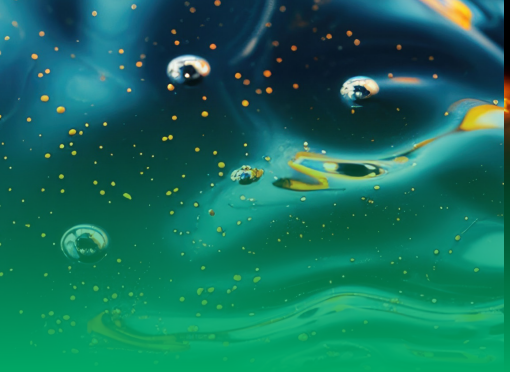
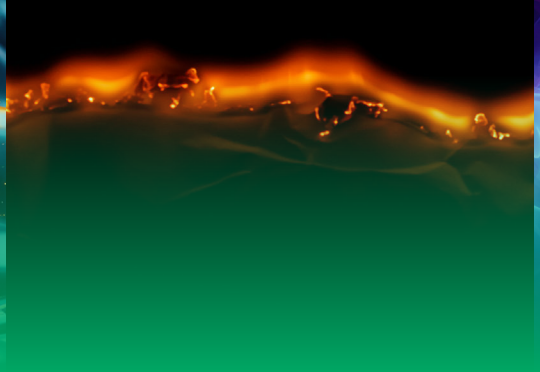




# Fiches Valorisation

12 fiches permettant d'étudier les filières permettant de valoriser les différents types de biomasse en les soumettant à différents critiques quantitatifs et qualitatifs.


- *Fiche 1 : Estérification de déchets gras*
- *Fiche 2 : Hydrogénation de déchets gras*
- *Fiche 3 : Pyrolyse rapide*
- *Fiche 4 : Liquéfaction hydrothermale*
- *Fiche 5 : Gazéification hydrothermale*
- *Fiche 6 : Pyrogazéification (Fischer-Tropsch)*
- *Fiche 7 : Pyrogazéification (méthanation)*
- *Fiche 8 : Pyrogazéification (méthanolation)*
- *Fiche 9 : Fermentation*
- *Fiche 10 : Méthanisation (méthanolation)*
- *Fiche 11 : Méthanisation (épuration)*
- *Fiche 12 : Combustion*


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

Solagro

Version 2 - Octobre 2024

# Estérification de déchets gras

## Description du procédé et état de développement

Cette filière permet de traiter des déchets gras (graisses, huiles de cuisson…) et de produire un produit similaire au diesel.

Pour cela, deux étapes se succèdent :

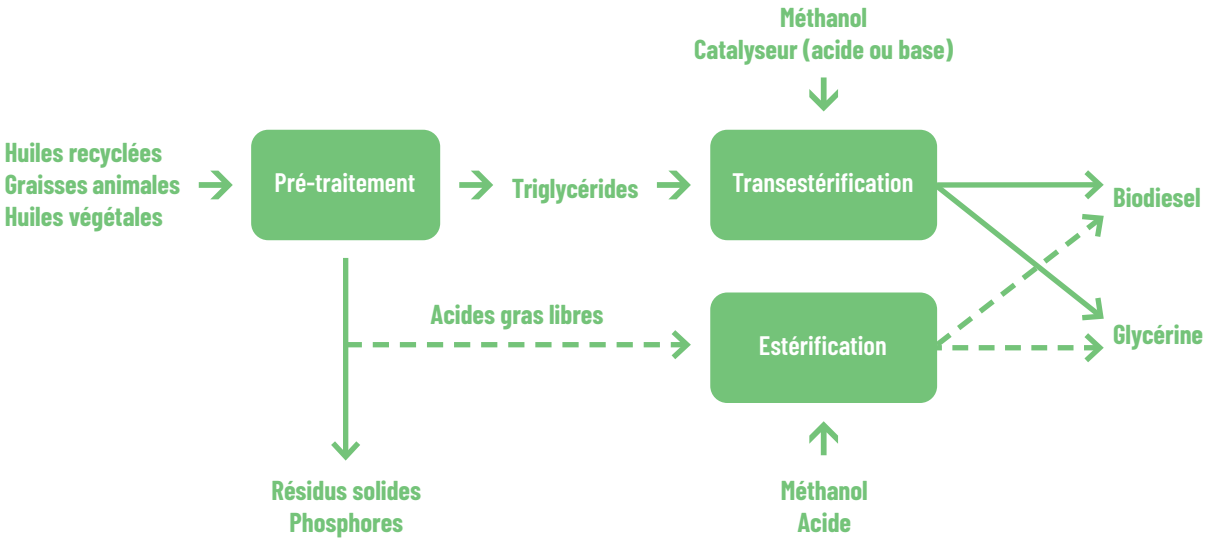
- le Pré-traitement : élimination des impuretés pouvant réduire l'efficacité et durée de vie des catalyseurs, et extraction des acides gras libres non désirés ;
- la transestérification : réaction, via un catalyseur, d'un alcool, généralement du méthanol, avec les triglycérides des huiles pour former un ester (biodiesel) et de la glycérine.

Pour la majorité des moteurs actuels, le biodiesel doit être nécessairement incorporé à du diesel d'origine fossile avec un taux maximum de 10 %. Certains producteurs de véhicules lourds proposent néanmoins des moteurs modifiés permettant d'utiliser du biodiesel pur.



©AdobeStock

## Les étapes du procédé




| **Potentiel de ressources accessibles en 2050**<br>(sans tenir compte des autres voies de valorisation énergétique possibles) | MtMS |
|---|---|
| Biodéchets (ménage, GMS, Resto) | 0,1 |
| Déchets IAA | 0,4 |
| **TOTAL** | **0,5** |

### ÉTAT DU DÉVELOPPEMENT

La technologie de transformation des huiles par estérification est mature depuis plus de 20 ans. Les usines fonctionnent principalement à partir d'huiles vierges (colza, soja, palme…). Ces carburants sont dits de 1ère génération (1G). En Europe, on compte plus d'une vingtaine de sites de production, les tailles allant de 10 à 850 ktMS/an, avec une moyenne autour de 140 ktMS/an.

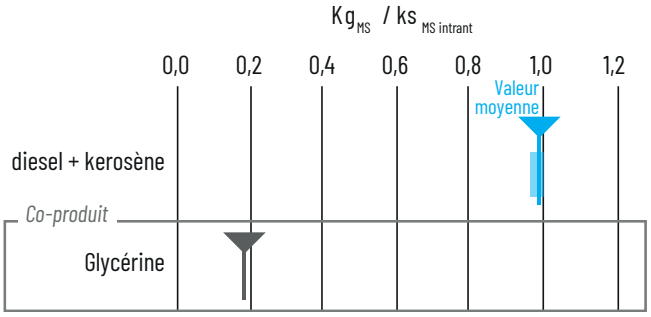
# Indicateurs pour caractériser les filières

## Critères techniques

### RENDEMENT MASSIQUE ET CO-PRODUITS

Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 0,97 tonne de carburant liquide, et 0,15 tonne de glycérine.

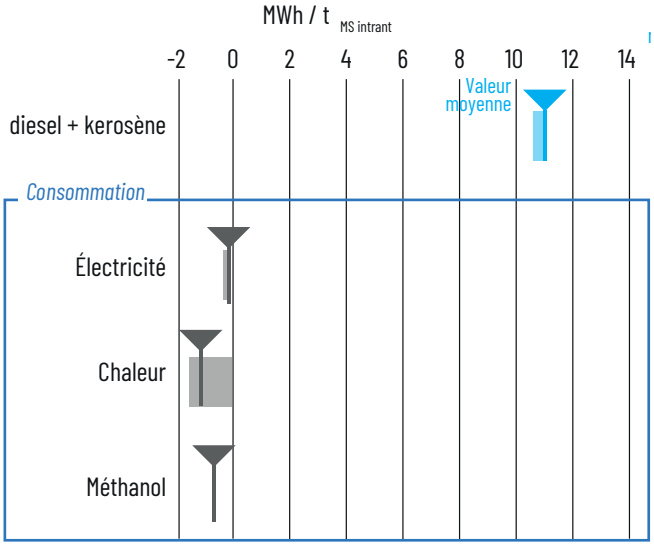
→ **Le rendement matière est très élevé, mais applicable à une très faible partie de la ressource.**




### BILAN ÉNERGÉTIQUE

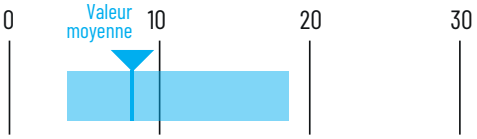
Le procédé permet la production, pour 1 tonne de matière sèche d'intrant de 10,7 MWh de carburant liquide. Pour cela, le procédé consomme en moyenne 0,1 MWh d'électricité, 1 MWh de chaleur et 0,7 MWh de méthanol.

→ **Le rendement énergétique est élevé en raison d'un bon rendement matière et d'une matière première (lipides) très énergétique. Le bilan net est néanmoins dégradé par l'ajout de méthanol.**



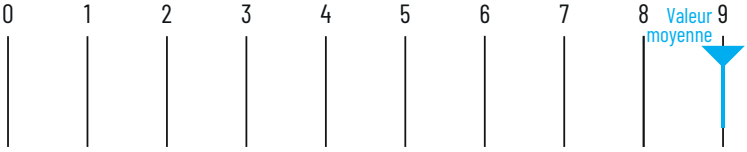

### TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUE

Il correspond à l'énergie produite par le vecteur principal divisée par la consommation de produits énergétiques (électricité, chaleur, méthanol) pour la production de ce vecteur.




### MATURITÉ TECHNOLOGIQUE (ÉCHELLE TRL)

→ **Plusieurs unités commerciales sont en service valorisant aussi bien des huiles vierges que des déchets. La filière bénéficie ainsi du développement de la filière 1G.**



# Critères environnementaux

### RETOUR AU SOL DU CARBONE

Pas de retour au sol de la matière organique.

Matière organique (carbone)

### RETOUR AU SOL DES NUTRIMENTS

Les nutriments se retrouvent peu dans les huiles et les graisses, seul le phosphore est récupéré lors du Pré-traitement.

Azote (N) Phosphore (P)

Potassium (K)

### FACTEUR D'ÉMISSION GES




### POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Indicateur qualitatif pour juger de l'impact de la filière sur la qualité de l'air (rejets dans l'air : particules, NOx, $NH_3$...) sur le site de production et lors de son usage final.

→ **Pas d'information sur les émissions du procédé. Sur l'usage final, la combustion du carburant est plus propre que le carburant fossile sur tous les indicateurs (particules, SOx, CO...) hormis les NOx.**

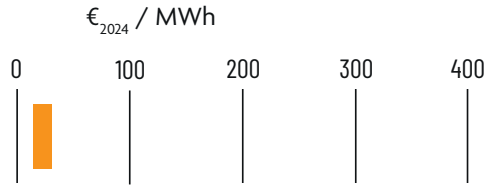


Impact faible à moyen

# Critères économiques et intégration territoriale

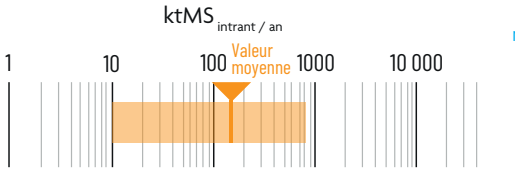
### COÛT DE PRODUCTION

Les coûts pour les filières matures (TRL = 9, en exploitation) sont issus de données mesurées, pour les autres ce sont des données estimées à partir des expérimentations.




### TAILLE DES UNITÉS

Taille moyenne des unités : 150 ktMS d'intrants biomasse par an.




### USAGE DU VECTEUR ÉNERGÉTIQUE

L'usage est principalement extraterritorial.
Le carburant produit sera à visée soit de l'aviation, mode de transport accessible à une faible part de la population, ou le secteur du transport maritime qui est déconnecté des usages locaux de l'énergie.

# Hydrogénation de déchets gras

## Description du procédé et état de développement

Cette filière permet de traiter des déchets gras (graisses, huiles de cuisson…) et de produire un produit similaire au diesel.

Les déchets gras subissent une première étape de Pré-traitement pour éliminer les impuretés et les acides gras libres non désirés et aboutir à la production de triglycérines.

Deux procédés distincts sont ensuite utilisés pour la formation de paraffines, avant la production de biodiesel :

- L'hydrogénolyse : conservation de la chaîne carbonée avec production d'eau et de propane.
- La décarboxylation : diminution de la taille de la chaîne carbonée, avec production de $CO_2$ et de propane.

L'hydrogénolyse nécessite plus d'hydrogène, mais permet d'obtenir des rendements plus élevés.

Le diesel produit par ces procédés, dits HVO (Hydrotreated Vegetable Oil), présente de meilleures qualités que celui produit par la filière Estérification :

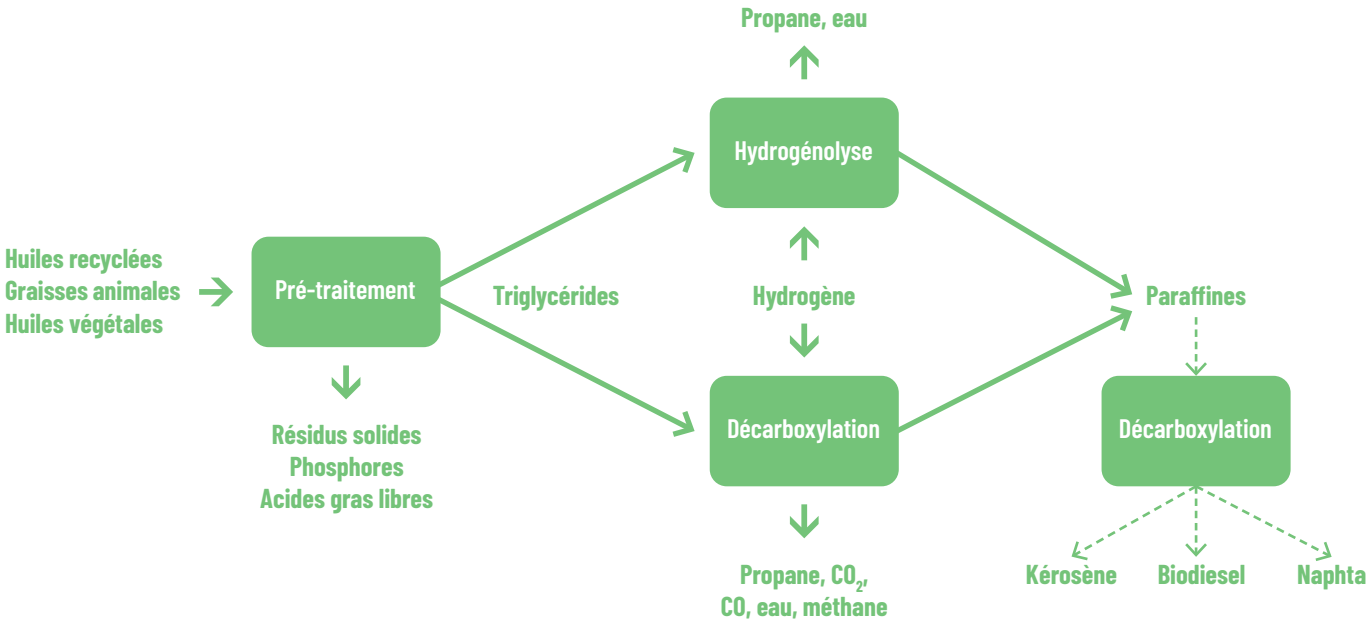
- Moins d'émissions d'oxydes d'azote (NOx) ;
- Meilleure résistance au froid ;
- Plus grande densité énergétique ;
- Possibilité d'une motorisation 100 % de HVO avec les moteurs actuels.

Il est possible de produire des carburants dans l'aviation à partir des paraffines. Celles-ci sont transformées en iso-paraffines. Ce procédé transforme ensuite une partie du diesel en kérosène et naphta. Les proportions en kérosène, diesel et naphta dépendent des propriétés du kérosène souhaitées.



© AdobeStock

## Les étapes du procédé




| **Potentiel de ressources accessibles en 2050**<br>(sans tenir compte des autres voies de valorisation énergétique possibles) | MtMS |
|---|---|
| Biodéchets (ménage, GMS, Resto) | 0,1 |
| Déchets IAA | 0,4 |
| **TOTAL** | **0,5** |

### ÉTAT DU DÉVELOPPEMENT

Plus d'une dizaine d'unités commerciales sont en fonctionnement en Europe, d'autres sont en projet. Les usines sont de très grandes tailles (entre 100 et 1400 kt/an avec une moyenne à 450 kt/an), et traitent en général également des huiles végétales (1G).

