

RAPPORT D'ETUDE

Constitution de valeurs GES dans la filière bois-énergie française (Directive RED)



Version 2 du 18/12/2025

Ce document remplace la Version 1 « Constitution de valeurs GES dans la filière bois-énergie française (Directive RED-II) Décembre 2023 »

Réalisé par :



Coordonné par :



Avec le soutien de :



Et la contribution de :



RESUME

Ce rapport a pour objectif d'établir des valeurs standards d'émissions de GES pour des combustibles bois actuellement non représentés dans la directive européenne RED : le bois hors forêt (plaquettes bocagères, plaquettes paysagères, et plaquettes issues de vergers), le bois déchet (bois A et bois B) et les résidus des filières papetières (boues papetières, liqueurs noires). La méthodologie du JRC est appliquée à ces combustibles, et complétée par des références issues majoritairement de la littérature, ou à dires d'experts faute de données existantes. La Figure 1 ci-dessous présente les résultats obtenus pour les valeurs standards d'émissions de GES pour un distance de 0 à 500 km.

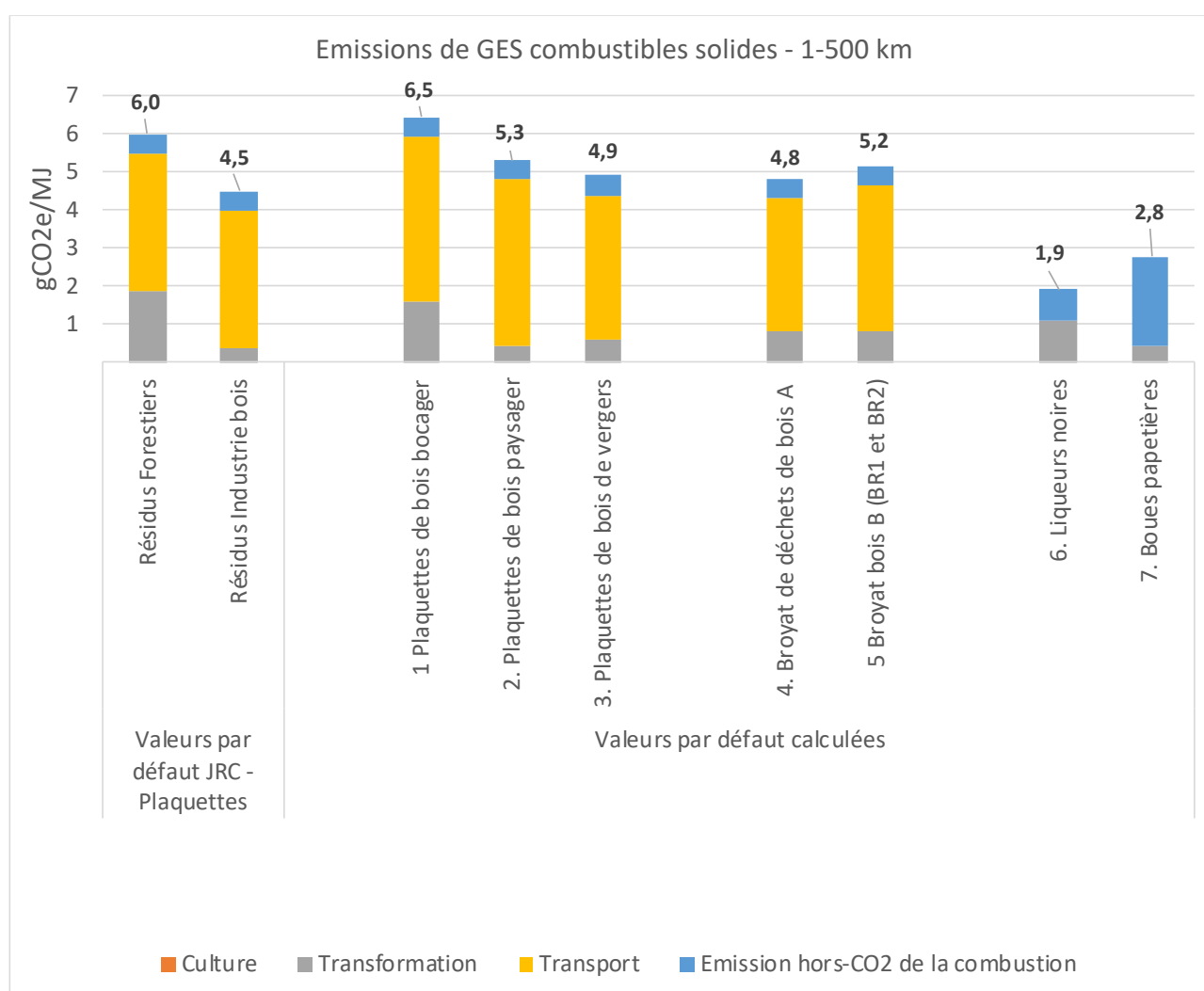


Figure 1 : Aperçu des résultats pour la tranche 1-500 km (valeurs standards)

SOMMAIRE

1	Introduction et contexte de la mission	5
1.1	Enjeux de la directive RED dans la filière bois-énergie.....	5
1.2	Filières de production de combustible solide	5
2	Méthodologie de calcul.....	6
2.1	Rappels de la méthodologie de la directive RED	6
2.1.1	Émissions de GES.....	6
2.1.2	Réductions d'émissions	6
2.1.3	Valeurs types et valeurs par défaut	8
2.1.4	Valeurs d'émissions de GES existantes et seuils RED	8
2.2	Données et hypothèses de référence.....	9
2.2.1	Principales sources des données	9
2.2.2	Pouvoir de réchauffement global	10
2.2.3	Utilisation de diesel	10
2.2.4	Utilisation d'électricité et de gaz naturel	11
2.2.5	Émissions à l'usage du combustible	11
2.2.6	Schémas de transports intermédiaires.....	12
2.2.7	Schémas de transports des produits finaux	14
2.2.8	Schémas d'humidité	15
2.2.9	Calcul des rendements en cogénération	16
2.3	Sélection de facteurs d'émissions dans la bibliographie disponible	18
2.3.1	Récolte de bois bocager	18
2.3.2	Broyage, affinage, déferrailage	19
2.3.3	Stockage avec perte d'humidité	21
2.4	Établissement de facteurs de procédés spécifiques aux filières étudiées	22
2.4.1	Tri des déchets bois	22
2.4.2	Four à liqueur noire et évaporation des liqueurs noires.....	23
4	Bois hors forêt	26
4.1	Schéma 1 : Plaquettes de bois provenant de haies bocagères.....	26
4.2	Schéma 2 : Plaquettes paysagères	28
4.3	Schéma 3 : Plaquettes de bois issus de vergers	29
4.4	Résultats.....	31
4.4.1	Émissions de GES filières bois hors forêt - Valeurs types et standards	31
4.4.2	Réductions d'émissions	33
5	Bois déchet.....	34
5.1	Schéma 4 : Broyat de déchets de bois A et déchets d'emballages	34

5.2	Schéma 5 : Broyat de déchet de bois B (BR1 et BR2)	35
5.3	Résultats	37
5.3.1	Émissions de GES Filières Bois-Déchet	37
5.3.2	Réductions d'émissions	38
6	Filières papetières	40
6.1	Schéma 6 : Liqueurs noires	40
6.2	Schéma 7 : Boues papetières.....	42
6.3	Résultats	43
6.3.1	Émissions de GES filières papetières	43
6.3.2	Réductions d'émissions	44
7	Cogénération type	45
7.1	Valeurs de référence du JRC.....	45
7.2	Valeurs pour les nouveaux combustibles	49
8	Tables des figures et tableaux.....	51
8.1	Table des figures.....	51
8.2	Table des tableaux	52
9	Bibliographie	54
10	ANNEXE	55

1 INTRODUCTION ET CONTEXTE DE LA MISSION

1.1 Enjeux de la directive RED dans la filière bois-énergie

Dans le cadre de la directive européenne sur les énergies renouvelables (RED), il est nécessaire d'estimer la réduction d'émissions de GES des filières de production d'énergie renouvelable. Les annexes de la directive présentent des valeurs par défaut pour différents combustibles en fonction de leur moyen de production. En ce qui concerne la filière bois-énergie, des valeurs par défaut pour des combustibles solides sont présentées à l'annexe VI de la directive, mais celle-ci n'intègre pas certaines matières clé dans les filières françaises. C'est notamment le cas pour le bois hors forêt (haies, bocages, parcs et jardins...), les déchets de bois (emballages, bois B) et les résidus liquides des filières papetières (liqueurs noires, boues papetières). Par ailleurs, la directive précise des pourcentages de réduction d'émissions par rapport à la référence fossile pour les usages thermiques et électriques seuls, mais pas pour les usages en cogénération. Les acteurs français du bois-énergie souhaitent disposer de valeurs standards fiables d'émissions de GES pour ces filières et la production d'énergie en cogénération.

Ce rapport a pour objectif d'établir des valeurs de référence pour ces différents cas de figure en se basant sur la méthodologie de calcul des émissions de GES de la directive RED (en particulier celle décrite par le JRC, 2017). Ces valeurs sont établies de manière rigoureuse et transparente afin qu'elles puissent également être reconnues comme des références fiables par les instances nationales et européennes. Les valeurs sont calculées pour le contexte Français lorsque les données sont disponibles.

1.2 Filières de production de combustible solide

Les émissions de GES sont calculées pour les filières de production des combustibles solides suivants :

1. Plaquettes bocagères
2. Plaquettes paysagères
3. Plaquettes de bois d'arrachage de vergers
4. Broyat de déchets de bois A
5. Broyat de déchets de bois B (BR1 et BR2)
6. Liqueurs noires
7. Boues papetières

Des taux de réduction d'émission standards en cogénération seront donnés pour les installations de cogénération dont le rendement énergétique est d'au moins 75%.

2 METHODOLOGIE DE CALCUL

2.1 Rappels de la méthodologie de la directive RED

2.1.1 Émissions de GES

Conformément à l'annexe VI de la directive RED en vigueur, les émissions exprimées en gCO₂e/MJ de combustible sont calculées de la manière suivante pour l'ensemble des biomasses :

$$E = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr}$$

- E = le total des émissions résultant de la production du combustible avant la conversion de l'énergie,
- e_{ec} = les émissions résultant de l'extraction ou de la culture des matières premières,
- e_l = les émissions annualisées résultant de modifications des stocks de carbone dues à des changements dans l'affectation des sols,
- e_p = les émissions résultant de la transformation,
- e_{td} = les émissions résultant du transport et de la distribution,
- e_u = les émissions résultant du carburant utilisé,
- e_{sca} = les réductions des émissions dues à l'accumulation du carbone dans les sols grâce à une meilleure gestion agricole,
- e_{ccs} = les réductions des émissions dues au piégeage et au stockage géologique du CO₂, et
- e_{ccr} = les réductions des émissions dues au piégeage et à la substitution du CO₂.

Certains des termes de cette équation doivent être spécifiquement documentés selon les pratiques réelles et ne peuvent donc faire l'objet d'une évaluation par défaut. Aussi, dans l'établissement des valeurs type par défaut d'émission de GES, seuls seront pris en compte : e_{ec} ; e_p ; e_{td} et e_u .

L'ADEME a élaborée une méthode intégrant un périmètre plus large en intégrant les effets de variation du carbone biogénique, ce qui permettrait à terme de mieux éclairer l'impact du bois énergie sur le changement climatique. Cette approche est plus complète cependant elle est encore largement exploratoire. La méthodologie retenue ici est celle plus classique utilisée par les textes européens.

2.1.2 Réductions d'émissions

Conformément à l'annexe VI de la directive RED en vigueur, les réductions d'émissions associées à ces combustibles, exprimées en pourcentage de réduction par rapport à une référence fossile, sont calculées de la manière suivante :

$$\text{RÉDUCTION} = (EC_{F(h\&c,el)} - EC_{B(h\&c,el)}) / EC_{F(h\&c,el)}$$

sachant que:

$EC_{B(h\&c,el)}$ = le total des émissions provenant de la chaleur ou de l'électricité,

$EC_{F(h\&c,el)}$ = le total des émissions provenant du combustible fossile de référence pour la chaleur utile et l'électricité.

Les valeurs fossiles de référence sont fixées comme étant de 80 gCO₂e/MJ pour l'usage en chaleur seule, et 183 gCO₂e/MJ pour l'usage en électricité seule.

Ces valeurs fossiles sont comparées aux émissions de GES de l'énergie produite à partir des combustibles, en prenant en compte le rendement énergétique. Dans le cas d'une valorisation thermique ou électrique simple, les émissions affectées à l'énergie sont respectivement :

$$EC_h = \frac{E}{\eta_h}$$

$$EC_{el} = \frac{E}{\eta_{el}}$$

Avec η_h le rendement thermique par défaut fixé à 85% dans la directive, et η_{el} le rendement électrique par défaut fixé à 25%.

Dans le cas de la cogénération, un coefficient d'allocation exergetique est utilisé pour distinguer la partie du coefficient d'émission associée à la production d'électricité de celle associée à la production de chaleur. Cela se traduit par :

$$EC_{el} = \frac{E}{\eta_{el}} \left(\frac{C_{el} \cdot \eta_{el}}{C_{el} \cdot \eta_{el} + C_h \cdot \eta_h} \right) \quad EC_h = \frac{E}{\eta_h} \left(\frac{C_h \cdot \eta_h}{C_{el} \cdot \eta_{el} + C_h \cdot \eta_h} \right)$$

$E_{Ch,el}$ = le total des émissions de gaz à effet de serre du produit énergétique final,

E = le total des émissions de gaz à effet de serre du combustible avant la conversion finale,

η_{el} = le rendement électrique, défini comme la production annuelle d'électricité divisée par l'apport annuel d'énergie, sur la base de son contenu énergétique,

η_h = le rendement thermique, défini comme la production annuelle de chaleur utile divisée par l'apport annuel d'énergie sur la base de son contenu énergétique,

C_{el} = la fraction de l'exergie dans l'électricité, et/ou l'énergie mécanique, fixée à 100 % ($C_{el} = 1$),

C_h = le rendement de Carnot (fraction de l'exergie dans la chaleur utile).

Le rendement de Carnot (C_h) pour la chaleur utile à différentes températures est défini selon la formule suivante:

$$C_h = \frac{T_h - T_0}{T_h}$$

sachant que:

T_h = la température, mesurée en température absolue (kelvin) de la chaleur utile au point de fourniture,

T_0 = la température ambiante, fixée à 273,15 kelvins (soit 0 °C).

Par ailleurs, si la température d'utilisation est utilisée pour chauffer des bâtiments à moins de 150°C, le rendement de Carnot utilisé est celui pour une température de 150°C (soit 0,3546).

Pour l'usage en cogénération, la directive ne fournit actuellement pas de valeurs de rendement thermique et électrique par défaut pour établir les réductions d'émissions, qu'il convient donc de calculer indépendamment. Par ailleurs, elle ne précise pas si et comment les réductions d'émissions en électricité et en chaleur peuvent être agrégées au sein d'un seul indicateur.

