

# Fiches Ressources

14 fiches permettant de dresser l'inventaire des différents types de biomasses étudiées dans cette étude et de prendre la mesure de leurs enjeux propres que sont les produits issus de l'agriculture, les produits de la forêt et des arbres hors forêt, ainsi que la question des déchets.



Fiche 1 : CIVE



Fiche 2 : Résidus de cultures



Fiche 3 : Effluents d'élevage



Fiche 4 : Herbes



Fiche 5 : Biodéchets



Fiche 6 : Déchets d'industries agro-alimentaires



Fiche 7 : Boues de STEP



Fiche 8 : Déchets verts



Fiche 9 : Bois forêt



Fiche 10 : Bois hors-forêt



Fiche 11 : Connexes



Fiche 12 : Liqueurs noires



Fiche 13 : Déchets de bois



Fiche 14 : Combustibles Solides de Récupération

>> ÉTUDE "QUELLES BIOMASSES POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?" - 2024 - SOLAGRO



# Cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE)

Les cultures intermédiaires à vocation énergétique sont des cultures semées entre deux cultures principales qui présentent de nombreux avantages.

## Description de la ressource

- **Capture des reliquats d'azote** restant dans le sol après la récolte ;
- **Protection contre l'érosion** en évitant de laisser le sol nu entre deux cultures ;
- **Compétition avec les adventices** qui ont ainsi moins de place ;
- **Stockage du carbone** dans le sol ;
- **Production de biomasse.**

Les cultures intermédiaires peuvent porter plusieurs dénominations selon la fonction choisie prioritairement : les CIPAN (Culture Intermédiaire Piège à Nitrates) pour la fonction piège à nitrate, permettant de capter une partie de l'azote de la culture précédente et d'en limiter les pertes dans les sols et les eaux, et les Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique (CIVE) pour la fonction de production d'énergie.

On distingue plusieurs catégories de cultures intermédiaires, qui dépendent de la rotation :

**Les CIVE d'hiver sont des cultures semées en septembre après une culture d'hiver** (culture semée à l'automne et récoltée à l'été : blé, orge, colza, pois...), et récoltée en avril/mai avant une culture d'été (culture semée au printemps et récoltée à l'automne : maïs, tournesol, sorgho, soja).

**Les CIVE d'été sont insérées entre deux cultures principales d'hiver**, elles sont implantées entre la récolte

de la culture précédente en été et avant le semis de culture suivante en automne. Elles présentent plus de risque que les CIVE d'hiver puisqu'elles bénéficient d'un temps de pousse plus court et sont soumises au risque de sécheresse estival.

Il existe également différentes stratégies de conduite des CIVE selon le niveau et le type de fertilisation, le recours ou non à l'irrigation et aux traitements phytosanitaires ou encore l'objectif de rendement. La date de récolte est un point clé : trop tardive, elle peut réduire le rendement de la culture principale.

La mise en place d'une CIVE, par le fait d'un rendement en biomasse plus important qu'un couvert végétal, **permet la restitution de matière organique au sol** par le biais des chaumes et des racines, à laquelle s'ajoute le digestat épandu sur les parcelles de production.

## Quantification de la ressource

La ressource totale que représentent les CIVE est calculée sur la base de l'évolution des assolements.

Le calcul du potentiel de production prend en compte :

- Le contexte climatique, en établissant trois zones (potentiel bon, moyen et médiocre) ;
  - Les surfaces en cultures d'été et en cultures d'hiver ;
- Une hypothèse de variabilité interannuelle des rendements.

**Un seuil de 4 tMS/ha au-dessous duquel les CIVE ne seraient pas récoltées est retenu**, ce qui aboutit à une récolte de 50 % des CIVE produites annuellement sur surfaces de grandes cultures.

Ainsi, un potentiel de CIVE est évalué de l'ordre de **40 MtMS en France en 2050, avec 20 MtMS récoltables pour la méthanisation (soit environ 20 % de la biomasse mobilisable pour l'énergie) et 20 MtMS laissées au champ en 2050.**

## ÉVALUATION DE LA RESSOURCE MOBILISABLE POUR L'ÉNERGIE

Ressource produite totale : **40 MtMS**

Ressource accessible : **20 MtMS**

Laissé au champ

Ressource mobilisable pour l'énergie : **20 MtMS**

FICHE  
#01



## Comparaison aux autres études

L'évaluation proposée se situe dans la moyenne des scénarios des autres études (de 5 à 40 MtMS/an).

Note : le détail des comparaisons est en annexe du rapport

## Valorisation actuelle

Les CIVE représentent aujourd'hui 13% des apports en matière brute de méthaneurs agricoles. La quantité totale de CIVE utilisée **actuellement est estimée à 1,5 MtMS/an**, soit environ 6 Mt brutes (FranceAgriMer, 2022) correspondant à 4,5 TWh/an. Les surfaces concernées représenteraient 300 000 ha.



## Valorisations possibles

**Exemple de lecture du tableau :** Cette ressource très biodégradable est traitée uniquement par *méthanisation* pour des questions de retour au sol de matière organique et des nutriments.

La *méthanisation* de la totalité des CIVE quantifiée en 2050 aboutirait à la production de 63 TWh de biométhane, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (58 TWh) ou chaleur haute température en industrie verrière par exemple (38 TWh) ou en électricité de pointe (22 TWh) ou en biocarburant (63 TWh) que ce soit pour les poids lourds ou le maritime.

En ajoutant plusieurs briques technologiques (*méthanolation*), cette ressource permettrait la production de biocarburant liquide qui pourrait être utilisé dans la production de chaleur haute température (35 TWh) ou d'électricité de pointe (21 TWh), ou de carburant (à partir de 53 TWh) de biokérosène pour les avions plus 6 TWh de biodiesel pour alimenter les poids lourds ou la flotte maritime .

Une fois la filière de valorisation et l'usage énergétique déterminés, le taux de retour énergétique et les autres critères économiques, environnementaux et sociaux sont à prendre en considération pour un usage optimal de la ressource initiale. Voir le détail dans la fiche « critère ».

Filières	Vecteur principal produit	Potentiel de prod. 2050 (TWh)	Selon usage final (TWh)					Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intég. territoriale		
			Chaleur basse temp.	Chaleur indust. haute temp.	Production d'électricité de pointe	Carburant ▲		Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol azote et phosphore	Émissions de GES (kgeq CO <sub>2</sub> /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production***	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique
						Poids-lourd ou maritime	Aérien										
Méthanisation + épuration		63	58	38	22	63		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	40	●	€€	3 - 100	Local à territorial *
Méthanisation + méthanolation		59	55	35	21	6	53	●	CO <sub>2</sub>	< 5	●	●	-	●	-	3 - 100	Extra-territorial

\* Excepté pour le maritime, pour lequel l'usage final est extra-territorial ▲ **AVERTISSEMENT** : les quantités d'énergies affichées pour les usages en carburants ne tiennent pas compte des pertes de conversion en énergie mécanique de l'ordre de 60 à 70 % selon le type de motorisation. \*\*\* En gras pour les filières matures

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ».  Chaleur (produit par combustion directe)  Gaz (méthane, injectable dans les réseaux)  Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)

# Résidus de culture

Les « résidus de cultures » sont la partie aérienne de la culture hors la récolte *stricto sensu*, c'est-à-dire hors grain pour les céréales et les oléo-protéagineux, et hors feuillage récolté pour les plantes fourragères.

## Description de la ressource

Les résidus de culture sont constitués de la paille et des menues pailles, des cannes de tournesol, des cannes de maïs grain, des collants de betterave, des fanes de pomme de terre... Les **résidus de cultures contribuent à entretenir la matière organique du sol et à fournir des éléments minéraux**. Ils sont en majorité laissés au champ, le reste étant exporté pour fournir de la litière (fumier), voire d'autres usages (paillage, construction, énergie). **Les seuils maximums d'export différent entre les filières permettant un retour au sol de la matière organique (litière, méthanisation) et celles sans retour au sol (usages matériaux, combustion...)**. Les résidus de culture sont constitués en grande partie de

**paille de céréales, qui fournissent l'essentiel du potentiel.** Les **menues pailles** sont les résidus végétaux rejetés par la moissonneuse-batteuse lors du nettoyage du grain pendant la moisson, elles sont composées de morceaux de paille, de l'enveloppe du grain et de graines d'adventices. Leur utilisation en méthanisation permet de réduire le potentiel germinatif de ces graines, et donc de limiter les contraintes de désherbage. Les **chaumes**, partie des céréales situées sous la barre de coupe, ne sont pas considérés comme exportables pour des raisons techniques, et restent donc sur la parcelle, ne faisant pas partie de cette ressource.

## Quantification de la ressource

La ressource totale est calculée en multipliant le **rendement de résidus de culture** (méthodologie CITEPA) par **les surfaces de chaque type de culture**.

La statistique agricole récente permet de définir les rendements de culture et surfaces cultivées. Pour les projections, le **scénario Afterres 2050** est utilisé avec les principaux impacts suivants :

- Sur les rendements :
    - Impact du changement climatique
    - Impact du changement des pratiques agricoles avec une conversion majoritaire en agriculture biologique et ou de conservation
  - Sur l'assolement :
    - Impact du changement de régime alimentaire (protéine animale partiellement remplacée par protéine végétale)
    - Impact du changement des pratiques agricoles, avec notamment l'allongement des rotations, l'intégration de légumineuse en partie pour réduire les besoins en engrais de synthèse
- Enfin, pour évaluer la ressource accessible pour des usages énergétiques, sont pris en compte :

- La part de retour au sol nécessaire pour ne pas dégrader leur potentiel agronomique

- La part utilisée pour les besoins en litière
- La part du retour au sol dépend du type de sol, du type d'assolement et du niveau de fertilisation organique. Sauf dans certaines situations (sols sableux, rotations avec pomme de terre et betterave), il est possible d'exporter entre **50 et 100 % des pailles en cas de retour au sol sur la parcelle (cas des litières et du digestat) et 30 % en moyenne en cas d'export sans retour au sol.**

Il a été retenu un taux d'export maximal de 50 % avec des besoins en litière satisfaits en intégralité : 50 % dans le cas de la méthanisation et 15 % pour les autres usages énergétiques) sans retour au sol (combustion, pyrogazéification).

Ainsi en 2050, sur une ressource totale 57 MtMS (paille + chaume), 40 MtMS sont accessibles pour une valorisation matière ou énergie. Dans le cas d'une mobilisation pour la **méthanisation** avec retour au sol du digestat, **un potentiel de 20 MtMS peut être prélevé, et dans le cas des autres valorisations énergétiques, un potentiel de 5 MtMS.**

## ÉVALUATION DE LA RESSOURCE MOBILISABLE POUR L'ÉNERGIE

Ressource produite totale : **57 MtMS**

Ressource accessible : **40 MtMS**

Laisser au champ (chaume)

Ressource mobilisable pour l'énergie : **5 - 20 MtMS**

Laisser au champ, litière, matériaux

FICHE  
#02



## Comparaison aux autres études

L'évaluation proposée se situe, comparativement aux autres études étudiées (2 et 62 MtMS), dans la fourchette basse pour l'évaluation sans retour au sol et dans la fourchette haute avec retour au sol.

Les principales raisons de cette divergence tiennent aux hypothèses prises concernant :

- Les rendements et surfaces des cultures en 2050
- L'interprétation des recommandations sur un export maximal de résidus permettant de conserver le potentiel agronomique de la parcelle.

- La distinction ou non des exports avec retour au sol des exports sans retour au sol

Note : le détail des comparaisons est en annexe du rapport

## Valorisation actuelle

Aujourd'hui, les résidus de culture sont peu valorisés en méthanisation et sont essentiellement broyés et laissés au champ ; une part est utilisée en litière animale.