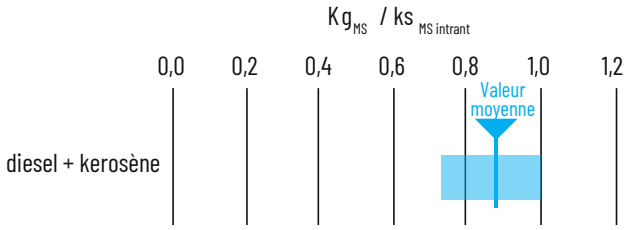
# Indicateurs pour caractériser les filières

## Critères techniques

### RENDEMENT MASSIQUE ET CO-PRODUITS

Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 0,88 tonne diesel + kérosène.

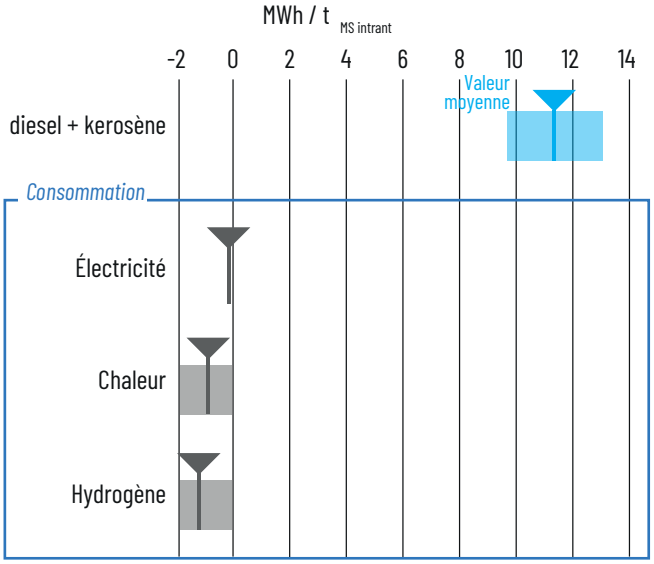
→ **Le rendement matière est très élevé, mais applicable à une très faible partie de la ressource.**




### BILAN ÉNERGÉTIQUE

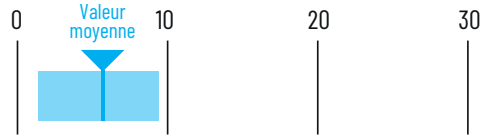
Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 11,5 MWh de diesel + kérosène. Pour cela, le procédé consomme 0,05 MWh d'électricité, 1,1 MWh de chaleur et 1,6 MWh d'hydrogène.
Le procédé peut également, dans certains cas, être producteur d'une petite quantité d'électricité et de chaleur liée à de la récupération d'énergie sur le procédé.

→ **Le rendement énergétique est élevé également en raison d'un bon rendement matière et d'une matière première très énergétique. Le bilan net est néanmoins dégradé par l'ajout d'hydrogène.**



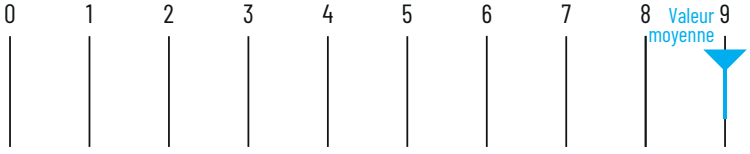

### TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUE

Il correspond à l'énergie produite par le vecteur principal divisée par la consommation de produits énergétiques (électricité, chaleur, hydrogène) pour la production de ce vecteur.




### MATURITÉ TECHNOLOGIQUE (ÉCHELLE TRL)

→ **Plusieurs unités commerciales sont en service valorisant aussi bien des huiles vierges que des déchets. La filière bénéficie ainsi du développement de la filière 1G.**



# Critères environnementaux

### RETOUR AU SOL DU CARBONE

Pas de retour au sol de la matière organique.

Matière organique (carbone)

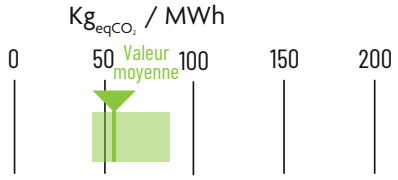
### RETOUR AU SOL DES NUTRIMENTS

Les nutriments se retrouvent peu dans les huiles et les graisses, seul le phosphore est récupéré lors du Pré-traitement.

Azote (N) Phosphore (P)

Potassium (K)

### FACTEUR D'ÉMISSION GES




### POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Indicateur qualitatif pour juger de l'impact de la filière sur la qualité de l'air (rejets dans l'air : particules, NOx, $NH_3$...) sur le site de production et lors de son usage final.

→ **Pas d'information sur les émissions du procédé. Sur l'usage final, la combustion du carburant est plus propre que le carburant fossile sur tous les indicateurs (particules, SOx, CO...) hormis les NOx.**

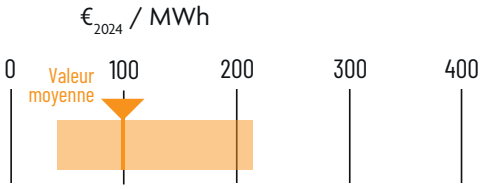


Impact faible à moyen

# Critères économiques et intégration territoriale

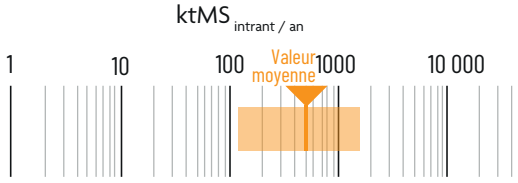
### COÛT DE PRODUCTION

Les coûts pour les filières matures (TRL = 9, en exploitation) sont issus de données mesurées, pour les autres ce sont des données estimées à partir des expérimentations.




### TAILLE DES UNITÉS

Taille moyenne des unités : 500 ktMS d'intrants biomasse par an.




### USAGE DU VECTEUR ÉNERGÉTIQUE

L'usage est principalement extraterritorial.
Le carburant produit sera à visée soit de l'aviation, mode de transport accessible à une faible part de la population, ou le secteur du transport maritime qui est déconnecté des usages locaux de l'énergie.

# Pyrolyse rapide

## Description du procédé et état de développement

La pyrolyse est un procédé thermochimique permettant de produire des combustibles solides, liquides ou gazeux à partir de matière organique. Selon les conditions de pression et de température, voire des agents de réaction, le procédé peut être orienté vers la production de d'huile pyrolytique. En combinant une montée en température rapide, un temps de séjour court et un refroidissement rapide, cette pyrolyse appelée « rapide » permet de maximiser la production de biohuile.

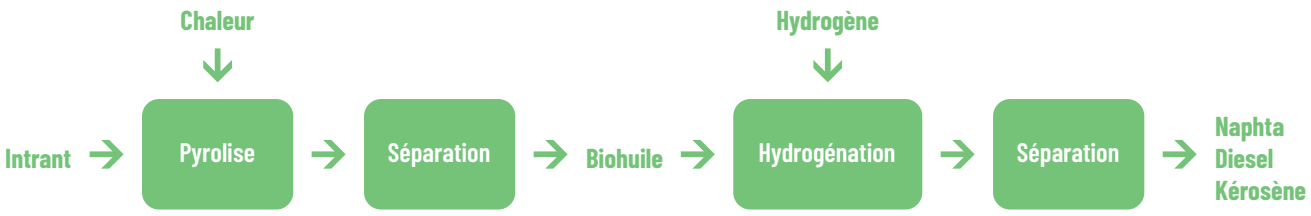
Il existe différents types de pyrolyseurs, dont les caractéristiques sont choisies selon la taille de l'unité, la typologie de la ressource (granulométrie, composition chimique…), la qualité ou la composition de l'huile souhaitée.

L'huile produite doit ensuite être « raffinée » pour produire des substituts au diesel ou au kérosène.



© AdobeStock

### Les étapes du procédé



| Potentiel de ressources accessibles en 2050<br>(sans tenir compte des autres voies de valorisation énergétique possibles) | MtMS |
|---|---|
| Résidus culture | 5 |
| Bois énergie issu de forêt | 11 |
| Bois énergie hors forêt | 8 |
| Connexes scieries | 6 |
| Bois déchet | 3 |
| CSR | 5 |
| **TOTAL** | **38** |

## ÉTAT DU DÉVELOPPEMENT

Il y a peu d'usines commerciales en fonctionnement actuellement (deux en Europe), mais plusieurs pilotes ou petits démonstrateurs existent.

La technologie n'est pas encore arrivée à maturité. De nombreux types de réacteurs sont actuellement à l'étude et aucun procédé n'est favorisé par les industriels.

### Projet Pyrocell

Suède - Démonstrateur commercial

**3,2 t/h**

**(24kt/an) d'huile de pyrolyse à partir de 5t/h de bois,**
la biohuile produite est ensuite mélangée avec du pétrole puis raffinée pour produire des carburants.
Le démonstrateur est en fonctionnement depuis 2021.

### Démonstrateur Green Fuel Nordic

Finlande (Lieksa) - Démonstrateur industriel

**100 ktMS/an**

**de la biohuile à partir de résidus forestiers.**
Le démonstrateur est en fonctionnement depuis 2020.

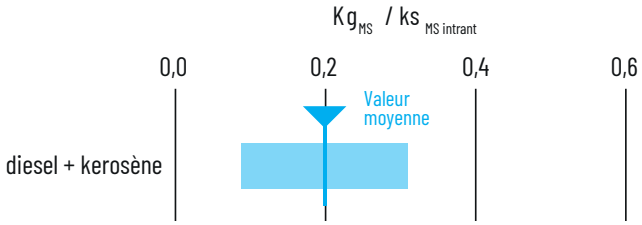
Des projets d'usines de plus grandes capacités sont annoncés en Norvège et en Finlande.

# Indicateurs pour caractériser les filières

## Critères techniques

### RENDEMENT MASSIQUE ET CO-PRODUITS

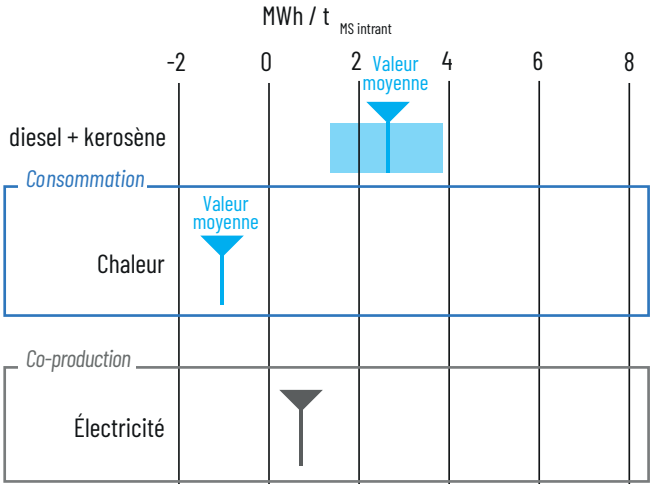
Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 0,2 tonne diesel + kérosène.




### BILAN ÉNERGÉTIQUE

Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 2,5 MWh de diesel + kérosène. Pour cela, le procédé consomme 1 MWh de chaleur. Dans certain cas, le procédé peut également être producteur d'électricité liée à de la récupération d'énergie sur le procédé.

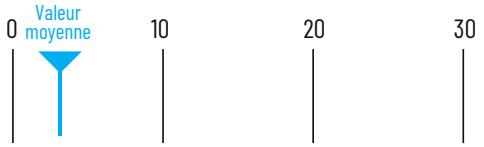
**→ Sur certains procédés, la chaleur excédentaire peut-être convertie en électricité et dépasse le besoin du procédé. De même l'hydrogène utilisée pour le raffinage de l'huile peut-être autoproduit à partir de syngas.**




### TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUE

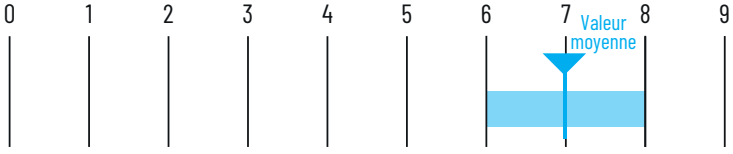
Il correspond à l'énergie produite par le vecteur principal divisée par la consommation de produits énergétiques (électricité, chaleur, hydrogène) pour la production de ce vecteur.

**→ Forte consommation d'énergie.**




### MATURITÉ TECHNOLOGIQUE (ÉCHELLE TRL)

**→ Des premières unités commerciales sont en service.**



# Critères environnementaux

### RETOUR AU SOL DU CARBONE

Pas de retour au sol de la matière organique.

Matière organique (carbone)

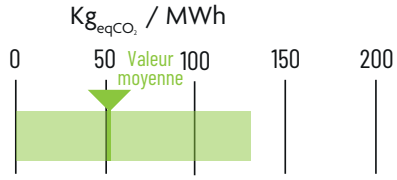
### RETOUR AU SOL DES NUTRIMENTS

L'azote est volatilisé, le phosphore et le potassium peuvent être plus ou moins récupérés et valorisés (dépend des intrants et des procédés).

Azote (N) Phosphore (P)

Potassium (K)

### FACTEUR D'ÉMISSION GES




### POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Indicateur qualitatif pour juger de l'impact de la filière sur la qualité de l'air (rejets dans l'air : particules, NOx, $NH_3$...) sur le site de production et lors de son usage final.



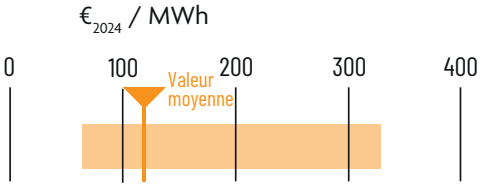

→ **Un des grands intérêts de la pyrolyse avec production de carburant est la réduction, voire la suppression, des rejets atmosphériques (selon les procédés et les intrants). Sur l'usage final, la combustion du carburant est plus propre que le carburant fossile sur tous les indicateurs (particules, SOx, CO...), hormis les NOx.**

# Critères économiques et intégration territoriale

### COÛT DE PRODUCTION

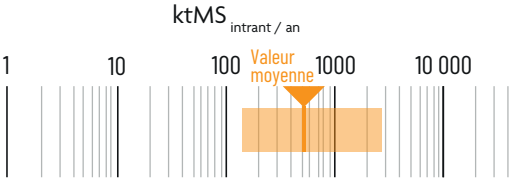
Les coûts les plus faibles sont obtenus pour de très unités de très grande tailles (+ de 500 ktMS/an).

→ **Les coûts pour les filières matures (TRL = 9, en exploitation) sont issus de données mesurées, pour les autres ce sont des données estimées à partir des expérimentations.**




### TAILLE DES UNITÉS

Taille moyenne des unités : 500 ktMS d'intrants biomasse par an.




### USAGE DU VECTEUR ÉNERGÉTIQUE

L'usage est principalement extraterritorial. Le carburant produit sera à visée soit de l'aviation, mode de transport accessible à une faible part de la population, ou le secteur du transport maritime qui est déconnecté des usages locaux de l'énergie.



# Liquéfaction hydrothermale

## Description du procédé et état de développement

Cette filière traite des intrants par voie humide (taux de matière sèche <20 %) elle peut donc traiter par exemple des boues de stations d'épuration, des effluents industriels, mais aussi d'autres intrants solides (bois, résidus de cultures) avec un Pré-traitement (broyage, dilution).

