an)	Cendres sous foyer produites (tMB/an)	Cendres sous foyer produites et conformes à l'épandage (tMB/an)	Flux brut Cadmium (kg/an)	Flux brut Mercure (kg/an)	Flux brut Plomb (kg/an)
37	228 300	191 100	497	14	5 182

A titre comparatif, l'apport annuel d'ETM toxiques (Cd, Pb, Hg) en France est de 762 000 kg/an, l'apport par les cendres en représente donc 0,7%. Notamment, l'apport total annuel de Cadmium en France est estimé à 54 000 kg/an, l'apport par les cendres en représente moins de 1%.

En 2020, Une surface agricole comprise entre 50 000 et 100 000 ha est nécessaire à l'épandage de la totalité des cendres produites, à raison d'un taux d'épandage de 2 à 4 tonnes de cendres par hectare de sol agricole (ADEME, 2021b). Du point de vue de la filière agricole française, le recours aux cendres limite la consommation d'engrais et amendements minéraux, à hauteur d'une économie d'engrais de 50 000 t/an (LBI, 2017).

3. Exemple d'un cas-type

Pour illustrer les différentes informations et quantifications mentionnées précédemment, nous avons pris l'exemple de la centrale biomasse de Belle Beille à Angers et de ses caractéristiques au bilan de l'année 2020 (AS, 2020).

La centrale est composée de deux chaudières bois (1,8 MW et 6,2 MW) et deux chaudières gaz (2 MW et 9,8 MW). Les quantités de chaleur produites et les ressources utilisées sont décrites dans le tableau ci-dessous **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** En 2020, l'approvisionnement en biomasse s'élève à 8 712 tonnes est assuré par 49% de plaquettes bocagères et 51% de plaquettes forestières, avec une humidité moyenne de 40% et un PCI moyen de 2761 kWh/tonne.

Tableau 6 : Centrale chaleur de Belle Beille - Approvisionnement et production de chaleur en 2020

		Approvisionnement	Production chaleur
	Gaz	9 569 MWh PCI	9 178 MWh
Bois	51 % Plaquettes forestières	12 598 MWh PCI 4 443 tonnes	10 143 MWh
	49 % Plaquettes bocagères	12 104 MWh PCI 4 268 tonnes	10 557 MWh

4 443 tonnes de plaquettes forestières sont équivalentes à 12 342 map (mètre cubes apparents) de plaquettes forestières, équivalentes à 4 936,8 m³ de bois rond.

Les surfaces équivalentes pour obtenir 4 937 m³ de bois rond (12 598 MWh d'énergie primaire) (Suf IDF – CNPF, 2012) selon le choix sylvicole sont décrites dans le tableau 7 ci-dessous.

Tableau 7 : Surfaces équivalentes à la production de 4936,8 m³ de bois rond selon les choix sylvicoles

Choix sylvicole	Taillis - fertilité haute	Taillis - fertilité moyenne	Futaie résineux - fertilité haute	Futaie feuillue - fertilité haute	Mix France	Culture dédiée type lignocellulosique
Surface forestière équivalente	577 ha	1010 ha	741 ha	653 ha	1709 ha	252 ha

La centrale biomasse s'étend sur 0,3 hectares en zone urbanisée (14,5 ha/TWh de chaleur_{bois} produit).

En 2020, un total 170 tonnes de cendres humides a été récupéré et valorisé en compost ainsi que 5,74 tonnes de cendres sèches parties en enfouissement techniques, soit environ 6 kg MB épandables par MWh d'énergie primaire (=170/(12 598+12 104)). Ces valeurs sont cohérentes avec les valeurs présentées dans le tableau 5.

4. Les perspectives d'évolutions selon les scénarios ADEME Transition(s) 2050

Les scénarios ADEME Transition(s) 2050 proposent différentes modalités de développement impliquant donc des impacts sur les sols variables selon la trajectoire suivie.

Dans cette partie, les potentiels impacts pour lesquels des ordres de grandeurs ont été estimés sont :

- Pour les chaufferies : la surface d'emprise totale (qui est équivalente à la surface totale d'imperméabilisation) et la surface incompatible avec un co-usage agricole, naturel ou forestier (incompatibilité stricte ENAF).
- Pour la production et la récolte de biomasse (bois) : les surfaces nécessaires à la production d'une quantité de biomasse équivalente à une production de chaleur donnée, selon plusieurs choix de modes de productions sylvicoles et le besoin de consommation de biomasse (énergie primaire en TWh) selon les différents scénarios.

