



France gaz
renouvelables



GAZÉIFICATION
HYDROTHERMALE
VALORISER LES DÉCHETS DE BIOMASSES HUMIDES



SFEC – GT Forêt-biomasse-usage des terres – Contribution

Janvier 2022

GRTgaz, GRDF, France Gaz Renouvelable, le Groupe de Travail sur la Gazéification Hydrothermale et les clubs Biogaz, Pyrogazéification, Power-to-gas de l'ATEE ont procédé à une analyse approfondie des **potentiels français de production de gaz renouvelables et plus particulièrement de méthane renouvelable à l'horizon 2050**, afin d'identifier la capacité à couvrir les besoins sur la base, dans un premier temps, d'une approche purement nationale.

Cette analyse s'est attachée aux différents potentiels de biomasse –principalement des déchets et résidus de l'agriculture, des industries et des ménages –mobilisables pour la production d'énergie, ainsi qu'au potentiel de méthanation, avec **un focus particulier pour les ressources qui ne sont ni agricoles, ni forestières**, tel que demandé par les pouvoirs publics lors du Groupe de Travail n°1 qui s'est tenu le 15 décembre dernier.

Synthèse

L'analyse approfondie des études existantes permet de conclure que la France dispose d'un **potentiel mobilisable de production de méthane renouvelable de 430 TWh PCS à l'horizon 2050**, s'appuyant sur la méthanisation, la pyrogazéification, la gazéification hydrothermale et la méthanation et qui respecte la priorité donnée aux usages alimentaires et matière. Ce potentiel est conséquent et contredit la perception selon laquelle le gaz renouvelable resterait une ressource rare.

En retenant des hypothèses réalistes de concrétisation de ces potentiels et en intégrant la concurrence de la valorisation énergétique de certaines biomasses utilisées, ces potentiels permettent de tabler sur une **trajectoire de production de méthane renouvelable et bas-carbone réaliste de 320 TWh PCS en 2050**.

Cette trajectoire permet donc de couvrir, à partir d'une production française, **la totalité des besoins français en méthane tels qu'ils ressortent des différents scénarios publiés récemment**. Cette trajectoire couvre en effet la composante méthane du scénario NegaWatt 2021 (219 TWh PCS), des scénarios S1 à S3 de l'étude Transitions 2050 ADEME (243 TWh PCS dans S3) et du scénario Territoires des Perspectives Gaz 2020 des opérateurs (235 TWh PCS).

Le potentiel mobilisable assure également **une couverture résiliente des besoins en méthane, y compris en cas d'aléas**. En effet, la couverture des besoins reste assurée :

- En cas d'aléa dans la concrétisation de l'une des technologies de production ;
- En cas d'aléa sur la trajectoire envisagée d'électrification des usages ;
- En cas d'aléa sur la trajectoire ambitieuse de rénovation du bâti.

Ce potentiel national pourrait être complété si nécessaire (cas du scénario S4 ADEME par exemple), ou **partiellement substitué si cela s'avère économiquement pertinent par des imports** de méthane renouvelable, par le recours au CCS et/ou par le développement de puits de carbone naturels, comme le propose d'ailleurs l'ADEME.

Gardons à l'esprit qu'au-delà de cette ressource méthane, une ressource hydrogène est amenée à se développer à un niveau très conséquent pour répondre au besoin futur en hydrogène renouvelable et bas-carbone. Selon les études, le besoin hydrogène 2050 varie dans une fourchette large de 100 à 260 TWh PCS¹, pouvant être couvert par une combinaison de production nationale d'hydrogène et d'imports.

L'analyse a été menée en tenant compte de la biomasse mobilisable pour l'énergie, dans le respect de la hiérarchie des usages.

Le tableau ci-dessous résume l'analyse menée.