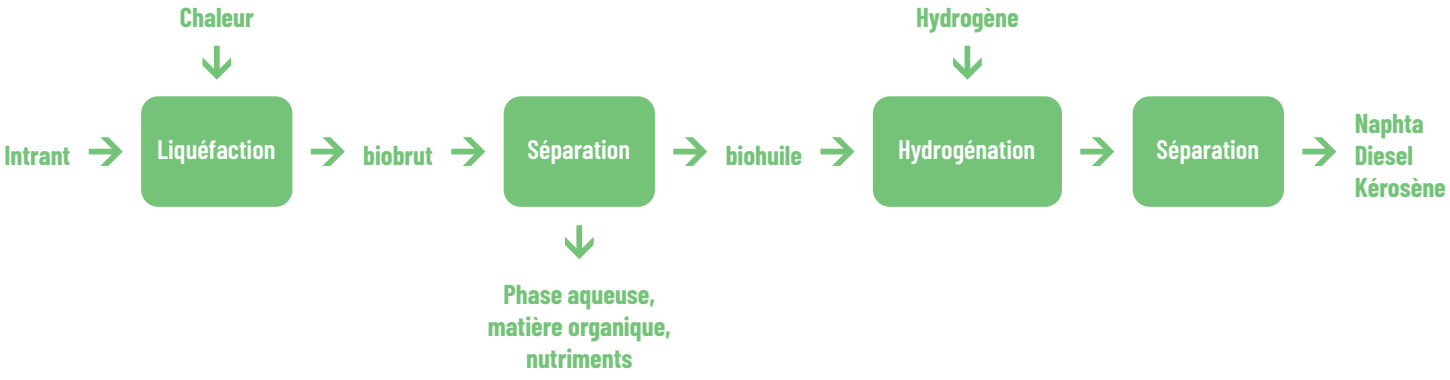
La transformation se déroule sous haute pression (100 à 300 bars) et à haute température (entre 250°C et 350°C) proche du point critique de l'eau pour accélérer la réaction. Les conditions sont choisies pour favoriser la production d'un biobrut (biocrude).

Il est ensuite nécessaire de séparer les produits de réaction, l'huile d'un côté et la phase aqueuse de l'autre.

L'huile doit ensuite être traitée par hydrogénation pour corriger sa teneur trop importante en oxygène. Cette étape peut être réalisée sur un autre site.

La phase aqueuse, riche en matière organique et en nutriments doit être traitée et peut potentiellement faire l'objet d'un retour au sol.

### Les étapes du procédé



| Potentiel de ressources accessibles en 2050<br>(sans tenir compte des autres voies de valorisation énergétique possibles) | MtMS |
|---|---|
| Déchets IAA | 1 |
| Boues de STEP | 1 |
| Bois énergie issu de forêt | 11 |
| Bois énergie hors forêt | 8 |
| Connexes scieries | 6 |
| Liqueurs noires | 5 |
| Bois déchet | 3 |
| CSR | 5 |
| **TOTAL** | **40** |

## ÉTAT DU DÉVELOPPEMENT

Aucune unité commerciale actuellement en fonctionnement. Cette technologie nécessite encore des améliorations nécessaires, en particulier en ce qui concerne :

- La réaction en continue pour augmenter les capacités de traitement et l'intégration thermique ;
- La valorisation des composés organiques et des nutriments de la phase aqueuse ;
- Éviter l'utilisation de solvants organiques pour la séparation de phases dans l'objectif d'améliorer le bilan environnemental.

### Démonstrateur Mura

Angleterre - Démonstrateur industriel

**20 kt/an**

**de déchets plastiques** pour la production d'huile de synthèse.
La réaction est en cours de mise en service.

### Démonstrateur CS-1 (Licella)

Australie - Démonstrateur industriel

**15 ktMS**

Le démonstrateur a été mis en service en 2022.

### Démonstrateur Silva Green Fuel

Norvège - Démonstrateur industriel

**6 tMS**

**d'intrant (bois) a été mis en 2021.**
Le démonstrateur a été mis en service en 2021.

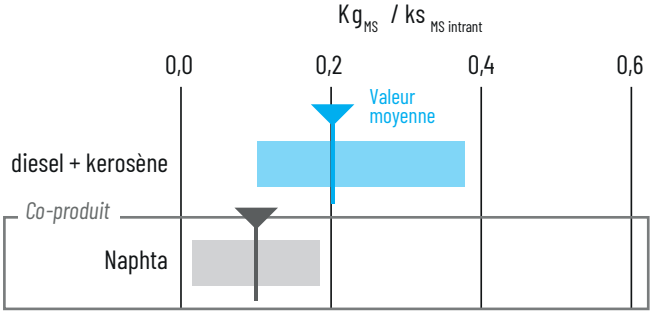
# Indicateurs pour caractériser les filières

## Critères techniques

### RENDEMENT MASSIQUE ET CO-PRODUITS

Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 0,2 tonne diesel+kérosène, et 0,08 tonne de naphta.

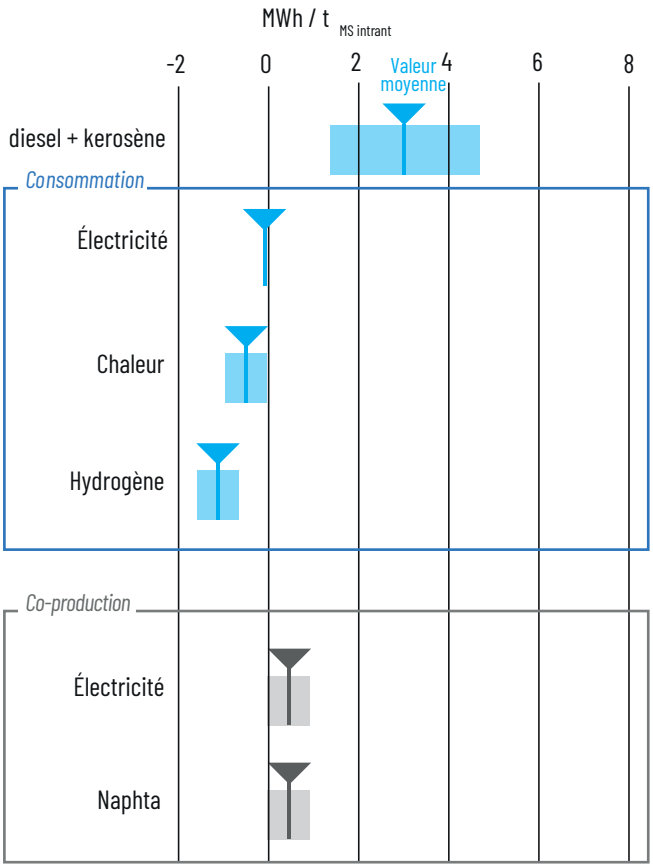
→ **Une partie de la matière organique semble théoriquement pouvoir être retournée au sol mais nécessite davantage d'informations pour confirmer.**




### BILAN ÉNERGÉTIQUE

Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 3 MWh de diesel+kérosène. Pour cela, le procédé consomme 0,02 MWh d'électricité, 0,5 MWh de chaleur et 1,1 MWh d'hydrogène.

Le procédé peut également, dans certains cas, être producteur d'une petite quantité d'électricité et de chaleur liée à de la récupération d'énergie sur le procédé, ainsi que du Naphta (0,5 MWh).



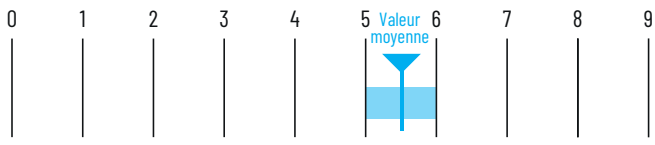

### TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUE

Il correspond à l'énergie produite par le vecteur principal divisée par la consommation de produits énergétiques (électricité, chaleur, hydrogène,méthanol) pour la production de ce vecteur.




### MATURITÉ TECHNOLOGIQUE (ÉCHELLE TRL)

Aucune unité commerciale actuellement en cours de fonctionnement.



# Critères environnementaux

### RETOUR AU SOL DU CARBONE

Pas de retour au sol de la matière organique.

Matière organique (carbone)

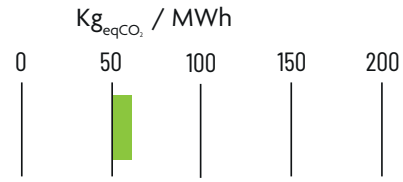
### RETOUR AU SOL DES NUTRIMENTS

Une partie des nutriments pourrait sans doute être retournée au sol, mais pas d'informations claires identifiées.

Azote (N) Phosphore (P)

Potassium (K)

### FACTEUR D'ÉMISSION GES




### POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Indicateur qualitatif pour juger de l'impact de la filière sur la qualité de l'air (rejets dans l'air : particules, NOx, NH3...) sur le site de production et lors de son usage final.



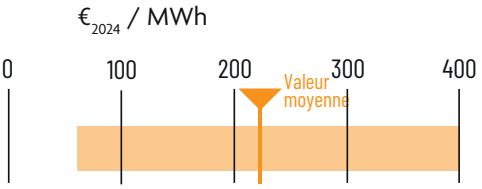

**→ À priori faible impact local seul du gaz naturel est brûlé. Sur l'usage final, la combustion du carburant est plus propre que le carburant fossile sur tous les indicateurs (particules, SOx, CO...), hormis les NOx.**

# Critères économiques et intégration territoriale

### COÛT DE PRODUCTION

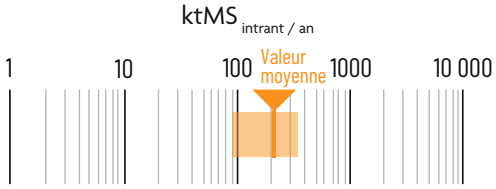
Les coûts pour les filières matures (TRL = 9, en exploitation) sont issus de données mesurées, pour les autres ce sont des données estimées à partir des expérimentations.

**→ La faible maturité de la filière présente des coûts théoriques très variés et globalement assez élevés.**




### TAILLE DES UNITÉS

Taille moyenne des unités : 200 ktMS d'intrants biomasse par an




### USAGE DU VECTEUR ÉNERGÉTIQUE

L'usage est principalement extraterritorial.
Le carburant produit sera à visée soit de l'aviation, mode de transport accessible à une faible part de la population, ou le secteur du transport maritime qui est déconnecté des usages locaux de l'énergie.

# Gazéification hydrothermale

## Description du procédé et état de développement

La gazéification hydrothermale est un procédé thermochimique destiné aux intrant humides dans l'objectif de produire un gaz de synthèse, ou « syngas », riche en méthane (50 à 60 %), $H_2$ et $CO_2$ variant selon les conditions opératoires et le type d'intrants.

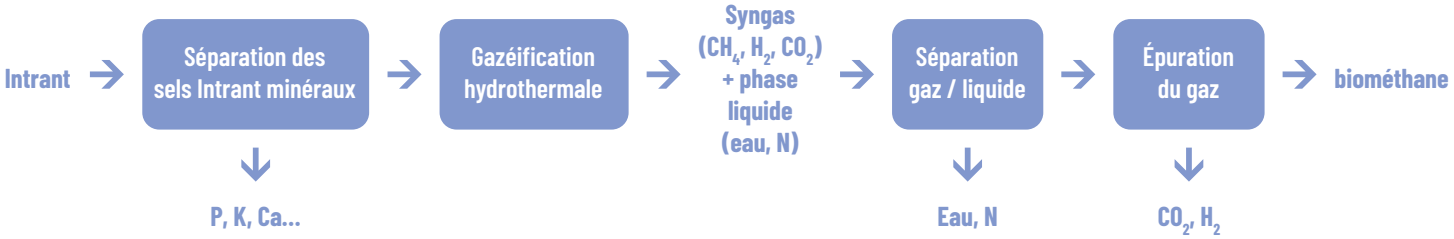
La transformation se déroule en présence ou non d'un catalyseur, sous haute pression (250-300 bars) et à haute température, 400 à 550°C (avec catalyseur) et 600 à 700°C (sans catalyseur).

Une première étape de séparation des sels minéraux (P, K, Ca...) peut être réalisée en amont de la gazéification afin de pouvoir les valoriser en engrais.

En sortie de l'étape de gazéification, deux étapes supplémentaires sont nécessaires :

- Séparation gaz / liquide avec valorisation possible de l'azote ;
- Épuration du gaz (séparation $CO_2$ et $H_2$) pour la production de biométhane. Avant l'épuration du gaz, une étape de méthanation peut être envisagée pour la valorisation de l'$H_2$ et du $CO_2$ sous forme de $CH_4$.

### Les étapes du procédé



| Potentiel de ressources accessibles en 2050<br>(sans tenir compte des autres voies de valorisation énergétique possibles) | MtMS |
|---|---|
| Déchets IAA | 1 |
| Boues de STEP | 1 |
| Bois énergie issu de forêt | 11 |
| Bois énergie hors forêt | 8 |
| Connexes scieries | 6 |
| Liqueurs noires | 5 |
| Bois déchet | 3 |
| CSR | 5 |
| **TOTAL** | **40** |

## ÉTAT DU DÉVELOPPEMENT

Quelques pilotes/démonstrateurs ont été développés en Europe dont notamment parmi les plus avancés figurent :

- PSI et Treatech en Suisse, 110 kg/h, sur le traitement des boues urbaines et d'effluents industriels ;
- CADE Engineered ;
- Bright Circular aux Pays-Bas, 1 t/h ;
- CADE Engineered Technologies en Espagne, 80 kg/h sur boues urbaines.

### L'usine SCW Systems

Pays-Bas (Alkmaar)

**16 t/h**

**à partir d'un gisement de glycérine.**
Cette unité est en cours de mise en service

### Démonstrateur GHAMa

France (Saint-Nazaire)

**2 t/h**

Projet piloté par Leroux & Lotz Technologies, en partenariat avec la CARENE, l'Agglomération de Saint-Nazaire, sur des déchets et des boues de station d'épuration urbaine

### VINCI Environnement

France

**150 kg/h**

Pilote mobile de petite taille, environ 150 kg/h, basé sur la technologie américaine de Genifuel

Plusieurs défis restent à relever pour assurer un développement de cette technologie :

- Assurer la tenue des matériaux sur le long terme (température/pression supercritiques, corrosion) ;
- Mieux maîtriser la séparation des sels à l'entrée du procédé ;
- Sortir des intrants de niches (glycérine, solvants organique) pour aller sur des intrants aux plus grands potentiels (boues de station d'épuration par exemple) ;
- Optimiser l'intégration énergétique.

Les intrants attendus sont principalement des déchets de matière organique relativement liquide même s'il est aussi envisagé de traiter des intrants solides après broyage et dilution. Pour les boues de station d'épuration voire leur digestat, la gazéification hydrothermale pourrait apporter une solution particulièrement pertinente, en alternative à l'incinération, dans les cas de contraintes fortes sur l'épendage.

Les tailles des installations industrielles attendues seront modulaires, avec des capacités de traitement de 4 à 50 ktMS/an de matière sèche ou matière organique.

# Indicateurs pour caractériser les filières

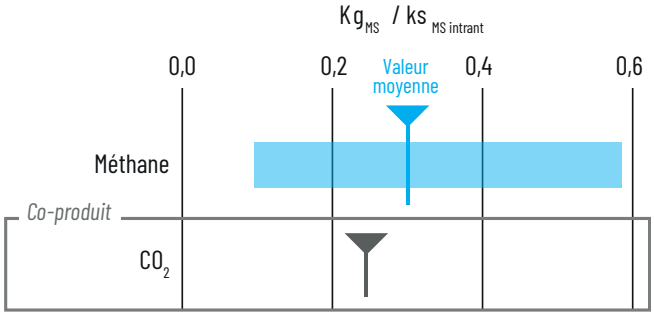
Note : Cette filière est peu documentée, il n'a pas été possible d'instruire tous les indicateurs, et ceux produits se font sur la base de peu d'études.

## Critères techniques

### RENDEMENT MASSIQUE ET CO-PRODUITS

Pour 1 kg de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 0,3 kg de méthane et co-produit de 0,25 kg de $CO_2$.

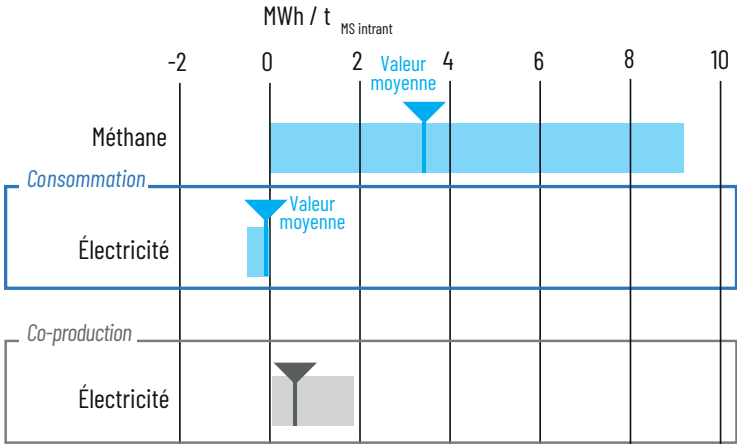
→ **Outre la production de méthane, cette filière permet de produire un $CO_2$ assez pur pour être valorisé dans les procédés power-to-X.**




### BILAN ÉNERGÉTIQUE

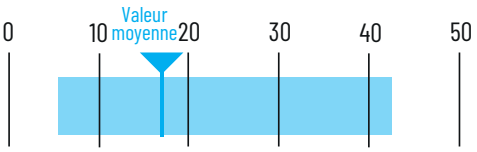
Le procédé permet la production, pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, de 3,3 MWh de méthane, pour cela, le procédé consomme 0,2 MWh d'électricité. Le procédé peut également, dans certains cas, être producteur de 0,4 MWh d'électricité lié à de la récupération d'énergie sur le procédé.