2.1.3 Valeurs types et valeurs par défaut

Dans les annexes de la directive et notamment l'annexe VI, des valeurs d'émissions de GES type et par défaut sont établies, ainsi que les réductions d'émissions associées. Les valeurs types (émission ou réduction d'émission) sont calculées sur la base de la représentation de schémas-types de production. Les valeurs par défaut, qui doivent être utilisées faute de calcul spécifique sur un combustible, sont déterminées pour les combustibles solides en majorant les émissions du procédé de transformation, du transport et de l'utilisation du combustible de 20% (JRC, 2014¹).

2.1.4 Valeurs d'émissions de GES existantes et seuils RED

A titre de comparaison, les valeurs d'émission de GES actuellement couvertes par la directive sont présentées dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Valeurs types et par défaut actuellement déterminées dans l'annexe de la directive RED

Combustible	Provenance	FACTEUR D'EMISSION (gCO ₂ e/MJ)	
		TYPE	PAR DEFAUT
Plaquettes - Résidus Forestiers	1-500 km	5	6
	500 - 2 000 km	7	9
	2 500 - 10 000 km	12	15
	> 10 000 km	22	27
Plaquettes - TCR (Eucalyptus)	2 500 - 10 000 km	25	27
Plaquettes - TCR (Peuplier - Fertilisé)	1-500 km	8	9
	500 - 2 000 km	10	11
	2 500 - 10 000 km	15	18
	> 10 000 km	25	30
Plaquettes - TCR (Peuplier - Non fertilisé)	1-500 km	6	7
	500 - 2 000 km	8	10
	2 500 - 10 000 km	14	16
	> 10 000 km	24	28
Plaquettes - Bois rond	1-500 km	5	6
	500 - 2 000 km	7	8
	2 500 - 10 000 km	12	15
	> 10 000 km	22	27
Plaquettes - Résidus Industrie bois	1-500 km	4	5
	500 - 2 000 km	6	7
	2 500 - 10 000 km	11	13
	> 10 000 km	21	25

¹ JRC. (2014). *Solid and gaseous bioenergy pathways, input values and GHG emissions*. Publications Office.

La directive impose une réduction d'émission de GES de 70% ou 80% selon les cas². Ces seuils permettent de déterminer un coefficient d'émissions maximales pour les combustibles solides, lesquelles sont présentées dans le Tableau 2 :

Tableau 2 : Émissions de GES maximales prévus par la directive RED

	70% de réduction	80% de réduction
E max – usage thermique seul	24 gCO ₂ e/MJ	16 gCO ₂ e/MJ
E max – usage électrique seul	55 gCO ₂ e/MJ	37 gCO ₂ e/MJ

La frise ci-après présente le détail des exigences de réduction d'émission de GES selon la date de mise en service d'une installation et sa puissance, en fonction de l'agenda prévu par la directive. Les tableaux de résultats de réduction d'émission de GES présentés au fil du document indiquent la conformité aux exigences avant et après le 1^{er} janvier 2026.

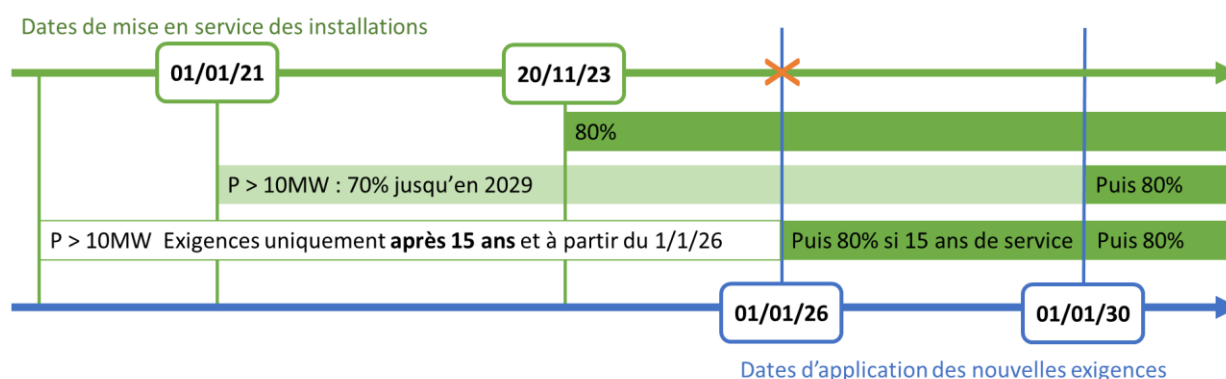


Figure 2 : Exigences de réductions de GES selon l'évolution RED III de l'Article 29.10 de RED II (CIBE)

2.2 Données et hypothèses de référence

2.2.1 Principales sources des données

Les données utilisées dans le présent rapport se basent principalement sur deux études de référence et leurs sources :

- JRC. (2017). *Solid and gaseous bioenergy pathways: input values and GHG emissions*. <https://doi.org/10.2790/27486>,
ci-après dite 'JRC'
- ADEME, Logel, X., Lhotellier, J., de Caemel, B., Alexandre, C., Cousin, S., Vial, E., Dubilly, A., Buitrago, M., Durand, M., Machefaux, E., & Mousset, J. (2022). *Analyse du Cycle de Vie du bois énergie collectif et industriel. Rapport final*.
ci-après dite 'Ademe'

Les autres sources utilisées seront précisées dans leurs contextes.

² Article premier paragraphe 19) de la directive (UE) 2023/2413 dite RED III, modifiant l'article 29 paragraphe 10 de la directive (UE) 2018/2001 dite RED II

2.2.2 Pouvoir de réchauffement global

Conformément aux exigences de la directive RED, les émissions de GES autres que le CO₂ (c'est-à-dire de CH₄ et de N₂O) sont prises en compte. Le pouvoir de réchauffement global des différents gaz à effet de serre sont rappelés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Pouvoir de réchauffement global des gaz à effet de serre (JRC)

	gCO ₂ e/g
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298

2.2.3 Utilisation de diesel

La principale source d'émissions de GES lors des opérations de transformation des combustibles provient de l'utilisation de machines fonctionnant au diesel. Le facteur d'émission est donc généralement calculé par l'estimation d'une consommation de diesel exprimée en MJ_{diesel}/MJ_{produit}. Conformément aux calculs du JRC, le facteur d'émission utilisé pour l'utilisation de diesel (comprenant l'approvisionnement et la combustion) est de 95,1 gCO₂e/MJ.

A ce facteur, il faut ajouter les émissions hors CO₂ liées à l'utilisation de diesel, qui dépend notamment de l'équipement utilisé. Le JRC documente ces valeurs pour certains procédés, en se basant sur les émissions hors CO₂ de la combustion de diesel dans des machines agricoles et forestières (utilisées dans les schémas dont il est question dans la présente note). Lorsque seule la consommation de diesel est connue, des émissions de GES hors CO₂ sont donc ajoutées selon la même méthodologie, en appliquant les coefficients présentés dans le Tableau 4 :

Tableau 4 : Émissions hors-CO₂ de la combustion de diesel par des machines agricoles et forestières

	mg/MJ _{diesel}
CH ₄	1,14
N ₂ O	3,20

Source : European Environment Agency (EEA). (2023). *EMEP/EEA Air pollutant emission inventory Guidebook* ; 1.A.4.c.ii - Table_3-1_02³

Note : PCI Diesel : 43,1 MJ/kg

Dans certains cas, ces émissions ne peuvent pas être calculées car les seules données disponibles dans la littérature sont des données globales d'émissions de GES, directement en gCO₂e (et pas en consommation de diesel).

³ Cette référence est celle utilisée par le JRC pour les émissions hors CO₂ du diesel.

2.2.4 Utilisation d'électricité et de gaz naturel

Lorsque des procédés utilisent de l'électricité, le facteur d'émission associé est celui recommandé par l'acte délégué de la directive RED-II, correspondant au mix électrique moyen français, qui diffère selon le type de réseau (HT, MT, BT⁴). Lorsque des procédés utilisent du gaz naturel, le facteur d'émission du gaz naturel est celui donné par le JRC pour l'approvisionnement et la combustion. Ces valeurs sont présentées dans le Tableau 5 :

Tableau 5 : Facteur d'émission de l'électricité et du gaz naturel

	gCO ₂ e/kWh	gCO ₂ e/MJ	Source
Électricité Haute tension (100-400 kV) – France	81	22,50	1
Électricité Moyenne tension (10-20 kV) – France	82	22,78	1
Électricité Basse tension (200-400 V) – France	86	23,89	1
Gaz naturel	237	65,9	2

Source :

- (1) Commission Européenne. (2022). RÈGLEMENT D'EXÉCUTION (UE) 2022/996 DE LA COMMISSION du 14 juin 2022 concernant les règles relatives à la vérification du respect des critères de durabilité et de réduction des émissions de gaz à effet de serre et des critères relatifs au faible risque d'induire des changements indirects dans l'affectation des sols. *Journal Officiel de l'Union Européenne*.
- (2) JRC

2.2.5 Émissions à l'usage du combustible

Les émissions liées à l'utilisation du combustible (E_u) prennent en compte les émissions de GES hors CO₂ biogénique. Le JRC se base sur la base de données GEMIS pour distinguer les émissions attribuables à la combustion de plaquettes et de pellets de bois (ces derniers n'étant pas intégrés à la présente étude).

Dans cette base de données, aucune distinction n'est faite entre le bois non adjuvanté et le bois adjuvanté en termes d'émissions de GES hors CO₂. Parallèlement, aucune indication sur une telle différence d'émission n'est documentée dans les autres références de coefficients d'émissions (GIEC 2006, OMINEA). De plus, les émissions de GES ne sont pas sujettes à des valeurs limites d'émission, et leur comptabilisation en sortie d'installation est peu documentée dans la littérature technique. Pour ces raisons, les mêmes valeurs d'émissions de GES hors CO₂ seront appliquées aux plaquettes de bois, quelle que soit leur provenance (bocage, verger, déchets A, déchets B).

⁴ Haute Tension, Moyenne Tension, Basse Tension

Concernant les liqueurs noires, la base de données GEMIS fournit une valeur d'émissions de GES hors CO₂ qui est donc utilisable pour la présente étude.

Concernant les boues papetières, il n'existe pas de références spécifiques concernant leurs valeurs d'émissions de GES hors CO₂. Dans la base de données de comptabilisation des GES à l'échelle nationale (OMINEA), les mêmes valeurs sont utilisées pour les 'boues de stations d'épuration' et les 'déchets de bois'. Ces valeurs, bien supérieures à celles utilisées par le JRC pour les plaquettes, seront utilisées pour la combustion de boues papetières. Le Tableau 6 ci-dessous récapitule les valeurs utilisées par le JRC (qui se base sur la base de données GEMIS), complétées des valeurs nécessaires dans la présente note pour les boues papetières et les liqueurs noires.

Tableau 6 : Émissions hors CO₂ en fonction à l'utilisation des combustibles

	CH ₄ (g/MJ)	N ₂ O (g/MJ)	CO ₂ e (g/MJ)	Source
Combustion de plaquettes de bois	0,005	0,001	0,41	1
Combustion de liqueurs noires	0,0031	0,0021	0,69	2
Combustion de boues papetières	0,03	0,004	1,94	3*

Sources :

(1) GEMIS, version 4.9; wood-chips-forest-heat plant-1 MW-EU-2005 ; d'après JRC

(2) GEMIS, version 5.0; 2014 ; black-liquor-boiler-EU-2020 (with FGD)

(3) CITEPA, 2023. BDD OMINEA – Edition 20.1 ; OSNAP 030101 ; NAPFUE 116 et 118

* Valeur extrapolée sur la base des déchets de bois et des boues de STEP

2.2.6 Schémas de transports intermédiaires

Le JRC n'intègre qu'une seule modalité de transport routier, qui est le camion de 90 m³ (charge utile 27t). Pour représenter les étapes des transports intermédiaires, différents types de camions seront considérés, en utilisant les données de la base carbone Ademe. Le facteur d'émission retenu par le JRC correspond au facteur de l'Ademe pour un camion de 40 m³ avec un taux de remplissage de 50% (hypothèse du retour à vide). La même hypothèse est donc prise sur les autres types de véhicules. Ces valeurs sont représentées dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Types de véhicules et facteurs d'émission associés

Type de camion (volume en m ³)	Poids total t	Charge utile t	Facteur d'émission gCO ₂ e/tkm	Référence
90 m³	40t	27	78	(1)
40 m³	25t	12	140	(2)
15m³	7,5t	4	267	(3)
autre	<15	4	267	(4)

Sources :

(1) JRC⁵

(2) Base Carbone Ademe - Transport en camion 14-20t (10t) France (dont parc, utilisation et infrastructure) (50%) [tkm], FR

(3) Base Carbone Ademe - Transport en camion 7,5t (3t) France (dont parc, utilisation et infrastructure) (50%) [tkm], FR

(4) Base Carbone Ademe - Transport en camion non spécifié France (dont parc, utilisation et infrastructure) (50%) [tkm], FR

La distance parcourue sera évaluée de la même manière que dans le JRC, avec des valeurs en tonnes-kilomètres, calculées de la manière suivante :

$$Distance \left[\frac{t \cdot km}{MJ_{produits}} \right] = \frac{Load[t] \times [km]}{(Load - tank)[t] \cdot PCI_{sec} \left[\frac{MJ_{produit}}{kgMS} \right] \cdot tauxMS \left[\frac{kgMS}{kgMB} \right]}$$

Avec *Load* la charge utile du camion et *tank* le poids du conteneur, qui en l'occurrence est égal à 1t étant donné que toutes les matières transportées sont solides (d'après la méthode de calcul du JRC).

Concernant la distance des transports intermédiaires, c'est-à-dire les apports sur différentes plateformes et sites de traitement, les hypothèses sont faites à dire d'experts de chaque filière et maximisantes. En référence, la distance utilisée en ACV par l'Ademe est un transport sur une plateforme de préparation de pellets de 40 km par un camion de 90 m³, et celle utilisée par le JRC est de 50 km avec le même type de camion. Les choix suivants ont été retenus :

- (1) Pour le bois hors forêt, les plateformes intermédiaires sont situées à proximité des chantiers, avec une distance retenue de 20km à dire d'experts. Étant donné que les volumes ne justifient pas nécessairement un transport par camion de 90m³, le type de véhicule considéré est donc un camion de 40m³.
- (2) Pour le bois déchets, une distance de 50 km est retenue à dire d'expert (et cohérente avec les distances utilisées par le JRC) comme représentative du maillage territorial des plateformes de gestion des déchets bois A et B. Dans le cas du bois B, plusieurs transports peuvent être possibles (par exemple, plateforme tri puis plateforme broyage). Le schéma retenu est un cas de figure majorant impliquant deux transports de 50 km, soit 100 km au total. Le type de véhicule considéré est un camion de 90m³ pour les déchets de bois (en cohérence avec les hypothèses du JRC et de l'Ademe).
- (3) Le transport des déchets par les consommateurs (déchetteries) est exclu du cadre, car dans la logique de production de déchets, ce transport est effectué dans tous les cas et n'est pas imputable spécifiquement au bois énergie.