	Potentiel mobilisable pour un usage énergétique 2050 (TWh PCS, énergie finale)	Trajectoire de production de méthane 2050 (TWh PCS, énergie finale)
Méthanisation	142	130
Dont issu de biomasse agricole	115	
Dont non issu de biomasse agricole	27	
Pyrogazéification	180	90
Dont issu de biomasse forestière (connexes inclus)	85	
Dont non issu de biomasse forestière	95	
Gazéification hydrothermale	58	50
Dont issu de déchets agricoles et de digestats de méthanisation	38	
Dont issu d'autres déchets	20	
(Méthanation – non issu de biomasse)	50	50
TOTAL	430	320 <i>Dont 260 renouvelable et 60 bas-carbone</i>

¹ 100 TWh PCS dans les scénarios S2 et S3 ADEME 2021, 170 TWh PCS dans le scénario Hydrogène+ RTE, et jusqu'à 260 TWh PCS dans l'étude France Hydrogène / McKinsey de 2018

Analyse des potentiels méthane

Méthanisation

La méthanisation est la voie biologique qui se base sur l'utilisation de micro-organismes pour décomposer de la matière organique et produire du biogaz principalement composé méthane et de dioxyde de carbone.

Concernant la biomasse fermentescible, cible de la méthanisation, l'étude la plus poussée reste à date l'étude ADEME de 2018², elle-même basée sur l'analyse AFTERRES de SOLAGRO qui évalue finement la biomasse disponible canton par canton, et dont les résultats ont été reconfirmés par l'étude ADEME 2021³.

Cette étude indique un **potentiel de production de biométhane par méthanisation de 142 TWh**, équivalent à 151 TWh_{PCS} en énergie primaire.

Ce potentiel provient pour 122 TWh_{PCS} d'énergie primaire de la méthanisation agricole :

- 51 TWh issus de CIVE, basés sur une hypothèse de 10,8 Mha de CIVE en 2050 produisant 41 Mt de matière sèche dont seuls 50% seraient récoltés pour être dirigés en méthanisation. Ce gisement est d'autant plus prudent qu'il est basé sur un potentiel méthanogène des CIVE de 218 Nm³ CH₄/t MS alors que la filière compte désormais 300 Nm³/t MS (source : Artaim), ce qui augmenterait le potentiel de 38% (+19 TWh).
- 31 TWh issus de résidus de culture, basés sur une production totale de 62 Mt de matière sèche en 2050 dont 20% seulement seraient dirigés vers la méthanisation. Ici aussi, ce taux de mobilisation est prudent. Ainsi l'Imperial College⁴ selon son étude de 2021, considère des taux de mobilisation des résidus de culture entre 40% et 50%, ce qui reviendrait à doubler le gisement mobilisable (+31 à +46 TWh).
- 13 TWh issus d'herbes et fourrages ;
- 27 TWh issus d'effluents d'élevage.

A ce gisement, il faut y ajouter **29 TWh_{PCS} d'énergie primaire non issue de l'agriculture** :

- 14 TWh issus de la méthanisation d'algues⁵ ;
- 8 TWh issus de déchets des ménages, collectivités et entreprises⁶ ;
- 2,5 TWh issus des installations de stockage des déchets non dangereux et des déchets résiduels⁷ ;
- 5 TWh issus de sous-produits des industries agroalimentaires⁸.

Pour cette biomasse fermentescible, la valorisation en méthanisation est la plus pertinente, puisqu'elle évite les émissions de méthane associées au compostage ou à l'épandage direct des intrants, tout en conservant le bénéfice du retour au sol du carbone stable et des minéraux via l'épandage des digestats.

² [Ademe, un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ?](#), 2018

³ [ADEME - Transition\(s\) 2050](#)

⁴ [Sustainable biomass availability in the EU, to 2050 - FuelsEurope](#)

⁵ [Ademe, un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ?](#), 2018, page 52

⁶ Ibid, page 37

⁷ Ibid, page 38

⁸ Ibid.

En tenant compte de la conversion en énergie finale et d'une dizaine de TWh dédiés à la valorisation par cogénération pour les petites installations agricoles, on aboutit à une trajectoire de **production de biométhane par méthanisation de 130 TWh_{PCS} en 2050**.