## Valorisations possibles

**Exemple de lecture du tableau :** La combustion de la totalité (5 MtMS) des résidus de culture accessible pour cette filière en 2050 permettrait la production d'énergie primaire de 24 TWh, dont l'usage unique est la production de 21 TWh de chaleur basse ou moyenne température. La méthanisation (20 MtMS, car avec retour au sol) permettrait la production de 40,8 TWh de gaz, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse/moyenne température (37,7 TWh) ou chaleur haute température en industrie verrière par exemple (24,4 TWh) ou en électricité de pointe (14,3 TWh) ou en biocarburant pour les poids lourds ou pour le maritime (40,7 TWh). Cette ressource pourrait également être traitée pour aboutir à la production de biocarburant liquide, par pyrogazéification+Fischer-Tropsch par exemple.

Dans ce cas, sans retour au sol (donc 5 MtMS d'intrant), la production de carburant liquide s'élèverait à 13 TWh, qui pourraient être valorisés soit sous forme de chaleur basse/moyenne température (12 TWh) haute température (8 TWh), ou d'électricité de pointe (4 TWh) ou encore de biokérosène pour les avions (9 TWh) et de biodiesel (4 TWh) pour alimenter les poids lourds ou la flotte maritime. Une fois la filière de valorisation et l'usage énergétique déterminés, le taux de retour énergétique et les autres critères économiques, environnementaux et sociaux sont à prendre en considération pour un usage optimal de la ressource initiale. Voir le détail dans la fiche « critère ».

Filières	Vecteur principal produit	Potentiel de prod. 2050 (TWh)	Selon usage final (TWh)					Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intég. territoriale		
			Chaleur basse temp.	Chaleur indust. haute temp.	Production d'électricité de pointe	Carburant ▲		Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol azote et phosphore	Émissions de GES (kgeq CO <sub>2</sub> /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production***	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique
						Poids-lourd ou maritime	Aérien										
Méthanisation + épuration		40,8	37,7	24,4	14,3	40,7		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	40	●	€€	3 - 100	Local à territorial *
Combustion		23,6	21,3					●	-	> 10	●	●	10 - 20	●	€	0 - 100	Local
Fermentation		7,3	6,7	4,4	2,6	2,4	4,9	●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	80 - 240	●	€€€	30 - 5000	Extra-territorial
Pyrolyse rapide		12,1	11,2	7,3	4,3	3,8	8,3	●	Naphta	< 5	●	●	20 - 100	●	€€	100 - 3000	Extra-territorial
Pyrogazéification + Fisher Tropsh		12,6	11,7	7,6	4,4	3,6	9,0	●	CO <sub>2</sub> Naphta	5 à 10	●	●	10 -130	●	€€	70 - 1000	Extra-territorial
Pyrogazéification + méthanation		16,0	14,8	9,6	5,6	16		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	50	●	€€	20 - 500	Local à territorial *
Pyrogazéification + méthanolation		10,6	9,9	6,4	3,7	1,1	9,5	●	CO <sub>2</sub>	< 5	●	●	-	●	-	80 - 600	Extra-territorial
Méthanisation + méthanolation		38,2	35,5	22,9	13,4	4,1	34,2	●	CO <sub>2</sub>	< 5	●	●	-	●	-	3 - 100	Extra-territorial

\* Excepté pour le maritime, pour lequel l'usage final est extra-territorial ▲ **AVERTISSEMENT** : les quantités d'énergies affichées pour les usages en carburants ne tiennent pas compte des pertes de conversion en énergie mécanique de l'ordre de 60 à 70 % selon le type de motorisation. \*\*\* En gras pour les filières matures

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ». Chaleur (produit par combustion directe) Gaz (méthane, injectable dans les réseaux) Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)

# Effluents d'élevage

Les effluents d'élevage (fumiers et lisiers) sont les excréments ou déjections issus des bâtiments d'élevage.

## Description de la ressource

Les effluents d'élevage sont composés :

- **des lisiers**, liquides, ne comprenant que des déjections et récupérés en fosse ;
- **des fientes de volaille** qui ne contiennent que des

déjections solides ou liquides suivant le type de récupération (flushage ou raclage) ;

- **des fumiers**, solides, c'est-à-dire des déjections additionnées de paille. Cette paille provenant de la litière est donc incluse dans la ressource « fumier ».

Les effluents d'élevage sont épandus sur des périodes réglementées et nécessitent donc d'être stockés parfois sur plusieurs mois. Les effluents d'élevage, lisiers en particulier, sont odorants à l'épandage.

**Les fumiers et lisiers alimentent la vie microbologique**

**du sol.** Les fumiers apportent un amendement de fond aux parcelles, c'est-à-dire que les nutriments qu'ils contiennent sont rendus disponibles pour les plantes sur plusieurs années. Les lisiers sont immédiatement assimilables par les plantes.

## Quantification de la ressource

L'évaluation repose sur plusieurs étapes :

1. Évaluation des quantités d'excréments produits par le cheptel, à partir de ratios d'excrément/type d'animal, et par type d'effluent (fumier, lisier, fientes) ;
2. Évaluation de la part produite sous bâtiment, en considérant le temps de pâturage des différents cheptels ; seules les déjections « maîtrisées » (produites sous bâtiment) sont comptées dans l'évaluation du potentiel ;
3. Évaluation des quantités de paille ajoutées aux déjections pour la partie « fumier » ;
4. L'application d'un coefficient de 80 % pour prendre en compte un taux de mobilisation maximum.

En ce qui concerne les projections de cette ressource à 2050, plusieurs hypothèses conduisent à faire évoluer le gisement d'après le scénario agricole Afterres2050, en particulier :

- **Les effectifs des différents cheptels bovins, ovins, porcins et volailles vont continuer à diminuer dans**

**les prochaines décennies** : il s'agit d'une évolution tendancielle, qui pourrait se renforcer du fait des impératifs de réduction des émissions de méthane et de santé publique ;

- **Le temps de pâture des ruminants augmente** (66 % de temps de pâture moyen en 2050 pour les élevages bovins lait contre 40 % en 2018), permettant de freiner la perte de prairies permanentes : l'objectif est de maintenir les prairies naturelles et de privilégier les élevages à l'herbe ;
- **La part des systèmes « fumier » augmente** au détriment des systèmes « lisier », pour des raisons d'amélioration des conditions sanitaires des élevages ;
- Globalement, chacune de ces évolutions contribue à **diminuer la production de déjections d'élevage.**

En 2050, 9 MtMS sont accessibles à la valorisation énergétique dont **7 MtMS sont mobilisées pour la méthanisation** (80 %) avec un retour au sol des digestats ; le reste est valorisé directement par épandage.

## ÉVALUATION DE LA RESSOURCE MOBILISABLE POUR L'ÉNERGIE

Ressource produite totale : **9 MtMS**

Ressource accessible : **9 MtMS**

Ressource mobilisable pour l'énergie : **7 MtMS**

Non collectée pour la méthanisation, valorisation traditionnelle (épandage)

FICHE  
#03



## Comparaison aux autres études Horizon 2050

Les différentes évaluations proposées dans les études de références présentent des résultats variés. **La proposition se situe dans la moyenne basse des autres évaluations (4 à 22 MtMS).** Ces **divergences reposent essentiellement sur les hypothèses prises concernant l'évolution de la composition et de la taille du cheptel en France d'ici 2050.**

Note : le détail des comparaisons est en annexe du rapport.

## Valorisation actuelle



Actuellement, **12 MtMS de déjections animales sont produites en France**, et sont très majoritairement épandues sur les champs (88 %), **12 % sont déjà méthanisées.**

### Valorisations possibles

**Exemple de lecture du tableau :** Cette ressource très biodégradable est traitée uniquement par *méthanisation* pour des questions de retour au sol de matière organique et des nutriments.

La *méthanisation* de la totalité des déjections animales quantifiées en 2050 aboutirait à la production de 13 TWh de bio-méthane, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (12 TWh) ou chaleur haute température en industrie verrière par exemple (8 TWh) ou en électricité de pointe (5 TWh) ou en biocarburant pour les poids lourds ou le maritime (13 TWh).

En ajoutant plusieurs briques technologiques (*méthanolation*), cette ressource permettrait la production de biocarburant liquide qui pourrait être utilisé dans la production de chaleur haute température (8 TWh) ou d'électricité de pointe (4 TWh), voir de biokérosène pour les avions (11 TWh) et de biodiesel (1 TWh) pour alimenter les poids lourds ou la flotte maritime. Une fois la filière de valorisation et l'usage énergétique déterminés, le taux de retour énergétique et les autres critères économiques, environnementaux et sociaux sont à prendre en considération pour un usage optimal de la ressource initiale. Voir le détail dans la fiche « critère ».

Filières	Vecteur principal produit	Potentiel de prod. 2050 (TWh)	Selon usage final (TWh)					Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intég. territoriale		
			Chaleur basse temp.	Chaleur indust. haute temp.	Production d'électricité de pointe	Carburant ⚠		Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol azote et phosphore	Émissions de GES (kgeq CO <sub>2</sub> /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production***	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique
						Poids-lourd ou maritime	Aérien										
Méthanisation + épuration		13	12	8	5	13		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	40	●	€€	3 - 100	Local à territorial *
Méthanisation + méthanolation		13	12	8	4	1	11	●	CO <sub>2</sub>	< 5	●	●	-	●	-	3 - 100	Extra-territorial

\* Excepté pour le maritime, pour lequel l'usage final est extra-territorial ⚠ **AVERTISSEMENT :** les quantités d'énergies affichées pour les usages en carburants ne tiennent pas compte des pertes de conversion en énergie mécanique de l'ordre de 60 à 70 % selon le type de motorisation. \*\*\* En gras pour les filières matures

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ».  Chaleur (produit par combustion directe)  Gaz (méthane, injectable dans les réseaux)  Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)



# Herbe de prairies

L'herbe est la production des prairies, qu'elles soient permanentes ou temporaires.

## Description de la ressource

L'herbe, qu'elle soit pâturée directement ou stockée en ensilage puis distribuée aux animaux, est **une ressource fourragère importante pour l'élevage de ruminants : 9,2 Mha de prairies permanentes et 3,4 Mha de prairies temporaires et prairies « artificielles » (luzerne, trèfle).**

Le maintien des prairies dans les rotations est indispensable pour le **maintien du stockage de carbone** dans les sols d'une part, et le **maintien de la biodiversité** d'autre part. La baisse tendancielle du cheptel, notamment ruminant, pose la question de ce maintien.

En outre, l'alimentation des ruminants n'est pas l'unique usage de l'herbe de prairies. En effet on observe aujourd'hui un développement de projets de méthanisation incluant de l'herbe dans la ration, avec deux familles de cas typiques :

- **En élevage bovin : la méthanisation des ressources fourragères est la conséquence d'une logique de sécurisation.** En effet, la variabilité inter-annuelle des rendements fourragers impose de plus en plus de constituer des stocks afin de faire face aux aléas, ce qui implique de disposer de surplus structurels. C'est une partie de ces surplus qui est méthanisée.

Le fait de disposer d'une solution de valorisation pour les surplus non consommés apporte une **forme de résilience aux élevages et permet des stratégies d'adaptation face au changement climatique.**

- **En régions de grandes cultures** avec peu, voire aucun élevage : la méthanisation permet de donner **une voie de valorisation supplémentaire aux cultures de légumineuses et de prairies temporaires intégrées dans les rotations pour des raisons agronomiques**, et qui n'ont pas d'autres débouchés locaux. Ces cultures associées à la méthanisation permettent d'apporter une fertilisation organique sous forme de digestat, et de l'azote obtenu par fixation symbiotique, dans une logique de **réduction de l'usage des engrais de synthèse, voire de suppression en cas de passage en agriculture biologique (engrais « vert »)**. Le digestat, résidus, ou déchets « digérés », issus de la méthanisation des déchets organiques, joue alors un rôle agronomique identique que celui joué par le lisier.

## Quantification de la ressource

La quantité totale d'herbes et fourrages méthanisés en 2050 est calculée à partir des bilans d'approvisionnement qui tiennent compte :

- de l'évolution des cheptels (diminution du nombre de ruminants),
- de leur alimentation (plus de systèmes pâturant et herbagers, moins de systèmes basés sur le couple maïs-soja),
- des surfaces (diminution tendancielle des surfaces de prairies permanentes, réduction des cultures fourragères sur terres arables, réduction des prairies de graminées au profit des prairies de légumineuses) des rendements.

