

A green rounded rectangular callout box with a white plus sign in a white circle at the top right corner. The text inside is white. The box is positioned over the industrial background.

Potentiel de la Gazéification Hydrothermale en France

Une technologie innovante pour le traitement des déchets et des résidus de biomasses liquides et leur conversion en gaz renouvelable.

Octobre 2019

Résumé exécutif

La gazéification hydrothermale est une technologie de conversion de biomasses humides permettant le traitement de résidus et de déchets organiques. Elle utilise l'eau contenue dans la biomasse dans son état supercritique comme milieu réactionnel pour produire un gaz de synthèse riche en méthane. Le gaz renouvelable produit se trouvant encore sous haute pression en sortie du procédé peut être soit injecté et stocké dans le réseau gazier (notamment le réseau de transport afin de valoriser au mieux la pression résiduelle), soit valorisé dans une station GNV ou dans tout autre usage consommant du gaz naturel (cogénération, chauffage, production électrique). En plus du gaz renouvelable produit, le procédé permet de récupérer des sels minéraux, de l'azote et de l'eau présents dans l'intrant, exploitables notamment pour la production de fertilisants.

En Europe, plusieurs acteurs développent ou exploitent actuellement des pilotes ou des démonstrateurs de la technologie. Plusieurs intrants ont été testés et de nombreux autres sont jugés potentiellement intéressants.

Les biomasses brutes pouvant être traitées par gazéification hydrothermale doivent répondre à certaines caractéristiques techniques pour assurer la rentabilité de l'installation. Elles doivent :

- ▶ être pompables,
- ▶ avoir une siccité de départ comprise entre 5% et 50% (à faire converger autour de 20%),
- ▶ posséder une part organique la plus élevée possible (au moins 50%) dans la matière sèche.

Plusieurs groupes d'intrants remplissent ces critères tout en représentant des gisements de production conséquents en France métropolitaine : les boues de stations d'épuration, les digestats de méthanisation, les effluents d'élevage et d'autres résidus d'activité agricole, les résidus et coproduits des industries agroalimentaires, les effluents organiques industriels et les déchets organiques urbains.

Selon l'intrant à traiter et l'écosystème du site, la gazéification hydrothermale peut se présenter comme un procédé alternatif ou complémentaire aux technologies existantes de conversion de biomasse en gaz renouvelable. Du fait de son taux de conversion en carbone élevé, de sa capacité à traiter des résidus humides et à extraire les sels minéraux et d'autres composants valorisables, elle peut être une alternative très intéressante à la méthanisation ou la pyrogazéification dans le traitement et la valorisation des intrants humides. Le choix de la valorisation optimale dépendra des spécificités de chaque intrant et des contextes locaux des projets. Dans le cas d'une installation de méthanisation déjà en place, la gazéification hydrothermale peut s'intégrer en complément en traitant les digestats en sortie de procédé qui ne peuvent être valorisés, en particulier du fait d'un déficit ou d'une interdiction de surfaces d'épandage localement. Elle permet ainsi une production additionnelle d'énergie facilitant la gestion des digestats et préservant la faculté d'un retour au sol des principaux composants (notamment azote, phosphore et potassium) récupérés comme fertilisants. Des analyses de cycle de vie sont à réaliser pour évaluer la pertinence des différentes voies de valorisation pour différents contextes, en tenant compte des différents impacts en particulier climatiques et agronomiques et des cycles du carbone et de l'azote.

Les principaux développeurs estiment que la technologie pourrait atteindre l'échelle industrielle à horizon 2023/2025 avec des installations modulaires dont la taille unitaire sera comprise entre 0,5 et 6 t/h. Le modèle d'affaires des projets de gazéification hydrothermale reposerait à la fois sur la rémunération du service rendu de traitement des déchets, la valorisation du gaz renouvelable produit et la valorisation des sels minéraux en tant que fertilisants.