L'étude menée par France Stratégie en 2021 conduit à des résultats très proches. Cette étude, qui porte uniquement sur le périmètre des intrants agricoles⁹, conclut à ce périmètre à un potentiel de production de biométhane de 89 à 109 TWh après réévaluation¹⁰.

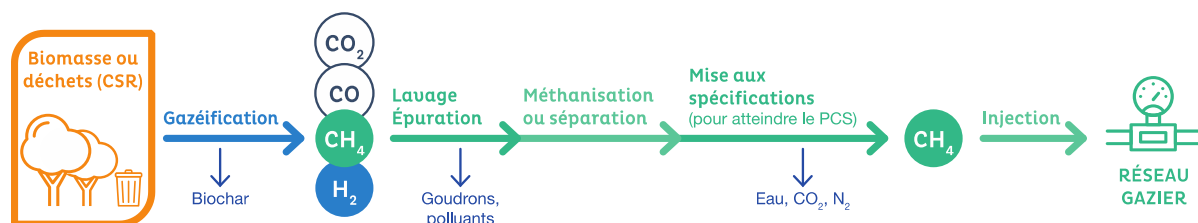
Le complément des intrants non-agricoles, qui correspond à un potentiel de 29 TWh (cf supra) permet d'aboutir à un potentiel de production de biométhane par méthanisation de 118 à 138 TWh.

L'étude menée par Engie¹¹, quant à elle, donne des potentiels méthanisables agricoles un peu plus élevés de 131 TWh_{PCS} (énergie finale) auxquels s'ajoutent 27 TWh_{PCS} issus de déchets (biodéchets et déchets industriels) soit 158 TWh.

Pyrogazéification

La pyrogazéification valorise des intrants secs, à savoir une grande variété de ressources difficilement valorisables : résidus de bois, bois non dangereux de démolition (portes, fenêtres, vieux meubles, panneaux d'industrie, etc) et « combustibles solides de récupération » (CSR).

Elle s'appuie sur les procédés de pyrolyse et de gazéification en chauffant de la matière carbonée relativement sèche à haute température (400 à 1 500 °C) en absence ou défaut d'oxygène. Cette matière est alors transformée en gaz (syngaz).



Concernant les intrants bois-énergie et CSR, l'étude ADEME 2021 a approfondi l'analyse de ce gisement par rapport à l'étude ADEME 2018.

En particulier, l'ADEME a retravaillé son hypothèse de sylviculture dynamique (scénarios S3 et S4), qui retient une augmentation des récoltes de 40% par rapport à la situation actuelle. Sous cette hypothèse, l'étude ADEME 2021 conclut à un **gisement énergétique issu de la forêt de près de 120 TWh_{PCI}** (énergie primaire)¹² provenant d'une récolte annuelle d'environ 70 Mm³ de bois, après affectation aux usages prioritaires que sont le bois d'œuvre (26 à 29

⁹ L'étude France Stratégie porte sur la biomasse agricole, soit les effluents d'élevage, les cultures intermédiaires, les surplus d'herbe et les résidus de cultures annuelles.

¹⁰ Chiffres *mis à jour* présentés lors du webinar de France Stratégie du 14/12/2021

(<https://www.strategie.gouv.fr/debats/webconference-biomasse-agricole-ressources-potentiel-energetique>, planche 21)

¹¹ *Geographical analysis of biomethane potential and costs in Europe in 2050, juin 2021*, page 37 : résidus de culture+cultures intermédiaires+effluents = 38+62.6+30.4 = 131 TWh_{PCS}; déchets industriels + biodéchets = 6.58+20.61 = 27.19 TWh_{PCS}

¹² Etude Ademe 2021, page 606, 120 TWh dans le scénario S3, 110 TWh dans le scénario S4

Mm3) et le bois industrie et en valorisant énergétiquement les sous-produits de transformation de ces usages prioritaires.

Ce chiffre est corroboré par l'étude Engie qui donne un potentiel de production (en énergie finale donc) de 71 TWh_{PCS}¹³ ce qui revient à plus de **100 TWh_{PCI} en énergie primaire**¹⁴.