Ces hypothèses sont retranscrites dans le Tableau 8 :

⁵Cohérent avec Base Carbone Ademe Transport en camion 34-40t (25t) France (dont parc, utilisation et infrastructure) (50%) [tkm], FR

Tableau 8 : Schémas de transports pour les produits intermédiaires en fonction des différentes filières.

	Distance (km)	Type de camion
Références		
Ademe - transport vers plateforme (sauf plaquettes sèches pour petites chaufferies)	40	90m ³ (25t)
Ademe - transport vers chaufferie	35	90 m ³ (25t)
JRC - transport de produits intermédiaires	50	90 m ³ (25t)
FACTEURS UTILISÉS DANS L'ÉTUDE		
Bois Hors Forêt		
1. Plaquettes de bois bocager - Plateforme de stockage intermédiaire	20	40m ³ (12t)
2. Plaquettes paysagères	20	40m ³ (12t)
3. Plaquettes de bois d'arrachage de vergers	20	40m ³ (12t)
Bois déchet		
4. Broyat de déchets de bois A	50	90m ³ (25t)
5. Broyat bois B - Apporté en plateforme de tri (broyé sur site)	100	90m ³ (25t)
Papeterie		
6. Liqueurs noires	-	-
7. Boues papetières	-	-

2.2.7 Schémas de transports des produits finaux

Pour le transport des produits finaux, nous utilisons les schémas d'exports proposés par le JRC, rappelés dans le Tableau 9. A titre de comparaison, l'Ademe considère une distance de transport vers la chaufferie de seulement 35 km. Afin de mieux représenter les distances réelles des usages infranationaux, une échelle 1-200 km, est ajoutée aux schémas du JRC (dont la distance minimale de transport est de 500km).

Tableau 9 : Distances de transport types des produits finaux. Source : JRC.

*Cette valeur a été ajoutée en complément des autres valeurs.

	Routier (90m3)	Ferroviaire	Maritime
1-200 km*	200	-	-
1-500 km	500	-	-
500 - 2 000 km	250	-	2 000
2 500 - 10 000 km	200	-	8 000
> 10 000 km	-	750	16 500

Les distances de transport des étapes intermédiaires, précédemment décrites dans le Tableau 8, ne varient pas selon les scénarios de distance finale⁶.

⁶ Dans les schémas existants du JRC, la distance du transport intermédiaire routier varie, uniquement pour le cas d'un approvisionnement à plus de 10 000 km. Leur hypothèse est que le bois vient des forêts canadiennes dans lesquelles les distances parcourues avant transformation sont plus importantes. Étant donné que dans les schémas considérés aucun intrant ne provient de la forêt, cette distinction n'a pas été reprise.

Note :

Au-delà de 2000 km de transport, les combustibles ne peuvent pas avoir été produits en France, et les données utilisées dans le contexte Français sont peu pertinentes. Ces valeurs sont néanmoins calculées par analogie avec la méthode du JRC.

Pour le transport maritime et ferroviaire, la distance est calculée selon la formule du JRC suivante :

$$Distance \left[\frac{t.km}{MJ_{produits}} \right] = \frac{\times [km]}{PCI_{sec} \left[\frac{MJ_{produit}}{kgMS} \right] \times tauxMS \left[\frac{kgMS}{kgMB} \right]}$$

Pour le transport maritime, le facteur d'émission dépend de la distance parcourue et de la densité apparente des matières. D'après la méthodologie employée par le JRC, en considérant une densité apparente de 0,22 t/m³ (référence utilisée pour les plaquettes de bois⁷), les facteurs d'émission utilisés sont décrits dans le Tableau 10. Concernant le transport ferroviaire, le JRC utilise un facteur d'émission associé à une consommation de diesel (utilisé dans les schémas d'imports de plaquettes du Canada). Ces hypothèses sont conservées pour les schémas de transport de produits finaux longue distance, ainsi que le facteur d'émission utilisé par le JRC présenté dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Facteurs d'émission utilisés pour le transport maritime et ferroviaire

Type transport	Densité apparente t/m3	Facteur d'émission gCO2e/tkm	Référence
Maritime - Handysize (≤2000 km)	0,22	24,21	(1)
Maritime - Supramax (> 2000 km)	0,22	15,45	(1)
Ferroviaire diesel	/	24,09	(1)

Sources : JRC

2.2.8 Schémas d'humidité

Étant donné que le transport est le principal poste d'émission sur toutes les filières considérées, l'humidité des matières transportées joue un rôle non négligeable sur les émissions de GES totales des combustibles. Les humidités considérées dans le JRC et dans l'Ademe ainsi que les valeurs retenues dans l'étude sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

⁷ Ce facteur est bien applicable à tous les produits car il concerne uniquement le transport final. Dans le cadre de cette étude et hors filières papetières, tous les produits finaux sont des plaquettes.

Tableau 11 : Schémas d'humidités de référence et hypothèses retenues dans l'étude

Références		
Bois frais	50%	(1)
Bois séché (séchage naturel)	30%	(1)
Bois frais	45%	(2)
Bois séché (séchage forcé)	25%	(2)
Déchets de bois	20%	(2)
Valeurs retenues dans l'étude		
Bois bocager, bois paysager, bois de verger, à la récolte	40%	(3)
Bois bocager, bois paysager, bois de verger, après stockage (séchage non contrôlé)	37%	(3)
Bois déchet (bois A et bois B)	20%	(2)

Note :

Faute de données génériques existantes, l'humidité est considérée comme identique à celle des bois bocagers et paysagers (40%), mais il s'agit d'une hypothèse pessimiste compte tenu de certaines données existantes (par exemple, 20% d'humidité sur le bois de pommier mesuré par le CTIFL⁸).

Sources :

- (1) JRC
- (2) Ademe
- (3) Dires d'experts - Voir section 2.3.3. Stockage avec perte d'humidité

2.2.9 Calcul des rendements en cogénération

Afin de déterminer des valeurs de réduction d'émissions de GES pour un usage en cogénération, il est nécessaire de déterminer des valeurs de rendements énergétiques pour ce type d'unité :

- Le rendement électrique
- Le rendement chaleur
- Avec une température d'utilisation

Tels que définis dans la directive (voir section 2.1.2. Réductions d'émissions).

⁸ Grasselly, D., Lescourret, F., & Colleu, S. (2019). Chapitre 2. Le service d'approvisionnement en fruits. La production de fruits en France métropolitaine. In M.-C. Bopp (Ed.), *Services rendus par les cultures fruitières*. Tableau 14.

Les unités de cogénérations sont très variables d'un site à l'autre, en particulier en ce qui concerne l'utilisation de la chaleur qui est très dépendante des besoins locaux. Pour les installations de cogénération s'étant engagées sur un rendement énergétique d'au moins 75% (exemple : Appel d'offre CRE 5_3 de 2019), les valeurs de rendements électrique et thermique peuvent être déterminés à partir de :

- Les obligations réglementaires de la CRE (Commission de Régulation de l'Energie) (Appel d'offre 5_3 de 2019) auxquelles sont soumises toutes les installations en France
- Une hypothèse de ratio de production électricité / chaleur compris entre 0,2 et 0,35 (Source : BAT⁹). La valeur de 0,2 qui entraîne un coefficient de réduction d'émission légèrement inférieur est retenue comme hypothèse pessimiste.
- Une température d'utilisation de la chaleur de 150°C, étant donné qu'il s'agit d'une valeur plancher dans le calcul des réductions d'émissions associée aux usages en basse température. Une valeur d'usage basse température est retenue du fait de l'impossibilité de généraliser un usage haute température. Cette hypothèse pénalise les réductions d'émissions électriques et favorise les réductions d'émissions en chaleur. Il convient d'utiliser une donnée cohérente avec le projet et justifiable.

Les valeurs retenues pour l'exemple d'unités de cogénération avec un rendement d'au moins 75% sont données dans le Tableau 12 ci-dessous :

Tableau 12 : Exemple de valeurs utilisées pour décrire une unité de cogénération avec un rendement énergétique >75%

	Valeurs standards	Source
<i>Rendement électrique standards en cogénération</i>	13%	1
<i>Rendement thermique standards en cogénération</i>	63%	2
<i>Température de production de la chaleur en cogénération</i>	150 °C	1

Sources :

- (1) Ratio électricité / chaleur = 0,2 (BAT)
- (2) Rendement calculé d'après les cahiers des charges de la CRE que sont tenues de respecter les unités de cogénération dont le rendement cible est d'au moins 75%.

Les valeurs de réduction d'émissions pour l'électricité seule et la chaleur seule produites par les rendements décrits ci-dessus dans le Tableau 12 peuvent être calculées avec la méthode décrite par la directive. Par ailleurs, la directive ne propose pas de méthode pour synthétiser la réduction d'émissions de la cogénération. Il est proposé de synthétiser

⁹ Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Rodrigo Gonzalo, M., Giner Santonja, G., Roudier, S., & Delgado Sancho, L. (2015). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board*. <https://doi.org/10.2791/370629>

les réductions d'émissions associées à la partie électrique et thermique dans une seule valeur, avec la formule d'agrégation suivante :

$$RÉDUCTION = (x(FFC_{él} - EC_{él}) + y(FFC_{chal} - EC_{chal})) / (xFFC_{él} + yFFC_{chal})$$

avec x et y les proportions respectives d'énergie produite par rapport à l'énergie totale produite, soit :

$$x = \eta_{él} / (\eta_{él} + \eta_{chal}) \text{ et } y = \eta_{chal} / (\eta_{él} + \eta_{chal})$$

Note :

Il est également possible de faire une allocation exergétique, c'est-à-dire utiliser la même logique que l'allocation des émissions de GES avec :

$$x = \eta_{él}C_{el} / (\eta_{él}C_{el} + \eta_{chal}C_{chal}) \text{ et } y = \eta_{chal}C_{chal} / (\eta_{él}C_{el} + \eta_{chal}C_{chal})$$

Ce mode de calcul n'a pas été retenu dans cet exemple car l'allocation exergétique intervient déjà dans le calcul des coefficients d'émissions de GES. Par ailleurs, le choix de la méthode d'allocation fait en pratique très peu de différence dans le calcul final.

A noter que ce calcul synthétique pour la cogénération n'étant pas mentionné par la directive, le calcul chaleur et électricité reste nécessaire.

2.3 Sélection de facteurs d'émissions dans la bibliographie disponible

La représentation de nouvelles filières nécessite de déterminer le facteur d'émission à différentes sous-étapes. Il faut pour cela sélectionner des valeurs pertinentes dans la bibliographie disponible.

2.3.1 Récolte de bois bocager

Les différentes valeurs possibles pour les émissions de cette étape sont listées dans le Tableau 13. Le JRC propose actuellement deux méthodes : la récolte de résidus forestiers et la production et récolte de bois ronds, pour lesquels il propose une consommation de diesel et des émissions de GES hors CO₂ associées. L'Ademe fournit directement des coefficients d'émissions pour différentes pratiques de gestion sylvicole, dont trois pratiques pertinentes sont retenues dans le cadre de cette étude (taillis de feuillus, futaie de feuillus, et récolte des menus bois sous futaie de feuillus). Tous ces facteurs sont agrégés, si bien qu'il n'est pas possible de les subdiviser pour ne retenir que les émissions liées au périmètre concerné par les combustibles de la présente étude. Dans les filières où la récolte doit être prise en compte, le facteur d'émission utilisé sera celui dont le périmètre est le plus proche de la réalité des opérations sur le terrain. En l'occurrence, la coupe de bois de haies peut être convenablement décrite par le périmètre du cas "taillis de feuillus" de l'Ademe. Cela revient à imputer toute l'opération de récolte au bois énergie. Ce facteur d'émission est légèrement inférieur à celui de la récolte de résidus forestiers du JRC, mais

ce dernier intègre le dessouchage qui n'est pas pratiqué en récolte de bois bocager (voir Tableau 13). Ce facteur de l'Ademe ne détaille pas la consommation de diesel mais indique directement le résultat en émissions de CO₂. Ce résultat est donc considéré comme intégrant les émissions de GES hors CO₂.

Tableau 13 : Facteurs d'émissions - Collecte du bois bocager

	Diesel	CH4	N2O	CO2e	Périmètre	Utilisation dans la présente étude
	MJ/MJ	g/MJ	g/MJ	gCO2e/MJ		
JRC - Collecte de résidus forestiers	0,0120	9,2E-06	3,9E-05	1,15	Forwarding, Bundling/lifting; Oil use ; Forestry / Machinery transport ; Load/Unload ; Stump harvesting	
JRC - Production et récolte de bois rond (résineux)	0,0107	8,2E-06	3,4E-05	1,03	Seedling production and cultivation (from Aldentun (2002)); Soil scarification; Cut-over clearing; Fertilisation (energy for application of fertiliser); Cleaning; Regeneration; Logging; Forwarding to terminal	
Ademe - Taillis feuillus	/	/	/	0,97	Exploitation, Démembrement du houppier et évacuation, Débardage/ramassage	Schéma 1
Ademe - Futaie feuillus	/	/	/	0,75	Mise à disposition des plants et transport, Plantation, Éclaircie, Exploitation, Démembrement du houppier et évacuation, Débardage/ramassage, Arasage et destruction des souches	
Ademe - Futaie feuillus - Menu bois	/	/	/	0,58	Débardage/ramassage	

2.3.2 Broyage, affinage, déferailage

Le JRC et l'Ademe indiquent des valeurs de consommation de diesel associées à l'opération de broyage, décrites dans le Tableau 14. Le JRC propose un procédé unique, supposé décrire un ensemble diversifié de situations. L'Ademe distingue le broyage en bord de route (qui comprend l'acheminement du broyeur jusqu'au site) du broyage en plateforme qui se base sur une représentation plus précise des filières françaises. Elle fait notamment intervenir deux étapes de broyage : un broyage lent (concassage) et un broyage rapide, suivis d'une étape de criblage. Il est important de distinguer ces différents types de broyage.

Les procédés retenus selon les filières sont les suivants :

- Broyeurs mobiles (au champ, en bord de haie / route) : le facteur d'émission utilisé est issu la méthode ACV de l'Ademe pour le broyage en bord de route. Cette valeur correspond bien au cas spécifique en question, et intègre donc le périmètre pertinent. Elle est donc plus précise (par ailleurs, plus élevée) que celle du JRC qui agrège des situations très différentes.