4.1. Les chaufferies

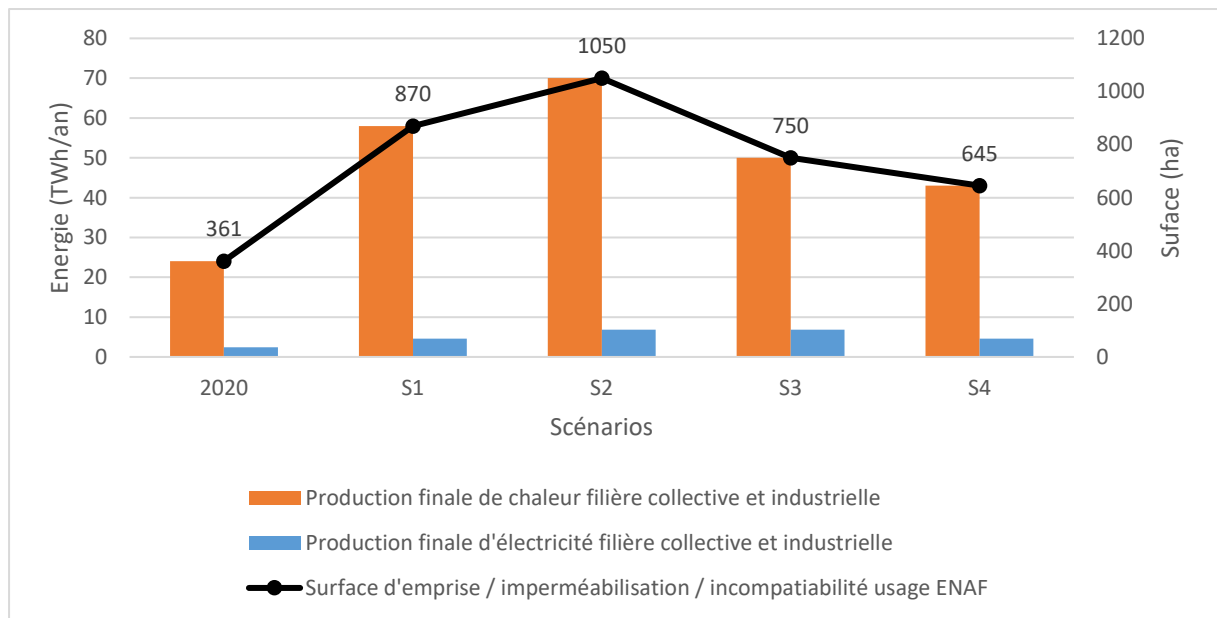


Figure 1 - Capacité de production installée et surface occupée par les unités de chaufferies collectives / industrielles / tertiaires selon les scénarios ADEME Transition(s) 2050

Les surfaces occupées par les chaufferies sont estimées relativement à la production énergétique finale, soit un ratio 15 ha/TWh. Ce paramètre ne diffère pas selon le scénario choisi.

Sur cette base, les surfaces occupées par les chaufferies collectives et industrielles en 2050 sont très modérées, comprises entre 645 ha et 1050 ha selon les scénarios. Il est néanmoins important de rappeler qu'il s'agit de surfaces déjà imperméabilisées, généralement en substitution de chaufferies fossiles.

4.2. La production et la récolte de biomasse

Les surfaces agricoles et forestières nécessaires pour la production et la récolte de biomasse (Figure 2) sont estimées à partir des besoins en énergie primaire pour la filière collective et industrielle (Figure 3). Dans cette dernière figure, l'augmentation des besoins de la filière collective et industrielle sont mis en regard de ceux de la filière domestique qui sont amenés à se réduire dans le même temps.