S'agissant des **ressources non forestières**, l'étude ADEME 2021 identifie :

- Un gisement de bois hors forêt de 11 Mt correspondant à environ 35 TWh_{PCI} en énergie primaire¹⁵
- Un gisement de bois-déchets de 6 Mt soit 8 TWh_{PCI} (énergie primaire)¹⁶
- Un gisement de cultures lignocellulosiques de 10 Mt soit environ 50 TWh_{PCI} (énergie primaire)¹⁷
- Un gisement de CSR (déchets) de 18 Mt¹⁸, qui correspond à un potentiel additionnel de 90 TWh_{PCI} en énergie primaire.

Ainsi, *sans* tenir compte des cultures lignocellulosiques qui peuvent poser des questions en termes de changement d'affectation des sol¹⁹, **le potentiel global mobilisable en pyrogazéification, respectant la hiérarchie des usages de la biomasse et de la valorisation des déchets s'élève donc à environ 255 TWh_{PCI} en énergie primaire soit 180 TWh_{PCS} en gaz injectable (énergie finale)**. L'estimation globale reste donc identique à celle de l'étude ADEME 2018, la révision à la baisse sur le développement de la sylviculture étant compensée par les gisements réhaussés de CSR pour lesquels la valorisation gaz est reconnue comme particulièrement pertinente.

En retenant une hypothèse de mobilisation de l'intégralité du gisement déchets CSR et déchets de bois pour lequel il n'existe pas de solution alternative pertinente, comme l'indique l'ADEME, et une hypothèse prudente de 20% du potentiel total bois-énergie (forêt et hors forêt), pour tenir compte de voies de valorisation alternatives et des risques de non-atteinte de la trajectoire de sylviculture dynamique, il est réaliste de considérer une **production de méthane par pyrogazéification de 90 TWh_{PCS}**.

La valorisation injection permet d'adapter la valorisation au plus près des gisements de bois-énergies et de déchets grâce au réseau gaz étendu sur l'ensemble du territoire, limitant ainsi l'impact environnemental de transferts massifs de matières solides. Selon la localisation des gisements, en particulier ceux liés aux déchets des ménages et des industries, la valorisation gaz peut être complétée par une valorisation chaleur dans une logique de cogénération.

¹³ [Geographical analysis of biomethane potential and costs in Europe in 2050, juin 2021](#), page 37

¹⁴ En tenant compte d'un rendement de pyrogazéification de 70% (méthane injecté [PCS]/énergie primaire [PCI]), source Ademe 2018