- Broyage en plateforme de bois paysager (schéma 2) : selon les experts de la filière, une seule étape de broyage est réalisée. Il s'agit d'un broyage lent générant peu de fractions fines, car celles-ci sont peu valorisables. Aucune étape de criblage suite au broyage n'est considérée, car le criblage n'est pas nécessaire après un broyage lent. Par ailleurs, il n'est pas non plus requis pour l'approvisionnement des chaufferies visées par la directive RED. Le procédé utilisé pour décrire cette étape est celui proposé par le JRC, qui représente un procédé de broyage générique (utilisé aussi bien pour les résidus forestiers que pour le bois rond). Cette valeur est d'autant plus pertinente que le JRC l'utilise pour le broyage de résidus forestiers, situation très proche de celle considérée ici.
- Broyage en plateforme de bois déchets (bois A et B) : cette étape prend en compte l'énergie utilisée pour le broyage des déchets de bois A / déchets d'emballage sur la plateforme ainsi que le chargement de ces déchets dans le broyeur. Le déferrailage est intégré au broyage et n'induit pas de consommation d'énergie supplémentaire notable. Les opérations peuvent être assez diversifiées pour le conditionnement du bois. Il peut y avoir un ou deux broyages, et potentiellement un criblage (ADEME, 2016¹⁰). La logique a été ici de regrouper cette diversité sous l'appellation générique broyage/affinage/déferrailage, et de retenir le principe que deux opérations sont réalisées sur la plateforme : soit deux broyages soit broyage et criblage. Le facteur d'émission retenu pour représenter ces deux équipements est celui donné par l'Ademe pour la combinaison concassage et broyage rapide.

Tableau 14 : Facteurs d'émission – Broyage. *Ratio diesel EEA_EMEP

	Ratio intrant MJ/MJ	Diesel MJ/MJ	CH4 g/MJ	N2O g/MJ	CO2e gCO2e/MJ	Utilisation dans la présente étude
JRC - Broyage de résidus forestiers	1,025	0,0034	2,6E-06	1,1E-05	0,32	Schémas 2
Ademe - Broyage bord de route	1,00	0,0051	5,9E-06*	1,6E-05*	0,49	Schémas 1 et 3
Ademe - Concassage	1	0,0035	4,0E-06*	1,1E-05*	0,34	
Ademe - Broyage rapide	1	0,0035	4,0E-06*	1,1E-05*	0,34	
Ademe - Concassage + Br rapide	1	0,0067	7,6E-06*	2,1E-05*	0,64	
Ademe - Criblage	1,176	0,0009	1,0E-06*	2,8E-06*	0,08	
Broyage - Affinage - Déferrailage						Schémas 4 et 5
Bois Déchet (Choix méthodologique de l'étude pour le bois déchet)	1	0,0067	7,6E-06*	2,1E-05*	0,64	

¹⁰ ADEME, CEDEN, Biomasse Normandie, & FCBA. (2016). ERCIBEN. État de l'art de la gestion des déchets de bois en Europe.

2.3.3 Stockage avec perte d'humidité

Dans les filières en bois hors forêt, il n'y a pas de séchage piloté, mais un stockage temporaire qui implique une perte d'humidité, qui n'implique pas de consommation énergétique dédiée. Dans les références existantes, seuls des processus de séchage impliquant une forte réduction en humidité sont représentés. Le processus de séchage comporte deux paramètres clés :

- La perte en MS (dégradation naturelle par des micro-organismes) qui augmente l'impact des étapes en amont du séchage (car il faut alors plus de MS récoltée pour parvenir à 1 MJ final)
- La perte en humidité, qui diminue l'impact des étapes de transport en aval.

L'Ademe et le JRC proposent deux processus de séchage différents qui correspondent dans les deux cas à une perte d'humidité de 20%, et se distinguent par un taux de perte en MS différent. La valeur du JRC correspond à un séchage générique non contrôlé, similaire à ce qui intervient dans la gestion des bois hors forêts, tandis que les valeurs de l'Ademe concernent un séchage contrôlé destiné aux petites installations. Ces deux références sont donc éloignées de ce qui est observé par les experts, c'est-à-dire une très faible perte d'humidité au cours du stockage sur la plateforme intermédiaire. Pour représenter le stockage avec perte d'humidité, les choix méthodologiques suivants ont donc été faits :

- **Perte d'humidité** : déterminée à dire d'expert, l'humidité passe de 40% lors de la collecte à 37% lors du transport. La valeur de collecte est une médiane entre les valeurs de l'Ademe et du JRC, et la faible perte en humidité permet de ne pas trop minorer la part du transport en aval (l'humidité finale est plus élevée que dans les deux références).
- **Perte de MS** : la valeur JRC de 5% est choisie. Cette valeur majore l'impact des étapes amont (étant donné que cette valeur est donnée pour une perte d'humidité de 20%, alors que la perte d'humidité retenue n'est ici que de 3%).

Tableau 15 : Procédés de séchage

	Ratio intrant			Utilisation dans la présente étude
	MJ/MJ	H in	H out	
JRC - Séchage en bord de route	1,05	50%	30%	
Ademe - Séchage naturel	1,15	45%	25%	
Stockage avec perte d'humidité (Choix méthodologique de l'étude)	1,05	40%	37%	Schémas 1 et 2

2.4 Établissement de facteurs de procédés spécifiques aux filières étudiées

Les filières étudiées mobilisent des procédés qui n'ont pas été représentés à des fins de bilan GES ou d'ACV. Cette section présente la méthodologie utilisée au cas par cas pour ces différents procédés.

2.4.1 Tri des déchets bois

Les émissions de GES des opérations de tri sont à ce jour très mal documentées, a fortiori sur les filières bois. Deux modalités de tri sont possibles : soit du tri automatisé et électrifié dans des usines de tri de déchets mélangés, soit du tri manuel (à la pelle mécanique) en plateforme bois, visant à séparer le bois déchet destiné au recyclage matière de celui destiné à la valorisation énergétique. Sur les filières de gestion des bois A et bois B, le tri est majoritairement réalisé manuellement avant broyage¹¹. Pour documenter les émissions du tri manuel en plateforme bois, une consommation de gasoil a été déterminée sur la base des travaux de l'Ademe, et complétée par les émissions de GES hors CO₂ associée à cette consommation. Le facteur d'émission est déterminé à partir de la consommation et du débit horaire du chargeur des broyeurs indiqué dans l'Ademe, à savoir 5l/h et un débit de 150 map¹²/h. Par ailleurs, un taux d'indésirables de 2% est considéré à dire d'expert.

Le procédé retenu est le suivant :

Tableau 16 : Procédés de tri des déchets bois en plateforme

Matière	Entrée / sortie	Quantité	Unité	Source
Bois déchet	IN	1,02	MJ	(1)
Diesel	IN	0,00035	MJ	(2)
Bois déchet trié	OUT	1	MJ	(1)
CH ₄	OUT	3,93E-7	g	(3)
N ₂ O	OUT	1,11E-6	g	(3)

Sources :

(1) Dires d'experts : taux d'indésirable de 2%

(2) Ademe : données du chargeur du broyeur pour les opérations de broyage (5 L/h, 150 map/h)

¹¹ Voir ADEME, CEDEN, Biomasse Normandie, & FCBA. (2016). ERCIBEN. État de l'art de la gestion des déchets de bois en Europe.

¹² Mètre cube apparent

(3) European Environment Agency (EEA). (2023). *EMEP/EEA Air pollutant emission inventory Guidebook* ; 1.A.4.c.ii - Table_3-1_02.

2.4.2 Four à liqueur noire et évaporation des liqueurs noires

Les données disponibles dans le BAT sur les filières papetières permettent de déterminer des consommations énergétiques associées à l'évaporation des liqueurs noires

Tableau 17 : Hypothèses retenues pour l'évaporation des liqueurs noires. *valeurs utilisées dans les calculs

Poste	Chaleur (MJ/tADpâte)	Electricité (kWh/tADpâte)	Source
Évaporation et stripping	3979 (4223*)	59	1
Four à liqueurs noires	244 (0*)	122	1

Note :

1 tAD = tonne de pâte à papier séchée à 90%

Le ratio de 1,5 tMS de liqueurs noires par tAD de pâte à papier est utilisé (2)

*Pour la simplification du calcul, la consommation de chaleur du four à liqueurs noires est affectée à l'évaporation, portant donc la valeur à 4223 MJ/tADpâte.

Sources :

- (1) BAT : Efficacité 88% : Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Rodrigo Gonzalo, M., Giner Santonja, G., Roudier, S., & Delgado Sancho, L. (2015). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board*. <https://doi.org/10.2791/370629>, Table 3.32, 4.7 and 4.8
- (2) Tran, Honghi & Vakkilainen, Esa. (2016). THE KRAFT CHEMICAL RECOVERY PROCESS.)

D'après les références techniques des BREF, l'efficacité retenue pour le four à liqueurs noires est de 88% (BAT). D'après ces hypothèses, le procédé de combustion dans le four à liqueurs noires est donc représenté par le Tableau 17 :

Tableau 10 : Procédé de production de chaleur par la combustion de liqueurs noires dans un four à liqueurs noires

Matière	Entrée / sortie	Quantité	Unité	Source
Liqueur noire séchée	IN	1,136	MJ	(1)
Électricité	IN	0,027	MJ	(1)
Vapeur	OUT	1	MJ	(1)

CH4	OUT	0,0035	g	(2)
N2O	OUT	0,0024	g	(2)

(1) BAT : Efficacité 88% : Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Rodrigo Gonzalo, M., Giner Santonja, G., Roudier, S., & Delgado Sancho, L. (2015). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board*. <https://doi.org/10.2791/370629>

(2) GEMIS, version 4.9; 2014 ; black-liquor-boiler-EU-2020 (with FGD)

D'après les hypothèses retenues dans le Tableau 17, le procédé d'évaporation des liqueurs noires est représenté de la manière suivante :

Tableau 18 : Procédé d'évaporation des liqueurs noires

Matière	Entrée / sortie	Quantité	Unité	Source
Liqueur noire brute (H =85%)	IN	1	MJ	(1)
Chaleur	IN	0,256	MJ	(1)
Électricité	IN	0,018	MJ	(1)
Liqueur noire séchée (H=20%)	OUT	1	MJ	(1)

Le BREF fournit des indications sur les opérations associées à l'épaississement des boues papetières. Par ailleurs, une étude RECORD documente également la consommation électrique associée à l'épaississement de boues, toute industrie confondue. Ces valeurs sont reportées dans le tableau suivant :

Tableau 19 : Données de références disponibles pour représenter l'épaississement des boues papetières

	Min (kWh/t)	Max (kWh/t)	Source	Utilisation dans la présente étude
Thickening	1	10	(1)	
Dewatering (screw press)	10	15	(1)	
Dewatering (double wire press)	2	4	(1)	

Dewatering (screw press) + Thick.	11	25	(1)	Schémas 7 (valeur Max)
Dewatering (double wire press) + Thick.	3	14	(1)	
Filtre à bande	10	25	(2)	
Filtre centrifuge	60	80	(2)	
Filtre presse	25	35	(2)	

Parmi ces combinaisons, la valeur retenue est la valeur maximale reportée dans la littérature technique dédiée (le BREF), c'est-à-dire 25kWh/t de boues. Cette valeur est cohérente avec celles de l'étude RECORD, et est plus spécifique que cette dernière. Le procédé est donc représenté de la manière suivante :

Tableau 20 : Procédés d'épaississement des boues papetières

Matière	Entrée / sortie	Quantité	Unité	Source
Boues brutes	IN	1	MJ	(1)
Électricité	IN	0,0167	MJ	(1)
Boues épaissies	OUT	1	MJ	(1)

Note :

- PCI boues : 1,5 MWh/tMS (3)

Sources :

- (1) BAT : Efficacité 88% : Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Rodrigo Gonzalo, M., Giner Santonja, G., Roudier, S., & Delgado Sancho, L. (2015). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board*. <https://doi.org/10.2791/370629>, Table 2.11, 6.12 et 6.29
- (2) Record. (2007). *Revue des filières de traitement/valorisation des boues Critères de choix d'une filière adaptée et arbre de décision associé*. www.record-net.org
- (3) Centre Technique du Papier

4 BOIS HORS FORET

4.1 Schéma 1 : Plaquettes de bois provenant de haies bocagères

Le bois bocager est issu de l'entretien des haies bocagères. Les filières bois-énergie sont une filière de valorisation dans laquelle ils sont majoritairement utilisés sous forme de plaquettes. Deux modalités de production de plaquettes ont été identifiées :

(1) Stockage sur plateforme intermédiaire : le bois frais est broyé en bord de haie puis acheminé sur une plateforme de stockage intermédiaire où il est stocké jusqu'à son utilisation. Pendant le stockage, l'humidité diminue légèrement.

(2) Utilisation directe en chaufferie : le bois frais est broyé en bord de haie et acheminé directement dans une chaufferie. Cet itinéraire concerne principalement le bois d'alignement pour lequel un accès routier est directement disponible.

La filière de stockage intermédiaire engendre davantage de transport, et donc un coefficient d'émission supérieur. Pour des raisons de lisibilité pour les acteurs de la filière, seule cette modalité majorante a été retenue.

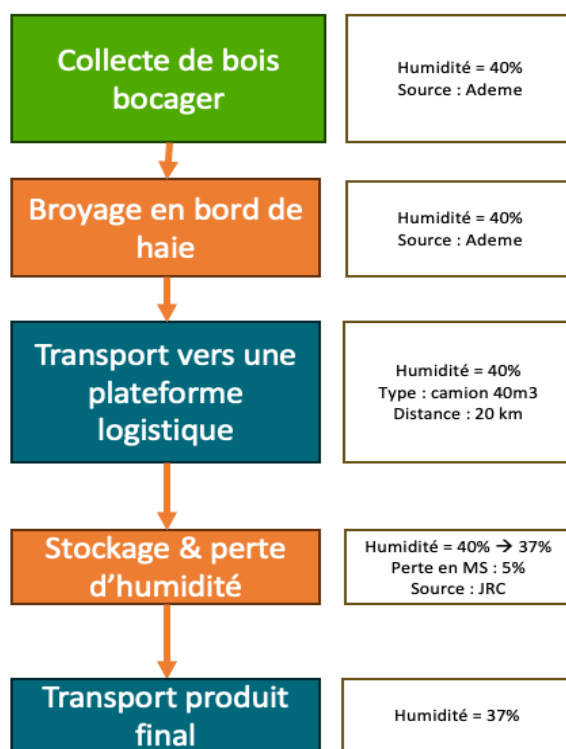


Figure 3 : Étapes de production de plaquettes de bois bocager et schémas d'humidité

Étape 1. Collecte du bois bocager / bois d'alignement

Cette étape correspond à l'énergie consommée pour la collecte de bois bocager. D'après les hypothèses retenues (voir section 2.3.1), la collecte de bois bocager est décrite par le Tableau 21 ci-après :

Tableau 21 : Processus de récolte du bois bocager

Collecte de bois bocager				
IN			OUT	
Bois sur pied	1	MJ	Bois bocager	1 MJ
			Émissions CO2e	0,972 g

Notes :

- PCI sec : 19 MJ/kg (JRC)
- Humidité : 40% (Dires d'experts)

Source : Ademe – taillis de feuillus

Étape 2 : Broyage en bord de haie

Cette étape comprend à la fois l'énergie utilisée par le broyeur (diesel) et celle liée au transport du broyeur. D'après les hypothèses retenues (voir chapitre 2.3.2), le broyage en bord de haie est décrit par le Tableau 22.