→ **Peu de bilan énergétique complet, en particulier manque d'information sur la consommation électrique. Certaines études proposent de la coproduction d'électricité, d'autres non.**



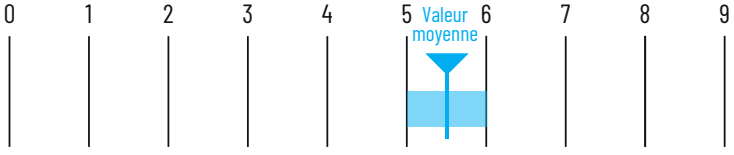

### TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUE

Il correspond à l'énergie produite par le vecteur principal divisée par la consommation de produits énergétiques (électricité, chaleur) pour la production de ce vecteur.




### MATURITÉ TECHNOLOGIQUE (ÉCHELLE TRL)

Une première unité commerciale est en cours de mise en route, avec un intrant de niche. Les autres technologies sont au stade de pilote expérimental à industriel.



# Critères environnementaux

### RETOUR AU SOL DU CARBONE

Pas de retour au sol de la matière organique.

Matière organique (carbone)

### RETOUR AU SOL DES NUTRIMENTS

L'azote se retrouve dans la phase liquide, le phosphore et le potassium se retrouvent dans les sels extraits dans la première phase. Il semble donc possible de récupérer les nutriments NPK pour un retour au sol, mais sa mise en œuvre reste encore à valider avec les premières unités.

Azote (N) Phosphore (P)

Potassium (K)

### FACTEUR D'ÉMISSION GES

Pas d'information.

### POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Indicateur qualitatif pour juger de l'impact de la filière sur la qualité de l'air (rejets dans l'air : particules, NOx, $NH_3$...) sur le site de production et lors de son usage final.



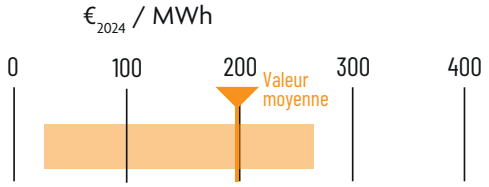

→ **Une partie des gaz produits ou de séparation est brûlée pour apporter la chaleur nécessaire au procédé. Sur l'usage final, la combustion du méthane est plus propre que celle de la biomasse. Dans le cas du bioGNV, les émissions de particules et NOx des gaz d'échappement des moteurs à combustion sont réduites par rapport au diesel.**

# Critères économiques et intégration territoriale

### COÛT DE PRODUCTION

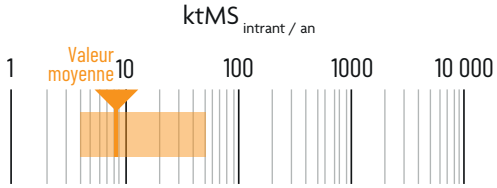
Les coûts pour les filières matures (TRL = 9, en exploitation) sont issus de données mesurées, pour les autres ce sont des données estimées à partir des expérimentations.

→ **Peu de données fiables, les faibles coûts sont pour des intrants industriels de niche (glycérine, solvants...).**




### TAILLE DES UNITÉS

Taille moyenne des unités : 8 kt MS d'intrants biomasse par an.




### USAGE DU VECTEUR ÉNERGÉTIQUE

L'usage est local à territorial. Le méthane produit est injecté dans le réseau gazier auquel 1/3 des communes sont raccordées, couvrant plus des 3/4 de la population française métropolitaine. Il bénéficie à l'ensemble des consommateurs connectés au réseau. Le développement actuel du bioGNV élargit son usage en particulier au transport de marchandise (camion) et aux transports en commun (bus, car).

# Pyrogazéification (Fischer-Tropsch)

## Description du procédé et état de développement

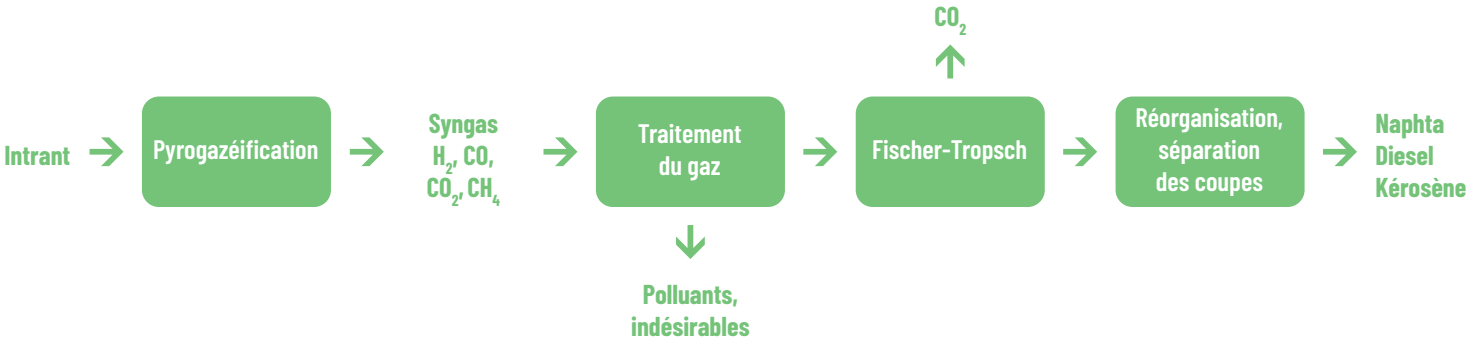
La pyrogazéification est un procédé thermochimique permettant de produire des combustibles solides, liquides ou gazeux à partir de matière organique. Selon les conditions de pression et de température, voire des agents de réaction, le procédé peut être orienté vers la production de gaz de synthèse appelé « syngas ». Celui-ci est composé principalement de méthane, d'hydrogène, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone mais aussi de goudrons, et autres impuretés. Il existe une multitude de types de gazogènes, dont les caractéristiques vont être choisies selon la taille de l'unité, la typologie de la ressource (granulométrie, composition chimique…), la qualité ou la composition du syngas souhaité.

Le syngas est ensuite converti par la réaction « Fischer-Tropsch » (FT) en différents produits hydrocarbures dont la répartition est dépendante du type de catalyseur, de la température, la pression ou la composition du syngas. Dans le but de favoriser la production de certaines coupes d'hydrocarbures (ex : kérosène), un post-traitement peut aussi être mis en oeuvre pour une réorganisation partielle (craquage des chaînes longues par exemple).



© Solagro, Sylvaine Berger – Güssing (AT)

### Les étapes du procédé



| Potentiel de ressources accessibles en 2050<br>(sans tenir compte des autres voies de valorisation énergétique possibles) | MtMS |
|---|---|
| Résidus culture | 5 |
| Bois énergie issu de forêt | 11 |
| Bois énergie hors forêt | 8 |
| Bois énergie hors forêt | 6 |
| Connexes scieries | 3 |
| CSR | 5 |
| **TOTAL** | **38** |

## ÉTAT DU DÉVELOPPEMENT

Cette voie de valorisation été développée durant la Seconde guerre mondiale, en Allemagne, pour la production, à partir de charbon, de carburants pour l'aviation et le transport terrestre.
Les enjeux actuels restent l'adaptation de la technologie à la biomasse, tant sur la typologie des ressources que sur la taille des usines afin de s'adapter aux biomasses locales. Les choix sont complexes du fait d'une diversité de solutions technologiques et d'optimisations possibles entre la qualité du syngas (brique gazéification) et la chaîne de traitement aval (briques traitement du syngas et Fischer-Tropsch).
Il n'y a pas aujourd'hui d'unité commerciale en fonctionnement à partir de biomasse :

### Démonstrateur BioTFuel

France (Dunkerque)
Démonstrateur semi-industriel

**8 kt/an**

**de carburant liquide.**

Le démonstrateur a fonctionné entre 2020 et 2021 à partie de biomasse ligneuse torréfiée.

### Démonstrateur Red Rock Biofuel

USA (Lakeview, Oregon)

**144 000 t/an**

**de bois.**

Cette unité a été construite, mais jamais opérée. Rachetée en 2023, l'installation est en cours de conversion pour produire du méthane et de l'hydrogène.

### Démonstrateur BioTJet

France (Pardies)
Démonstrateur commercial

**300 000 t/an**

**de biomasse.**

Projet en cours d'étude de faisabilité (fin prévue fin 2024). Elle serait associée à un électrolyseur pour produire de l'hydrogène et compléter la production de carburant, pour atteindre 75 000 t/an au total.

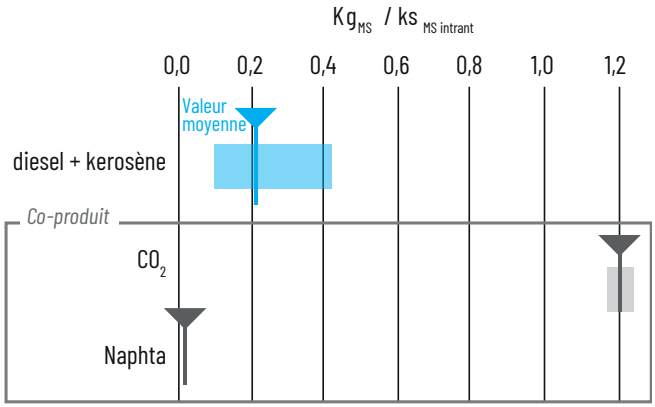
# Indicateurs pour caractériser les filières

## Critères techniques

### RENDEMENT MASSIQUE ET CO-PRODUITS

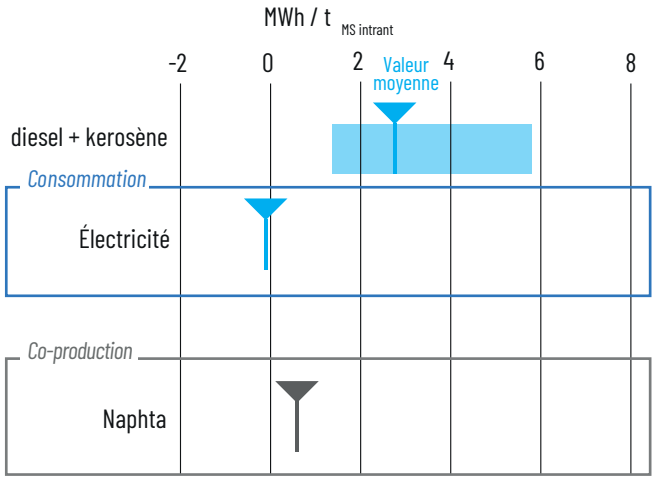
Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 0,2 tonne diesel+kérosène, de 1,2 tonne de $CO_2$ et de 0,03 tonne de naphta.

→ **Outre la production de kérosène et diesel cette filière permet de produire un $CO_2$ assez pur pour être valorisé dans les procédés power-to-X, et pour la production de bionaptha.**




### BILAN ÉNERGÉTIQUE

Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 2,6 MWh de diesel+kérosène. Pour cela, le procédé consomme 0,2 MWh d'électricité. Le procédé permet également la production de 0,4 MWh de naphta.

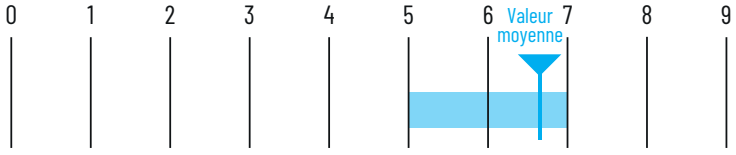



### TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUE

Il correspond à l'énergie produite par le vecteur principal divisée par la consommation de produits énergétiques (électricité, chaleur) pour la production de ce vecteur.




### MATURITÉ TECHNOLOGIQUE (ÉCHELLE TRL)



# Critères environnementaux

### RETOUR AU SOL DU CARBONE

Pas de retour au sol de la matière organique.

Matière organique (carbone)

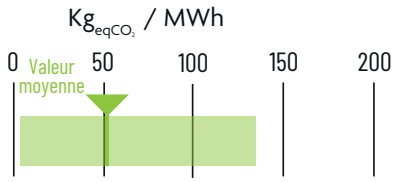
### RETOUR AU SOL DES NUTRIMENTS

L'azote est volatilisé. Le phosphore et le potassium peuvent être plus ou moins récupérés et valorisés (dépend des intrants et des procédés).

Azote (N) Phosphore (P)

Potassium (K)

### FACTEUR D'ÉMISSION GES




### POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Indicateur qualitatif pour juger de l'impact de la filière sur la qualité de l'air (rejets dans l'air : particules, NOx, $NH_3$...) sur le site de production et lors de son usage final.



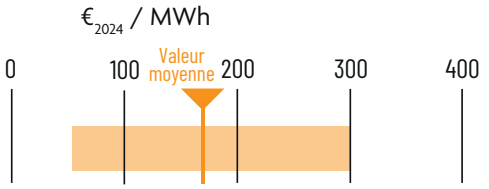

**→ Un des grands intérêts de la gazéification avec production de carburant figure dans la réduction, voire la suppression, des rejets atmosphériques (selon les procédés et les intrants).**
**Sur l'usage final, la combustion du carburant est plus propre que le carburant fossile sur tous les indicateurs (particules, SOx, CO...), hormis les NOx.**

# Critères économiques et intégration territoriale

### COÛT DE PRODUCTION

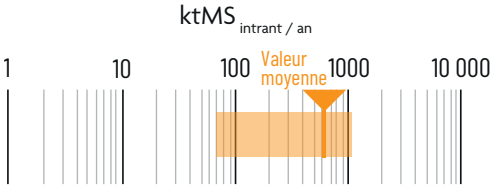
Les coûts pour les filières matures (TRL = 9, en exploitation) sont issus de données mesurées, pour les autres ce sont des données estimées à partir des expérimentations.

**→ La faible maturité de la filière présente des coûts théoriques très variés.**
**Les coûts faibles sont associés à des unités de grande taille (effet d'échelle important).**




### TAILLE DES UNITÉS

Taille moyenne des unités : 650 kt MS d'intrants biomasse par an.




### USAGE DU VECTEUR ÉNERGÉTIQUE

L'usage est principalement extraterritorial.
Le carburant produit sera à visée soit de l'aviation, mode de transport accessible à une faible part de la population, ou le secteur du transport maritime qui est déconnecté des usages locaux de l'énergie.

# Pyrogazéification (méthanation)

## Description du procédé et état de développement

La pyrogazéification est un procédé thermochimique, permettant de produire des combustibles solides, liquides ou gazeux à partir de matière organique. Selon les conditions de pression et de température, voire des agents de réaction, le procédé peut être orienté vers la production de gaz de synthèse appelé « syngas » et composé principalement de méthane, d'hydrogène, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone mais aussi de goudrons, et autres impuretés.

Il existe une multitude de types de gazogènes, dont les caractéristiques vont être choisies selon la taille de l'unité, la typologie de la ressource (granulométrie, composition chimique…), la qualité ou la composition du syngas souhaité.

Pour produire du méthane, le syngas doit ensuite passer une série de 3 étapes :

- Traitement du gaz : extraction des goudrons, composés soufrés, particules…
- Enrichissement en méthane (méthanation) : conversion de l'hydrogène en méthane en l'associant au CO voire $CO_2$.
- Mise aux spécifications du réseau de gaz : séparation fine des composés indésirables, du $CO_2$ voire de l'hydrogène résiduel.