¹⁵ Etude Ademe 2021, pages 589 et 606, scénario 3

¹⁶ Ibid. pages 589 et 467, scénario 3

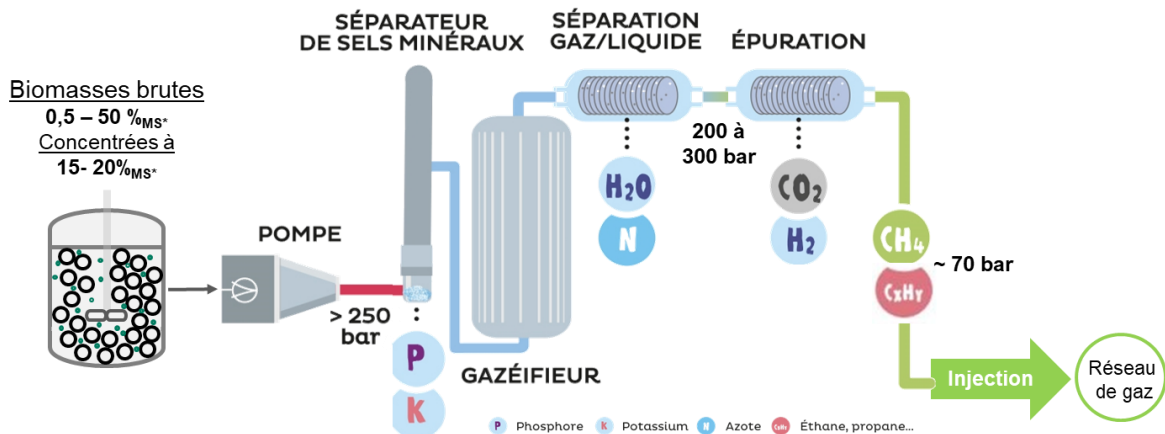
¹⁷ Ibid., pages 589 et 606, scénario 3

¹⁸ Etude Ademe 2021, pages 559, scénario 3

¹⁹ Les études Ademe 2018 et France Stratégie 2021 ne les prennent pas en compte ; l'Imperial College ne les considère que dans les terres en jachère, dégradées ou abandonnées estimées à 1,761 Mha en France.

Gazéification hydrothermale

La Gazéification Hydrothermale (GH), procédé de conversion thermo-chimique à haute pression (210 à 350 bars) et haute température (360 à 700 °C), est une technologie innovante pour la conversion de biomasses humides en un gaz de synthèse riche en méthane, hydrogène et gaz carbonique.



La GH est donc une *solution de traitement de déchets humides* particulièrement intéressante puisqu'elle permet de :

- Convertir plus de 90% du carbone sous forme gazeuse, y compris en cas de pollution des intrants par d'éventuels microplastiques ;
- Récupérer des sels minéraux (phosphore, potassium, ...) notoirement adaptés à un retour au sol ciblé, de l'ammonium (NH₄⁺) et une eau résiduelle de qualité industrielle revalorisable après filtration.
- Supprimer toute trace de micro-organismes (bactéries, virus (ex.: COVID19) et de pathogènes.

Elle permet ainsi de valoriser pertinemment les déchets de biomasse humides qui sont aujourd'hui incinérés, enfouis, ou pour lesquels les contraintes réglementaires de traitement (épandage par exemple) sont de plus en plus fortes.

En Europe, plusieurs acteurs développent ou exploitent déjà des projets pilotes ou démonstrateurs de la technologie. Une toute première installation industrielle de 20 MW_{th} est en cours de mise en service aux Pays-Bas. Ce pays, confronté à des difficultés pour le retour au sol de ses effluents organiques liquides, prévoit dans sa feuille de route « gaz vert » 2030²⁰, que la production issue de gazéification hydrothermale sera même supérieure à celle de la méthanisation (12 TWh en 2030 contre 6 TWh issu de méthanisation).

GRTgaz a mené en 2019, avec l'appui d'Enea Consulting, une étude sur le potentiel de gazéification hydrothermale en France²¹.

Le potentiel mobilisable retenu dans la présente analyse est évalué en retenant le gisement qui n'est actuellement pas mobilisé par d'autres technologies de valorisation énergétique. Ce gisement est estimé à 35 TWh_{PCS} de production de méthane, à savoir :

²⁰ [Kamerbrief Routekaart Groen Gas | Kamerstuk | Rijksoverheid.nl](#) (page 2)

²¹ [Première étude sur le potentiel de la gazéification hydrothermale en France | grtgaz.com](#)

- Les digestats de méthanisation agricole ne pouvant être compostés, épandus ou qui sont en excès par rapport aux quantités épandables près des sites de méthanisation ou issus des boues et digestats de STEP, ce qui correspond à un potentiel de 23 TWh ;
- Les boues de curage et dragage (ports, fleuves et canaux) dont le rejet en mer des boues polluées sera interdit en 2025 (5 TWh).
- Des sous-produits animaux (carcasses) et végétaux (vinasses) non valorisés en méthanisation correspondant à un potentiel de 2 TWh.
- La valorisation pertinente de 60% des liqueurs noires, actuellement brûlées dans l'industrie papetière par défaut d'exutoire, qui représente près de 5 TWh.

En outre, d'autres intrants, tels que des boues industrielles, certains déchets industriels (pulpes de betteraves sucrières co-produits du biodiésel et du bioéthanol, lixiviats de centres d'enfouissement) pour lesquels les industriels cherchent des alternatives à leurs modes de valorisation actuels, peuvent être aisément valorisés par gazéification hydrothermale. Ce second potentiel est estimé à 23 TWh_{PCS} de production de méthane.