Tableau 22 : Processus de broyage en bord de haie

Broyage en bord de haie				
IN			OUT	
Bois bocager	1,00	MJ	Plaquettes	1 MJ
Diesel	0,00515	MJ (1)	CH4	5,85E-06 g (2)
			N2O	1,65E-05 g (2)
Émissions	0,495	gCO2e		

Notes :

- PCI sec : 19 MJ/kg
- Humidité : 40%

Source :

- (1) Ademe – broyage en bord de route
- (2) European Environment Agency (EEA). (2023). *EMEP/EEA Air pollutant emission inventory Guidebook* ; 1.A.4.c.ii - Table_3-1_02

Étape 3 : Transport vers une plateforme logistique

Les plaquettes de bois bocager sont transférées sur une plateforme à proximité, sur une distance de 20km avec un camion de 40m³. Voir chapitre 2.2.6, Tableau 7 et Tableau 8.

Étape 4 : Stockage avec perte d'humidité

Les plaquettes sont entreposées sur la plateforme et leur humidité diminue légèrement, bien que l'objectif de l'opération de stockage ne soit pas le séchage. D'après les hypothèses retenues (voir chapitre 2.3.3), le procédé de stockage avec perte d'humidité est représenté dans le Tableau 23.

Tableau 23 : Procédé de séchage en bord de haie

Stockage avec perte d'humidité					
IN			OUT		
Plaquette	1,053	MJ	Plaquette	1	MJ
Humidité Entrée	45%				
Humidité Sortie	37%				

Notes : PCI sec : 19 MJ/kg

Source : JRC

Étape 5 : Transport final

Les distances de transport final sont décrites dans le Tableau 9.

4.2 Schéma 2 : Plaquettes paysagères

Les résidus d'entretien des espaces verts ne sont généralement pas utilisés en bois énergie lorsqu'ils sont broyés sur place. Dans le cas contraire, ils sont donc transportés non broyés sur une plateforme. Cette configuration représente également les déchets verts apportés en déchetterie, qui sont également transportés non broyés sur une plateforme.

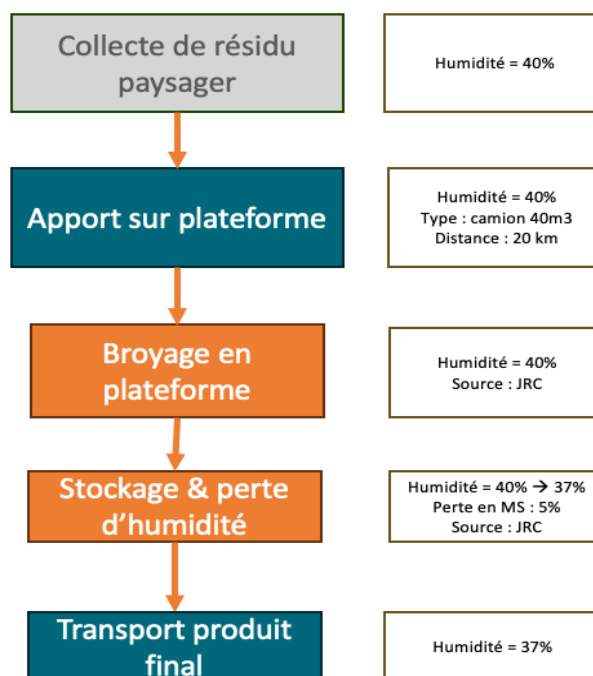


Figure 4 : Étapes de production de plaquettes paysagères et schémas d'humidité

Étape 1. Collecte du bois d'élagage

Cette étape n'est pas incluse dans le calcul d'émission car les bois d'entretiens d'espaces verts sont considérés comme des résidus de l'activité d'entretien des espaces verts, parcs

et jardins. Cet entretien n'est pas motivé par l'utilisation du bois en filière bois énergie. L'humidité du bois récolté peut être considérée de 40%, à dire d'experts (voir section 2.2.8).

Étape 2. Transport des bois d'élitage sur plateforme

Les bois d'élitage sont transférés sur une plateforme à proximité, sur une distance de 20 km avec un camion de 40 m3, suivant la même logique que dans le schéma 1 pour les bois bocagers. Voir chapitre 2.2.6, Tableau 7 et Tableau 8.

Étape 3. Broyage en plateforme

Le processus de broyage de bois paysager en plateforme est décrit par le Tableau 20 :

Tableau 24 : Processus de broyage de bois d'élitage en plateforme

Broyage de bois d'élitage en plateforme					
IN			OUT		
Résidus Forestiers	1,025	MJ	Plaquette	1	MJ
Diesel	0,00336	MJ	CH4	2,57E-06	g
			N2O	1,07E-05	g

Notes :

- PCI sec : 19 MJ/kg(1)
- Humidité : 40%

Source : JRC, broyage de résidus forestiers

Étape 4 : Stockage avec perte d'humidité

Identique au schéma 1.

Étape 5 : Transport final

Les distances de transport final sont décrites dans le Tableau 9.

4.3 Schéma 3 : Plaquettes de bois issus de vergers

Les bois d'entretien de vergers sont généralement utilisés directement par les exploitations (broyage et retour au sol). Cependant, les itinéraires de cultures fruitières impliquent un renouvellement des vergers tous les 20 à 30 ans, qui conduit à l'arrachage et au remplacement des vergers. Le bois obtenu lors de cette opération est aujourd'hui essentiellement non valorisé en bois énergie. Cette voie est néanmoins sérieusement envisagée par les acteurs de la filière, au vu des enjeux liés à la gestion actuelle de ces matières qui sont encore souvent brûlées au champ (Grasselly et al. 2019)¹³. La logique de représentation de la filière est faite par analogie avec celle des bois bocagers, en écartant

¹³ Grasselly, D., Lescourret, F., & Colleu, S. (2019). Chapitre 2. Le service d'approvisionnement en fruits. La production de fruits en France métropolitaine. In M.-C. Bopp (Ed.), *Services rendus par les cultures fruitières*.

l'étape de récolte, car les bois d'arrachage de vergers s'inscrivent dans une logique 'déchets'.

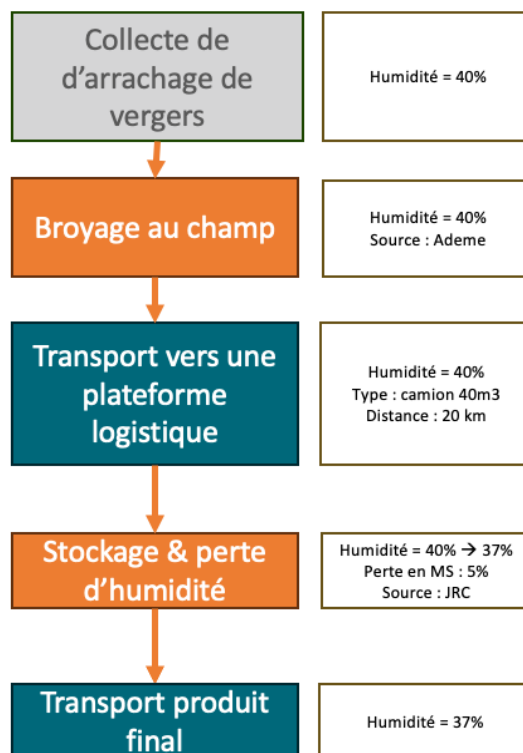


Figure 5 : Étapes de production de plaquettes issues de vergers et schémas d'humidité

Étape 1. Collecte du bois d'arrachage des vergers

Aucune émission n'est attribuée à cette étape, car il est considéré que les bois d'arrachage de vergers sont un déchet des exploitations agricoles. L'arrachage est en effet motivé par la remise en culture de la parcelle.

Étape 2 : Broyage au champ

Identique au schéma 1.

Étape 3 : Transport vers une plateforme logistique

Identique au schéma 1, par analogie avec les filières existantes pour le bois bocager. Voir chapitre 2.2.6, Tableau 7 et Tableau 8.

Étape 4 : Stockage avec perte d'humidité

Identique au schéma 1, par analogie avec les filières existantes pour le bois bocager.

Étape 5 : Transport final

Les distances de transport final sont décrites dans le Tableau 9.

4.4 Résultats

Pour les filières d'approvisionnement en bois hors forêt, les émissions de GES sont données par le Tableau 25 et le Tableau 26. Ces résultats prennent en compte les opérations détaillées dans les différents schémas, auxquelles s'ajoutent les émissions de CO₂ à l'utilisation (voir 2.2.6).

4.4.1 Émissions de GES filières bois hors forêt - Valeurs types et standards

Tableau 25 : Émissions de GES des filières bois hors forêt. Valeurs types et standards agrégées.

		Valeur Type	Valeur standards
1. Plaquettes de bois bocager	1-200 km	3,4	4,0
	1-500 km	5,4	6,5
	500 - 2 000 km	7,7	9,3
	2 500 - 10 000 km	13,7	16,4
	> 10 000 km	24,8	29,8
2. Plaquettes de bois paysager	1-200 km	2,4	2,9
	1-500 km	4,4	5,3
	500 - 2 000 km	6,8	8,1
	2 500 - 10 000 km	12,7	15,3
	> 10 000 km	23,9	28,6
3. Plaquettes de bois de vergers	1-200 km	2,6	3,1
	1-500 km	4,6	5,5
	500 - 2 000 km	7,0	8,3
	2 500 - 10 000 km	12,9	15,5
	> 10 000 km	24,0	28,8

Tableau 26 : Émissions de GES des filières bois hors forêt. Valeurs types et standards désagrégées.

		Valeur Type				Valeur standards			
		Culture	Transformation	Transport	Utilisation	Culture	Transformation	Transport	Utilisation
1. Plaquettes de bois bocager	1-200 km	0,0	1,3	1,6	0,4	0,0	1,6	2,0	0,5
	1-500 km	0,0	1,3	3,7	0,4	0,0	1,6	4,4	0,5
	500 - 2 000 km	0,0	1,3	6,0	0,4	0,0	1,6	7,2	0,5
	2 500 - 10 000 km	0,0	1,3	12,0	0,4	0,0	1,6	14,3	0,5
	> 10 000 km	0,0	1,3	23,1	0,4	0,0	1,6	27,7	0,5
2. Plaquettes de bois paysager	1-200 km	0,0	0,3	1,6	0,4	0,0	0,4	2,0	0,5
	1-500 km	0,0	0,3	3,7	0,4	0,0	0,4	4,4	0,5
	500 - 2 000 km	0,0	0,3	6,0	0,4	0,0	0,4	7,2	0,5
	2 500 - 10 000 km	0,0	0,3	12,0	0,4	0,0	0,4	14,4	0,5
	> 10 000 km	0,0	0,3	23,1	0,4	0,0	0,4	27,7	0,5
3. Plaquettes	1-200 km	0,0	0,5	1,6	0,4	0,0	0,6	2,0	0,5
	1-500 km	0,0	0,5	3,7	0,4	0,0	0,6	4,4	0,5

de bois de vergers	500 - 2 000 km	0,0	0,5	6,0	0,4	0,0	0,6	7,2	0,5
	2 500 - 10 000 km	0,0	0,5	12,0	0,4	0,0	0,6	14,3	0,5
	> 10 000 km	0,0	0,5	23,1	0,4	0,0	0,6	27,7	0,5

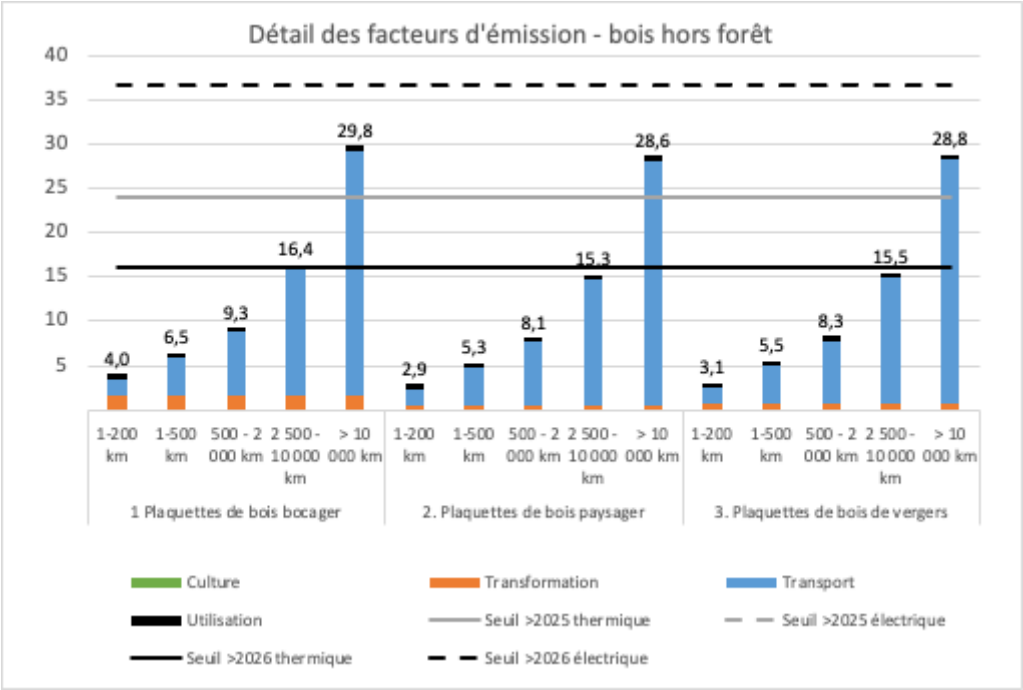


Figure 6 : Représentation graphique des valeurs standards d'émission de GES des filières bois hors forêt

4.4.2 Réductions d'émissions

Légende :

Conforme après 2026
Conforme avant 2026

Tableau 27 : Réductions d'émissions de GES des filières bois hors forêt. Valeurs types et standards pour les usages en chaleur et en électricité

		Type		Défaut	
		Chaleur (%)	Électricité (%)	Chaleur (%)	Électricité (%)
1 Plaquettes de bois bocager	1-200 km	95%	93%	94%	91%
	1-500 km	92%	88%	90%	86%
	500 - 2 000 km	89%	83%	86%	80%
	2 500 - 10 000 km	80%	70%	76%	64%
	> 10 000 km	63%	46%	56%	35%
2. Plaquettes paysagères	1-200 km	96%	95%	96%	94%
	1-500 km	93%	90%	92%	88%
	500 - 2 000 km	90%	85%	88%	82%
	2 500 - 10 000 km	81%	72%	78%	67%
	> 10 000 km	65%	48%	58%	37%
3. Plaquettes de bois d'arrachage de vergers	1-200 km	97%	95%	96%	94%
	1-500 km	94%	91%	93%	89%
	500 - 2 000 km	91%	87%	89%	84%
	2 500 - 10 000 km	83%	75%	80%	70%
	> 10 000 km	69%	54%	63%	45%