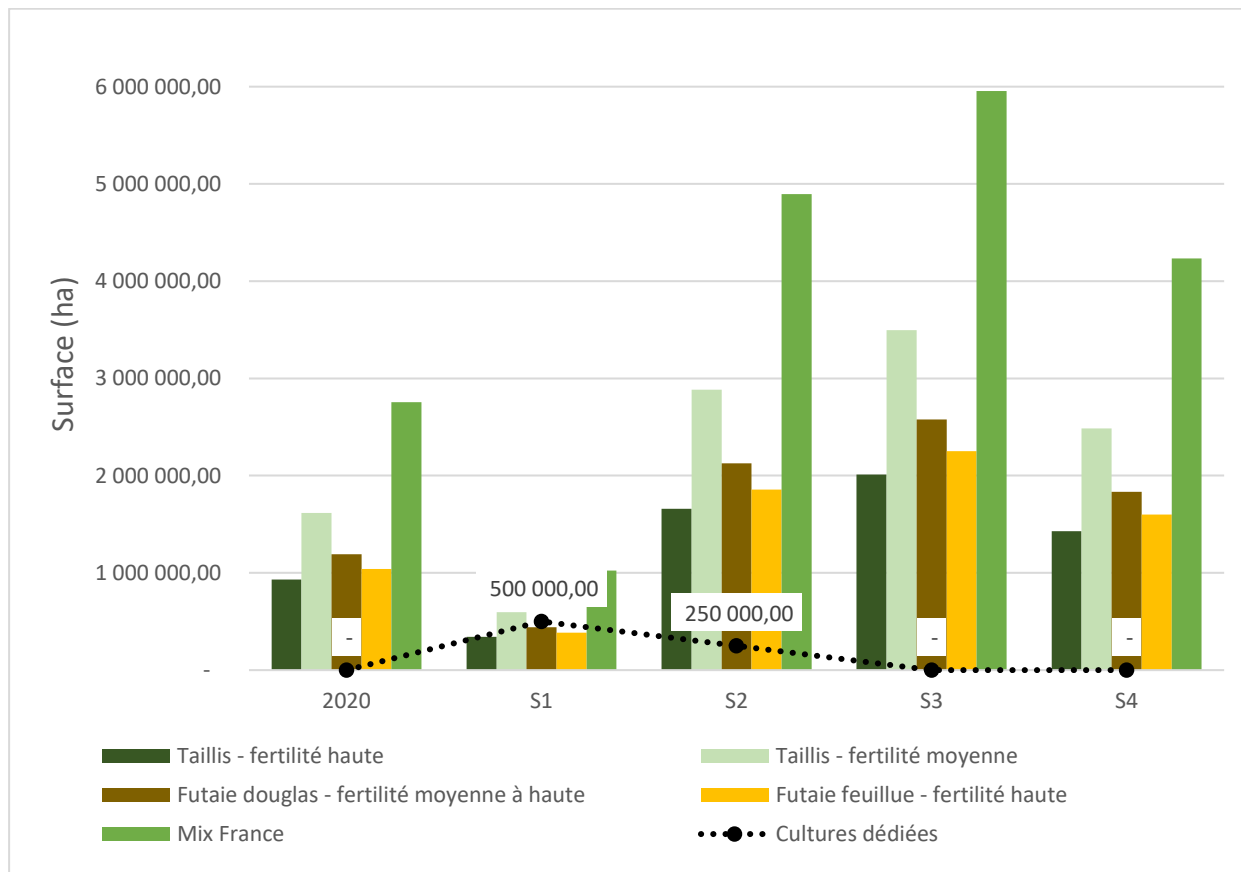


Figure 2 : Surface de cultures dédiées et surfaces forestières nécessaires pour le maintien du niveau de récolte de plaquettes forestières pour la filière énergie collective et industrielle, selon différents modes de sylvicultures pour chaque scénario ADEME Transition(s) 2050.

Remarque : chaque surface forestière est équivalente à la quantité d'énergie primaire du bois forêt mentionnée dans la figure précédente (exemple : pour 2020, 930 000 hectares de taillis – fertilité haute OU 1 617 300 hectares de taillis – fertilité moyenne sont nécessaires à la production de 19 TWh d'énergie primaire de bois forêt). Les modes de sylvicultures « Taillis – fertilité haute », « Taillis – fertilité moyenne », « Futaie douglas – fertilité moyenne à haute » et « Futaie feuillue – fertilité haute » sont issus des travaux de l'ADEME (ADEME, 2022c), le mode de sylviculture « Mix France » est plus représentatif de la ressource forestière disponible au bois énergie et est issu d'estimations à partir des chiffres de l'IGN, du SER et de FBF (IGN, 2019 ; SER, FBF, 2021). Ces surfaces permettent également la production de bois d'œuvre et/ou d'industrie en proportion plus ou moins importante selon le mode de sylviculture (cf. Tableau 3).