Cette ressource est complémentaire à d'autres CIVE, résidus de cultures, déjections d'élevage et peut compter jusqu'à 20 à 35 % de la ration totale. Le principe consiste à méthaniser en priorité les stocks les plus anciens, de plus faible qualité nutritionnelle, pour laisser la priorité des stocks les plus récents, plus appétents, aux animaux.

**En 2050**, la ressource totale produite s'élève à 57 MtMS, dont 22 MtMS de surplus dont **11 MtMS seraient méthanisées.**

## ÉVALUATION DE LA RESSOURCE MOBILISABLE POUR L'ÉNERGIE

Ressource produite totale : **57 MtMS**

Ressource accessible : **52 MtMS**

Laissé au champ

Ressource mobilisable pour l'énergie : **11 MtMS**

Alimentation animale

FICHE  
#04



## Comparaison aux autres études

La proposition retenue dans cette étude est supérieure aux autres études (entre 5 et 9 MtMS) et aux travaux antérieurs de Solagro. La révision à la hausse de la ressource s'explique par des travaux de modélisation prospectifs (Afterres 2023) plus précis réalisés sur le bilan fourrager, qui ont permis de montrer des marges d'excédents supérieures.

Note : le détail des comparaisons est en annexe du rapport

## Valorisation actuelle

**Aujourd'hui la quantité totale de ressources fourragères à partir d'herbe est estimée à 80 MtMS, avec 20 MtMS de surplus.**



La **quantité actuelle d'herbe méthanisée** n'est pas connue, elle est estimée en ordre de grandeur à **0,2 ou 0,3 MtMS**. On ne comptabilise pas ici les cultures fourragères dédiées à la méthanisation comme le maïs ensilé, qui sont supprimées dans les différents scénarios prospectifs.

## Valorisations possibles

**Exemple de lecture du tableau :** Cette ressource très biodégradable est traitée uniquement par *méthanisation* pour des questions de retour au sol de matière organique et des nutriments.

La *méthanisation* de la totalité de l'herbe de fauche quantifiée en 2050 aboutirait à la production de 26 TWh de biométhane, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (24 TWh) ou chaleur haute température en industrie verrière par exemple (16 TWh) ou en électricité de pointe (9 TWh) ou en biocarburant (26 TWh) que ce soit pour les poids lourds ou le maritime.

En ajoutant plusieurs briques technologiques (*méthanolation*), cette ressource permettrait la production de biocarburant liquide qui pourrait être utilisé dans la production de chaleur haute température (15 TWh) ou d'électricité de pointe (9 TWh), voire de biokérosène pour les avions (22 TWh) plus 3 TWh de biodiesel pour alimenter les poids lourds ou la flotte maritime. Une fois la filière de valorisation et l'usage énergétique déterminés, le taux de retour énergétique et les autres critères économiques, environnementaux et sociaux sont à prendre en considération pour un usage optimal de la ressource initiale. Voir le détail dans la fiche « critère ».

Filières	Vecteur principal produit	Potentiel de prod. 2050 (TWh)	Selon usage final (TWh)					Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intég. territoriale		
			Chaleur basse temp.	Chaleur indust. haute temp.	Production d'électricité de pointe	Carburant ▲		Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol azote et phosphore	Émissions de GES (kgeq CO <sub>2</sub> /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production***	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique
						Poids-lourd ou maritime	Aérien										
Méthanisation + épuration		26	24	16	9	26		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	40	●	€€	3 - 100	Local à territorial *
Méthanisation + méthanolation		25	23	15	9	3	22	●	CO <sub>2</sub>	< 5	●	●	-	●	-	3 - 100	Extra-territorial

\* Excepté pour le maritime, pour lequel l'usage final est extra-territorial ▲ **AVERTISSEMENT** : les quantités d'énergies affichées pour les usages en carburants ne tiennent pas compte des pertes de conversion en énergie mécanique de l'ordre de 60 à 70 % selon le type de motorisation. \*\*\* En gras pour les filières matures

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ».  Chaleur (produit par combustion directe)  Gaz (méthane, injectable dans les réseaux)  Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)

# Biodéchets

Les biodéchets englobent les déchets de cuisine, épluchures, restes de repas, produits non consommés...

## Description de la ressource

Les biodéchets proviennent de plusieurs sources :

- **des ménages : fraction fermentescible des ordures ménagères** (FFOM) hors déchets verts,
- **de la distribution : petites, moyennes et grandes surfaces,**
- **de la restauration hors foyer** : restauration collective et restauration commerciale.

Le tri à la source et **la valorisation des biodéchets sont imposés par la réglementation**, y compris pour les ménages, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2024 et la généralisation du tri à la source des biodéchets dans les pays membres de

l'Union européenne (Loi AGECE février 2020). Le mode de collecte de ces déchets (collecte en porte-à-porte ou en apport volontaire) diffère selon la source (ménages ou entreprises) et les territoires.

## Quantification de la ressource

Chaque catégorie est évaluée séparément :

- **Déchets fermentescibles des ménages hors déchets verts** : le ratio de production de fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM) retenu est de **45 kg/an par habitant**. C'est un ratio fréquemment observé lors de mises en place de collecte sélective en zone urbaine. Ce ratio est appliqué à l'ensemble des habitants en France, hormis les habitants des communes classées comme rurales, à l'habitat dispersé qui privilégie le compostage de proximité individuel. Cette ressource rurale représente 10 % du total de la ressource.
- **Production des biodéchets de grandes et moyennes Surfaces (GMS)** : les déchets de la distribution sont quantifiés à partir d'un ratio de production de déchet rapporté à la surface (m<sup>2</sup>) de magasin, compris entre 10 et 50 kg/m<sup>2</sup>.
- **Repas et restes de repas de la restauration hors foyer** : les biodéchets de la restauration hors foyer (RHF) sont quantifiés à partir d'un nombre de repas par effectifs (restauration collective) ou salariés

(restauration commerciale) et d'un **grammage moyen** de restes issus des repas, **compris entre 115 g/repas et 330 g/repas** selon le type d'établissement (source ADEME).

Au total, sur le territoire français, les biodéchets représentent **actuellement 1,8 MtMS** : **70 % issus des ménages (hors déchets verts) et 30 % issus des GMS et de la RHF**.

**En 2050**, la ressource en biodéchets mobilisable pour l'énergie s'élève à **1,1 MtMS** : malgré l'augmentation de la population, le potentiel de biodéchets est plus faible qu'actuellement. Cette baisse est liée aux objectifs de réduction du gaspillage, soit 50 % de réduction en 2030 par rapport à 2015 (Loi AGECE 2020).



**1,1 MtMS**

soit 1% de la biomasse mobilisable pour l'énergie en 2050

## ÉVALUATION DE LA RESSOURCE MOBILISABLE POUR L'ÉNERGIE

Ressource produite totale : **1,2 MtMS**

Ressource accessible : **1,1 MtMS**

Compostage des biodéchets des ménages dans les zones rurales

Ressource mobilisable pour l'énergie : **1,1 MtMS**

FICHE  
#05



## Comparaison aux autres études

On observe une **grande disparité au sein des références bibliographiques (de 0,2 à 8,5 MtMS)** qui restent peu nombreuses, notamment du fait du périmètre considéré (déchets verts inclus ou non, taux de mobilisation). **L'évaluation proposée se situe dans la fourchette basse.**

Note : le détail des comparaisons est en annexe du rapport

## Valorisation actuelle

Les biodéchets sont **aujourd'hui** :

- **10 % méthanisés ou compostés,**
- **2,8 % incinérés**
- **45 % traités en installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND).**

## Valorisations possibles

**Exemple de lecture du tableau :** Cette ressource très biodégradable peut être traitée par *méthanisation* et une partie, les huiles de cuisson, peut faire l'objet d'une valorisation en biocarburant via les filières *estérification* ou *hydrogénation*.

La *méthanisation* de la totalité des biodéchets en 2050 aboutirait à la production de 2,6 TWh de biométhane, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (2,4 TWh) ou chaleur haute température en industrie verrière par exemple (1,6 TWh) ou en électricité de pointe (1 TWh) ou en biocarburant (2,6 TWh), que ce soit pour les poids lourds ou le maritime.

Le traitement de la totalité des huiles de cuisson par *hydrogénation* en 2050 aboutirait à la production de 0,7 TWh de biocarburant liquide, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (0,6 TWh) ou haute température en industrie verrière par exemple (0,4 TWh) ou en électricité de pointe (0,2 TWh) ou encore de biokérosène pour les avions (0,5 TWh) et de biodiesel (0,2 TWh) pour alimenter les poids lourds ou la flotte maritime.

Une fois la filière de valorisation et l'usage énergétique déterminés, le taux de retour énergétique et les autres critères économiques, environnementaux et sociaux sont à prendre en considération pour un usage optimal de la ressource initiale. Voir le détail dans la fiche « critère ».

Note : les deux premières filières ne traitent que les huiles et les graisses.

Filières	Vecteur principal produit	Potentiel de prod. 2050 (TWh)	Selon usage final (TWh)					Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intég. territoriale		
			Chaleur basse temp.	Chaleur indust. haute temp.	Production d'électricité de pointe	Carburant ▲		Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol azote et phosphore	Émissions de GES (kgeq CO <sub>2</sub> /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production***	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique
						Poids-lourd ou maritime	Aérien										
Déchet gras + esterification		0,6	0,6	0,4	0,2	0,2	0,4	●	Glycérine	> 10	●	●	50	●	€	10 - 800	Extra-territorial
Déchet gras + hydrogénation		0,7	0,6	0,4	0,2	0,2	0,5	●	-	5 à 10	●	●	50 - 80	●	€	100 - 2000	Extra-territorial
Méthanisation + épuration		2,6	2,4	1,6	0,9	2,6		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	40	●	€€	3 - 100	Local à territorial
Méthanisation + méthanolation		2,5	2,3	1,5	0,9	0,3	2,2	●	CO <sub>2</sub>	< 5	●	●	-	●	-	3 - 100	Extra-territorial

\* Excepté pour le maritime, pour lequel l'usage final est extra-territorial ▲ **AVERTISSEMENT** : les quantités d'énergies affichées pour les usages en carburants ne tiennent pas compte des pertes de conversion en énergie mécanique de l'ordre de 60 à 70 % selon le type de motorisation. \*\*\* En gras pour les filières matures

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ». Chaleur (produit par combustion directe) Gaz (méthane, injectable dans les réseaux) Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)

# Déchets des industries agro-alimentaires

Les industries agro-alimentaires, ou IAA, génèrent des déchets liés à leur production principale qui peuvent être sous la forme d'effluents (lavages, boues...) ou de déchets organiques (refus de production, parties non valorisables en alimentation humaine...).

## Description de la ressource

Ces déchets sont généralement riches en cellulose ou en graisses.

Les IAA génèrent également souvent des sous-produits ou co-produits (pulpes, mélasses, graisses...) qui font l'objet d'une valorisation à haute valeur ajoutée (cosmétique, alimentation animale, etc.). L'évaluation réalisée ici porte uniquement sur les déchets qui n'entrent pas en compétition avec ces filières.



## Quantification de la ressource

La ressource organique valorisable issue des industries agro-alimentaires est difficile à appréhender. Elle repose sur la distinction entre les déchets (destinés à l'abandon) et les sous-produits ou co-produits (qui trouvent un marché). **À ce jour, la quasi-totalité des déchets issus des IAA n'est ni incinérée ni enfouie en ISDND. Une grande partie est directement épandue sur les champs ou subit une étape de compostage.**

D'autres filières à plus grande valeur ajoutée sont également privilégiées : cosmétique pour les collagènes (déchets gras) ainsi que la filière en alimentation animale par exemple.

**Les conditions de mobilisation des déchets des IAA pour la production d'énergie dépendent fortement du contexte local, des filières déjà en place et de la stratégie des entreprises.**

Elles dépendront en particulier :

- de la valeur économique attribuée à la ressource par l'industriel,
- du poids économique du transport dans la transaction,
- des facilités logistiques offertes par l'unité de valorisation énergétique (fréquence de collecte, réactivité sur des enlèvements exceptionnels, capacité d'absorber une saisonnalité, etc.).