5 BOIS DECHET

5.1 Schéma 4 : Broyat de déchets de bois A et déchets d'emballages

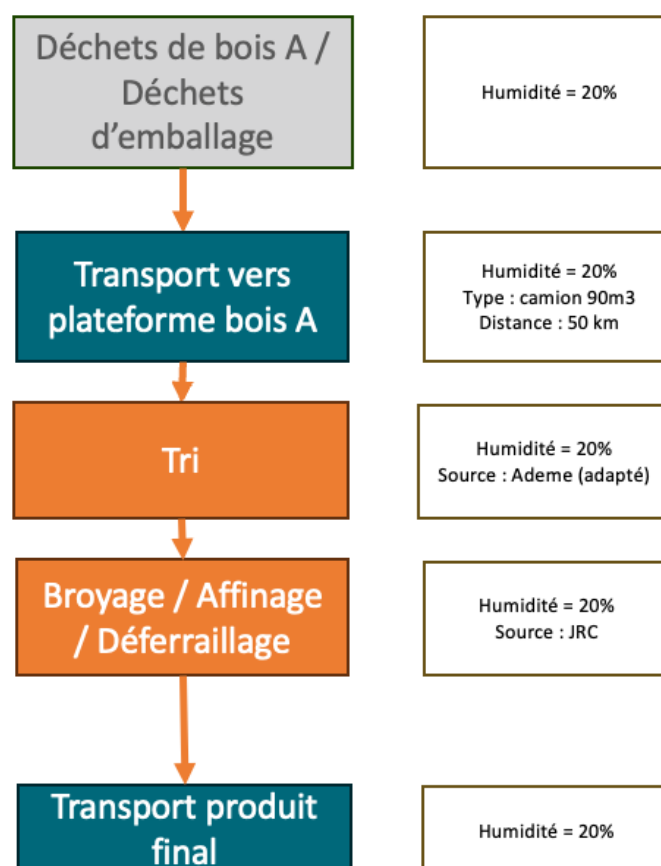


Figure 7 : Étapes de production de broyat de déchets de bois A et déchets d'emballages et schémas d'humidité

Étape 1 : Production de déchet de bois A / déchet d'emballage

Aucune émission n'est affectée à la production de déchets de bois A ou de déchets d'emballage, car il s'agit de déchets. L'humidité des déchets de bois est 20%, valeur utilisée dans l'étude ACV de l'Ademe.

Étape 2 : Transport vers la plateforme SSD

Le déchet de bois A / déchet d'emballage est transféré sur une plateforme à une distance de 50km avec un camion de 90m3. Voir chapitre 2.2.6, Tableau 7 et Tableau 8.

Étape 3 : Tri

Le calcul d'émission prend en compte la consommation de combustible de la pelle mécanique utilisée pour trier le bois A avant broyage. Le procédé de tri est représenté par le tableau suivant.

Tableau 28 : Processus de tri des déchets de bois

Tri					
Refus de tri	2%	(1)			
IN			OUT		
Bois déchet en mélange	1,020	MJ (1)	Bois déchet	1	MJ
Diesel	0,00035	MJ (2)	CH4	3,93E-07	g (3)
			N2O	1,11E-06	g (3)

Sources :

- (1) Dires d'experts
- (2) Ademe (Consommation du chargeur du broyeur)
- (3) European Environment Agency (EEA). (2023). *EMEP/EEA Air pollutant emission inventory Guidebook* ; 1.A.4.c.ii - Table_3-1_02

Étape 4 : Broyage, affinage, déferrailage

D'après les hypothèses retenues (voir chapitre 2.3.2), le procédé de broyage/affinage/déferrailage utilisé est le suivant :

Broyage – Affinage – Déferrailage					
IN			OUT		
Bois déchet	1,00	MJ(1)	Broyat	1	MJ(1)
Diesel	0,00668	MJ(1)	CH4	7,60E-06	g(2)
			N2O	2,14E-05	g(2)

Sources :

- (1) Ademe (Concassage + Broyage lent + Chargeur)
- (2) European Environment Agency (EEA). (2023). *EMEP/EEA Air pollutant emission inventory Guidebook* ; 1.A.4.c.ii - Table_3-1_02

Étape 5 : Transport produit final

Les distances de transport final sont décrites dans le Tableau 9.

5.2 Schéma 5 : Broyat de déchet de bois B (BR1 et BR2)

Les filières d'approvisionnement en bois BR1 et BR2 ne sont pas clairement distinctes, et il est donc considéré que ces deux types de matières suivent le même schéma. Une diversité de situations a été relevée, car le bois B peut être soit apporté en déchetterie, soit apporté directement en plateforme. Par ailleurs, il peut également y avoir une plateforme de tri intermédiaire. Pour des raisons de lisibilité pour les acteurs de la filière, une seule configuration a été retenue pour le schéma standards. Cette configuration intègre :

- Une étape de tri

- Un terme générique de transport de 100 km (voir schémas de transports intermédiaires, Tableau 2.2.6).

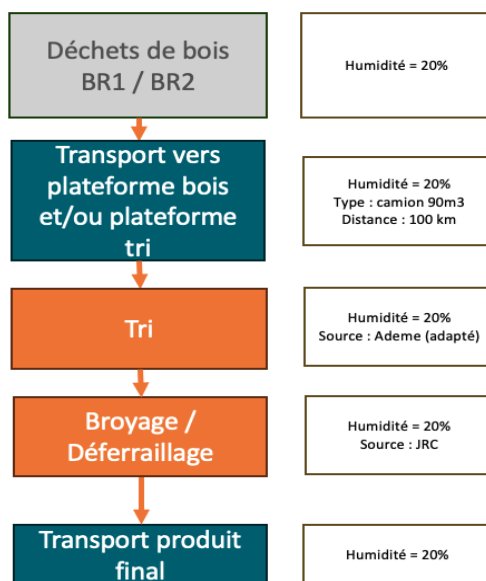


Figure 8 : Étapes de production de broyat de déchets de bois B et schémas d'humidité

Étape 1 : Production des déchets de bois

Cette étape est commune à toutes les filières. Aucune émission n'est affectée à la production de déchets de bois B. Leur humidité est de 20% (Source : Ademe).

Étape 2 : Transport vers une plateforme bois et/ou une plateforme de tri

Le déchet de bois B en déchetterie est transféré sur une plateforme bois et/ou une plateforme de tri à une distance de parcours cumulée de 100km avec un camion de 90m³. L'humidité des déchets de bois B reste de 20% durant les différents transports. Voir chapitre 2.2.6, Tableau 7 et Tableau 8.

Étape 3 : Tri

Le tri des déchets de bois est effectué sur des plateformes de tri à partir de gisements de bois B pré-triés. Le calcul d'émission prend en compte la consommation de combustible de la pelle mécanique utilisée pour séparer le bois B à usage énergétique du bois B destiné au recyclage matière. Le procédé de tri est identique au schéma 4.

Étape 4 : Broyage / Affinage / Déferrailage

Identique au schéma 3.

Étape 5 : Transport produit final

Les distances de transport final sont décrites dans le Tableau 9.

5.3 Résultats

Pour les filières d'approvisionnement en bois déchets, les émissions de GES sont données par le Tableau 29 et le Tableau 30. Les résultats prennent en compte les opérations détaillées dans les différents schémas, auxquelles s'ajoutent les émissions de CO₂ à l'utilisation (voir 2.2.6).

5.3.1 Émissions de GES Filières Bois-Déchét

Tableau 29 : Émissions de GES des filières bois déchet. Valeurs types et standards agrégées.

		Valeur Type	Valeur standards
4. Broyat de déchets de bois A	1-200 km	2,4	2,9
	1-500 km	4,0	4,8
	500 - 2 000 km	5,9	7,1
	2 500 - 10 000 km	10,6	12,7
	> 10 000 km	19,3	23,2
5. Broyat bois B (BR1 et BR2)	1-200 km	2,7	3,2
	1-500 km	4,3	5,2
	500 - 2 000 km	6,2	7,4
	2 500 - 10 000 km	10,8	13,0
	> 10 000 km	19,6	23,5

Tableau 30 : Émissions de GES des filières bois déchet. Valeurs types et standards désagrégées.

		Valeur Type				Valeur standards			
		Culture	Transfor mation	Trans port	Utilisati on	Culture	Transfor mation	Trans port	Utilisat ion
4. Broyat de déchets de bois A	1-200 km	0,0	0,7	1,3	0,4	0,0	0,8	1,6	0,5
	1-500 km	0,0	0,7	2,9	0,4	0,0	0,8	3,5	0,5
	500 - 2 000 km	0,0	0,7	4,8	0,4	0,0	0,8	5,7	0,5
	2 500 - 10 000 km	0,0	0,7	9,5	0,4	0,0	0,8	11,4	0,5
	> 10 000 km	0,0	0,7	18,2	0,4	0,0	0,8	21,9	0,5
5 Broyat bois B (BR1 et BR2)	1-200 km	0,0	0,7	1,6	0,4	0,0	0,8	1,9	0,5
	1-500 km	0,0	0,7	3,2	0,4	0,0	0,8	3,8	0,5
	500 - 2 000 km	0,0	0,7	5,1	0,4	0,0	0,8	6,1	0,5
	2 500 - 10 000 km	0,0	0,7	9,7	0,4	0,0	0,8	11,7	0,5

> 10 000 km	0,0	0,7	18,5	0,4	0,0	0,8	22,2	0,5
-------------	-----	-----	------	-----	-----	-----	------	-----

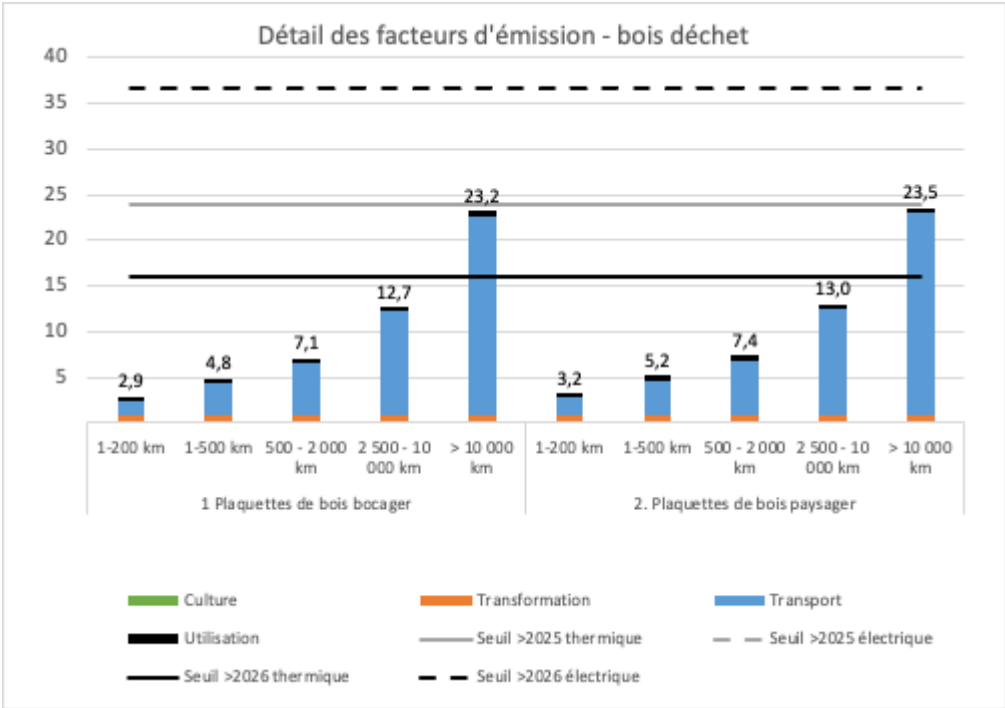


Figure 9 : Représentation graphique des valeurs standards d'émission de GES des filières bois déchet

5.3.2 Réductions d'émissions

Légende :

Conforme après 2026
Conforme avant 2026

Tableau 31 : Réductions d'émissions de GES des filières bois déchet. Valeurs types et standards pour les usages en chaleur et en électricité

		Type		Défaut	
		Chaleur (%)	Electricité (%)	Chaleur (%)	Electricité (%)
4. Broyat de déchets de bois A	1-200 km	96%	95%	96%	94%
	1-500 km	94%	91%	93%	89%
	500 - 2 000 km	91%	87%	90%	85%
	2 500 - 10 000 km	84%	77%	81%	72%
	> 10 000 km	72%	58%	66%	49%
	1-200 km	96%	94%	95%	93%

5 Broyat bois B (BR1 et BR2)	1-500 km	94%	91%	92%	89%
	500 - 2 000 km	91%	87%	89%	84%
	2 500 - 10 000 km	84%	76%	81%	72%
	> 10 000 km	71%	57%	65%	49%

6 FILIERES PAPETIERES

6.1 Schéma 6 : Liqueurs noires

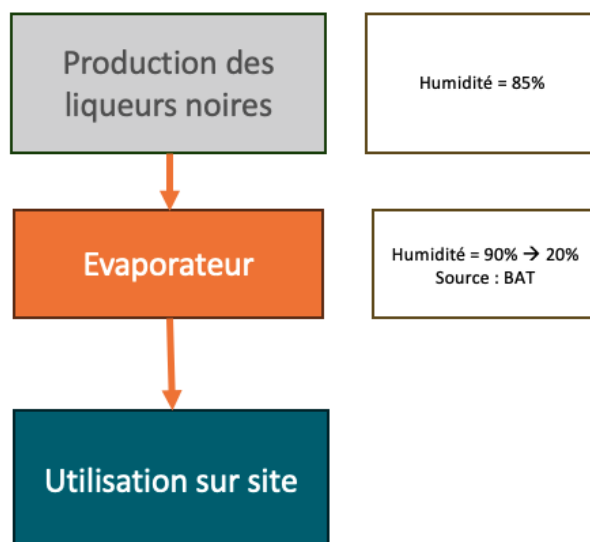


Figure 10 : Étapes de production liqueurs noires séchées et schémas d'humidité

Étape 1 : Production des liqueurs noires

Aucune émission n'est affectée à cette étape car les liqueurs noires sont considérées comme un résidu de production de pâte de cellulose.

Étape 2 : Évaporation / Concentration

Afin d'être utilisées comme combustible, les liqueurs noires sont évapoconcentrées. Selon les données disponibles dans le BREF sur les filières papetières, les étapes de préparation des liqueurs noires en vue de leur combustion peuvent être représentées de la manière suivante :

Évaporation liqueurs noires

IN			OUT			
Liqueurs noires	1,000	MJ (1)	Liqueur séchée	noire	1	MJ (1)
Électricité	0,039	MJ (1)				
Chaleur	0,256	MJ (1)				

Notes :

- PCI : 11,67 MJ/kg à 8% d'humidité (2)

- Humidité : séchage de 85% à 20%
- Électricité haute tension

Source :

- (1) Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Rodrigo Gonzalo, M., Giner Santonja, G., Roudier, S., & Delgado Sancho, L. (2015). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board*. <https://doi.org/10.2791/370629>
- (2) Berien Elbersen, Igor Staritsky, Geerten Hengeveld, Jan-Peter Lesschen, & Calliope Panoutsou. (2016). *Guidelines for data collection to estimate and monitor technical and sustainable biomass supply. Deliverable 2.2 of the Biomass Policies project*.