En prenant en compte les gisements mobilisables des déchets organiques en France métropolitaine et les spécificités de la technologie de gazéification hydrothermale, **des perspectives significatives de production de gaz renouvelable existent notamment pour des effluents d'élevage, des boues de stations d'épuration et des digestats de méthanisation non valorisables localement. Le potentiel de production annuelle de méthane renouvelable via la gazéification hydrothermale peut être estimé à l'horizon 2050 à au moins 58 TWh pouvant monter jusqu'à 138 TWh**, pour ces seules catégories d'intrants. La gazéification hydrothermale se présente donc comme une technologie prometteuse offrant un vrai potentiel de traitement des déchets et de production de gaz renouvelable.

Si le cœur du procédé de la gazéification hydrothermale est déjà maîtrisé par plusieurs acteurs, un certain nombre de défis techniques sont encore à adresser pour permettre l'industrialisation et la commercialisation des installations comme en particulier :

- ▶ améliorer la régénération du catalyseur,
- ▶ améliorer la part de méthane dans le gaz de synthèse produit,
- ▶ parfaire la séparation de la phase solide en fonction du type d'intrant,
- ▶ et trouver le meilleur compromis technico-économique pour le recyclage de la chaleur process.

Les autres efforts de développement visent surtout à réussir la montée en échelle (upscale), à diminuer les coûts d'exploitation-maintenance et à simplifier le fonctionnement des installations.

GRTgaz s'implique dans le développement de la filière en apportant un support aux développeurs de technologie ainsi qu'à l'initiation de projets pilote et de démonstration. Ce soutien vise prioritairement à faciliter l'arrivée de la gazéification hydrothermale sur le marché français et diversifier les intrants accessibles à la technologie. GRTgaz s'implique également dans les études économiques et environnementales générales pour orienter les politiques publiques et les décideurs et tirer le meilleur parti de la gazéification hydrothermale en complément des autres voies de valorisations des effluents et des déchets en gaz renouvelables.

Table des matières

Résumé exécutif	2
1. Présentation de la gazéification hydrothermale.....	5
1.1 Principes et procédés	5
1.2 La gazéification hydrothermale traite un vaste champ de résidus et déchets organiques.....	6
1.3 Un procédé alternatif ou complémentaire aux autres technologies de conversion de biomasse	9
2. Une technologie en développement avec des 1 ^{ers} projets à l'échelle industrielle à horizon 2023	11
3. La gazéification hydrothermale a un potentiel significatif de production de gaz additionnel.....	14
4. Conclusion	17

1. Présentation de la gazéification hydrothermale

1.1 Principes et procédés

La gazéification hydrothermale est une technologie de conversion de biomasses humides en gaz de synthèse (mélange principalement de CH₄, H₂ et CO₂) permettant le traitement de déchets et de résidus dont le taux de matière sèche est faible mais encore riche en composants organiques.

La gazéification hydrothermale fait partie d'une large famille de technologies hydrothermales¹. Ces procédés utilisent tous l'eau contenue dans la biomasse comme milieu réactionnel à hautes pression et température, dans son état sous ou supercritique (supercritique pour le cas de la gazéification hydrothermale). Ils permettent de convertir la partie organique de la biomasse humide soit en biochar soit en biocombustible selon la technologie².

Le procédé de gazéification hydrothermale permet de produire un gaz de synthèse riche en méthane, hydrogène et gaz carbonique qui varie en fonction des caractéristiques de la biomasse traitée et des conditions opératoires (température, pression, débit, temps de séjour et présence ou non d'un séparateur de sels et d'un catalyseur) de l'installation. Elles ont en particulier un impact sur le taux de conversion du carbone en gaz (entre 80 et 95 %³), et sur la part volumique de méthane dans le gaz (en général autour de 50 % et jusqu'à 60 % en présence d'un catalyseur). La gazéification hydrothermale permet également de recycler la partie minérale et d'autres composants présents dans la biomasse (par exemple, l'eau et l'azote).

Il existe aujourd'hui deux grands types de procédés de gazéification hydrothermale : les procédés sans catalyseur et ceux avec catalyseur. La différence principale entre les deux procédés consiste en l'ajout d'un catalyseur dans le gazéifieur, qui permet d'abaisser le niveau de température de réaction d'un niveau se situant entre 600 et 700°C à environ 400°C et d'augmenter le taux de méthane dans le gaz final. Les deux types de procédés peuvent permettre d'atteindre des taux très élevés de conversion de carbone.