**L'estimation du potentiel a été réalisée, au niveau national, à partir d'études nationales, régionales, et d'études des inter-professions sur les déchets et sous-produits, filière par filière, en écartant les valeurs incohérentes.** Le tonnage national total pour chaque activité (code APE) a été ensuite ramené au nombre de salariés afin de pouvoir ensuite territorialiser cette ressource.

**Les ratios de production s'échelonnent entre 0,6 tMS/salarié (cas de la pâtisserie) à 26 tMS/salarié (cas des malteries), avec en moyenne pour l'ensemble des IAA, un ratio de 5 tMS/salarié.**

La production actuelle de déchets des IAA accessible à la production d'énergie est estimée à **1,5 MtMS/an**.

En 2050, le potentiel s'élève à 1,3 MtMS en prenant en compte une réduction de 50 % du gaspillage alimentaire par rapport au niveau de 2015 d'ici 2030 (Loi AGECE 2020).



## 1,3 MtMS

soit 1,5 % de la biomasse mobilisable pour l'énergie en 2050



## Comparaison aux autres études

Les différences observées sont liées au degré d'appréciation entre déchets et sous-produits ou co-produits et à la priorité donnée ou non à la valorisation énergétique par rapport aux filières déjà en place, notamment l'alimentation animale. **L'évaluation proposée se situe dans la fourchette basse des autres études issues de la bibliographie (1,5 à 6,5 MtMS/an)**

Note : le détail des comparaisons est en annexe du rapport

## Valorisation actuelle

Aujourd'hui, **0,8 MtMs de déchets issus des IAA seraient déjà méthanisés soit environ 50 % de la ressource estimée**. Le reste de la ressource est valorisé, suivant les types de déchets en incinération/ISDND, épandage/compostage, alimentation animale, ou en produits secondaires type cosmétiques.

## Valorisations possibles

**Exemple de lecture du tableau :** Cette ressource très biodégradable et généralement liquide peut être traitée par *méthanisation ou gazéification hydrothermale ou liquéfaction hydrothermale*.

Une partie seulement, les graisses et huiles, peut faire l'objet d'une valorisation en biocarburant via les filières *estérification ou hydrogénation*.

La *méthanisation* de la totalité des déchets d'IAA en 2050 aboutirait à la production de 4,2 TWh de biométhane, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (3,9 TWh) ou chaleur haute température en industrie verrière par exemple (2,5 TWh) ou en électricité de pointe (1,5 TWh) ou en biocarburant (4,2 TWh) que ce soit pour les poids lourds ou le maritime.

Le traitement de la totalité des déchets gras des IAA par *hydrogénation* en 2050 aboutirait à la production de 4,4 TWh de biocarburant liquide, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (4,1 TWh) ou haute température en industrie verrière par exemple (2,7 TWh) ou en électricité de pointe (1,6 TWh) ou encore de biokérosène pour les avions (3 TWh) et de biodiesel (1,4 TWh) pour alimenter les poids lourds ou la flotte maritime.

Une fois la filière de valorisation et l'usage énergétique déterminés, le taux de retour énergétique et les autres critères économiques, environnementaux et sociaux sont à prendre en considération pour un usage optimal de la ressource initiale. Voir le détail dans la fiche « critère ».

Note : les deux premières filières ne traitent que les huiles et les graisses.

Filières	Vecteur principal produit	Potentiel de prod. 2050 (TWh)	Selon usage final (TWh)					Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intég. territoriale		
			Chaleur basse temp.	Chaleur indust. haute temp.	Production d'électricité de pointe	Carburant ▲		Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol azote et phosphore	Émissions de GES (kgeq CO <sub>2</sub> /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production***	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique
						Poids-lourd ou maritime	Aérien										
Déchet gras + esterification		4,1	3,8	2,5	1,4	1,3	2,8		Glycérine	> 10			50		€	10 - 800	Extra-territorial
Déchet gras + hydrogénation		4,4	4,1	2,7	1,6	1,4	3,0		-	5 à 10			50 - 80		€	100 - 2000	Extra-territorial
Méthanisation + épuration		4,2	3,9	2,5	1,5	4,2			CO <sub>2</sub>	> 10			40		€€	3 - 100	Local à territorial
Liquéfaction hydrothermale		4,0	3,7	2,4	1,4	1,2	2,7		Naphta	< 5			50		€€€	90 - 300	Extra-territorial
Gazéification hydrothermale		4,4	4,0	2,6	1,5	4,4			CO <sub>2</sub>	> 10			-		€€€	4 - 50	Local à territorial
Méthanisation + méthanolation		3,9	3,6	2,3	1,4	0,4	3,5		CO <sub>2</sub>	< 5			-		-	3 - 100	Extra-territorial

\* Excepté pour le maritime, pour lequel l'usage final est extra-territorial ▲ **AVERTISSEMENT :** les quantités d'énergies affichées pour les usages en carburants ne tiennent pas compte des pertes de conversion en énergie mécanique de l'ordre de 60 à 70 % selon le type de motorisation. \*\*\* En gras pour les filières matures

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ». Chaleur (produit par combustion directe) Gaz (méthane, injectable dans les réseaux) Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)

# Boues de station d'épuration des eaux usées

Les boues de station d'épuration sont un co-produit du traitement des eaux usées.

## Description de la ressource

Le traitement des eaux résiduaires urbaines entrant sur les stations d'épuration des eaux usées (STEU) **génère des boues et des graisses**, sous-produits pouvant faire l'objet d'un traitement pour la production d'énergie (méthanisation, gazéification hydrothermale), voire la valorisation spécifique des graisses pour la production de biocarburants.

## Quantification de la ressource

La quantification est basée sur les données du Portail de l'assainissement du ministère qui recense l'ensemble des TEU de France, avec leur taille (en EH), les productions de boues (MtMS/an) et de la littérature (ratios, liste des TEU équipées d'une étape de méthanisation).

Fin 2019, 1,5 MtMS de boues primaires et biologiques et de graisses sont produites en France.

**1,4 MtMS/an, soit 90 % du gisement total de boues et de graisses sont accessibles à la production d'énergie par méthanisation** correspondant aux stations de plus de 5 000 EH :

- entre 5 000 et 30 000 EH (environ 1 700 TEU), les boues peuvent être mobilisables sur un ouvrage collectif de traitement des boues ;
- pour les stations de plus de 30 000 EH (environ 560 TEU), un équipement dédié peut être installé sur la station d'épuration.

Aujourd'hui, environ **38 % des boues et graisses des STEU sont déjà méthanisées.**

**En 2050**, les sous-produits de l'assainissement (boues urbaines et graisses) mobilisables pour la méthanisation ou la gazéification hydrothermale s'élèvent à environ **1,4 MtMS.**

**La France compte environ 22 000 stations d'épuration**, dont, particularité française, une très grande majorité de petites stations. En effet, **97 % des STEU sont de taille inférieure à 30 000 EH** (équivalent habitant).



 **1,4 MtMS**

quantité de sous-produits de l'assainissement (boues urbaines et graisses) mobilisables pour la méthanisation ou la gazéification hydrothermale en 2050

## ÉVALUATION DE LA RESSOURCE MOBILISABLE POUR L'ÉNERGIE

Ressource produite totale : **1,5 MtMS**

Ressource accessible : **1,4 MtMS**

STEU de moins de 5 000 EH (équivalent habitant)

Ressource mobilisable pour l'énergie : **1,4 MtMS**

FICHE  
#07



## Comparaison aux autres études

**Ce résultat fait consensus parmi les autres études de la bibliographie :** les divergences (entre 0,6 et 1,5 MtMS) sont liées à la taille minimale de TEU jugée compatible pour l'ajout d'une étape de méthanisation. À noter que la gazéification hydrothermale n'est pas considérée dans ces études et pourrait voir abaisser le seuil de la taille minimum.

Note : le détail des comparaisons est en annexe du rapport

## Valorisation actuelle

On compte près d'une centaine de stations d'épuration équipées d'un méthaniseur. Plus de la moitié des TEU de grande capacité (> 200 000 EH) méthanisent leurs boues, avec une valorisation du biogaz, principalement en injection sur le réseau de gaz.

**Aujourd'hui, au total près de 0,57 MtMS passent par une étape de méthanisation,** pour une production de 0,4 MtMS de boues digérées.

L'exutoire final principal en 2019 pour les boues urbaines (méthanisées ou non) est le retour au sol (83 % des tonnes de matière sèche), soit par épandage direct (37 %) soit après une étape de compostage (46 %). Le reste est incinéré (17 %), la mise en décharge reste marginale (<1 %)

D'une façon générale, les boues des stations d'épuration de taille inférieure à 60 000 EH sont soit épandues soit compostées, celles de taille comprise entre 60 000 et 200 000 EH sont majoritairement compostées, et celles des stations de plus de 200 000 EH sont majoritairement incinérées.

## Valorisations possibles

**Exemple de lecture du tableau :** Cette ressource très biodégradable et liquide peut être traitée par *méthanisation* ou *gazéification hydrothermale* ou *liquéfaction hydrothermale*.

La *méthanisation* de la totalité des boues de stations d'épuration urbaines en 2050 aboutirait à la production de 3,0 TWh de biométhane, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (2,8 TWh) ou chaleur haute température en industrie verrière par exemple (1,8 TWh) ou en électricité de pointe (1,1 TWh) ou en biocarburant (3,0 TWh) que ce pour les poids lourds ou le maritime

La *gazéification hydrothermale* de la totalité des boues de stations d'épuration urbaines en 2050 aboutirait à la production de 4,6 TWh de méthane de synthèse, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (4,3 TWh) ou chaleur haute température en industrie verrière par exemple (2,8 TWh) ou en électricité de pointe (1,6 TWh) ou en biocarburant (3,8 TWh) pour les poids lourds ou le maritime.

Une fois la filière de valorisation et l'usage énergétique déterminés, le taux de retour énergétique et les autres critères économiques, environnementaux et sociaux sont à prendre en considération pour un usage optimal de la ressource initiale. Voir le détail dans la fiche « critère ».

Filières	Vecteur principal produit	Potentiel de prod. 2050 (TWh)	Selon usage final (TWh)					Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intég. territoriale		
			Chaleur basse temp.	Chaleur indust. haute temp.	Production d'électricité de pointe	Carburant ▲		Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol azote et phosphore	Émissions de GES (kgeq CO <sub>2</sub> /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production***	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique
						Poids-lourd ou maritime	Aérien										
Méthanisation + épuration		3,0	2,8	1,8	1,1	3,0		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	40	●	€€	3 - 100	Local à territorial
Liquéfaction hydrothermale		4,2	3,9	2,5	1,5	1,3	2,9	●	Naphta	< 5	●	●	50	●	€€€	90 - 300	Extra-territorial
Gazéification hydrothermale		4,6	4,3	2,8	1,6	4,6		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	-	●	€€€	4 - 50	Local à territorial
Méthanisation + méthanolation		2,8	2,6	1,7	1,0	0,3	2,5	●	CO <sub>2</sub>	< 5	●	●	-	●	-	3 - 100	Extra-territorial

\* Excepté pour le maritime, pour lequel l'usage final est extra-territorial ▲ **AVERTISSEMENT :** les quantités d'énergies affichées pour les usages en carburants ne tiennent pas compte des pertes de conversion en énergie mécanique de l'ordre de 60 à 70 % selon le type de motorisation. \*\*\* En gras pour les filières matures

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ». Chaleur (produit par combustion directe) Gaz (méthane, injectable dans les réseaux) Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)



# Déchets verts non ligneux et fauches de bord de routes

Les déchets verts sont des déchets biodégradables issus de la taille et de l'entretien des espaces verts publics et privés, ou encore de l'élagage des haies et arbres d'alignement.

## Description de la ressource

Les déchets verts sont composés :

- **de produits fermentescibles** (les tontes, les feuilles des arbres, les fleurs fanées des massifs),
- **de produits ligneux**, tels que branches d'élagage et tailles de haies.