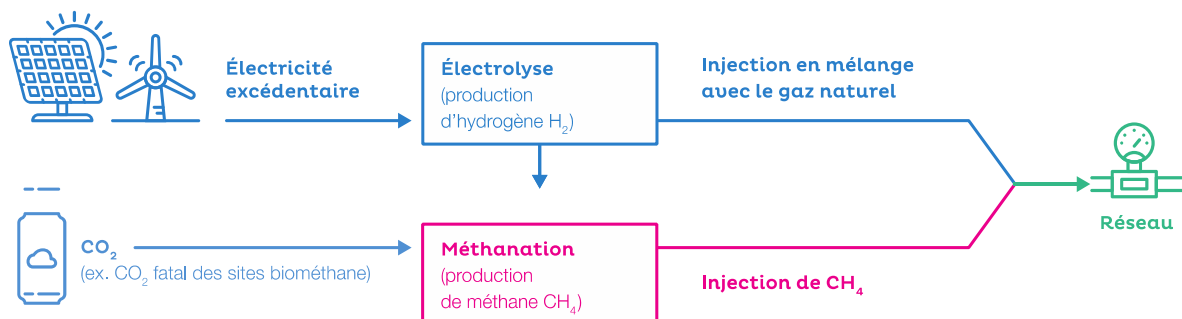
Le **potentiel mobilisable correspondant est donc de 58 TWh_{PCS}²².**

Compte-tenu des intrants listés, de l'émergence de potentielles voies de valorisation énergétiques alternatives (carburants liquides notamment), la trajectoire de **production de biométhane par gazéification hydrothermale s'élève réalistement à 50 TWh_{PCS}.**

Méthanation

La méthanation est un procédé industriel qui convertit de l'hydrogène en méthane, avec une source de CO₂.

Si l'hydrogène de départ est produit lui-même à partir d'une source d'énergie renouvelable (par électrolyse de l'eau avec une électricité renouvelable par exemple) ou bas-carbone (électrolyse de l'eau avec une électricité bas-carbone, vaporeformage du gaz naturel associé à la capture du CO₂ etc.), alors le gaz produit peut être considéré comme respectivement renouvelable ou bas-carbone.



²² Ce potentiel correspond à la fourchette basse de l'étude GRTgaz/Enea de 2019 du fait des gisements retenus.



France gaz
renouvelables



GAZÉIFICATION
HYDROTHERMALE
VALORISER LES DÉCHETS DE BIOMASSES HUMIDES



L'étude ADEME 2018 estime à 140 TWh le potentiel théorique de gaz de synthèse issu du power to gas dans un contexte de mix électrique 100 % renouvelable.

L'étude ADEME 2021 met en évidence qu'une **trajectoire de production par méthanation de 50 TWh est réaliste** en valorisant utilement les excédents de production électrique renouvelable.

Cette trajectoire est identifiée en évaluant les optimisations possibles de la valorisation du CO₂. A cet égard, deux sources de CO₂ sont possibles :

- Le CO₂ issu de méthanisation agricole : l'étude ADEME 2021 propose une voie de méthanation issue du couplage de CO₂ de méthanisation agricole avec des électrolyseurs, en prévoyant la mise en place systématique d'une telle valorisation sur toutes les installations de méthanisation à partir de 2028, tout en prévoyant un fonctionnement réduit dans l'année (2000 à 3000 heures) de façon à optimiser la valorisation du carbone biogénique avec les excédents de production d'électricité renouvelable. Le potentiel mobilisable est estimé autour de 40 TWh.
- Le CO₂ industriel (industries agro-alimentaires en particulier) qui pourrait également être utilisé dans des installations de méthanation, de façon analogue, en maximisant le recyclage du carbone dans un contexte de valorisation de la production électrique renouvelable excédentaire. Le potentiel correspondant peut être estimé autour de 10 TWh.