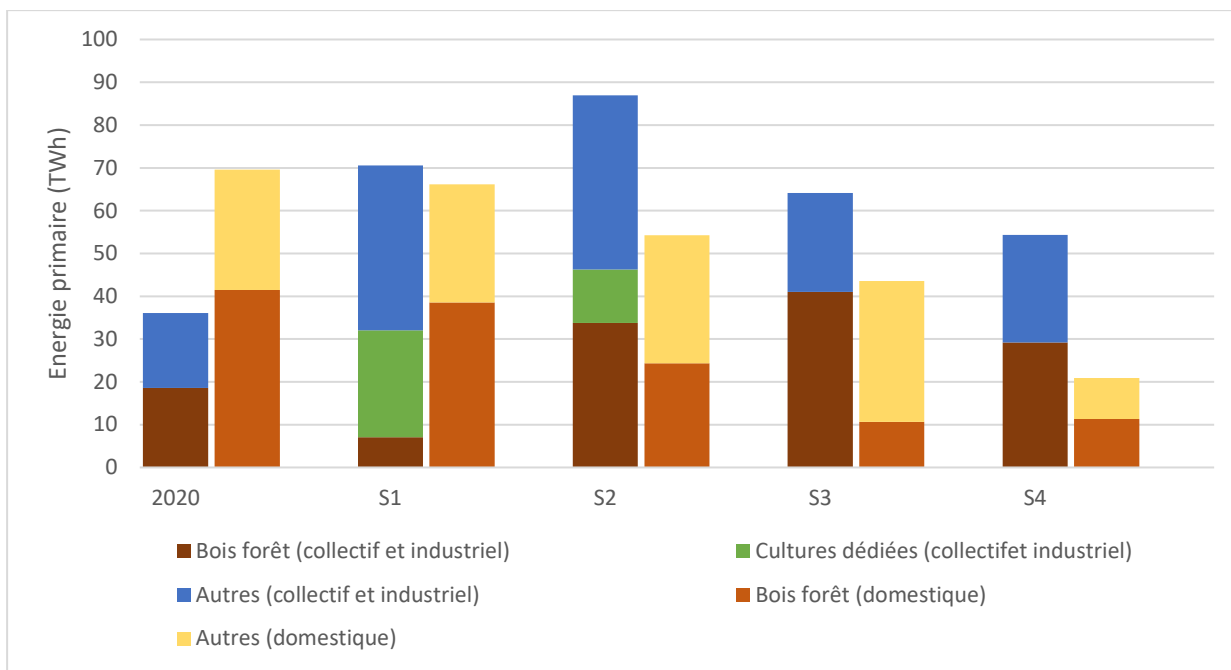


Figure 3 : Les besoins en énergie primaire pour assurer la production énergétique de la filière domestique et collective selon les différents scénarios ADEME Transition(s) 2050. Remarque : La catégorie « Autres » regroupe les produits connexes de scierie, les déchets bois, le bois hors forêt (haies, verger, agroforesterie), les granulés, liqueur noire.

Le besoin en biomasse de la filière collective suit une évolution différente selon les scénarios (ADEME, 2021b) :