Ils peuvent être générés par :

- les ménages disposant d'un jardin,
- les entretiens des espaces verts (service public ou paysagistes),
- les services d'entretien des routes.

**Les fauches de bord de route sont issues de l'entretien des bas-côtés des voies départementales et communales.** L'objectif de la collecte est de réduire les travaux de curages de fossés d'une part et de limiter la propagation des espèces invasives d'autre part. Cette

collecte n'est pas systématiquement mise en œuvre du fait du coût important pour obtenir une quantité intéressante (investissement matériel, logistique pour la valorisation, exutoire proche) et de qualité (tri manuel des déchets obligatoire).

## Quantification de la ressource

**Un ratio de production de déchets verts** par habitant est appliqué et diffère suivant les zones climatiques **entre 45 kg/habitant (montagnard) et 160 kg/habitant (océanique)**. Sur le tonnage brut, 50 % sont ligneux. Ce ratio est issu de l'étude « Audit des plateformes de compostage de déchets organiques en France - ADEME, CEDEN, Biomasse Normandie (2008) ».

La ressource quantifiée correspond donc à l'ensemble des déchets verts transitant en plateforme de compostage ; elle ne tient pas compte des déchets verts qui ne sont pas collectés, mais utilisés sur place en broyat ou compostage individuel.

Ne sont pas pris en compte dans cette estimation :

- les objectifs de réduction liée au gaspillage,
- l'évolution attendue du refus de prise en charge des tontes par certaines déchèteries,
- l'impact du changement climatique (sécheresse) sur la ressource.

L'estimation des fauches de bord de route repose sur une compilation de retours d'expériences (projet CARMEN en Bretagne, et département de la Mayenne),

avec **un ratio de 2,6 tMB/km de route fauchable (20 % des km de routes départementales et 50 % des km des routes communales)**.

Actuellement, 7 MtMB de déchets verts sont collectées, soit environ 3 MtMS, avec **1,3 MtMS de déchets verts non ligneux (30 % MS)** et 1,6 MtMS de déchets verts ligneux (40 % MS).

En 2050, sans prise en compte des objectifs de réduction, et uniquement du fait des projections INSEE sur l'augmentation de la population, la ressource en déchets verts augmente très faiblement (+60 ktMS).

**Le potentiel de fauches de bord de route s'élève à 0,30 MtMS.**



## 1,6 MtMS

soit 1,5 % de la biomasse mobilisable pour l'énergie en 2050



## Comparaison aux autres études

Les deux évaluations présentées sont plus faibles (0,4 à 0,7 MtMS) en raison d'un périmètre d'analyse restreint aux fauches de bord de route. Notre évaluation est proche de celle de GFC 2022 et plus faible de ADEME 2018 en raison de la prise en compte de retours d'expérience moins optimistes.

Note : le détail des comparaisons est en annexe du rapport

## Valorisation actuelle

La grande majorité des déchets verts collectés est aujourd'hui compostée. On estime à environ 0,09 MtMS les déchets verts aujourd'hui méthanisés.

### Valorisations possibles



**Exemple de lecture du tableau :** Cette ressource très biodégradable est traitée uniquement par *méthanisation* pour des questions de retour au sol de matière organique et des nutriments.

La *méthanisation* de la totalité des déchets verts non ligneux et fauches de bords de route en 2050 aboutirait à la production de 3,4 TWh de biométhane, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (3,1 TWh) ou chaleur haute température en industrie verrière par exemple (2,0 TWh) ou en électricité de pointe (1,2 TWh) ou en biocarburant (3,4 TWh), que ce soit pour les poids lourds ou le maritime.

En ajoutant plusieurs briques technologiques (*méthanolation*), cette ressource permettrait la production de biocarburant liquide qui pourrait être utilisé dans la production de chaleur basse température (2,9 TWh) ou haute température (1,9 TWh) ou d'électricité de pointe (1,1 TWh), voire de biokérosène pour les avions (2,8 TWh) plus du biodiesel (0,3 TWh) pour alimenter les poids lourds ou la flotte maritime.

Une fois la filière de valorisation et l'usage énergétique déterminés, le taux de retour énergétique et les autres critères économiques, environnementaux et sociaux sont à prendre en considération pour un usage optimal de la ressource initiale. Voir le détail dans la fiche « critère ».

Note : les déchets verts ligneux sont comptabilisés avec le Bois Hors Forêt (Fiche Ressources 10)

Filières	Vecteur principal produit	Potentiel de prod. 2050 (TWh)	Selon usage final (TWh)					Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intég. territoriale		
			Chaleur basse temp.	Chaleur indust. haute temp.	Production d'électricité de pointe	Carburant ▲		Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol azote et phosphore	Émissions de GES (kgeq CO <sub>2</sub> /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production***	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique
						Poids-lourd ou maritime	Aérien										
Méthanisation + épuration		3,4	3,1	2,0	1,2	3,4		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	40	●	€€	3 - 100	Local à territorial
Méthanisation + méthanolation		3,2	2,9	1,9	1,1	0,3	2,8	●	CO <sub>2</sub>	< 5	●	●	-	●	-	3 - 100	Extra-territorial

\* Excepté pour le maritime, pour lequel l'usage final est extra-territorial ▲ **AVERTISSEMENT :** les quantités d'énergies affichées pour les usages en carburants ne tiennent pas compte des pertes de conversion en énergie mécanique de l'ordre de 60 à 70 % selon le type de motorisation. \*\*\* En gras pour les filières matures

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ».  Chaleur (produit par combustion directe)  Gaz (méthane, injectable dans les réseaux)  Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)

# Bois forêt

Bois directement issu de prélèvements forestiers.

## Description de la ressource

Les prélèvements forestiers se répartissent entre 3 types de production : le bois d'œuvre (BO), le bois d'industrie (BI) et le bois énergie (BE). Il est admis que l'utilisation du bois prélevé en forêt doit respecter une hiérarchie des usages fondée sur la valeur économique et sur la durée de vie. Le BO est le bois qui vaut le plus cher et présente la plus longue durée de vie ; le BE est le moins cher et de courte durée de vie, le BI présente des caractéristiques intermédiaires.

Le BE peut être en compétition avec des usages matière, BO ou BI, en fonction des cours des différents produits, de la demande, et de la présence ou non d'outils de transformation à proximité. On notera que le BO et le BI produisent par ailleurs indirectement du bois destiné à une valorisation énergétique (voir les fiches F11 « connexes » et F12 « liqueurs noires »).

Cette hiérarchie des usages est généralement respectée. Le bois énergie issu de la forêt provient, en France et en Europe, en majorité de la sylviculture dédiée à la production de bois

d'œuvre ou de bois d'industrie. La sylviculture dédiée au bois énergie est minoritaire et concerne principalement des taillis ou des peuplements de très faible valeur commerciale.

La sylviculture destinée à la production de bois matériau, principalement BO mais aussi BI, implique des opérations dites de dépressage, de balivage ou d'éclaircie (et parfois des coupes rases) qui permettent de favoriser le développement des arbres conservés. Ces coupes d'éclaircies sont valorisables en BE ou BI.

La récolte de BE apparaît majoritairement comme un outil de gestion forestière pour améliorer les peuplements. Elle peut également offrir un exutoire pour les bois déperissant : la mortalité en forêt a connu une hausse spectaculaire depuis quelques années, et les coupes sanitaires, destinées à réduire la pression (maladies, stress hydrique, risque d'incendie, vulnérabilité aux tempêtes) sont en forte augmentation.

## Quantification de la ressource

La plupart des scénarios prospectifs voient une augmentation des prélèvements forestiers justifiée par le fait que seule la moitié de l'accroissement annuel est prélevée. Cependant, la diminution de l'accroissement forestier ces dernières années fait peser de fortes incertitudes sur l'avenir de la forêt française et européenne.

La SNBC2, qui reposait sur un prélèvement en forêt de plus de 80 Mm<sup>3</sup> en 2050, est caduque, et la SNBC3 devrait aboutir à une valeur autour de 60 Mm<sup>3</sup>, comme les scénarios Afterres ou Ademe S1 et S2. Le Plan National Forêt Bois prévoit également une augmentation des récoltes de 12 Mm<sup>3</sup> à un horizon plus proche (2026).

Les scénarios diffèrent au niveau de la répartition des trois formes, BO/BI/BE. Le scénario Afterres, couplé au scénario négaWatt, voit une stabilisation de la demande en BO et en BI sous l'effet de plusieurs facteurs conjugués qui se compensent. Les facteurs conduisant à rehausser la demande sont : la forte augmentation de la part du bois et des matériaux biosourcés dans la construction neuve et dans la rénovation, la réduction des importations au profit de productions locales et la substitution des emballages par des matériaux biosourcés. Les facteurs conduisant à réduire la demande sont : la stabilisation de la population et des surfaces habitées par personne, dans un contexte de lutte

contre l'artificialisation et de réduction de l'empreinte matière de la construction, les économies de papier et la sobriété dans tous les usages.

Dans le scénario Afterres, la croissance de la production de BE est le résultat de la stabilisation de la demande et de la hausse des prélèvements induite à la fois par les besoins de substitution aux énergies fossiles et par les pratiques sylvicoles rendues nécessaires par le changement climatique, notamment les coupes sanitaires et préventives.

Les évolutions récentes - augmentation des circuits commerciaux (volumes déclarés, plaquette forestière) et déclin des circuits traditionnels (économie informelle, le bois bûche) - se poursuivent voire s'accroissent, avec une part croissante de l'utilisation de bois énergie (BE) sous forme de granulés, plus en adéquation avec les besoins des bâtiments à faible consommation, ainsi que pour des usages industriels.

Aujourd'hui, les prélèvements en forêt représentent 48 millions de m<sup>3</sup> dont 19 pour le bois d'œuvre, 10 pour le bois d'industrie et 18 pour le bois énergie.

En 2050, les prélèvements s'élèvent à 62 millions de m<sup>3</sup>, dont 22 pour le bois d'œuvre, 13 pour le bois d'industrie et 27 pour le bois énergie, soit à 10,8 MtMS pour le bois énergie, soit environ 11 % du potentiel de biomasse mobilisable pour l'énergie.

## ÉVALUATION DE LA RESSOURCE MOBILISABLE POUR L'ÉNERGIE

Ressource produite totale : 25 MtMS

Ressource accessible : 25 MtMS

Ressource mobilisable pour l'énergie : 11 MtMS

Utilisation en bois d'œuvre et bois industrie

FICHE  
#09



## Comparaison aux autres études

L'évaluation proposée se situe dans la **moyenne des scénarios** des autres études, soit entre **49 à 82 millions de m<sup>3</sup>/an de prélèvement en forêt**.

Note : le détail des comparaisons est en annexe du rapport.

## Valorisation actuelle

La récolte de **bois énergie en forêt** s'effectue sous la forme de bois bûche : 8 millions de m<sup>3</sup> sont déclarés au titre des enquêtes annuelles de production réalisées par l'INSEE, et 10 relevant de l'économie informelle (auto-consommation, vente directe), ce qui correspond au total à **7,2 MtMS en combustion (100 %)**.

## Valorisations possibles

**Exemple de lecture du tableau :** La combustion de la totalité de la ressource Bois issu de la Forêt en 2050 permettrait la production d'énergie primaire de 53 TWh, dont l'usage unique est la production de 48 TWh de chaleur basse température. Cette même ressource pourrait être traitée par *pyrogazéification+méthanation* qui permettrait la production de 36 TWh de gaz, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (33 TWh) ou de haute température en industrie verrière par exemple (18 TWh) ou en électricité de pointe (13 TWh) ou en biocarburant pour les poids lourds ou pour le maritime (36 TWh).

Cette ressource peut également être traitée pour aboutir à la production de biocarburant liquide, par *pyrogazéification+Fischer-Tropsch* par exemple. Dans ce cas, la production d'énergie primaire s'élèverait à 28 TWh, qui pourraient être valorisés soit sous forme de chaleur haute température (17 TWh), ou d'électricité de pointe (10 TWh) ou encore de biokérosène pour les avions (20 TWh) plus du biodiesel (8 TWh) pour alimenter les poids lourds ou la flotte maritime. Une fois la filière de valorisation et l'usage énergétique déterminés, le taux de retour énergétique et les autres critères économiques, environnementaux et sociaux sont à prendre en considération pour un usage optimal de la ressource initiale. Voir le détail dans la fiche « critère ».