© Solagro, Simon Métivier – GAYA (64)

### Les étapes du procédé



| **Potentiel de ressources accessibles en 2050**<br>(sans tenir compte des autres voies de valorisation énergétique possibles) | MtMS |
|---|---|
| Résidus culture | 4,8 |
| Bois énergie issu de forêt | 10,8 |
| Bois énergie hors forêt | 8,3 |
| Connexes scieries | 5,5 |
| Bois déchet | 2,8 |
| CSR | 5,0 |
| **TOTAL** | **37** |

## ÉTAT DU DÉVELOPPEMENT

La pyrogazéification est une technologie ancienne. Elle s'est développée industriellement dès la fin du 19e siècle lors des premiers réseaux de gaz de ville en Europe qui étaient à cette époque des réseaux locaux de syngas produit à partir de charbon. Cette industrie a pris fin avec l'arrivée du gaz naturel à partir du milieu du 20e siècle.

Dans les années 1970, quelques très gros sites de pyrogazéification ont été mis en œuvre notamment en Chine, en Afrique du Sud et aux États-Unis ont pour convertir du charbon en « gaz naturel de synthèse ».

L'application de la pyrogazéification à la biomasse s'est également développée mais pour des utilisations en combustion direct du syngas pour la production de chaleur ou d'électricité par cogénération.

Le couplage de pyrogazéification de biomasse avec la production de biométhane n'est pas encore au stade de déploiement industriel (mais toutes les briques sont matures). En Europe, on retrouve 3 unités au stade de démonstration.

### Projet Gobigas

Suède - Démonstrateur commercial

**30 MWth**

**divers types de bois (granulés, plaquettes, écorces, déchets bois A)**

**12 000 h**

**de fonctionnement sur la période 2013-2018**

Après plus de 70 $GWh_{PCS}$ produits et injectés dans le réseau, l'unité a été mise sous cocon faute de modèle économique : les coûts de production (138 $€_{2024}/MWh_{PCS}$) étaient supérieurs au prix d'achat du biométhane (63 $€_{2024}/MWh_{PCS}$) en Suède à cette époque.

### Démonstrateur GAYA

France - Démonstrateur industriel

**0,6 MWth**

**(0,4 $MW_{CH4}$). Ce démonstrateur a été mis en service en 2018**

Le projet a été mis en service en 2018 et visait à :
- démontrer une technologie améliorée inspirée de celle du démonstrateur Gobigas (Suède)
- tester différents types d'intrants dont des CSR.

Le démonstrateur réalise la méthanation du syngas, mais n'intègre cependant pas la mise aux spécifications et l'injection dans le réseau.

### ABSL Swindon

Angleterre - Démonstrateur commercial

**10 ktMS/an**

**mise en service fin 2023**

Outre le biométhane injecté dans les réseaux, il commercialise du bio$CO_2$ liquéfié. Les porteurs de projets comptent ensuite répliquer le projet avec une installation plus importante, de 150 kt/an.

En France, la filière est dynamique avec environ une quinzaine de projets en développement recensés.

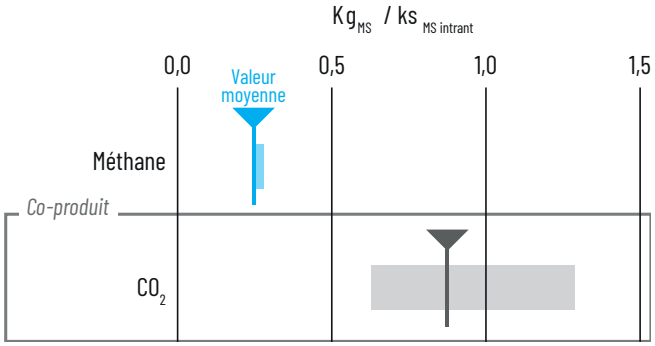
# Indicateurs pour caractériser les filières

## Critères techniques

### RENDEMENT MASSIQUE ET CO-PRODUITS

Pour 1 kg de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 0,2 kg de méthane, de 0,9 kg de $CO_2$.

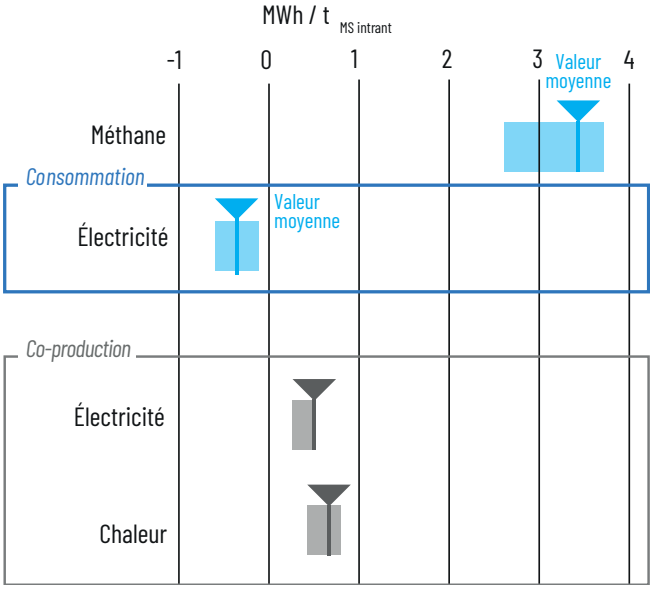
→ **Outre la production de méthane, cette filière permet de produire un $CO_2$ suffisamment pur pour être valorisé dans les procédés power-to-X.**




### BILAN ÉNERGÉTIQUE

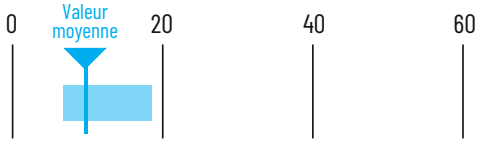
Le procédé permet la production pour 1 tonne de matière sèche d'intrant de 3,3 MWh de méthane, pour cela, le procédé consomme 0,4 MWh d'électricité. Le procédé peut également, dans certain cas, être producteur, de 0,5 MWh d'électricité et 0,6 MWh de chaleur liée à de la récupération d'énergie sur le procédé.

→ **Une partie importante de l'énergie non valorisée sous forme de méthane peut être récupérée sous forme de chaleur haute température. Selon les tailles et les procédés, il peut être intéressant de l'utiliser pour produire de l'électricité. Cette chaleur permet si besoin le séchage du combustible.**



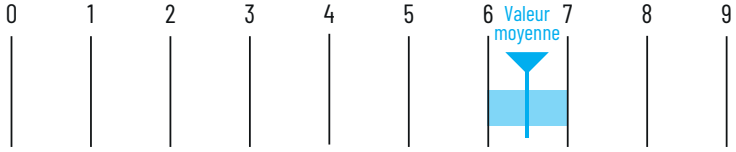

### TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUE

C'est l'énergie produite par le vecteur principal divisée par la consommation de produits énergétiques (électricité, chaleur, hydrogène, méthanol) pour la production de ce vecteur.




### MATURITÉ TECHNOLOGIQUE (ÉCHELLE TRL)

→ **La plage TRL est large car il existe une grande diversité de technologies, et de couples technologies/intrants qui n'ont pas le même niveau de maturité.**



# Critères environnementaux

## RETOUR AU SOL DU CARBONE

Matière organique (carbone)

## RETOUR AU SOL DES NUTRIMENTS

L'azote est volatilisé. Le phosphore et le potassium peuvent être plus ou moins récupérés et valorisés (dépend des intrants et des procédés).

Azote (N) Phosphore (P)

Potassium (K)

## FACTEUR D'ÉMISSION GES




## POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Indicateur qualitatif pour juger de l'impact de la filière sur la qualité de l'air (rejets dans l'air : particules, NOx, $NH_3$...) sur le site de production et lors de son usage final.

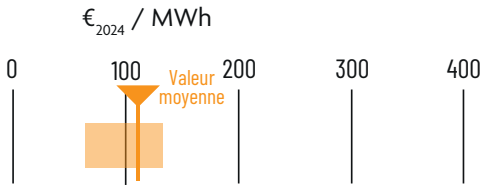



**→ Un des grands intérêts de la gazéification avec production de méthane est la réduction voire la suppression des rejets atmosphériques selon les procédés et les intrants. Sur l'usage final, la combustion du méthane est plus propre que celle de la biomasse. Dans le cas du bioGNV, les émissions de particules et NOx des gaz d'échappement des moteurs à combustion sont réduites par rapport au diesel.**

# Critères économiques et intégration territoriale

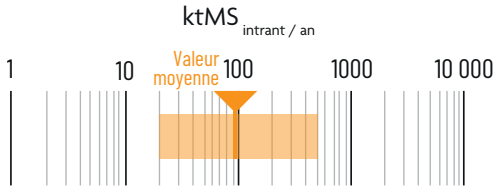
## COÛT DE PRODUCTION

Les coûts pour les filières matures (TRL = 9, en exploitation) sont issus de données mesurées, pour les autres ce sont des données estimées à partir des expérimentations.




## TAILLE DES UNITÉS

Taille moyenne des unités : 6 kt MS d'intrants biomasse par an.




## USAGE DU VECTEUR ÉNERGÉTIQUE

Principalement extraterritorial.
Le carburant produit sera à visée de l'aviation, mode de transport accessible à une faible part de la population.

# Pyrogazéification (méthanolation)

## Description du procédé et état de développement

La pyrogazéification est un procédé thermochimique, permettant de produire des combustibles solides, liquides ou gazeux à partir de matière organique. Selon les conditions de pression et de température, voire des agents de réaction, le procédé peut être orienté vers la production de gaz de synthèse appelé « syngas » et composé principalement de méthane, d'hydrogène, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone mais aussi de goudrons, et autres impuretés.

Il existe une multitude de types de gazogènes dont les caractéristiques vont être choisies selon la taille de l'unité, la typologie de la ressource (granulométrie, composition chimique…), la qualité ou la composition du syngas souhaité. Pour produire du méthanol, le syngas doit ensuite passer une série de 4 étapes :

- Traitement du gaz : extraction des goudrons, composés soufrés, particules…
- Ajustement de la composition avec l'ajout d'eau pour convertir une partie du monoxyde de carbone en hydrogène, le $CO_2$ excédentaire est aussi retiré ;
- Synthèse du méthanol ($CH_3OH$) ;
- Séparation gaz/liquide et distillation pour récupérer uniquement le méthanol.

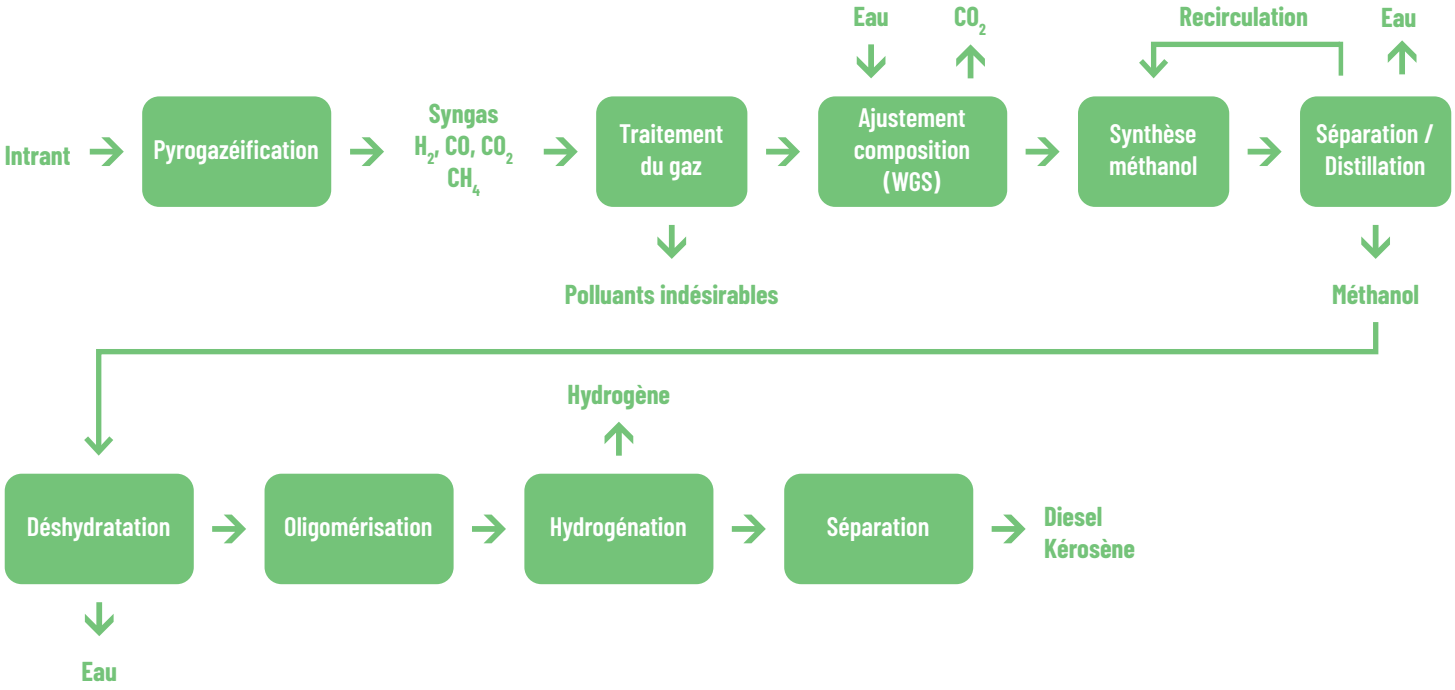
Le méthanol renouvelable fait partie des alternatives possibles pour les carburants maritimes, en mélange ou pur, mais nécessite une modification des moteurs et implique une réduction importante de la capacité de stockage.

Le méthanol est aussi un intermédiaire qui peut permettre de produire des hydrocarbures liquides en particulier pour la production de kérosène, et présente l'intérêt d'avoir une sélectivité (part du kérosène dans le mix d'hydrocarbures obtenu) plus importante que par les procédés Fischer-Tropsh. Ce type de procédé, pouvant être intégré ou délocalisé, est couramment appelé MTJ (Methanol-to-Jet fuel) et est constitué classiquement de 4 étapes : déshydratation, oligomérisation, hydrogénation, séparation.



©AdobeStock

## Les étapes du procédé




| **Potentiel de ressources accessibles en 2050**<br>(sans tenir compte des autres voies de valorisation énergétique possibles) | MtMS |
|---|---|
| Résidus culture | 5 |
| Bois énergie issu de forêt | 11 |
| Bois énergie hors forêt | 8 |
| Connexes scieries | 6 |
| Bois déchet | 3 |
| CSR | 5 |
| **TOTAL** | **38** |

### ÉTAT DU DÉVELOPPEMENT

À ce jour, seul le démonstrateur commercial, Enerkem (Canada), produisant du méthanol par gazéification à partir de déchet/coproduit organique a fonctionné à partir de déchets municipaux, entre 2014-2024 (15 000h). Plusieurs unités commerciales sont à l'étude en Espagne et dans les pays nordiques.

En ce qui concerne la deuxième brique technologique (methanol-to-jetfuel), plusieurs acteurs (Exxon, Topsoe, MetaFuel/PSI) ont développé des technologies, mais aucune unité industrielle n'a encore fonctionné. Quelques projets industriels sont à l'étude (pays nordiques, USA). La technologie est moins mature que pour d'autres alcools tels que l'éthanol ou le butanol.

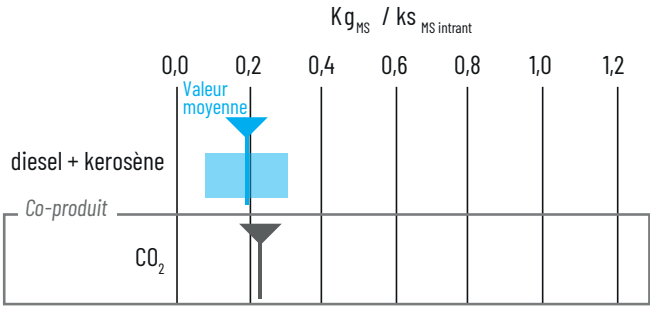
# Indicateurs pour caractériser les filières

## Critères techniques

### RENDEMENT MASSIQUE ET CO-PRODUITS

Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 0,17 tonne diesel + kérosène et la co-production de 0,24 tonne de $CO_2$.