- S1 – Génération Frugale** : La majeure partie de la biomasse provient de sources connexes à l'industrie du bois. En effet, les domaines de l'industrie et du bâtiment sont privilégiés pour l'utilisation du bois forêt (valorisation matériau prioritaire) offrant une disponibilité plus importante en produits connexes de scierie ou en liqueur noire par exemple. L'introduction de cultures lignocellulosiques (type Miscanthus et Switchgrass) sur une superficie de 500 000 ha répond notamment au besoin de production de chaleur. L'évolution des régimes alimentaires et la réduction des besoins en alimentation animale permet de limiter la concurrence d'usage des sols, car ces cultures s'implantent sur des surfaces agricoles libérées. Le besoin de surfaces forestières pour les chaufferies collectives et industrielles est *in fine* moindre qu'en 2020 (**facteur 2 à 3**).
- S2 – Coopérations Territoriales** : La demande de bois énergie augmente de manière importante (+127%). Comme pour le scénario « Génération Frugale », la biomasse provient majoritairement de sources connexes. La ressource « cultures dédiées de type lignocellulosiques » est néanmoins moins développée car elle est notamment orientée dans d'autres filières énergétiques (biocarburant, pyrogazéification). Dans ce scénario, le besoin de surfaces forestières pour les chaufferies est plus important qu'actuellement et est estimé entre **1,6 et 4,9 millions d'hectares, selon l'itinéraire sylvicole considéré**.
- S3 – Technologies Vertes** : Le besoin total en bois énergie diminue car ce scénario propose un développement de l'électricité pour la production de chaleur. De plus, ce scénario propose une réduction forte des besoins en bois énergie pour le secteur domestique. Celle-ci est néanmoins compensée par une hausse de la demande du secteur collectif. Les cultures lignocellulosiques ne sont plus utilisées dans cette filière car orientées en totalité vers les filières biocarburants. La demande en bois forestier augmente donc et est maximale dans ce scénario. Elle représente des surfaces forestières mobilisées estimées entre **2 et 6 millions d'hectares**.
- S4 – Pari Réparateur** : La demande en bois énergie a fortement décliné en raison de l'électrification des secteurs collectif/industrie et domestique pour répondre à leurs besoins thermiques. De plus, l'usage en biocarburant est privilégié pour l'utilisation du bois forêt. La filière collective est ici largement supérieure à la domestique et la demande en bois forêt présente un besoin de surface forestière compris entre **1,4 et 4,2 millions d'hectares**.

Les scénarios mettent tous en avant une augmentation de la production d'énergie primaire destinée à la filière bois énergie collective. Seul le scénario « Génération Frugale » permet cette augmentation sans une mobilisation accrue des surfaces forestières. Pour cela, il s'appuie sur 500 000 hectares de cultures

dédiées, la mobilisation de bois bocager et un développement des usages du bois dans le bâtiment et l'industrie offrant une disponibilité plus importante en produits connexes de scierie.

4.3. L'épandage des cendres

L'épandage des cendres sur sol agricole nécessitera en 2050 au maximum 1,1% des surfaces cultivées (~ 225 000 ha) en France, et ne présente donc pas d'enjeu en termes d'excédents structurels à une échelle nationale.

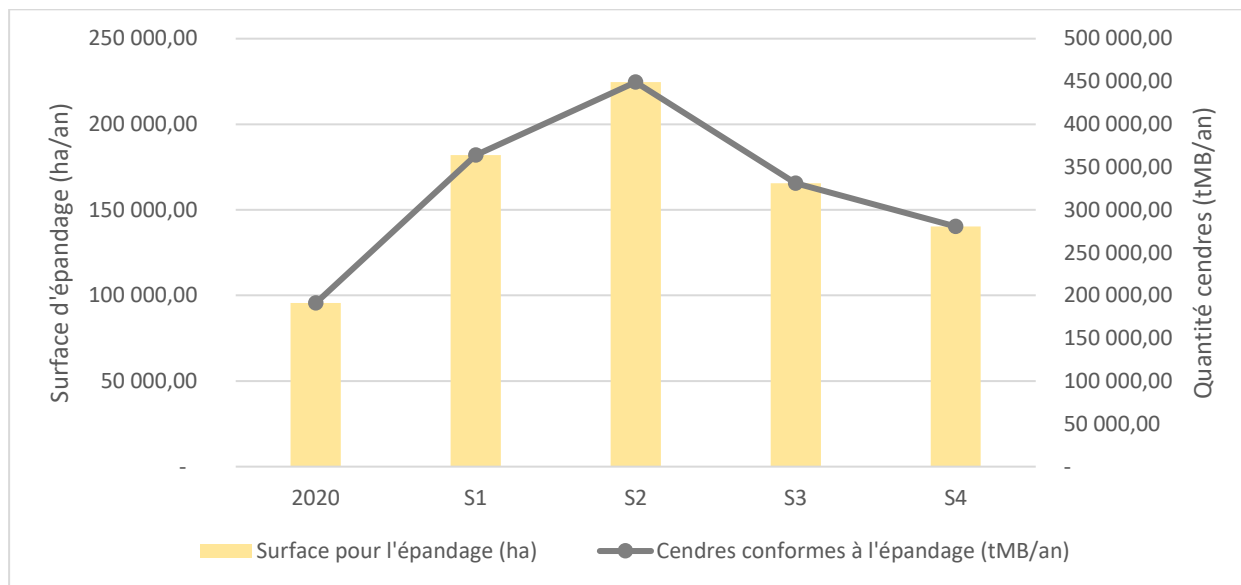


Figure 4 : Estimation de la quantité de cendres conformes à l'épandage produite ainsi que les surfaces agricoles correspondantes (pour un taux d'épandage de 2 t/ha par an).