Filières	Vecteur principal produit	Potentiel de prod. 2050 (TWh)	Selon usage final (TWh)					Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intég. territoriale			
			Chaleur basse temp.	Chaleur indust. haute temp.	Production d'électricité de pointe	Carburant ▲		Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol azote et phosphore	Émissions de GES (kgeq CO <sub>2</sub> /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production***	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique	
						Poids-lourd ou maritime	Aérien											
Combustion		53	48						●	-	> 10	●	●	10 - 20	●	€	0 - 100	Local
Fermentation		16	15	10	6	5	11	●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	80 - 240	●	€€€	30 - 5000	Extra-territorial	
Pyrolyse rapide		27	25	16	10	9	19	●	Naphta	< 5	●	●	-20 - 100	●	€€	100 - 3000	Extra-territorial	
Gazéification + Fisher Tropsch		28	26	17	10	8	20	●	CO <sub>2</sub> Naphta	5 à 10	●	●	10 - 130	●	€€	70 - 1000	Extra-territorial	
Pyrogazéification + méthanation		36	33	22	13	36		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	50	●	€€	20 - 500	Local à territorial	
Liquéfaction hydrothermale		32	30	19	11	10	22	●	Naphta	< 5	●	●	50	●	€€€	90 - 300	Extra-territorial	
Gazéification hydrothermale		36	33	21	13	36		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	-	●	€€€	4 - 50	Local à territorial	
Pyrogazéification + méthanolation		24	22	14	8	3	21	●	CO <sub>2</sub>	< 5	●	●	-	●	-	-	80 - 600	Extra-territorial

\* Excepté pour le maritime, pour lequel l'usage final est extra-territorial ▲ **AVERTISSEMENT** : les quantités d'énergies affichées pour les usages en carburants ne tiennent pas compte des pertes de conversion en énergie mécanique de l'ordre de 60 à 70 % selon le type de motorisation. \*\*\* En gras pour les filières matures

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ». Chaleur (produit par combustion directe) Gaz (méthane, injectable dans les réseaux) Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)

# Bois hors forêt

Ressource composée de prélèvement de bois non issu des forêts.

## Description de la ressource

Le bois hors forêt est constitué de différents types de ressources

- **Haies et bocages** : il s'agit du bois d'entretien des haies et bocages par les agriculteurs, propriétaires ou collectivités.
- **Parcs et jardins** : Le bois de parcs et jardins est le produit des coupes d'élagage (et/ou abattage), souvent effectuées en milieu urbain, dans les espaces publics ou par les particuliers. Il peut être utilisé par les particuliers directement en énergie (bois de récupération) ou collecté par le service public ou privés pour être traité (déchets verts).
- **Vignes et vergers** : Les vignes et vergers produisent du bois annuellement (sarments de vignes, bois de verger) et lors de leur arrachage (pour renouvellement tous les 25 à 30 ans, ou définitif).
- **T(T)CR** : Les taillis à courte rotation (TCR) ou taillis à très courte rotation (TTCR) désignent des exploitations de cultures ligneuses ayant une faible durée de révolution, respectivement de l'ordre de 5 à 10 ans et de 2 à 4 ans.
- **Agroforesterie** : L'agroforesterie correspond à la plantation d'arbres à l'intérieur de parcelles agricoles, en association avec des cultures ou des prairies. Étant donné la faible surface que représente actuellement cette pratique et du temps nécessaire à ce que les arbres deviennent productifs, cette ressource n'est ici pas considérée.

## Quantification de la ressource

Le potentiel total de bois hors forêt estimé pour 2050 s'élève à 8,3 MtMS/an.

### Haies et Bocages :

Malgré leur intérêt majeur en tant qu'infrastructures agroécologiques (biodiversité, lutte contre l'érosion des sols et les inondations, stockage de carbone...), on observe une diminution constante du linéaire de haies depuis les années 1960. **Aujourd'hui estimé à environ 700 000 km, le linéaire de haies et bocages continue à diminuer de plus de 20 000 km par an.**

Compte tenu de ces enjeux, l'hypothèse retenue pour 2050 est l'inversion de la tendance pour atteindre 1,4 Mkm de linéaire en 2050 (équivalent à celui des années 1960-1970).

**Le potentiel en 2050 s'élève à 2,2 MtMS/an.**

### Parcs et jardins :

Le potentiel en 2050 correspondant à la partie ligneuse des déchets verts collectés et traités par le service public ou des entreprises privées s'élève à **1,8 MtMS/an**. Le potentiel du bois de récupération s'élève à **0,8 MtMS/an**.

### Vignes et Vergers

Le volume de bois produit annuellement est relativement faible et fragmenté, complexifiant son utilisation dans les filières énergétiques. Les bois d'entretiens sont par ailleurs souvent retournés au sol, ce qui présente des avantages agronomiques intéressants. Pour ces raisons, seul le bois produit lors de l'arrachage des vignes et vergers est quantifié pour l'évaluation de la ressource. **Le potentiel à 2050 est estimé à 1,4 MtMS/an.**

### T(T)CR :

Bien que soulevant des questions environnementales encore ouvertes, ils peuvent également apporter des co-bénéfices à la production de bois dans certains contextes : préservation de la qualité de l'eau, limitation de l'érosion des sols... La quantification de cette ressource se base sur une augmentation forte de ces cultures dans ces contextes particuliers (300 000 ha en 2050), soit une production de **2,2 MtMS/an**.



## 8,6 MtMS

soit 9 % de la biomasse mobilisable pour l'énergie en 2050



## Comparaison aux autres études

Les scénarios de l'Ademe intègrent les cultures énergétiques, dont les TCR, de manière plus ambitieuse que la vision de Solagro (y compris dans le scénario S1). À l'inverse, le scénario Afterres 2050 de Solagro conçoit cette filière comme plus extensive et intègre donc une hypothèse de rendement moindre. Concernant les autres filières hors forêt, le scénario Afterres 2050 prévoit une augmentation importante de la mobilisation des bois de vergers et bocages. **Au final, l'évaluation proposée se situe dans la fourchette haute des autres études (3 à 13,5 MtMS).**

Note : le détail des comparaisons est en annexe du rapport.

## Valorisation actuelle

Aujourd'hui, **3,8 MtMS de bois hors forêt sont produites** chaque année.

- **2,2 MtMS sont valorisées en énergie** (bois de récupération, bois d'entretien de verger et plaquettes bocagères).
- **1,6 MtMS correspondant à la partie ligneuse des déchets verts est majoritairement traitée par compostage** en mélange avec la partie non ligneuse, et également avec d'autres co-substrats (boues urbaines, biodéchets).

## Valorisations possibles

**Exemple de lecture du tableau :** La combustion de la totalité de la ressource Bois Hors Forêt en 2050 permettrait la production d'énergie primaire de 41 TWh, dont l'usage unique est la production de 37 TWh de chaleur basse température. Cette même ressource pourrait être traitée par pyrogazéification+méthanation qui permettrait la production de 28 TWh de gaz, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (25 TWh) ou de haute température en industrie verrière par exemple (16 TWh) ou en électricité de pointe (10 TWh) ou en biocarburant (28 TWh) pour les poids lourds ou pour le maritime.

Cette ressource peut également être traitée pour aboutir à la production de biocarburant liquide, par pyrogazéification+Fischer-Tropsch par exemple. Dans ce cas, la production d'énergie primaire s'élèverait à 22 TWh, qui pourraient être valorisés soit sous forme de chaleur basse température ou haute température (13 TWh), ou d'électricité de pointe (8 TWh) ou encore de biokérosène pour les avions (16 TWh) plus du biodiesel (6 TWh) pour alimenter les poids lourds ou la flotte maritime. Une fois la filière de valorisation et l'usage énergétique déterminés, le taux de retour énergétique et les autres critères économiques, environnementaux et sociaux sont à prendre en considération pour un usage optimal de la ressource initiale. Voir le détail dans la fiche « critère ».

Filières	Vecteur principal produit	Potentiel de prod. 2050 (TWh)	Selon usage final (TWh)					Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intég. territoriale			
			Chaleur basse temp.	Chaleur indust. haute temp.	Production d'électricité de pointe	Carburant ▲		Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol azote et phosphore	Émissions de GES (kgeq CO <sub>2</sub> /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production***	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique	
						Poids-lourd ou maritime	Aérien											
Combustion		41	37						●	-	> 10	●	●	10 - 20	●	€	0 - 100	Local
Fermentation		13	12	8	4	4	8	●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	80 - 240	●	€€€	30 - 5000	Extra-territorial	
Pyrolyse rapide		21	19	13	7	7	14	●	Naphta	< 5	●	●	-20 - 100	●	€€	100 - 3000	Extra-territorial	
Gazéification + Fisher Tropsch		22	20	13	8	6	16	●	CO <sub>2</sub> Naphta	5 à 10	●	●	10 - 130	●	€€	70 - 1000	Extra-territorial	
Pyrogazéification + méthanation		28	25	16	10	28		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	50	●	€€	20 - 500	Local à territorial	
Liquéfaction hydrothermale		25	23	15	9	8	17	●	Naphta	< 5	●	●	50	●	€€€	90 - 300	Extra-territorial	
Gazéification hydrothermale		27	25	16	10	27		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	-	●	€€€	4 - 50	Local à territorial	
Pyrogazéification + méthanolation		18	17	11	6	2	16	●	CO <sub>2</sub>	< 5	●	●	-	●	-	80 - 600	Extra-territorial	

\* Excepté pour le maritime, pour lequel l'usage final est extra-territorial ▲ **AVERTISSEMENT** : les quantités d'énergies affichées pour les usages en carburants ne tiennent pas compte des pertes de conversion en énergie mécanique de l'ordre de 60 à 70 % selon le type de motorisation. \*\*\* En gras pour les filières matures

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ». Chaleur (produit par combustion directe) Gaz (méthane, injectable dans les réseaux) Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)

# Connexes

Les connexes sont tous les sous-produits solides issus de la transformation du bois : écorces, sciures, chutes.

## Description de la ressource

On peut notamment distinguer :

- Les connexes produits lors de **la première transformation du bois d'œuvre** (BO), étape qui transforme les grumes en produits semi-finis (principalement en scierie)
- Les connexes produits lors de **la deuxième transformation du bois d'œuvre** : production de produits finis (meubles, menuiseries...)
- Les connexes solides issus des **procédés de transformation en bois industrie** (BI) : pâte à papier vierge, panneau de bois (structurel ou isolant)

## Quantification de la ressource

La quantité de connexes totaux est évaluée en appliquant un rendement matière (issus de la littérature scientifique et technique) aux filières de bois d'œuvre et de bois industrie. Ce rendement dépend notamment de l'essence pour la première transformation.

Une part de ces connexes est valorisée pour des usages matières : en particulier les connexes issus de la transformation du bois d'œuvre sont en partie utilisés pour la production de pâte à papier ou la production de panneaux de bois.

Pour les évaluations, chaque transformation est modélisée en deux étapes :

1. Évaluation de la production totale de connexes, à partir d'un rendement matière qui permet de connaître la part du bois se retrouvant dans le produit fini et, par complément, la part de connexes ;
2. Évaluation de la part des connexes mobilisable pour une valorisation énergétique, après déduction de la part valorisée pour un usage matière (BI).

Les hypothèses intégrées dans cette estimation sont basées sur les valeurs actuelles pour les rendements matière et de répartition usage énergie/matière. Les ratios sont considérés comme constants en projection 2050. Les évolutions de connexes mobilisables pour l'énergie sont donc liées à la demande en bois d'œuvre.

Par ailleurs, les données existantes sur l'allocation de ces connexes, notamment leur répartition entre usage matière et énergétique, permettent de déterminer la ressource actuellement utilisée en énergie.