Les différentes étapes du procédé de gazéification hydrothermale sont présentées ci-dessous en *Figure 1*.

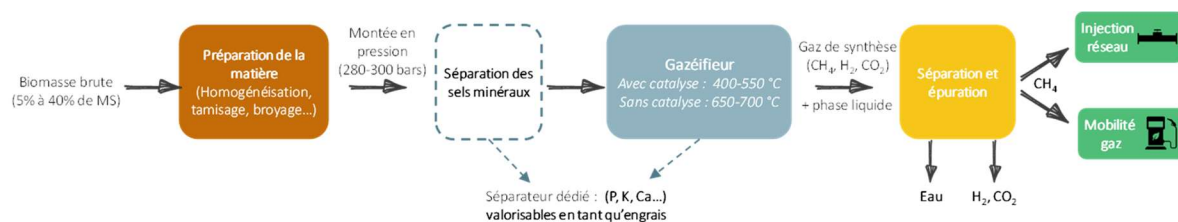


Figure 1 – Schéma de principe du procédé de gazéification hydrothermale

La première étape correspond à la préparation des intrants : elle dépend fortement du type d'intrant et vise en priorité une homogénéisation de la composition de la biomasse brute pour faciliter et optimiser, par la suite, la réaction thermochimique. Elle peut nécessiter de limiter la taille des composants entrants dans le système via un tamisage ou un broyage, de séparer certains éléments indésirables (inertes, métaux lourds, etc.) et de concentrer ou de diluer la matière organique de l'intrant pour optimiser sa conversion en gaz.

¹ Notamment la liquéfaction hydrothermale et la carbonisation hydrothermale.

² Respectivement en biochar pour la carbonisation hydrothermale et en biocombustible (biocrude ou gaz synthétique) pour la liquéfaction ou la gazéification hydrothermale.

³ L'objectif est d'atteindre, pour la plupart des intrants, un taux de conversion dépassant les 90%.

L'intrant ainsi préparé est ensuite comprimé jusqu'à un niveau de pression se situant entre 280 et 300 bars avant d'être préchauffé par la chaleur résiduelle du procédé de gazéification et orienté vers la prochaine étape du procédé.

Dans le cas d'un procédé sans catalyseur nécessitant une plus haute température de réaction, les intrants sont ensuite envoyés directement dans le gazéifieur. Les conditions supercritiques entraînent une précipitation gravitaire des sels minéraux en bas du gazéifieur d'où ils peuvent être évacués par un dispositif approprié.

Dans le cas d'un procédé avec catalyseur (intégré dans le gazéifieur), la présence d'un séparateur de sels suivi d'un captage de l'éventuelle présence de soufre est nécessaire en amont du gazéifieur pour assurer le bon fonctionnement et rallonger au maximum la durée de vie du catalyseur⁴. En effet, un séparateur de sels dédié permet non seulement de séparer et évacuer les composants solides ou inertes, en particulier les sels minéraux, mais aussi de diminuer le risque de corrosion du gazéifieur et de tous les autres équipements en aval du séparateur qui sont exposés à la haute pression.⁵

En sortie de gazéifieur, le gaz de synthèse produit à haute pression (environ 280 bars) est séparé du résidu liquide puis épuré afin d'obtenir un gaz renouvelable conforme à la norme gaz naturel du réseau. Ce gaz renouvelable se trouvant encore à une pression d'au moins 80 bars peut être injecté et stocké dans le réseau de gaz, de préférence de transport, pour valoriser au mieux la pression résiduelle. Il peut également être valorisé dans une station GNV fonctionnant à haute pression (200 bars et plus) ou dans tout autre usage consommant du gaz naturel (cogénération, chauffage, production électrique par turbine à gaz ou cycle combiné). Le choix de la valorisation optimale du gaz renouvelable produit dépendra des contextes locaux des projets.

En plus du gaz produit, le procédé permet généralement de récupérer de l'eau claire, des sels minéraux et de l'ammonium qui pourront également être valorisés (notamment en tant que fertilisants)⁶.