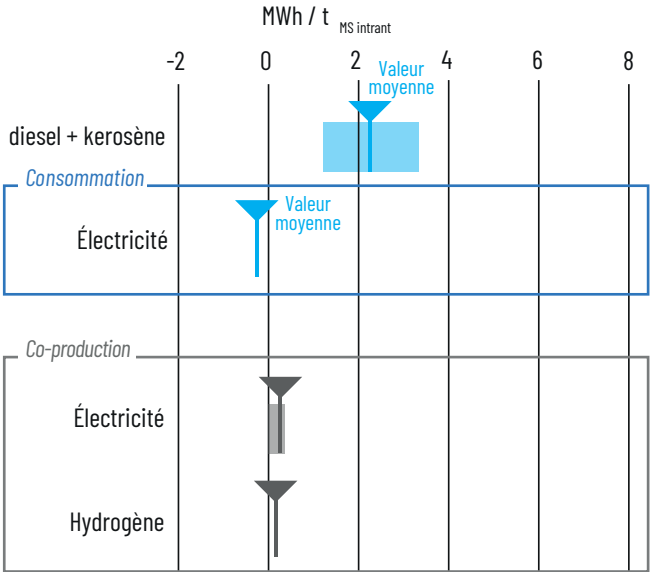
**→ Peu de littérature est disponible. On constate néanmoins des écarts importants de rendement massique.**




### BILAN ÉNERGÉTIQUE

Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 2,3 MWh de diesel+kerozène. Pour cela, le procédé consomme 0,3 MWh d'électricité, et 1,1 MWh de chaleur.

**→ Une partie importante de l'énergie non valorisée sous forme de méthane peut être récupérée sous forme de chaleur haute température. Selon les tailles et les procédés, il peut être intéressant de l'utiliser pour produire de l'électricité. Cette chaleur permet si besoin le séchage du combustible.**



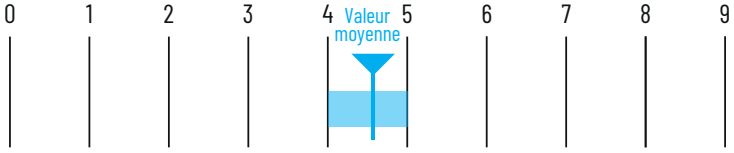

### TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUE

Il correspond à l'énergie produite par le vecteur principal divisée par la consommation de produits énergétiques (électricité, chaleur) pour la production de ce vecteur.




### MATURITÉ TECHNOLOGIQUE (ÉCHELLE TRL)

**→ La filière biomass-to-methanol présente un TRL 6-8, mais la filière methanol-to-jetfuel a un TRL de seulement 4-5.**



# Critères environnementaux

### RETOUR AU SOL DU CARBONE

Matière organique (carbone)

### RETOUR AU SOL DES NUTRIMENTS

L'azote est volatilisé. Le phosphore et le potassium peuvent être plus ou moins récupérés et valorisés (dépend des intrants et des procédés).

Azote (N) Phosphore (P)

Potassium (K)

### FACTEUR D'ÉMISSION GES

Pas d'information.

### POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Indicateur qualitatif pour juger de l'impact de la filière sur la qualité de l'air (rejets dans l'air : particules, NOx, $NH_3$...) sur le site de production et lors de son usage final.




**→ Un des grands intérêts de la pyrogazéification avec production de carburant figure dans la réduction, voire la suppression, des rejets atmosphériques (selon les procédés et les intrants). La brique aval (methanol-to-jetfuel) comporte des rejets de gaz oxydés.**
**Sur l'usage final, la combustion du carburant est plus propre que le carburant fossile sur tous les indicateurs (particules, SOx, CO...), hormis les NOx.**

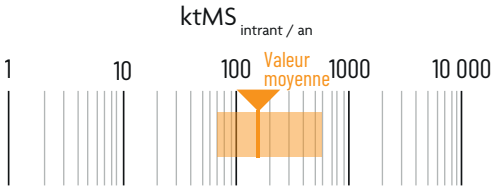
# Critères économiques et intégration territoriale

### COÛT DE PRODUCTION

Pas d'information.

### TAILLE DES UNITÉS

Taille moyenne des unités : 150 kt MS d'intrants biomasse par an.




### USAGE DU VECTEUR ÉNERGÉTIQUE

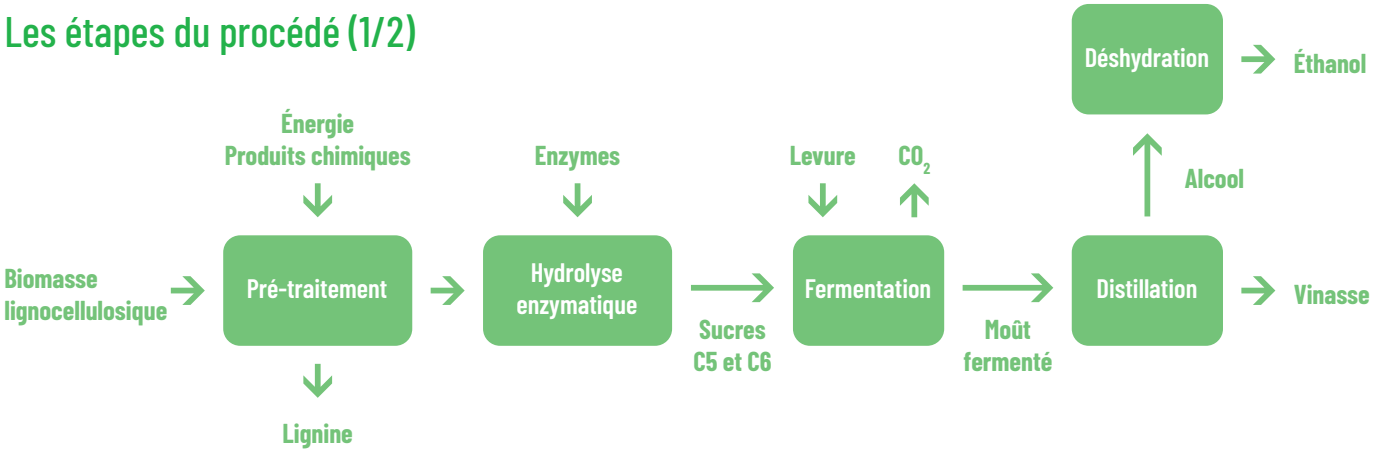
L'usage est principalement extraterritorial.
Le carburant produit sera à visée de l'aviation, mode de transport accessible à une faible part de la population.

# Fermentation

## Description du procédé et état de développement

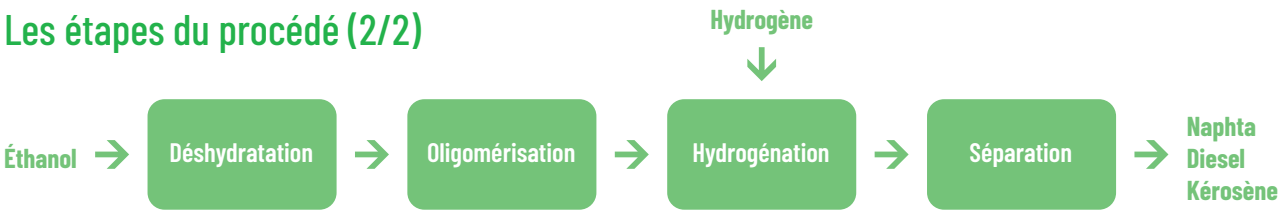
La production d'éthanol peut être réalisée à partir de résidus lignocellulosiques, c'est-à-dire contenant une part non négligeable de lignine, composé essentiel de la biomasse situé dans les structures intercellulaires, et qui fournit la cohésion aux matériaux ligneux.

### Les étapes du procédé (1/2)




Pour pouvoir accéder aux parties valorisables de ces biomasses (sucres), une étape de Pré-traitement est indispensable. Cette 1ère étape, consommatrice d'énergie (thermique et/ou mécanique) et de produits chimiques (soude, acides). La biomasse délignifiée passe par 2 étapes biologiques successives, l'hydrolyse enzymatique puis la fermentation à base de levures. Enfin, le moût contenant l'alcool subit une étape de distillation, qui permet de séparer l'éthanol, ce dernier est enfin déshydraté pour être valorisé comme carburant liquide. Enfin, pour pouvoir être facilement utilisé comme carburant aérien ou maritime, il est nécessaire de convertir l'alcool en kérosène ou diesel de synthèse. Ce type de procédé, pouvant être intégré ou délocalisé, est couramment appelé ATJ (Alcool-to-Jet fuel) et est constitué classiquement de 4 étapes : déshydratation, oligomérisation, hydrogénation, séparation. 3 principaux hydrocarbures (kérosène, diesel, naphta) sont produits.

### Les étapes du procédé (2/2)




En dehors de l'éthanol, plusieurs sous-produits sont issus de la filière : la lignine qui est principalement valorisée en énergie (combustion sur site), les vinasses, chargées en carbone mais également en éléments chimiques (sels, acide organiques), issues des pré-traitements, qui doivent être post-traitées avant valorisation (retour au sol, application industrielle ) et le $CO_2$ qui peut être valorisé pour des usages industriels ou alimentaires.

| **Potentiel de ressources accessibles en 2050**<br>(sans tenir compte des autres voies de valorisation énergétique possibles) | MtMS |
|---|---|
| Résidus culture | 5 |
| Bois énergie issu de forêt | 11 |
| Bois énergie hors forêt | 8 |
| Connexes scieries | 6 |
| Bois déchet | 3 |
| **TOTAL** | **33** |

## ÉTAT DU DÉVELOPPEMENT

Les années 2000 ont vu le développement de travaux d'ampleur (programmes R&D et pilotes) en France et en Europe sur la production d'Éthanol 2G. Toutefois, à date, aucune usine n'a fonctionné sur une durée assez longue en Europe sur cette technologie :

### L'usine Sunliquid®

(procédé Clariant) - Roumanie (Podari)

**250 000 t/an**

**de paille traités.**

Cette unité a été arrêté en 2023 malgré une mise en service récente (mi-2022) pour des raisons de non atteinte des performances économiques attendues.

### Projet d'usine INA

Croatie (Sisak) - procédé FUTUROL$_{TM}$ Axens

**250 000 t/an**

**de miscanthus.**

Ce projet est en cours de développement notamment sur la partie production de biomasse et la logistique.

### Usine INBICON

(Pré-traitement Bio Trac de Valmet) - Danemark

Cette unité est arrêtée depuis 2014, a redémarré en 2023 pour une production de bioéthanol à partir de paille, d'autres co-produits à haute valeur ajoutée sont également valorisés (fibre alimentaire, lignine).

Pour cette filière, l'enjeu est de pouvoir réduire la taille des usines, en lien avec les possibilités d'approvisionnement en biomasse sur un territoire donné, tout en conservant un équilibre économique en valorisant des co-produits (molécule plate-forme, biogaz, lignine). Le retour au sol d'une partie des sous-produits est à rechercher pour ne pas mettre en péril la fertilité des sols.

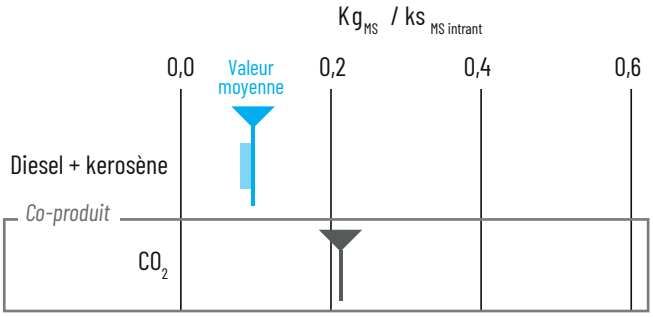
# Indicateurs pour caractériser les filières

## Critères techniques

### RENDEMENT MASSIQUE ET CO-PRODUITS

Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 0,11 tonne diesel + kérosène et la co-production de 0,2 tonne de $CO_2$.

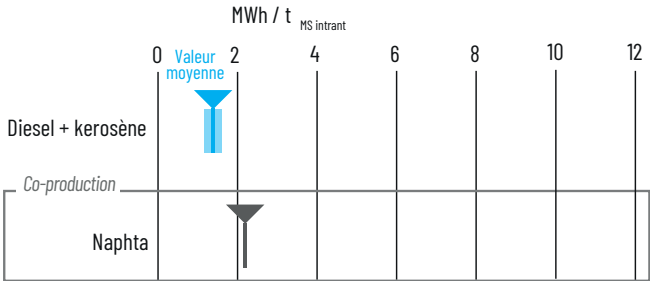
→ **Faible rendement massique vers le vecteur énergétique, mais une co-production intéressante de $CO_2$ assez pur lors de la fermentation, ainsi que d'autres co-produits (fibre alimentaire, lignine, biogaz).**




### BILAN ÉNERGÉTIQUE

Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 1,5 MWh de diesel+kérosène. Pour cela, le procédé consomme 0,01 MWh d'électricité et 0,1 MWh d'hydrogène. Le procédé co-produit du naphta (0,1 MWh).

→ **Les consommations d'énergie thermique sont importantes (pré-traitement, distillation, concentration) et généralement assurées par la combustion des résidus ligneux non converti en éthanol. Les consommations d'électricité dépendent des procédés de pré-traitement.**




### TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUE

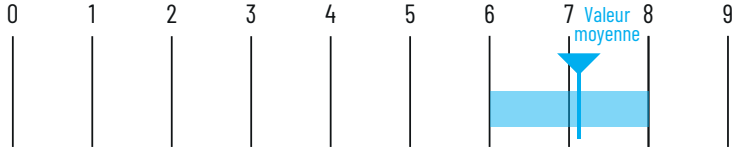
Il correspond à l'énergie produite par le vecteur principal divisée par la consommation de produits énergétiques (électricité, chaleur) pour la production de ce vecteur.

→ **Très dépendant des post-traitements et du type de valorisation des co-produits (biogaz ou non, valorisation de la lignine ou non). Le TRE peut être élevé dans certains cas, du fait de l'autoconsommation thermique du process.**




### MATURITÉ TECHNOLOGIQUE (ÉCHELLE TRL)

→ **Les technologies sont matures. De nombreux projets n'ont pas donné suite ou se sont arrêtés ces dernières années, mais on peut s'attendre à de nouveaux projets orientés vers la valorisation de tous les co-produits (lignine, fibres, $CO_2$, biogaz...) pour atteindre un équilibre économique.**



# Critères environnementaux

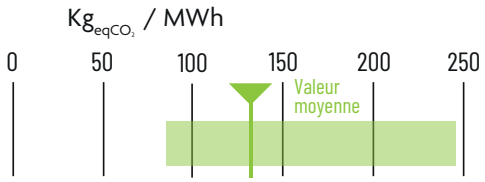
## RETOUR AU SOL DES NUTRIMENTS

Une partie des nutriments est retournée au sol via les vinasses qui nécessitent un post-traitement (concentration, élimination des sels). La proportion va dépendre des procédés et du degré d'autoconsommation d'énergie (combustion matière).

Azote (N) Phosphore (P) Potassium (K)

## FACTEUR D'ÉMISSION GES

Le facteur d'émission de GES est assez élevé.
Une large plage de valeur est à noter.




## RETOUR AU SOL DU CARBONE

Matière organique (carbone)

## POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Indicateur qualitatif pour juger de l'impact de la filière sur la qualité de l'air (rejets dans l'air : particules, NOx, $NH_3$...) sur le site de production et lors de son usage final.

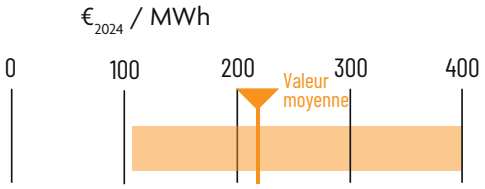
**→ En général, les besoins importants de chaleur du procédé nécessitent de la combustion de co-produits sur site (lignine, biogaz).**




# Critères économiques et intégration territoriale

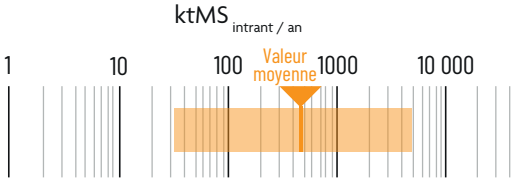
## COÛT DE PRODUCTION

Les coûts pour les filières matures (TRL = 9, en exploitation) sont issus de données mesurées, pour les autres ce sont des données estimées à partir des expérimentations.




## TAILLE DES UNITÉS

Taille moyenne des unités : 450 kt MS d'intrants biomasse par an.




## USAGE DU VECTEUR ÉNERGÉTIQUE

L'usage est principalement extraterritorial.
Le carburant produit sera à visée soit de l'aviation, mode de transport accessible à une faible part de la population, ou le secteur du transport maritime qui est déconnecté des usages locaux de l'énergie.