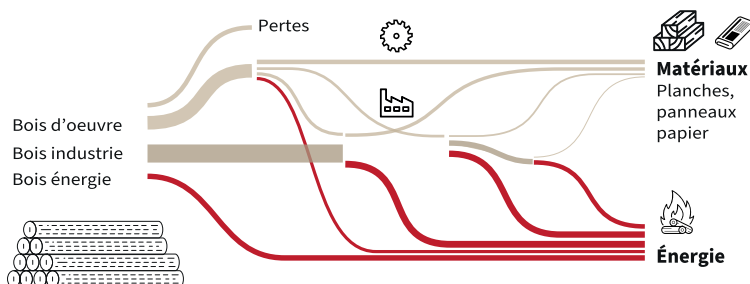
Par conséquent, la ressource en connexes dépend directement de l'usage de la ressource bois par les autres secteurs que le bois énergie (usage actuel et scénarios de demande).



## 5,5 MtMS

soit 5 % de la biomasse mobilisable pour l'énergie en 2050

### Le bois énergie, sous-produits du bois d'oeuvre



## Comparaison aux autres études

Les quantités de connexes (0,9 à 2,2 MtMS) allouées à une production d'énergie (chaleur en industrie, réseaux de chaleurs et tertiaire) dans les scénarios Transition(s) 2050 de ADEME équivalent sont plus faibles que celle évaluée ici.

Note : le détail des comparaisons est en annexe du rapport.

## Valorisation actuelle









La totalité des connexes actuellement produits, 4,7 MtMS, est valorisée en énergie, directement en combustion, ou bien via la production de granulés.

## Valorisations possibles

**Exemple de lecture du tableau :** La combustion de la totalité de la ressource Connexes en 2050 permettrait la production d'énergie primaire de 27 TWh, dont l'usage unique est la production de 24 TWh de chaleur basse température.

Cette même ressource pourrait être traitée par pyrogazéification+méthanation qui permettrait la production de 18 TWh de gaz, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (17 TWh) ou de haute température en industrie verrière par exemple (11 TWh) ou en électricité de pointe (6 TWh) ou en biocarburant (18 TWh) pour les poids lourds ou pour le maritime.

Cette ressource peut également être traitée pour aboutir à la production de biocarburant liquide, par pyrogazéification+Fischer-Tropsch par exemple. Dans ce cas, la production d'énergie primaire s'élèverait à 14 TWh, qui pourraient être valorisés soit sous forme de chaleur basse température (13 TWh) ou haute température (9 TWh), ou d'électricité de pointe (5 TWh) ou encore de biokérosène pour les avions (10 TWh) plus du biodiesel (4 TWh) pour alimenter les poids lourds ou la flotte maritime. Une fois la filière de valorisation et l'usage énergétique déterminés, le taux de retour énergétique et les autres critères économiques, environnementaux et sociaux sont à prendre en considération pour un usage optimal de la ressource initiale. Voir le détail dans la fiche « critère ».

Filières	Vecteur principal produit	Potentiel de prod. 2050 (TWh)	Selon usage final (TWh)					Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intég. territoriale			
			Chaleur basse temp.	Chaleur indust. haute temp.	Production d'électricité de pointe	Carburant ▲		Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol azote et phosphore	Émissions de GES (kgeq CO <sub>2</sub> /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production***	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique	
						Poids-lourd ou maritime	Aérien											
Combustion		27	24						●	-	> 10	●	●	10 - 20	●	€	0 - 100	Local
Fermentation		8	8	5	3	3	6	●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	80 - 240	●	€€€	30 - 5000	Extra-territorial	
Pyrolyse rapide		14	13	8	5	4	10	●	Naphta	< 5	●	●	-20 - 100	●	€€	100 - 3000	Extra-territorial	
Gazéification + Fisher Tropsch		14	13	9	5	4	10	●	CO <sub>2</sub> Naphta	5 à 10	●	●	10 - 130	●	€€	70 - 1000	Extra-territorial	
Pyrogazéification + méthanation		18	17	11	6	18		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	50	●	€€	20 - 500	Local à territorial	
Liquéfaction hydrothermale		17	15	10	6	5	11	●	Naphta	< 5	●	●	50	●	€€€	90 - 300	Extra-territorial	
Gazéification hydrothermale		18	17	11	6	18		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	-	●	€€€	4 - 50	Local à territorial	
Pyrogazéification + méthanolation		12	11	7	4	1	11	●	CO <sub>2</sub>	< 5	●	●	-	●	-	80 - 600	Extra-territorial	

\* Excepté pour le maritime, pour lequel l'usage final est extra-territorial ▲ **AVERTISSEMENT** : les quantités d'énergies affichées pour les usages en carburants ne tiennent pas compte des pertes de conversion en énergie mécanique de l'ordre de 60 à 70 % selon le type de motorisation. \*\*\* En gras pour les filières matures

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ».  Chaleur (produit par combustion directe)  Gaz (méthane, injectable dans les réseaux)  Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)

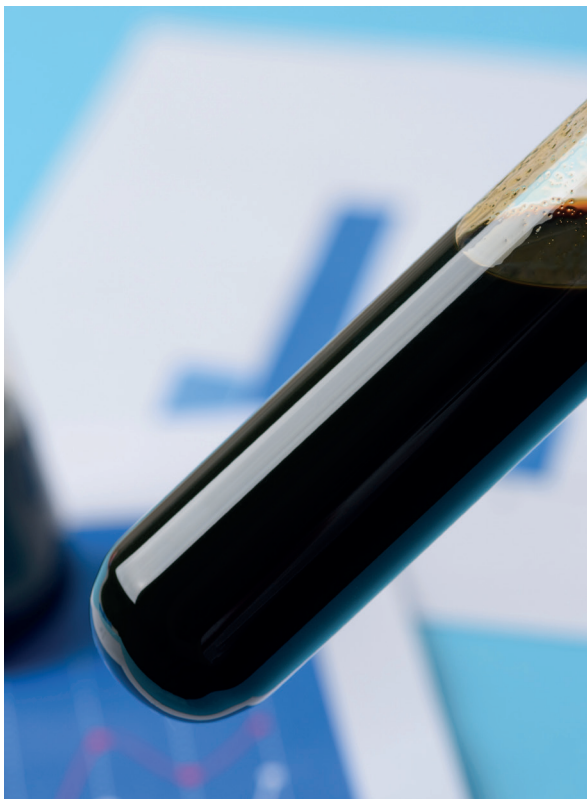


# Liqueurs noires

Les liqueurs noires sont des sous-produits liquides issues de l'industrie papetière.

## Description de la ressource

La fabrication de pâte à papier chimique implique la séparation de la lignine et la cellulose du bois. La cellulose est le composant principal de la pâte à papier, tandis que la **lignine extraite** est dissoute dans un résidu liquide contenant également les solvants du procédé. Ce résidu, appelé **liqueur noire**, est épaissi puis **brûlé sur site**, dans un four à liqueurs, afin de **fournir une partie de l'énergie nécessaire au procédé de fabrication** (notamment le séchage de la pâte), et de régénérer les solvants (présents dans les cendres du four à liqueurs).



©AdobeStock

## Quantification de la ressource

L'estimation de la quantité de liqueurs noires se fait par un bilan matière en prenant les mêmes hypothèses que pour les connexes solides, et en utilisant des ratios sur la filière pâte à papier issu de la bibliographie (INRA/IGN 2017, COPACEL).

**Les projections de production de pâte à papier vierge augmentent légèrement** en raison d'un maintien des besoins sur la filière papier carton emballage et d'une certaine relocalisation de la filière de production de pâte vierge (hypothèses des scénarios negamat/negaWatt).

Le potentiel de liqueurs noires à l'horizon 2050 est évalué à 4,5 MtMS



**4,5 MtMS**

soit 5 % de la biomasse mobilisable pour l'énergie en 2050

## Comparaison aux autres études

Aucune étude prospective ne mentionne spécifiquement le gisement de liqueurs noires.

Note : le détail des comparaisons est en annexe du rapport

## Valorisation Actuelle

Sur une production actuelle de 4 MtMS, la **totalité des liqueurs noires est utilisée en énergie pour le processus de production de pâte à papier.**


















## Valorisations possibles

**Exemple de lecture du tableau :** Les liqueurs noires peuvent être brûlées (combustion) ou traitées par *gazéification* ou *liquéfaction hydrothermale*.

La *combustion* de la totalité de la ressource Liqueurs noires en 2050 permettrait la production d'énergie primaire de 22 TWh, dont l'usage unique est la production de 20 TWh de chaleur basse température.

La *gazéification hydrothermale* de la totalité des liqueurs noires en 2050 aboutirait à la production de 15 TWh de méthane de synthèse, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (14 TWh) ou chaleur haute température en industrie verrière par exemple (9 TWh) ou en électricité de pointe (5 TWh) ou en biocarburant (15 TWh) pour les poids lourds ou le maritime.

Cette ressource peut également être traitée pour aboutir à la production de biocarburant liquide, par *liquéfaction hydrothermale*. Dans ce cas, la production d'énergie primaire s'élèverait à 14 TWh, qui pourraient être valorisés soit sous forme de chaleur basse température (13 TWh) ou haute température (9 TWh), ou d'électricité de pointe (5 TWh) ou encore de biokérosène pour les avions (9 TWh) plus du biodiesel (4 TWh) pour alimenter les poids lourds ou la flotte maritime. Une fois la filière de valorisation et l'usage énergétique déterminés, le taux de retour énergétique et les autres critères économiques, environnementaux et sociaux sont à prendre en considération pour un usage optimal de la ressource initiale. Voir le détail dans la fiche « critère ».

Filières	Vecteur principal produit	Potentiel de prod. 2050 (TWh)	Selon usage final (TWh)					Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intég. territoriale		
			Chaleur basse temp.	Chaleur indust. haute temp.	Production d'électricité de pointe	Carburant ⚠		Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol azote et phosphore	Émissions de GES (kgeq CO <sub>2</sub> /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production***	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique
						Poids-lourd ou maritime	Aérien										
Combustion		22	20						-	> 10			10 - 20		€	0 - 100	Local
Liquéfaction hydrothermale		14	13	8	5	4	9		Naphta	< 5			50		€€€	90 - 300	Extra-territorial
Gazéification hydrothermale		15	14	9	5	15			CO <sub>2</sub>	> 10			-		€€€	4 - 50	Local à territorial

\* Excepté pour le maritime, pour lequel l'usage final est extra-territorial ⚠ **AVERTISSEMENT :** les quantités d'énergies affichées pour les usages en carburants ne tiennent pas compte des pertes de conversion en énergie mécanique de l'ordre de 60 à 70 % selon le type de motorisation. \*\*\* En gras pour les filières matures

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ».  Chaleur (produit par combustion directe)  Gaz (méthane, injectable dans les réseaux)  Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)

# Déchets de bois

Les déchets de bois englobent tous les produits bois utilisés par les ménages et les entreprises et destinés au rebut, qu'ils soient ou non collectés.

## Description de la ressource

Les déchets de bois sont caractérisés par leur teneur en éléments polluants :

- **BOIS A** : déchets de bois **non adjuvés**, essentiellement des déchets d'emballages (palettes, cagettes...), ils peuvent bénéficier de la sortie du statut de déchet (SSD), sous conditions.
- **BOIS B** : déchets de bois **traité non dangereux** principalement issus de produits de consommation : bois brut traité, panneaux de lamellés, panneaux de particules contenant de la colle, de bois peints...
- **BOIS C** : déchets de bois **traités à des usages spécifiques** (traverses de chemins de fer, poteaux téléphoniques...), qui sont considérés comme **déchets dangereux**.

Hormis le Bois C non librement valorisable et aujourd'hui fléché vers des filières dédiées, les déchets de bois peuvent faire l'objet d'une valorisation matière (priorité des usages) ou énergétique (combustion, pyrogazéification ou autre).

La majorité des déchets de bois est aujourd'hui

collectée, triée ou en mélange avec d'autres déchets, dans les déchèteries, ou par des collectes organisées par les filières (construction/démolition des bâtiments, ameublement). Une partie reste non collectée, et est utilisée comme combustible par les ménages, ou brûlée à l'air libre ou jetée en dépôts sauvages.