5. Conclusion / Perspectives

Le développement croissant de la filière bois énergie collectif et industriel peut permettre de répondre en partie aux besoins de chaleur, se substituant à l'utilisation de ressources fossiles (gaz naturel, fioul, charbon).

Ce développement présente des enjeux potentiels sur les sols durant les différentes étapes clés de la filière : de la production de bois à l'épandage des cendres de chaufferies.

Les principaux enjeux concernent la production et la récolte de bois. Ils mettent en avant l'intérêt de favoriser une sylviculture de qualité permettant la production de bois d'œuvre et un usage des bois en cascade tout en respectant des bonnes pratiques de récolte. Des phénomènes de tassement, d'orniérage et de compaction liés à l'augmentation de chantier en forêt peuvent avoir lieu ; la mise en place d'un réseau de circulation avec une classification des parcelles selon leur sensibilité, la prise en compte des caractéristiques physiques (portance, porosité et humidité) du sol ainsi que l'utilisation de matériel adapté sont à promouvoir. Quoiqu'actuellement peu développée, la récolte de rémanents a un impact direct sur la fertilité, la matière organique, la biodiversité et les propriétés physico-chimiques du sol. La considération des sensibilités du milieu apparaît comme un enjeu majeur dans le développement de la filière bois-énergie. Un plan national « Sol Forestier », en cours d'élaboration en 2023 dans le cadre de la mise en œuvre de la stratégie nationale Biodiversité 2030 devrait y contribuer.

La construction des chaufferies a également des impacts. Néanmoins, le développement des chaufferies prévu dans Transition(s) 2050 représente des surfaces d'emprise et d'imperméabilisation faibles (jusqu'à environ un millier d'hectares) au regard d'autres infrastructures y compris de production d'énergies renouvelables (par exemple, pour la méthanisation, on estime 16 000 hectares d'emprise et 7000 ha imperméabilisées). De plus, celles-ci viennent majoritairement en substitution de chaufferies préexistantes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ADEME (2012) Bois énergie – L’approvisionnement en plaquettes forestières, http://docs.gip-ecofor.org/public/Manuel-ADEME-Plaquette_Vdef-30-03-12.pdf
2. ADEME, Landmann G., Nivet., C. (coord.) 2014. Projet Resobio. Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité. Angers : ADEME, Paris : Ministère de l’agriculture, de l’agroalimentaire et de la forêt – GIP Ecofor. Rapport final, 243 p., http://accac.eu/la_foret_domaniale_de_l_aigoual/docs/resobio-2-rapport-final-2014mars.pdf
3. ADEME (2018), Landmann G., Augusto L., Pousse N., Gosselin M., Cacot E., Deleuze C., Bilger I., Amm A., Bilot N., Boulanger V., Leblanc M., Legout. A., Pitocchi S., Renaud J.-P., Richter C., Saint-André L., Schrepfer L., Ulrich E. (2018). Recommandations pour une récolte durable de biomasse forestière pour l’énergie – Focus sur les menus bois et les souches. Paris : ECOFOR, Angers : ADEME, 50 pages. <https://bibliothèque.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/892-gerboise-gestion-raisonnee-de-la-recolte-de-bois-energie.html>
4. ADEME (2020A) Récolte durable de bois pour la production de plaquettes forestières, <https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/4980/recolte-durable-production-plaquettes-forestieres-010985.pdf>
5. ADEME (2020B), État de l’art des impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages, et des moyens d’évaluation de ces impacts, <https://bibliothèque.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/17-etat-de-l-art-des-impacts-des-energies-renouvelables-sur-la-biodiversite-les-sols-et-les-paysages-et-des-moyens-d-evaluation-de-ces-impacts.html>
6. ADEME (2021A) Transition(s) 2050 : Choisir maintenant pour le climat – Rapport <https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/6531/transitions2050-rapport-compressé.pdf?modal=false>
7. ADEME, PLUMAIL D., BOURGEOIS S., GUIBERT B., DESANGLOIS G., CEDEN, Biomasse Conseil, FIBOIS. (2021B), Campagne d’analyses des cendres de chaufferies biomasse – 2018-2019. 247 pages
8. ADEME (2022A), Prospective – Transitions 2050 – Feuilleton Sols, [https://bibliothèque.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/5438-prospective-transitions-2050-feuilleton-sols.html#:~:text=Le%20rapport%20Transition\(s\)%202050,et%20des%20puits%20de%20carbon e.](https://bibliothèque.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/5438-prospective-transitions-2050-feuilleton-sols.html#:~:text=Le%20rapport%20Transition(s)%202050,et%20des%20puits%20de%20carbon e.)
9. ADEME (2022C), Analyse du cycle de vie du bois énergie collectif et industriel <https://bibliothèque.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/5214-analyse-du-cycle-de-vie-du-bois-energie-collectif-et-industriel.html>
10. Alter services (AS, 2020), Angers Loire métropole, Rapport annuel du délégataire Exercice 2020 Convention de délégation de service public Réseau de chaleur du quartier de Belle Beille, https://www.angersloiremetropole.fr/fileadmin/user_upload/2020_-_rapport_annuel_2020_rcu_belle-beille.pdf
11. CIBE (2017), Le cahier du bois-énergie n°78 – Valorisation des cendres issues des chaufferies collectives et industrielles au bois
12. CIBE, Fedene, SER, Uniclimate (2019). Panorama de la chaleur renouvelable et de récupération – Edition 2019. https://www.fedene.fr/wp-content/uploads/sites/2/2019/10/PANORAMA_CHALEUR_2019.pdf
13. CIBE (2020), Manutention et logistique des cendres : état des lieux et bonnes pratiques, <https://cibe.fr/documents/manutention-logistique-cendres-etat-lieux-bonnes-pratiques-2020-rex-2/>