# Méthanisation (méthanolation)

## Description du procédé et état de développement

La méthanisation, ou digestion anaérobie, est un processus biologique de dégradation de la matière organique en conditions anaérobies (absence d'oxygène) par des groupes de microorganismes (bactéries et archées). Une partie de la matière organique entrante est transformée en biogaz (gaz riche en méthane et dioxyde de carbone $CO_2$), la partie non dégradée reste dans le digestat. La quantité de biogaz produite est dépendante du type d'intrants. Le système nécessite un maintien en température, à 37°C, voie mésophile la plus courante, voire à 55°C, pour la voie thermophile. La digestion anaérobie est sensible à différents paramètres (antibiotiques, teneurs en soufre, en ammoniac $NH_3$, température, pH) qui peuvent modifier la stabilité du processus mais également la vitesse de production de biogaz.

Pour des intrants chargés en matière sèche et en matières en suspension, les unités de méthanisation en voie liquide c'est-à-dire fonctionnant avec des teneurs en matière sèche <20 %MS dans des réacteurs infiniment mélangés sont les plus courantes. D'autres systèmes, pour des intrants plus secs existent mais restent néanmoins moins utilisés : voie piston avec une alimentation en continue de substrats de l'ordre de 30 %MS et en voie sèche discontinue (ou système « garage »).

Le digestat est stocké sur site avant d'être épandu sur les sols agricoles. Selon le type d'intrants en méthanisation, le digestat sera valorisé pour ses effets amendant (contient de la matière organique stable) et/ou fertilisant (riche en $NH_4$).

Outre les valorisations actuelles en biométhane injecté dans les réseaux ou par combustion en cogénération, la production de biométhanol pourrait représenter une nouvelle possibilité. Dans ce cas le méthane est réformé pour être décomposé en $H_2$ et CO, brique de base pour le réacteur de méthanolation. Plus de la moitié du $CO_2$ du biogaz rentre également dans la composition du méthanol.

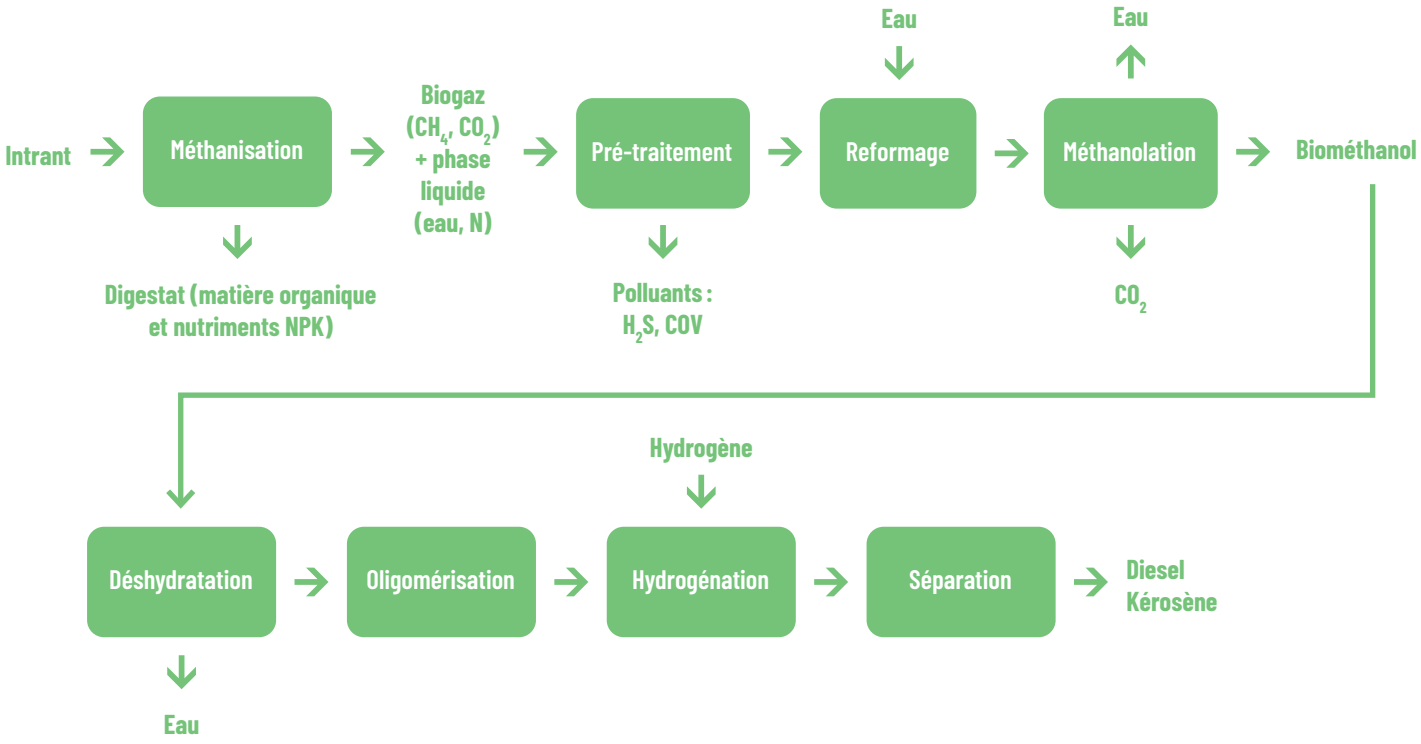


©AdobeStock

Le méthanol renouvelable fait partie des alternatives possible pour les carburants maritimes, en mélange ou pur mais avec une modification des moteurs et une réduction importante de la capacité de stockage.

Le méthanol est aussi un intermédiaire qui peut permettre de produire des hydrocarbures liquides en particulier pour la production de kérosène, avec l'intérêt d'avoir une sélectivité (part du kérosène dans le mix d'hydrocarbure obtenu) plus importante que par les procédés Fischer- Tropsh. Ce type de procédé, pouvant être intégré ou délocalisé, est couramment appelé MTJ (Methanol-to-Jet fuel) et est constitué classiquement de 4 étapes : Deshydratation, oligomérisation, hydrogénation, séparation.

## Les étapes du procédé




| **Potentiel de ressources accessibles en 2050**<br>(sans tenir compte des autres voies de valorisation énergétique possibles) | MtMS |
|---|---|
| CIVE | 20 |
| Résidus culture | 20 |
| Effluents élevage | 7 |
| Herbes | 11 |
| Biodéchet (ménage, GMS, Resto) | 1 |
| Déchets IAA | 1 |
| Boues de STEP | 1 |
| Déchets verts non ligneux + Tontes bord de route | 2 |
| **TOTAL** | **63** |

### ÉTAT DU DÉVELOPPEMENT

En France, fin 2023, environ 1700 unités de méthanisation sont en fonctionnement, dont 652 qui injectent le biométhane sur le réseau (12 TWh de capacité de production annuelle), 1050 unités qui produisent de l'électricité par cogénération (600 MW). Cependant, aucune unité en France et dans le monde, ne produit du méthanol.

Topsoe et l'université de Aarhus ont démarré un pilote de 10kg/h de méthanol en 2022.

En France, Energo met actuellement en service un pilote de méthanol à partir de biogaz synthétique d'une capacité de 20 Nm3/h (biogaz) dans son laboratoire.
Pour la deuxième brique, methanol-to-jetfuel, plusieurs acteurs (Exxon, Topsoe, MetaFuel/PSI) ont développé des technologies, mais aucune unité industrielle n'a fonctionné. Quelques projets industriels sont à l'étude (pays nordiques, USA). La technologie est moins mature que pour d'autres alcools, tels l'éthanol ou le butanol.

# Indicateurs pour caractériser les filières

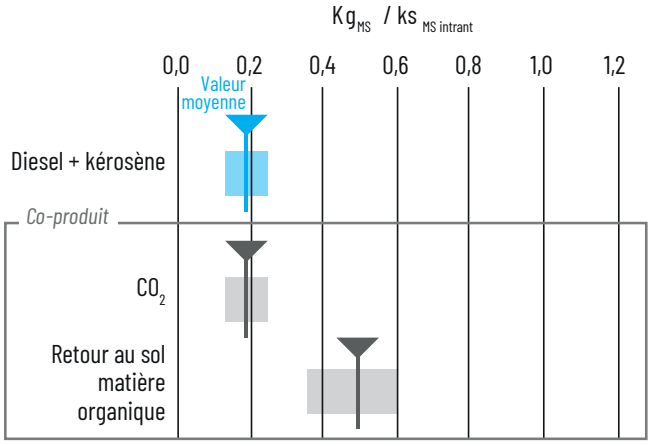
Note : Cette filière est peu documentée, il n'a pas été possible d'instruire tous les indicateurs, et ceux produits se font sur la base de peu d'études.

## Critères techniques

### RENDEMENT MASSIQUE ET CO-PRODUITS

Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 0,18 tonne de diesel + kerosène, de 0,17 tonne de $CO_2$ et de 0,5 tonne de matière organique qui retourne au sol.

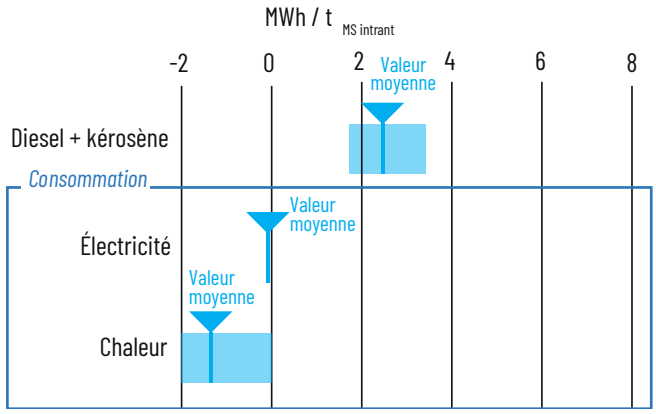
**→ Le rendement massique vers le vecteur énergétique (kérosène) est limité, mais la majorité de la matière organique se retrouve dans le digestat ce qui permet un retour au sol très important. Du $CO_2$ assez pur est également co-produit, dont une partie est utilisée pour la production de méthanol. Mais un reliquat reste, permettant avec peu de post traitement d'alimenter des usages traditionnels ou futurs (power-to-X). La variabilité des rendements s'explique par la diversité de intrants, mais aussi le choix d'utiliser ou non une partie du biogaz comme source de chaleur, en auto-consommation.**




### BILAN ÉNERGÉTIQUE

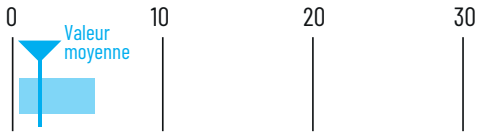
Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 2,3 MWh de diesel + kerozène. Pour cela, le procédé consomme 0,3 MWh d'électricité, et 1,1 MWh de chaleur.

**→ Les consommations d'énergie pour la transformation du biogaz en méthanol sont nettement plus élevées, d'où un TRE plus faible que pour la production de biométhane.**

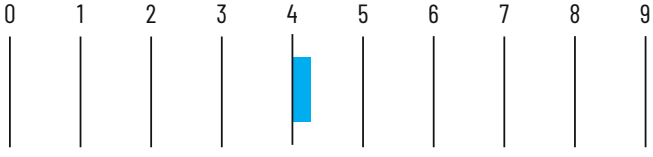



### TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUE

Il correspond à l'énergie produite par le vecteur principal divisée par la consommation de produits énergétiques (électricité, chaleur) pour la production de ce vecteur.




### MATURITÉ TECHNOLOGIQUE (ÉCHELLE TRL)



# Critères environnementaux

### RETOUR AU SOL DU CARBONE

Matière organique (carbone)

### RETOUR AU SOL DES NUTRIMENTS

L'intégralité des nutriments se retrouvent dans le digestat, et est donc retournée au sol.

Azote (N) Phosphore (P)

Potassium (K)

### FACTEUR D'ÉMISSION GES

Pas d'information.

### POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Indicateur qualitatif pour juger de l'impact de la filière sur la qualité de l'air (rejets dans l'air : particules, NOx, $NH_3$...) sur le site de production et lors de son usage final.




**→ Les émissions de $NH_3$ du digestat par volatilisation au stockage et à l'épandage du digestat sont équivalentes à celles d'un lisier porcin.**
**Ces émissions sont évitables et a minima maîtrisables par l'application des bonnes pratiques. La brique aval methanol-to-jet comporte des rejets de gaz oxydés. Sur l'usage final, la combustion du carburant est plus propre que le carburant fossile sur tous les indicateurs (particules, SOx, CO...), hormis les NOx.**

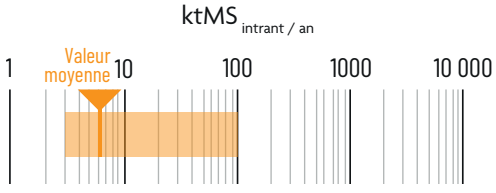
# Critères économiques et intégration territoriale

### COÛT DE PRODUCTION

Pas d'information.

### TAILLE DES UNITÉS

Taille moyenne des unités : 6 kt MS d'intrants biomasse par an.




### USAGE DU VECTEUR ÉNERGÉTIQUE

L'usage est principalement extraterritorial.
Le carburant produit sera à visée de l'aviation, mode de transport accessible à une faible part de la population.

# Méthanisation (épuration)

## Description du procédé et état de développement

La méthanisation, ou digestion anaérobie, est un processus biologique de dégradation de la matière organique en conditions anaérobies (absence d'oxygène) par des groupes de microorganismes (bactéries et archées). Une partie de la matière organique entrante est transformée en biogaz (gaz riche en méthane et dioxyde de carbone $CO_2$), la partie non dégradée reste dans le digestat. La quantité de biogaz produite est dépendante du type d'intrants. Le système nécessite un maintien en température, à 37°C, voie mésophile la plus courante, voire à 55°C, pour la voie thermophile. La digestion anaérobie est sensible à différents paramètres (antibiotiques, teneurs en soufre, en ammoniac $NH_3$, température, pH) qui peuvent modifier la stabilité du processus mais également la vitesse de production de biogaz.

Pour des intrants chargés en matière sèche et en matières en suspension, les unités de méthanisation en voie liquide c'est-à-dire fonctionnant avec des teneurs en matière sèche <20 %MS dans des réacteurs infiniment mélangés sont les plus courantes. D'autres systèmes, pour des intrants plus secs, existent mais restent néanmoins moins utilisés : voie piston avec une alimentation en continue de substrats de l'ordre de 30 %MS et en voie sèche discontinue (ou système « garage »).

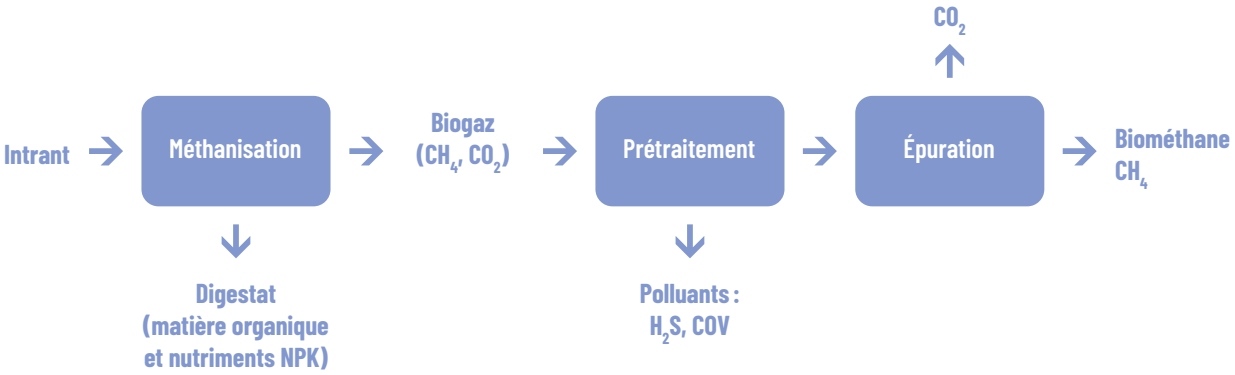
Le digestat est stocké sur site avant d'être épandu sur les sols agricoles. Selon le type d'intrants en méthanisation, le digestat sera valorisé pour ses effets amendant (il contient de la matière organique stable) et/ou fertilisant (riche en $NH_4$). Le biogaz produit peut être valorisé par combustion dans des moteurs de cogénération permettant la production d'électricité et de chaleur. Cette dernière, eau chaude à 90°C et vapeur récupérable
sur les fumées d'échappement, est utilisée pour le process et peut être valorisée hors site, à proximité.