Pour les apports en énergie, les hypothèses retenues à dire d'experts sont les suivantes :

- L'électricité est apportée par le réseau électrique haute tension
- La chaleur est apportée par de la chaleur excédentaire du four à liqueurs. Cela engendre une autoconsommation de liqueur noire sèche dans la chaîne de transformation pour pourvoir au besoin en chaleur de l'évaporateur. Le procédé est représenté de manière analogue à celui de la production de pellets dans le document du JRC. La quantité de liqueur noire séchée additionnelle nécessaire est donc calculée par :

$$LN_{additionnelle} = \frac{Chaleur_{evap}}{\eta_{th, fourLN} - Chaleur_{evap}} = \frac{0,256}{0,88 - 0,256} = 0,410 \text{ MJ/MJ LN séchée produite}$$

Le schéma de production des liqueurs noires séchées est donc représenté par le schéma suivant :

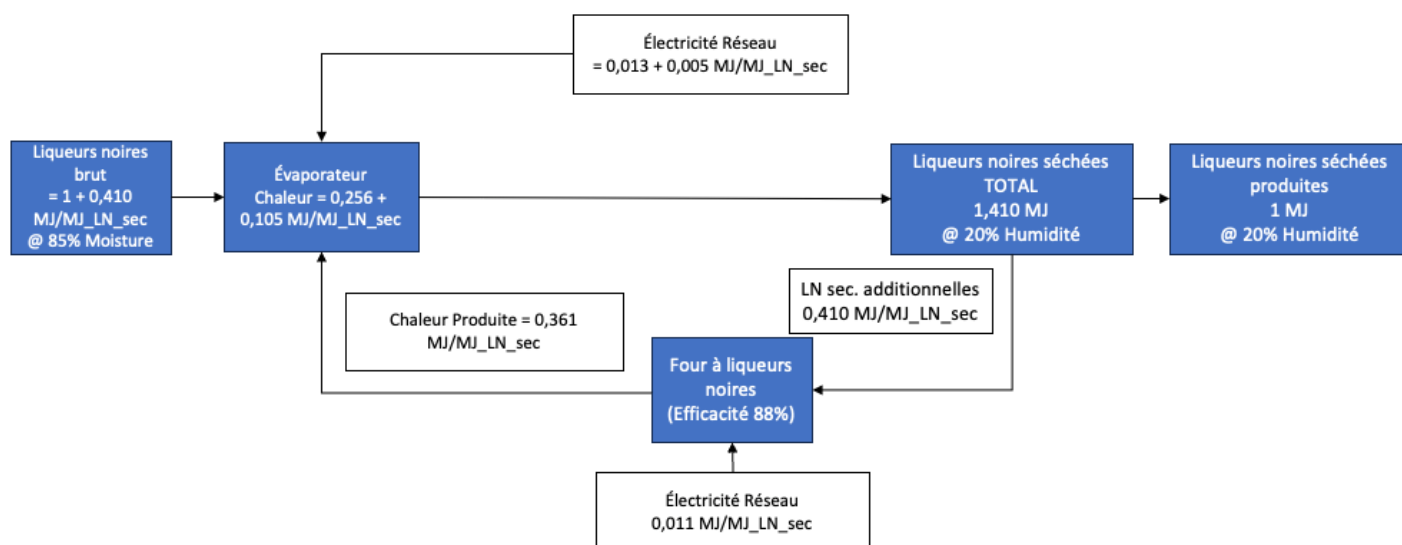


Figure 11 : Schémas de l'autoconsommation de chaleur issues du four à liqueurs noires par le procédé d'évaporation des liqueurs noires.

Note :

A des fins calculatoires et pour prendre en compte le fait que la chaleur est issue de la combustion de la liqueur noire elle-même, la liqueur noire séchée est artificiellement

dissociée pour faire apparaître la fraction nécessaire au séchage de 1 MJ de combustible final. Dans la réalité du procédé, toute la liqueur noire séchée est valorisée dans le four à liqueurs.

Étape 3 : Utilisation directe sur site

Les liqueurs noires sont utilisées directement sur le site de la papeterie, et ne sont donc pas concernées par une étape de transport final.

6.2 Schéma 7 : Boues papetières

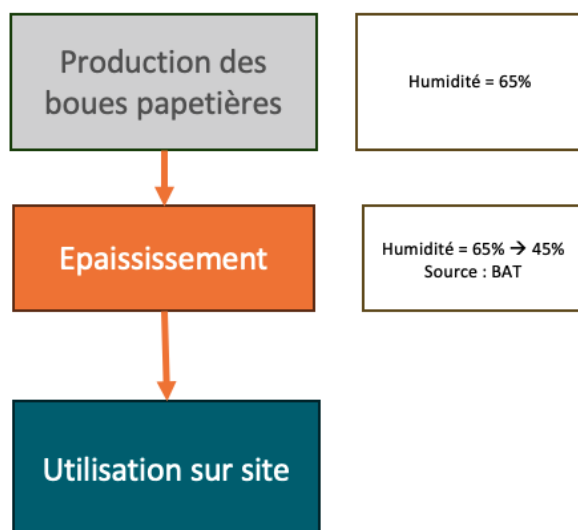


Figure 12 : Étapes de production de boues papetières déshydratées et schémas d'humidité

Note : la partie suivante décrit la méthodologie de calcul associée à la part biogénique des boues papetières. La partie non biogénique potentielle (qui dépend des sites) est à exclure de l'énergie produite, de la même manière que ce qu'il se fait pour la part non biogénique des CSR.

Étape 1 : Production des boues papetières

Aucune émission n'est affectée à cette étape car les boues papetières sont considérées comme un résidu de production de pâte ou papier-carton.

Étape 2 : Épaississement/déshydratation des boues papetières

Avant leur valorisation énergétique, les boues papetières sont épaissies et déshydratées au moyen d'équipements mécaniques comme des presses à vis ou presses à double toile. A partir de données moyennées du BREF, le procédé retenu est le suivant :

Épaississement / déshydratation des boues papetières

IN			OUT		
Boues liquides	1,000	MJ	Boues épaissies et déshydratées	1	MJ
Électricité	0,017	MJ (1)			

Notes :

- PCI : 5,4 MJ/kgMS (2)
- Humidité : séchage de 65% à 45%
- Électricité haute tension

Source :

- (1) Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Rodrigo Gonzalo, M., Giner Santonja, G., Roudier, S., & Delgado Sancho, L. (2015). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board*. <https://doi.org/10.2791/370629>
- (2) Centre technique du papier

6.3 Résultats

Pour les filières d'approvisionnement en résidus de filières papetières, les émissions de GES sont données par le Tableau 32 et le Tableau 33. Les résultats prennent en compte les opérations détaillées dans les différents schémas, auxquelles s'ajoutent les émissions de CO₂ à l'utilisation (voir 2.2.6).

6.3.1 Émissions de GES filières papetières

Tableau 32 : Émissions de GES des filières papetières. Valeurs types et standards agrégées

		Valeur Type	Valeur standards
6. Liqueurs noires	sur site	1,6	1,9
7. Boues papetières	sur site	2,3	2,8

Tableau 33 : Émissions de GES des filières papetières. Valeurs types et standards désagrégées

		Valeur Type				Valeur standards			
		Culture	Transfo rmation	Transpo rt	Utilisati on	Culture	Transfo rmation	Transpo rt	Utilisati on
6. Liqueurs noires	sur site	0,0	0,9	0,0	0,7	0,0	1,1	0,0	0,8
7. Boues papetières	sur site	0,0	0,4	0,0	1,9	0,0	0,5	0,0	2,3

A noter que les émissions pour les liqueurs noires sont plus faibles du fait d’une autoconsommation (pas d’émissions liées au transport). Les émissions liées à la production de liqueurs noires sont affectées à la production de papier.

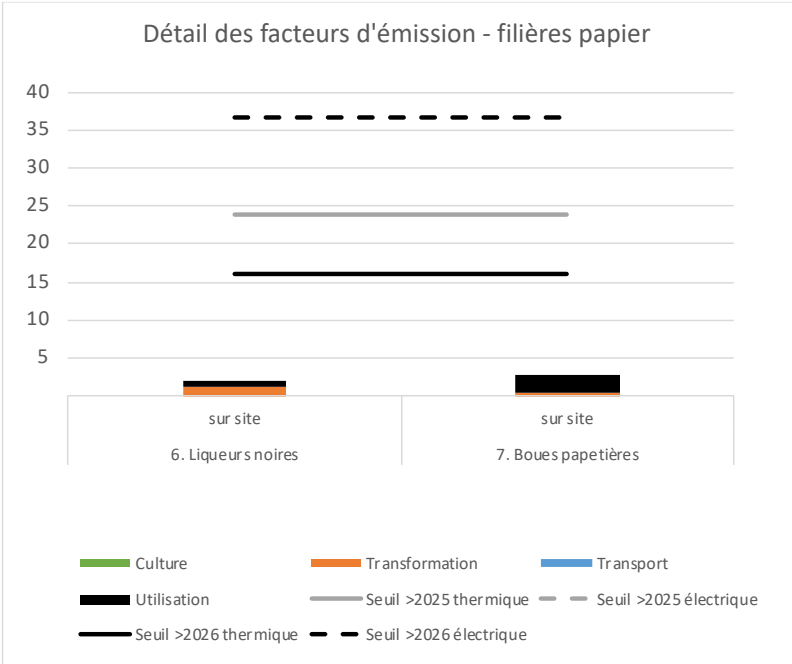


Figure 13 : Représentation graphique des valeurs standards d’émission de GES des filières papetières

6.3.2 Réductions d’émissions

Légende :

Conforme après 2026
Conforme avant 2026

		Type		Défaut	
		Chaleur (%)	Électricité (%)	Chaleur (%)	Électricité (%)
6. Liqueurs noires	sur site	98%	97%	97%	96%
7. Boues papetières	sur site	97%	95%	96%	94%

7 COGENERATION TYPE

Les tableaux ci-dessous donnent les résultats obtenus avec les rendements types de cogénération considérés (voir section 2.2.9. Calcul des rendements en cogénération).

Légende :

Conforme après 2026

Conforme avant 2026

7.1 Valeurs de référence du JRC

JRC – FILIERES PLAQUETTES

Tableau 34 : Réductions d'émissions des combustibles sous format plaquettes décrits dans RED pour des usages en cogénération

		Cogénération					
		Type			Défaut		
		Chaleur seule (Cogé.)	Électricité seule (Cogé.)	Global (Cogé.)	Chaleur seule (Cogé.)	Électricité seule (Cogé.)	Global (Cogé.)
Plaquettes - Résidus Forestiers	1-500 km	94%	92%	93%	92%	91%	92%
	500 - 2 000 km	91%	89%	90%	88%	86%	88%
	2 500 - 10 000 km	85%	81%	84%	81%	76%	79%
	> 10 000 km	72%	65%	70%	65%	57%	63%
Plaquettes - TCR (Eucalyptus)	2 500 - 10 000 km	68%	61%	66%	65%	57%	63%
Plaquettes - TCR (Peuplier - Fertilisé)	1-500 km	90%	87%	89%	88%	86%	88%
	500 - 2 000 km	87%	84%	86%	86%	83%	85%
	2 500 - 10 000 km	81%	76%	79%	77%	72%	75%
	> 10 000 km	68%	61%	66%	62%	53%	59%
Plaquettes - TCR (Peuplier - Non fertilisé)	1-500 km	92%	91%	92%	91%	89%	90%
	500 - 2 000 km	90%	87%	89%	87%	84%	86%
	2 500 - 10 000 km	82%	78%	81%	80%	75%	78%
	> 10 000 km	69%	62%	67%	64%	56%	62%

Plaquettes - Bois rond	1-500 km	94%	92%	93%	92%	91%	92%
	500 - 2 000 km	91%	89%	90%	90%	87%	89%
	2 500 - 10 000 km	85%	81%	84%	81%	76%	79%
	> 10 000 km	72%	65%	70%	65%	57%	63%
Plaquettes - Résidus Industrie bois	1-500 km	95%	94%	95%	94%	92%	93%
	500 - 2 000 km	92%	91%	92%	91%	89%	90%
	2 500 - 10 000 km	86%	83%	85%	83%	80%	82%
	> 10 000 km	73%	67%	71%	68%	61%	66%

JRC – FILIERES PELLETS

Tableau 35 : Réductions d'émissions des combustibles sous format pellet décrits dans RED pour des usages en cogénération

			Type			Défaut		
			Chaleur seule (Cogé.)	Électricité seule (Cogé.)	Global (Cogé.)	Chaleur seule (Cogé.)	Électricité seule (Cogé.)	Global (Cogé.)
Pellets - Résidus Forestiers	Cas 1	1-500 km	63%	54%	60%	55%	45%	52%
		500 - 2 000 km	63%	54%	60%	55%	45%	52%
		2 500 - 10 000 km	62%	53%	59%	54%	43%	51%
		> 10 000 km	57%	46%	53%	48%	35%	44%
	Cas 2a	1-500 km	80%	75%	78%	76%	70%	74%
		500 - 2 000 km	80%	75%	78%	76%	70%	74%
		2 500 - 10 000 km	78%	73%	77%	73%	67%	71%
		> 10 000 km	73%	67%	71%	68%	61%	66%
	Cas 3a	1-500 km	92%	91%	92%	91%	89%	90%
		500 - 2 000 km	92%	91%	92%	91%	89%	90%
		2 500 - 10 000 km	91%	89%	90%	90%	87%	89%
		> 10 000 km	86%	83%	85%	83%	80%	82%
	Cas 1	2 500 - 10 000 km	48%	35%	44%	41%	27%	37%