14. CIBE (2021), Recensement des installations au bois 2021.
15. Gosselin M & Paillet Y. (2017), Mieux intégrer la biodiversité dans la gestion forestière – Guide pratique, Marion Gosselin & Yoan Paillet, 2017, https://agriculture.gouv.fr/sites/default/files/documents/pdf/Guide_PFB.pdf
16. IGN (2019), La production annuelle en volume, <https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/flux2019.pdf>
17. LBI (2017), 78^{ème} Cahier du bois énergie : Valorisation des cendres issues des chaufferies collectives et industrielles au bois
18. MTECT (2022), Chiffre clés du climat – France, Europe et Monde – Edition 2022, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-du-climat-france-europe-et-monde-edition-2022>
19. ONF (2017) Les rendez-vous techniques n°54 hiver 2017, <https://www.onf.fr/+13d::rendez-vous-techniques-de-onf-no-54.html>
20. ONF (2021), PRATICSOLS Guide sur la praticabilité des parcelles forestières, (ONF, 2021), <https://www.onf.fr/onf/onf-agit/+192::praticols-guide-sur-praticabilite-des-parcelles-forestieres.html#:~:text=Le%20guide%20Pratic'sols%20r%C3%A9pond,praticabilit%C3%A9%20des%20cloisonnements%20d'exploitation.>
21. Saint-André L., Buée M., Aubert M., Richter C., Deleuze C., Rakotoarison H., Abildtrup J., Akroume E., Bach C., Berthe T., Bilot N., Bouvet A., Chauvat M., Dreyfus P., Echevarria G., Elie F., Fauchery L., Fuente P., Gérant D., Lauvin D., Leban J-M., Leblanc M., Leduc V., Maillard F., Normand M., Quibel E., Raveloson C., Renaud JP., Roy S-J, Stenger A., Viaud P., Vincenot L., Zeller B. (2019). RESPIRE – Récolte des menus bois en forêt – Potentiel, Impact, Indicateurs et remédiations par épandage de cendres de bois. 111 p. <https://librairie.ademe.fr/produire-autrement/852-respire-recolte-des-menus-bois-en-foret.html>
22. SER, FBF (2021), Questions Réponses Bois énergie (SER, FBF, 2021) <https://franceboisforet.fr/wp-content/uploads/2021/05/questions-reponses-bois-energie-SER-FBF-web.pdf>
23. UICN France (2015), Bois-énergie et biodiversité forestière. (UICN France, 2015). https://uicn.fr/wp-content/uploads/2016/06/Energies_renouvelables_Bois-m6.pdf