Le biogaz peut également subir une étape d'épuration, c'est-à-dire la séparation du méthane et du $CO_2$. Le biométhane ainsi obtenu est alors injecté sur le réseau de gaz naturel au niveau du poste d'injection, le $CO_2$ peut être post-traité et liquéfié et valorisé pour des utilisation industrielles ou alimentaires, mais aussi utilisé comme matière première pour le power-to-X.



© Solagro, Ivan Desneulin - Methagest (64)

## Les étapes du procédé




| **Potentiel de ressources accessibles en 2050**<br>(sans tenir compte des autres voies de valorisation énergétique possibles) | **MtMS** |
|---|---|
| CIVE | 20 |
| Résidus culture | 20 |
| Effluents élevage | 7 |
| Herbes | 11 |
| Biodéchet (ménage, GMS, Resto) | 1 |
| Déchets IAA | 1 |
| Boues de STEP | 1 |
| Déchets verts non ligneux + Tontes bords de route | 2 |
| **TOTAL** | **63** |

### ÉTAT DU DÉVELOPPEMENT

Fin 2023, environ 1700 unités de méthanisation sont en fonctionnement en France, dont 652 injectant du biométhane sur le réseau (12 TWh de capacité de production annuelle) et 1050 unités produisant de l'électricité par cogénération (600 MW).

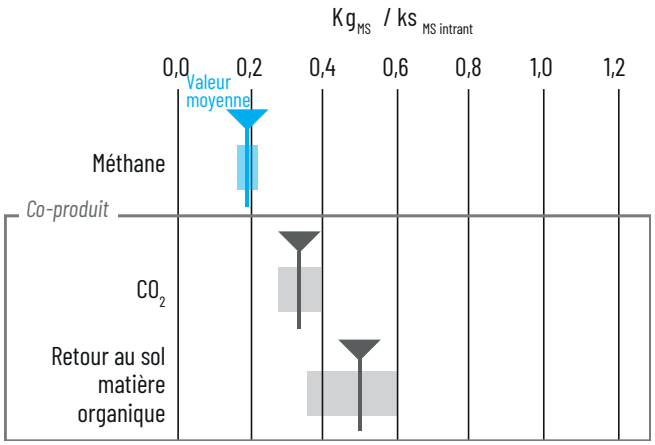
# Indicateurs pour caractériser les filières

## Critères techniques

### RENDEMENT MASSIQUE ET CO-PRODUITS

Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 0,16 tonne de méthane, de 0,32 tonne de $CO_2$ et de 0,5 tonne de matière organique qui retourne au sol.

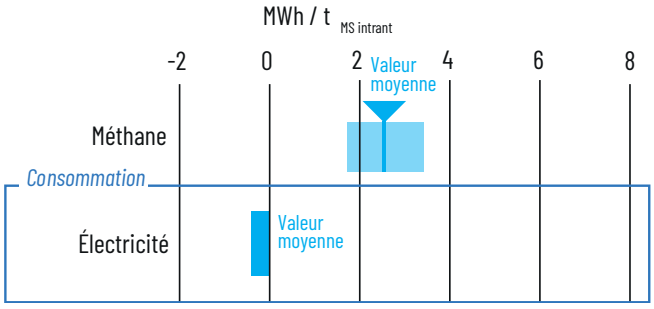
**→ Le rendement massique vers le vecteur énergétique (méthane) est limité, mais la majorité de la matière organique se retrouve dans le digestat ce qui permet un retour au sol très important. La méthanisation co-produit également du $CO_2$ assez pur permettant avec peu de post traitement d'alimenter des usages traditionnels ou futurs (power-to-X). La variabilité des rendement s'explique par la diversité de intrants.**




### BILAN ÉNERGÉTIQUE

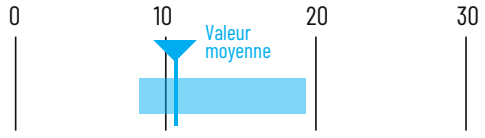
Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 2,5 MWh de méthane. Pour cela, le procédé consomme 0,23 MWh d'électricité.

**→ Les consommations auxiliaires sont essentiellement de l'électricité et un peu de carburant pour le chargement de la matière. Le taux de retour énergétique (TRE) est en moyenne supérieur à 10.**

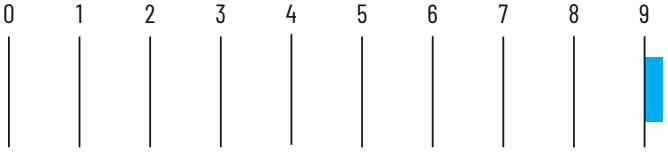



### TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUE

Il correspond à l'énergie produite par le vecteur principal divisée par la consommation de produits énergétiques (électricité, chaleur) pour la production de ce vecteur.




### MATURITÉ TECHNOLOGIQUE (ÉCHELLE TRL)



# Critères environnementaux

## RETOUR AU SOL DU CARBONE

Matière organique (carbone)

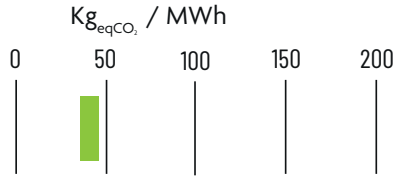
## RETOUR AU SOL DES NUTRIMENTS

L'intégralité des nutriments se retrouvent dans le digestat, et est donc retournée au sol.

Azote (N) Phosphore (P) Potassium (K)

## FACTEUR D'ÉMISSION GES

Au-delà des émissions liées aux consommation d'énergie, le facteur d'émissions est impacté par de faibles émissions de méthane. Néanmoins, la méthanisation contribue indirectement à l'atténuation des émissions, en réduisant les émissions liées au stockage des effluents d'élevage d'une part et en augmentant le stockage carbone des cultures intermédiaires (augmentation du rendement par utilisation du digestat).




## POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Indicateur qualitatif pour juger de l'impact de la filière sur la qualité de l'air (rejets dans l'air : particules, NOx, $NH_3$...) sur le site de production et lors de son usage final.

**→ Les émissions de $NH_3$ du digestat par volatilisation au stockage et à l'épandage du digestat sont équivalentes à celles d'un lisier porcin. Ces émissions sont évitables et a minima maîtrisables par l'application des bonnes pratiques. Dans le cas du bioGNV, les émissions de particules et NOx des gaz d'échappement des moteurs à combustion sont réduites par rapport au diesel.**

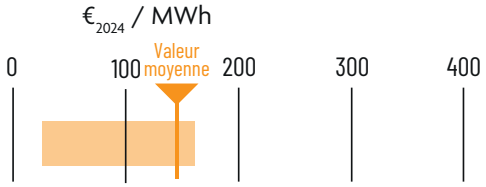



# Critères économiques et intégration territoriale

## COÛT DE PRODUCTION

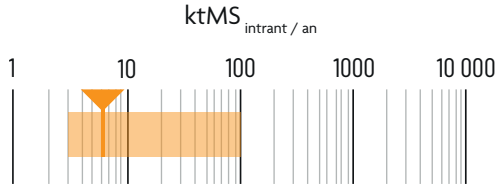
Les coûts pour les filières matures (TRL = 9, en exploitation) sont issus de données mesurées, pour les autres ce sont des données estimées à partir des expérimentations.

**→ Le coût de production dépend de la taille et du type d'intrants.**




## TAILLE DES UNITÉS

Taille moyenne des unités : 6 kt MS d'intrants biomasse par an.




## USAGE DU VECTEUR ÉNERGÉTIQUE

Le méthane produit est injecté dans le réseau gazier auquel 1/3 des communes sont raccordées, couvrant plus des 3/4 de la population française métropolitaine. Il bénéficie à l'ensemble des consommateurs connectés au réseau. Le développement actuel du bioGNV élargit son usage en particulier au transport de marchandise (camion) et aux transports en commun (bus, car).

# Combustion

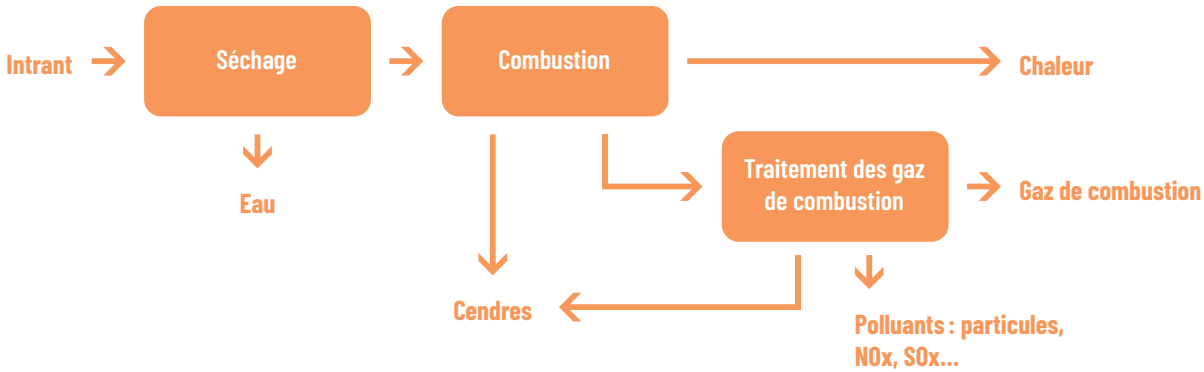
## Description du procédé et état de développement

La combustion permet de convertir directement la biomasse sèche en chaleur. Il s'agit d'une oxydation rapide qui convertit le carbone C en dioxyde de carbone ($CO_2$) et l'hydrogène en vapeur d'eau ($H_2O$). La biomasse doit être suffisamment sèche pour permettre à la combustion de s'autoentretenir et de se réaliser dans de bonnes conditions. Le séchage de l'intrant doit donc être prévu de manière naturelle via un entreposage suffisamment long, ou bien directement au sein de la l'équipement via un préchauffage de l'intrant avant d'arriver dans la zone de combustion. Selon la taille de l'installation et le type de combustible, les unités de combustion de biomasse sont équipées de dispositif de traitement des fumées plus ou moins performants et sophistiqués : cyclone, filtres, de-NOx... Les installations de combustion de biomasse sont d'une grande diversité d'usage et de taille, depuis le poêle à bois de quelques kW de puissance pour le chauffage d'habitation individuelles, jusqu'à des unités de plus de 50 MW en cogénération vapeur + électricité pour alimenter des procédés industriels, en passant par des chaufferies alimentant des réseaux d'eau chaude à 60-100°C pour le chauffage direct ou indirect (réseau de chaleur) de bâtiments.



©AdobeStock

### Les étapes du procédé



| **Potentiel de ressources accessibles en 2050**<br>(sans tenir compte des autres voies de valorisation énergétique possibles) | MtMS |
|---|---|
| Résidus culture | 5 |
| Bois énergie issu de forêt | 11 |
| Bois énergie hors forêt | 8 |
| Connexes scieries | 6 |
| Liqueurs noires | 5 |
| Bois déchet | 3 |
| CSR | 5 |
| **TOTAL** | **43** |

## ÉTAT DU DÉVELOPPEMENT

C'est une filière mature. En 2022, l'IGN recensait plus de 1500 chaufferies en fonctionnement en France métropolitaine.
Par ailleurs, en 2017, l'ADEME identifie que près de 7 millions de ménages ont recours à un équipement de chauffage au bois pour chauffer leur logement. Ce parc est en légère baisse ces dernières années, mais également en plein renouvellement avec le remplacement d'équipements anciens par des équipements plus performants.



© AdobeStock

# Indicateurs pour caractériser les filières

## Critères techniques

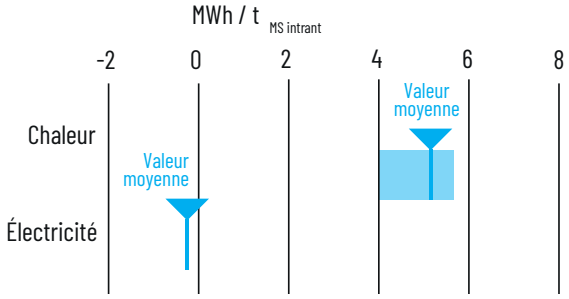
### RENDEMENT MASSIQUE ET CO-PRODUITS

**→ Cette filière convertit directement la biomasse en chaleur, sans vecteur intermédiaire : il n'y pas pas de rendement massique.**

### BILAN ÉNERGÉTIQUE

Pour 1 tonne de matière sèche d'intrant, le procédé permet la production de 4,9 MWh de chaleur. Pour cela, le procédé consomme 0,1 MWh d'électricité.

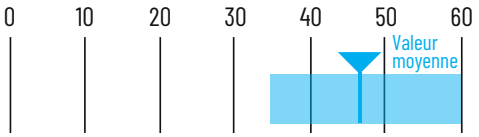
**→ Le cas modélisé est une chaufferie de réseau de chaleur. Le rendement est élevé mais dépend du niveau de température du réseau de chaleur, plus il est faible plus il sera possible de récupérer l'énergie contenue dans les fumées de combustion, et donc d'augmenter le rendement. Les modélisations sont faites pour des niveaux de température de 90-70°C et 70-35°C.**



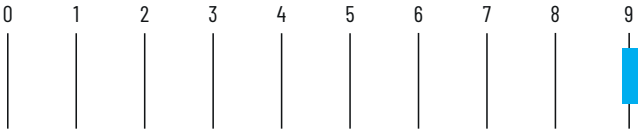

### TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUE

Il correspond à l'énergie produite par le vecteur principal divisée par la consommation de produits énergétiques (électricité) pour la production de ce vecteur.

**→ TRE très élevé lié au bon rendement et aux faibles consommations des auxiliaires.**




### MATURITÉ TECHNOLOGIQUE (ÉCHELLE TRL)



# Critères environnementaux

### RETOUR AU SOL DU CARBONE

Pas de retour au sol de la matière organique.

Matière organique (carbone)

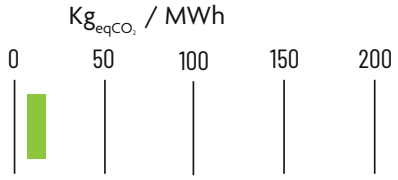
### RETOUR AU SOL DES NUTRIMENTS

L'azote est volatilisé, le phosphore et le potassium peuvent être récupérés dans les cendres et valorisés sous certaines conditions.

Azote (N) Phosphore (P)

Potassium (K)

### FACTEUR D'ÉMISSION GES




### POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Indicateur qualitatif pour juger de l'impact de la filière sur la qualité de l'air (rejets dans l'air : particules, NOx, $NH_3$...) sur le site de production et lors de son usage final.




→ **La combustion de biomasse génère de fortes émissions en raison de l'hétérogénéité du combustible (composition chimique, physique...).**

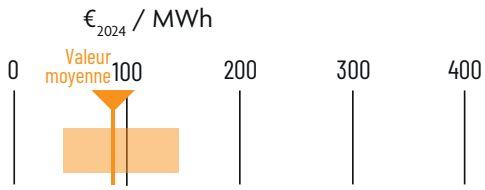
**Ces émissions peuvent être limitées selon la qualité du combustible ou son prétraitement (ex : granulé bois), le contrôle des conditions de combustion mais aussi par des dispositifs de traitement des fumées mis en œuvre de manière plus importante sur les unités de grandes tailles.**

# Critères économiques et intégration territoriale

### COÛT DE PRODUCTION

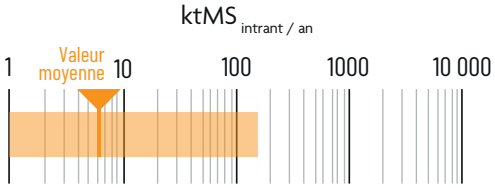
Les coûts pour les filières matures (TRL = 9, en exploitation) sont issus de données mesurées, pour les autres ce sont des données estimées à partir des expérimentations.

→ **Les coûts représentés sont ceux de réseaux de chaleur bois.**




### TAILLE DES UNITÉS

Taille moyenne des unités : 7 kt MS d'intrants biomasse par an.




### USAGE DU VECTEUR ÉNERGÉTIQUE

La valorisation de la chaleur issue de la combustion se fait généralement à même le site (logement, usine), voire à quelques kilomètres (réseau de chaleur).