Pellets - TCR (Eucalyptus)	Cas 2a	2 500 - 10 000 km	62%	53%	59%	58%	48%	55%
	Cas 3a	2 500 - 10 000 km	73%	67%	71%	72%	65%	70%
		1-500 km	60%	51%	57%	53%	42%	49%
	Cas 1	500 - 10000 km	59%	50%	56%	51%	40%	48%
		> 10 000 km	54%	43%	51%	45%	32%	41%
		1-500 km	77%	72%	75%	73%	67%	71%
	Cas 2a	500 - 10000 km	74%	68%	73%	71%	64%	68%
		> 10 000 km	71%	64%	68%	65%	57%	63%
		1-500 km	90%	87%	89%	88%	86%	88%
	Cas 3a	500 - 10000 km	87%	84%	86%	86%	83%	85%
Pellets - TCR (Peuplier - Fertilisé)		> 10 000 km	83%	80%	82%	81%	76%	79%
		1-500 km	62%	53%	59%	55%	45%	52%
	Cas 1	500 - 10000 km	60%	51%	57%	53%	42%	49%
		> 10 000 km	55%	45%	52%	48%	35%	44%
		1-500 km	80%	75%	78%	76%	70%	74%
	Cas 2a	500 - 10000 km	77%	72%	75%	73%	67%	71%
		> 10 000 km	73%	67%	71%	68%	61%	66%
		1-500 km	92%	91%	92%	91%	89%	90%
	Cas 3a	500 - 10000 km	90%	87%	89%	88%	86%	88%
		> 10 000 km	86%	83%	85%	83%	80%	82%
Pellets - TCR (Peuplier - Non fertilisé)		1-500 km	63%	54%	60%	55%	45%	52%
		500 - 2 000 km	63%	54%	60%	57%	46%	53%
	Cas 1	2 500 - 10 000 km	62%	53%	59%	54%	43%	51%
		> 10 000 km	57%	46%	53%	48%	35%	44%
		1-500 km	80%	75%	78%	77%	72%	75%
	Cas 2a	500 - 2 000 km	81%	76%	79%	77%	72%	75%
		2 500 - 10 000 km	78%	73%	77%	74%	68%	73%
		1-500 km	63%	54%	60%	55%	45%	52%
		500 - 2 000 km	63%	54%	60%	57%	46%	53%
	Cas 1	2 500 - 10 000 km	62%	53%	59%	54%	43%	51%
Pellets - Bois rond		> 10 000 km	57%	46%	53%	48%	35%	44%
		1-500 km	80%	75%	78%	77%	72%	75%
	Cas 2a	500 - 2 000 km	81%	76%	79%	77%	72%	75%
		2 500 - 10 000 km	78%	73%	77%	74%	68%	73%
		1-500 km	63%	54%	60%	55%	45%	52%
		500 - 2 000 km	63%	54%	60%	57%	46%	53%
	Cas 1	2 500 - 10 000 km	62%	53%	59%	54%	43%	51%
		> 10 000 km	57%	46%	53%	48%	35%	44%
		1-500 km	80%	75%	78%	77%	72%	75%
	Cas 2a	500 - 2 000 km	81%	76%	79%	77%	72%	75%

Pellets - Résidus Industrie bois	Cas 3a	> 10 000 km	73%	67%	71%	68%	61%	66%
		1-500 km	94%	92%	93%	92%	91%	92%
		500 - 2 000 km	94%	92%	93%	92%	91%	92%
		2 500 - 10 000 km	91%	89%	90%	90%	87%	89%
		> 10 000 km	86%	83%	85%	85%	81%	84%
	Cas 1	1-500 km	78%	73%	77%	73%	67%	71%
		500 - 2 000 km	78%	73%	77%	73%	67%	71%
		2 500 - 10 000 km	76%	70%	74%	71%	64%	68%
		> 10 000 km	72%	65%	70%	65%	57%	63%
	Cas 2a	1-500 km	88%	86%	88%	86%	83%	85%
		500 - 2 000 km	88%	86%	88%	86%	83%	85%
		2 500 - 10 000 km	87%	84%	86%	83%	80%	82%
		> 10 000 km	82%	78%	81%	78%	73%	77%
	Cas 3a	1-500 km	96%	95%	96%	95%	94%	95%
		500 - 2 000 km	96%	95%	96%	95%	94%	95%
		2 500 - 10 000 km	94%	92%	93%	92%	91%	92%
		> 10 000 km	90%	87%	89%	87%	84%	86%

7.2 Valeurs pour les nouveaux combustibles

Tableau 36 : Exemple de réductions d'émissions des combustibles issus de bois hors forêt pour des usages en cogénération dont le rendement énergétique total est d'au moins 75%

		Coefficients de réduction Cogénération					
		Type			Défaut		
		Chaleur seule (Cogé.)	Électricité seule (Cogé.)	Global (Cogé.)	Chaleur seule (Cogé.)	Électricité seule (Cogé.)	Global (Cogé.)
1. Plaquettes de bois bocager	1-200 km	96%	95%	95%	95%	94%	94%
	1-500 km	93%	92%	93%	92%	90%	91%
	500 - 2 000 km	90%	88%	89%	88%	85%	87%
	2 500 - 10 000 km	82%	78%	81%	79%	74%	77%
	> 10 000 km	68%	61%	66%	62%	53%	59%
2. Plaquettes paysagères	1-200 km	97%	96%	97%	96%	95%	96%
	1-500 km	94%	93%	94%	93%	92%	93%
	500 - 2 000 km	91%	89%	91%	90%	87%	89%
	2 500 - 10 000 km	84%	80%	83%	80%	76%	79%
	> 10 000 km	69%	62%	67%	63%	55%	61%
3. Plaquettes de bois d'arrachage de vergers	1-200 km	97%	96%	96%	96%	95%	96%
	1-500 km	94%	93%	94%	93%	91%	92%
	500 - 2 000 km	91%	89%	90%	89%	87%	89%
	2 500 - 10 000 km	84%	80%	82%	80%	76%	79%
	> 10 000 km	69%	62%	67%	63%	55%	60%

Tableau 37 : Exemple de réductions d'émissions des combustibles issus de bois déchet pour des usages en cogénération dont le rendement énergétique total est d'au moins 75%

		Type			Défaut		
		Chaleur seule (Cogé.)	Électricité seule (Cogé.)	Global (Cogé.)	Chaleur seule (Cogé.)	Électricité seule (Cogé.)	Global (Cogé.)
	1-200 km	97%	96%	97%	96%	95%	96%

4. Broyat de déchets de bois A	1-500 km	95%	94%	94%	94%	92%	93%
	500 - 2 000 km	92%	91%	92%	91%	89%	90%
	2 500 - 10 000 km	86%	83%	86%	84%	80%	83%
	> 10 000 km	75%	70%	73%	70%	63%	68%
5 Broyat bois B (BR1 et BR2)	1-200 km	97%	96%	96%	96%	95%	96%
	1-500 km	95%	93%	94%	93%	92%	93%
	500 - 2 000 km	92%	90%	92%	91%	88%	90%
	2 500 - 10 000 km	86%	83%	85%	83%	80%	82%
	> 10 000 km	75%	69%	73%	70%	63%	68%

Tableau 38 :Exemple de réductions d'émissions des combustibles issus de filières papetières pour des usages en cogénération dont le rendement énergétique total est d'au moins 75%

		Type				Défaut		
		Chaleur seule (Cogé.)	Électricité seule (Cogé.)	Global (Cogé.)		Chaleur seule (Cogé.)	Électricité seule (Cogé.)	Global (Cogé.)
6. Liqueurs noires	sur site	97%	96%	97%	97%	96%	96%	97%
7. Boues papetières	sur site	97%	96%	97%	96%	96%	96%	97%

8 TABLES DES FIGURES ET TABLEAUX

8.1 Table des figures

Figure 1 : Aperçu des résultats pour la tranche 1-500 km (valeurs standards)	2
Figure 2 : Exigences de réductions de GES selon l'évolution REDIII de l'Article 29.10 de RED II (CIBE)	9
Figure 3 : Étapes de production de plaquettes de bois bocager et schémas d'humidité	26
Figure 4 : Étapes de production de plaquettes paysagères et schémas d'humidité	28
Figure 5 : Étapes de production de plaquettes issues de vergers et schémas d'humidité	30
Figure 6 : Représentation graphique des valeurs standards d'émission de GES des filières bois hors forêt	32
Figure 7 : Étapes de production de broyat de déchets de bois A et déchets d'emballages et schémas d'humidité	34
Figure 8 : Étapes de production de broyat de déchets de bois B et schémas d'humidité	36
Figure 9 : Représentation graphique des valeurs standards d'émission de GES des filières bois déchet	38
Figure 10 : Étapes de production liqueurs noires séchées et schémas d'humidité	40
Figure 11 : Schémas de l'autoconsommation de chaleur issues du four à liqueurs noires par le procédé d'évaporation des liqueurs noires.	41
Figure 12 : Étapes de production de boues papetières déshydratées et schémas d'humidité	42
Figure 13 : Représentation graphique des valeurs standards d'émission de GES des filières papetières	44

8.2 Table des tableaux

Tableau 1 : Valeurs types et par défaut actuellement déterminées dans l'annexe de la directive RED	8
Tableau 2 : Émissions de GES maximales prévus par la directive RED	9
Tableau 3 : Pouvoir de réchauffement global des gaz à effet de serre (JRC)	10
Tableau 4 : Émissions hors-CO2 de la combustion de diesel par des machines agricoles et forestières	10
Tableau 5 : Facteur d'émission de l'électricité et du gaz naturel	11
Tableau 6 : Émissions hors CO2 en fonction à l'utilisation des combustibles	12
Tableau 7 : Types de véhicules et facteurs d'émission associés	12
Tableau 8 : Schémas de transports pour les produits intermédiaires en fonction des différentes filières.	14
Tableau 9 : Distances de transport types des produits finaux. Source : JRC. *Cette valeur a été ajoutée en complément des autres valeurs.	14
Tableau 10 : Facteurs d'émission utilisés pour le transport maritime et ferroviaire	15
Tableau 11 : Schémas d'humidités de référence et hypothèses retenues dans l'étude	16
Tableau 12 : Exemple de valeurs utilisées pour décrire une unité de cogénération avec un rendement énergétique >75%	17
Tableau 13 : Facteurs d'émissions - Collecte du bois bocager	19
Tableau 14 : Facteurs d'émission – Broyage. *Ratio diesel EEA_EMEP	20
Tableau 15 : Procédés de séchage	21
Tableau 16 : Procédés de tri des déchets bois en plateforme	22
Tableau 17 : Hypothèses retenues pour l'évaporation des liqueurs noires. *valeurs utilisées dans les calculs	23
Tableau 18 : Procédé d'évaporation des liqueurs noires	24
Tableau 19 : Données de références disponibles pour représenter l'épaississement des boues papetières	24
Tableau 20 : Procédés d'épaississement des boues papetières	25
Tableau 21 : Processus de récolte du bois bocager	27
Tableau 22 : Processus de broyage en bord de haie	27
Tableau 23 : Procédé de séchage en bord de haie	28
Tableau 24 : Processus de broyage de bois d'élague en plateforme	29
Tableau 25 : Émissions de GES des filières bois hors forêt. Valeurs types et standards agrégées.	31

Tableau 26 : Émissions de GES des filières bois hors forêt. Valeurs types et standards désagrégées.	31
Tableau 27 : Réductions d'émissions de GES des filières bois hors forêt. Valeurs types et standards pour les usages en chaleur et en électricité	33
Tableau 28 : Processus de tri des déchets de bois	35
Tableau 29 : Émissions de GES des filières bois déchet. Valeurs types et standards agrégées.	37
Tableau 30 : Émissions de GES des filières bois déchet. Valeurs types et standards désagrégées.	37
Tableau 31 : Réductions d'émissions de GES des filières bois déchet. Valeurs types et standards pour les usages en chaleur et en électricité	38
Tableau 32 : Émissions de GES des filières papetières. Valeurs types et standards agrégées	43
Tableau 33 : Émissions de GES des filières papetières. Valeurs types et standards désagrégées	43
Tableau 34 : Réductions d'émissions des combustibles sous format plaquettes décrits dans RED pour des usages en cogénération	45
Tableau 35 : Réductions d'émissions des combustibles sous format pellet décrits dans RED pour des usages en cogénération	46
Tableau 36 : Exemple de réductions d'émissions des combustibles issus de bois hors forêt pour des usages en cogénération dont le rendement énergétique total est d'au moins 75%	49
Tableau 37 : Exemple de réductions d'émissions des combustibles issus de bois déchet pour des usages en cogénération dont le rendement énergétique total est d'au moins 75%	49
Tableau 38 : Exemple de réductions d'émissions des combustibles issus de filières papetières pour des usages en cogénération dont le rendement énergétique total est d'au moins 75%	50

9 BIBLIOGRAPHIE

ADEME. (2022). Analyse du Cycle de Vie du bois énergie collectif et industriel. Rapport final. <https://librairie.ademe.fr/>

ADEME, CEDEN, Biomasse Normandie, & FCBA. (2016). *ERCIBEN. État de l'art de la gestion des déchets de bois en Europe*.

Grasselly, D., Lescourret, F., & Collet, S. (2019). Chapitre 2. Le service d'approvisionnement en fruits. La production de fruits en France métropolitaine. In M.-C. Bopp (Ed.), *Services rendus par les cultures fruitières*.

European Environment Agency (EEA). (2023). *EMEP/EEA Air pollutant emission inventory Guidebook* ; Technical guidance to prepare national emission inventories

Öko-Institut, Uwe R. Fritsche, Klaus Schmidt (2021) Global Emission Model of Integrated Systems (GEMIS) Database, version 5.0 (2021), Consulté en novembre 2023, disponible sur <https://iinas.org/en/downloads/gemis-downloads/>

CITEPA, 2022, Base de données OMINEA, consulté en novembre 2023, disponible sur <https://www.citepa.org/fr/omine/>

IPCC, Darío Gómez, A. R., Watterson Branca B Americano, J. D., Ha, C., Marland, G., Matsika, E., Nenge Namayanga, L., Osman-Elasha, B., Kalenga Saka, J. D., Treanton, K., & Quadrelli, R. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

JRC. (2017). Solid and gaseous bioenergy pathways: input values and GHG emissions. <https://doi.org/10.2790/27486>

Union Européenne. (2018). 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

Union Européenne. (2023). Directive (UE) 2023/2413 du Parlement européen et du Conseil du 18 octobre 2023 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables

Record. (2007). Revue des filières de traitement/valorisation des boues Critères de choix d'une filière adaptée et arbre de décision associé. www.record-net.org

Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Rodrigo Gonzalo, M., Giner Santonja, G., Roudier, S., & Delgado Sancho, L. (2015). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. <https://doi.org/10.2791/370629>

10 ANNEXE

Liste des experts ayant contribué à l'étude

Ariane Grisey	CTIFL	Ingénieure • Responsable d'unité • Unité Environnement - Energie
Dominique Boulday	Ceden	Responsable pôle déchets énergie environnement Responsable agence Ouest
Esther Bustillo	Engie	Biomass & Green Fuels Lab - Project Engineer LABORELEC
Jerôme Delannoy	Engie	Directeur Biomasse
Louis de Reboul	Veolia	Président de la filière palettes et bois de FEDEREC
Marie Descat	Fedene	Responsable Commission Bioénergies et territoires
Marion Mezzina	Engie	Chargée de la Qualité, Certification et Veille réglementaire Biomasse
Matthieu Fleury	CIBE/ BIOCOMBUSTIBLE	Président
Matthieu Petit	CBQ+ / fibois	Responsable qualité
Olivier Riu	Copacel	Responsable Energie
Pascal Philippe	Dalkia	Directeur Pôle Performance Industrielle
Thomas Huiban	Federrec	Chargé de mission QSE et recyclage
Yves Ryckmans	Engie	Chief Technology Officer Biomass and Solid Fuels