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Part des différentes ressources de bois énergie consommées, selon le secteur (ADEME, 2022a).....	6
Tableau 2 : Potentiels impacts sur les sols des chaufferies collectives et industrielles.....	8
Tableau 3 : Surface équivalente à un térawattheure d'énergie primaire de plaquettes forestières selon différents choix de cultures sylvicoles ou agricoles (issus du rapport « Analyse du cycle de vie du bois énergie collectif et industriel » (ADEME, 2022c), les éléments à destination énergétique peuvent être des menus bois récoltés, des portions d'arbres ou des arbres entiers variant selon le scénarios choisis. Facteur de conversion : 1[TWh énergie primaire] = 377 192,28 [m ³ de bois])	10
Tableau 4 : Les potentiels impacts sur les sols de la récolte de biomasse à destination du bois énergie collectif et industriel.....	11
Tableau 5 : Flux de cendres sous foyer et d'ETM selon la quantité d'énergie primaire utilisée pour les chaufferies bois collectives et industrielles (ADEME, 2021b)	14
Tableau 6 : Centrale chaleur de Belle Beille - Approvisionnement et production de chaleur en 2020	15
Tableau 7 : Surfaces équivalentes à la production de 4936,8 m ³ de bois rond selon les choix sylvicoles définis dans le Tableau 3.....	15

FIGURES

Figure 1 - Capacité de production installée et surface occupée par les unités de chaufferies collectives / industrielles / tertiaires selon les scénarios ADEME Transition(s) 2050.....	16
Figure 2 : Surface de cultures dédiées et surfaces forestières nécessaires pour le maintien de de niveau de récolte de plaquettes forestières pour la filière collective et industrielle, selon différents modes de sylvicultures pour chaque scénario ADEME Transition(s) 2050. Remarque : chaque surface forestière est équivalente à la quantité d'énergie primaire du bois forêt mentionnée dans la figure précédente (exemple : pour 2020, 930 000 hectares de taillis – fertilité haute OU 1 617 300 hectares de taillis – fertilité moyenne sont nécessaire à la production de 19 TWh d'énergie primaire de bois forêt). Les modes de sylvicultures « Taillis – fertilité haute », « Taillis – fertilité moyenne », « Futaie douglas – fertilité moyenne à haute » et « Futaie feuillue – fertilité haute » sont issus des travaux de l'ADEME (ADEME, 2022c), le mode de syviculture « Mix France » est plus représentatif de la ressource forestière disponible au bois énergie et est issu d'estimations à partir des chiffres de l'IGN, du SER et de FBF (IGN, 2019 ; SER, FBF, 2021).	17
Figure 3 : Les besoins en énergie primaire pour assurer la production énergétique de la filière domestique et collective selon les différents scénarios ADEME Transition(s) 2050. Remarque : La catégorie « Autres » regroupe les produits connexes de scierie, les déchets bois, le bois hors forêt (haies, verger, agroforesterie), les granulés, liqueur noire.	18
Figure 4 : Estimation de la quantité de cendres conformes à l'épandage produite ainsi que les surfaces agricoles correspondantes (pour un taux d'épandage de 2t/ha par an).....	19

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, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - 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.

Sol et bois énergie collectif et industriel

Cette étude vise à évaluer les surfaces nécessaires au développement du bois énergie pour les chaufferies collectives et industrielles. Elle propose des références surfaciques à la puissance installée ou à l'énergie produite, et évalue les surfaces nécessaires pour atteindre l'objectif de neutralité carbone à 2050 selon les scénarios proposés par l'ADEME dans Transition(s) 2050 (ADEME, 2021). L'analyse a permis d'identifier plusieurs enjeux pour les sols et leur usage au regard du déploiement du bois énergie en France métropolitaine.

- Le développement du bois-énergie présente des enjeux potentiels sur les sols, en particulier sur sa qualité, durant les différentes étapes clés de la filière : de la production de bois à l'épandage des cendres de chaufferies.
- Les principaux enjeux concernent la mise en œuvre de bonnes pratiques de préservation des sols à la production et à la récolte de bois, avec des surfaces forestières concernées pouvant atteindre plusieurs millions d'hectares à l'horizon 2050 selon les scénarios Transition(s) 2050. Celles-ci doivent aller de pair avec une sylviculture permettant la production de bois d'œuvre et un usage des bois en cascade.