## Quantification de la ressource

La quantification des déchets de bois est basée sur une compilation des données des professionnels du déchet (FEDEREC, filière construction/démolition bâtiment GDBAT) et des données ADEME (MODECOM, Observatoire Valorisation, Filière Déchets Ameublement). En outre, des hypothèses ont été prises dans certains cas (destinations Bois A, taux de déchets de bois dans les bennes en mélange...), permettant de boucler les bilans entrée/sortie.

**6,8 Mt de déchets de bois sont collectés** chaque année et environ 0,5 Mt de bois font l'objet d'un usage combustible privé ou sont éliminés sans respecter la loi (dépôt sauvage, brûlage à l'air libre).

**En 2050**, à partir d'hypothèses issues du scénario Negamat pour la filière Bois (impliquant une amélioration

du taux de collecte et de valorisation, le maintien d'un taux de la valorisation matière important et conservation des usages en énergie combustion, une diminution des flux à l'export), la quantité de bois B valorisée en énergie pourrait légèrement augmenter (+0,1 Mt/an), Ainsi un potentiel de **déchets de bois (Bois A + Bois B + fines)** aboutirait une **valorisation en énergie de 2,7 Mt/an**. Il resterait un **potentiel non valorisé estimé à 0,6 Mt/an**.



## 2,8 MtMS

soit 3 % de la biomasse mobilisable pour l'énergie en 2050

## ÉVALUATION DE LA RESSOURCE MOBILISABLE POUR L'ÉNERGIE

Ressource produite totale : **7,2 MtMS**

Ressource accessible : **5,8 MtMS**

Valorisation diffuse

Ressource mobilisable pour l'énergie : **2,8 MtMS**

Valorisation matière

FICHE  
#13



## Comparaison aux autres études

Une étude ADEME est en cours de finalisation sur le sujet de la quantification du Bois B.

## Valorisation actuelle

Aujourd'hui, **2,6 Mt de déchets de bois sont valorisés en énergie** sur des chaufferies industrielles sur le territoire national (1 Mt/an de Bois A et 1,6 Mt de Bois B et fines), **1,7 Mt/an sont exportées**, vers le Benelux principalement, et **1,4 Mt/an sont recyclées** (valorisation matière) vers l'industrie des panneaux et **1,4 Mt/an**, issues des déchèteries ou en mélange avec les Ordures ménagères résiduelles (OMR), **sont éliminées** (incinération ou en enfouissement).

## Valorisations possibles

**Exemple de lecture du tableau :** La combustion de la totalité de la ressource de déchets de bois en 2050 permettrait la production d'énergie de 14 TWh, dont l'usage unique est la production de 12 TWh de chaleur basse ou moyenne température. Cette même ressource pourrait être traitée par *pyrogazéification+méthanation* qui permettrait la production de 9 TWh de gaz, qui pourrait être valorisé sous forme de chaleur basse température (8,5 TWh) ou chaleur haute température en industrie verrière par exemple (4,6 TWh) ou en électricité de pointe (3,2 TWh) ou en biocarburant pour les poids lourds ou le maritime (9,2 TWh).

Cette ressource pourrait également être traitée pour aboutir à la production de biocarburant liquide, par *pyrogazéification+Fischer-Tropsch* par exemple. Dans ce cas, la production d'énergie primaire s'élèverait à 7,3 TWh, qui pourraient être valorisés soit sous forme de chaleur basse ou moyenne température (6,7 TWh) ou haute température (3,6 TWh), ou d'électricité de pointe (2,6 TWh) ou encore de biokérosène pour les avions (5,2 TWh) et de biodiesel (2,1 TWh) pour alimenter les poids lourds ou la flotte maritime. Une fois la filière de valorisation et l'usage énergétique déterminés, le taux de retour énergétique et les autres critères économiques, environnementaux et sociaux sont à prendre en considération pour un usage optimal de la ressource initiale. Voir le détail dans la fiche « critère »

Filières	Vecteur principal produit	Potentiel de prod. 2050 (TWh)	Selon usage final (TWh)					Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intég. territoriale			
			Chaleur basse temp.	Chaleur indust. haute temp.	Production d'électricité de pointe	Carburant ▲		Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol azote et phosphore	Émissions de GES (kgeq CO <sub>2</sub> /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production***	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique	
						Poids-lourd ou maritime	Aérien											
Combustion		13,6	12,3						●	-	> 10	●	●	10 - 20	●	€	0 - 100	Local
Fermentation		4,2	3,9	2,1	1,5	1,4	2,8	●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	80 - 240	●	€€€	30 - 5000	Extra-territorial	
Pyrolyse rapide		7,0	6,5	3,5	2,5	2,2	4,8	●	Naphta	< 5	●	●	-20 - 100	●	€€	100 - 3000	Extra-territorial	
Gazéification + Fisher Tropsch		7,3	6,7	3,6	2,6	2,1	5,2	●	CO <sub>2</sub> Naphta	5 à 10	●	●	10 - 130	●	€€	70 - 1000	Extra-territorial	
Pyrogazéification + méthanation		9,2	8,5	4,6	3,2	9,2		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	50	●	€€	20 - 500	Local à territorial	
Liquéfaction hydrothermale		8,3	7,7	4,2	2,9	2,6	5,7	●	Naphta	< 5	●	●	50	●	€€€	90 - 300	Extra-territorial	
Gazéification hydrothermale		9,2	8,5	4,6	3,2	9,2		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	-	●	€€€	4 - 50	Local à territorial	
Pyrogazéification + méthanolation		6,1	5,7	3,1	2,2	0,7	5,5	●	CO <sub>2</sub>	< 5	●	●	-	●	-	80 - 600	Extra-territorial	

\* Excepté pour le maritime, pour lequel l'usage final est extra-territorial ▲ **AVERTISSEMENT** : les quantités d'énergies affichées pour les usages en carburants ne tiennent pas compte des pertes de conversion en énergie mécanique de l'ordre de 60 à 70 % selon le type de motorisation. \*\*\* En gras pour les filières matures

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ». Chaleur (produit par combustion directe) Gaz (méthane, injectable dans les réseaux) Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)

# Combustibles solides de récupération (CSR)

Les Combustibles solides de récupération (CSR) sont produits à partir d'un pré-traitement de différents déchets collectés (plastiques, papiers/cartons, textiles/composites, déchets de bois). Ils ne sont que partiellement composés de biomasse.

## Description de la ressource

Les combustibles solides de récupération sont produits à partir d'un pré-traitement (broyage, criblage) de différents déchets collectés (plastiques, papiers/cartons, textiles/composites, déchets de bois) triés ou en mélange : refus de tri de collecte sélective, refus de tri mécano-biologique, des refus de tri de DAE (déchets d'activités économiques), encombrants, déchets d'ameublement. Il s'agit de déchets qui ont été préparés selon des prescriptions réglementaires pour être reconnus comme combustibles dans une filière de valorisation ad hoc.

Le contenu biogénique des CSR varie de 40 % à 50 % en masse selon leur origine (déchets ménagers ou industriels).

## Quantification de la ressource

La méthode de quantification est basée sur la compilation de données et d'études existantes (Bilan national du recyclage, ADEME 2022, Données INSEE 2020, MODECOM 2017) sur les déchets de bois, de papiers/cartons et de plastiques. Il s'agit des déchets non valorisés en matériau, c'est-à-dire les quantités destinées à l'énergie additionnées aux quantités destinées à l'élimination.

Sans compter les déchets de bois, le potentiel de CSR s'élève à 5 à 6 Mt/an, plus de la moitié du potentiel est déjà ou sera valorisée (projets en cours) sur des unités de combustion dans des chaufferies industrielles ou des cimenteries.



## Comparaison aux autres études

Une étude ADEME est en cours de finalisation sur le sujet de la quantification des CSR.

Les scénarios ADEME Transitions 2050 présentent une mobilisation de CSR (y compris déchets de bois en mélange) pour la production de gaz de synthèse via la pyrogazéification de 2 MtMS (Scénario S2 - 60 unités) à 15 MtMS (scénario S3 - 760 unités, 70 % de l'approvisionnement en CSR).

## Valorisation Actuelle

En 2020, la France compte 36 installations de production de CSR (capacité totale de 980 kt/an), et produit 400 kt de CSR. La valorisation des CSR est la combustion en cimenteries: 84 % en cimenteries principalement en France, 8 % vers des chaufferies CSR (dont en Espagne et en Suède), le reste dans des fours à chaux et UVE (incinération avec valorisation d'énergie).



**5,5 MtMS**

soit 5 % de la biomasse mobilisable pour l'énergie en 2050










## Valorisations possibles

**Exemple de lecture du tableau :** La combustion de la totalité de la ressource de CSR en 2050 permettrait la production d'énergie primaire de 25 TWh, dont l'usage unique est la production de 22 TWh de chaleur basse température.

Cette même ressource pourrait être traitée par pyrogazéification+méthanation qui permet la production de 17 TWh de gaz, qui peut être valorisé sous forme de chaleur basse température (15 TWh) ou de haute température en industrie verrière par exemple (10 TWh) ou en électricité de pointe (6 TWh) ou en biocarburant (16,7 TWh) pour les poids lourds ou le maritime.

Cette ressource pourrait également être traitée pour aboutir à la production de biocarburant liquide, par pyrogazéification+Fischer-Tropsch par exemple. Dans ce cas, la production d'énergie primaire s'élève à 13 TWh, qui peuvent être valorisés soit sous forme de chaleur basse température (12 TWh) ou haute température (8 TWh), ou d'électricité de pointe (5 TWh) ou encore de biokérosène pour les avions (9 TWh) plus du biodiesel (4 TWh) pour alimenter les poids lourds ou la flotte maritime. Une fois la filière de valorisation et l'usage énergétique déterminés, le taux de retour énergétique et les autres critères économiques, environnementaux et sociaux sont à prendre en considération pour un usage optimal de la ressource initiale. Voir le détail dans la fiche « critère ».

Filières	Vecteur principal produit	Potentiel de prod. 2050 (TWh)	Selon usage final (TWh)					Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intég. territoriale			
			Chaleur basse temp.	Chaleur indust. haute temp.	Production d'électricité de pointe	Carburant ▲		Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol azote et phosphore	Émissions de GES (kgeq CO <sub>2</sub> /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production***	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique	
						Poids-lourd ou maritime	Aérien											
Combustion		24,5	22,1						●	-	> 10	●	●	10 - 20	●	€	0 - 100	Local
Pyrolyse rapide		12,6	11,7	7,6	4,4	3,9	8,7	●	Naphta	< 5	●	●	-20 - 100	●	€€	100 - 3000	Extra-territorial	
Gazéification + Fisher Tropsch		13,1	12,2	7,9	4,6	3,7	9,4	●	CO <sub>2</sub> Naphta	5 à 10	●	●	10 - 130	●	€€	70 - 1000	Extra-territorial	
Pyrogazéification + méthanation		16,7	15,4	10,0	5,8	16,7		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	50	●	€€	20 - 500	Local à territorial	
Liquéfaction hydrothermale		15,0	13,9	9,0	5,3	4,7	10,3	●	Naphta	< 5	●	●	50	●	€€€	90 - 300	Extra-territorial	
Gazéification hydrothermale		16,6	15,3	9,9	5,8	16,6		●	CO <sub>2</sub>	> 10	●	●	-	●	€€€	4 - 50	Local à territorial	
Pyrogazéification + méthanation		11,1	10,3	6,6	3,9	1,2	9,9	●	CO <sub>2</sub>	< 5	●	●	-	●	-	-	80 - 600	Extra-territorial

\* Excepté pour le maritime, pour lequel l'usage final est extra-territorial ▲ **AVERTISSEMENT** : les quantités d'énergies affichées pour les usages en carburants ne tiennent pas compte des pertes de conversion en énergie mécanique de l'ordre de 60 à 70 % selon le type de motorisation. \*\*\* En gras pour les filières matures

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ».  Chaleur (produit par combustion directe)  Gaz (méthane, injectable dans les réseaux)  Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)