1.2 La gazéification hydrothermale traite un vaste champ de résidus et déchets organiques

Les biomasses pouvant être traitées via le procédé de gazéification hydrothermale doivent répondre à un certain nombre de caractéristiques techniques.

En premier lieu, **les intrants doivent être pompables tant à basse qu'à haute pression**. La pompabilité dépend pour chaque intrant de sa viscosité, de son taux de matière sèche, de la taille des composants les plus volumineux et de sa composition globale.

Les intrants bruts acceptables par le procédé de gazéification hydrothermale doivent avoir une siccité comprise entre 5% et 50% (amenée **généralement autour de 20%** pour maximiser la production de gaz tout en assurant une bonne pompabilité), hormis quelques rares exceptions (par exemple les huiles⁷). Il est cependant possible de mélanger des intrants à taux de matière sèche plus

⁴ Les éventuels métaux lourds présents dans l'intrant doivent également être extraits en amont lorsqu'un catalyseur est utilisé.

⁵ L'ajout d'un séparateur de sels est également possible pour procéder à haute température sans catalyseur, mais non indispensable au fonctionnement du procédé.

⁶ En fonction des intrants traités, des traitements mis en œuvre et de l'efficacité de la réaction, l'eau en sortie du procédé peut contenir des matières (par exemple de l'ammonium si l'intrant contient du nitrogène, du carbone non converti durant la réaction ou des métaux) qui pourront demander un éventuel traitement additionnel. Cette eau peut également être utilisée si c'est nécessaire pour diluer les intrants du procédé.

⁷ Les huiles, du fait de leur grande viscosité, sont pompables bien qu'elles comportent des taux de matière sèche pouvant être supérieurs à 90%.

élevés avec d'autres biomasses plus humides pour obtenir un mélange homogène traitable par la technologie. Ceci nécessite toutefois un réglage spécifique du procédé qui doit être adapté à chaque intrant ou au mélange d'intrants.

Par ailleurs, **les intrants doivent posséder une part organique relativement élevée pour assurer la rentabilité de l'installation** : à faible siccité, proche de 100% et à forte siccité, à au moins 50% de contenu organique.

De plus, la présence trop importante dans l'intrant de certains composants tels que le soufre, les chlorures, les minéraux, les inertes (cailloux et sable par exemple) ou les métaux, peut venir perturber le procédé et accélérer le vieillissement des équipements (du fait notamment de l'augmentation des risques d'abrasion et de corrosion). Ces composants doivent si possible être écartés en amont du procédé ou, au plus tard, avant que l'intrant ne réagisse dans le gazéifieur, par exemple par séparation spécifique de la matière inorganique (minéraux, chlorure et métaux) et captage du soufre.

Plusieurs groupes d'intrants répondent aux caractéristiques techniques requises par la gazéification hydrothermale, notamment :

- ▶ **Les boues des stations d'épuration (STEP) municipales et industrielles** : ces boues sont générées par le traitement des eaux usées municipales et industrielles et peuvent contenir des taux élevés de matières organiques. Au niveau industriel, les boues les plus intéressantes se trouvent dans les secteurs des industries agroalimentaires (filières laitières, viande, boissons, fruits et légumes) et celles du papier et carton, mais aussi en aval de certaines usines (pétro)chimiques et pharmaceutiques.
- ▶ **Les digestats de méthanisation** : ce sont les coproduits liquides et solides générés par la digestion anaérobie des déchets organiques d'origine agricole, urbaine et industrielle.
- ▶ **Les effluents d'élevage liquides et solides (lisiers et fumiers)** : ils sont issus des activités d'élevage (bovins, porcins et volailles). Ne sont considérés que les effluents récupérés dans les bâtiments d'élevage.
- ▶ **Des effluents liquides d'origine agricole** : il s'agit de tout type de déchets de biomasses liquides non ou difficilement valorisables par méthanisation et de résidus (lixivias) issus du stockage de récolte de végétaux ou de leurs déchets avec des taux de matière sèche relativement faibles.
- ▶ **Les résidus et co-produits des industries agroalimentaires** : les procédés des industries agroalimentaires génèrent de nombreux coproduits liquides afin d'élaborer leurs produits finis. On peut citer les matières organiques issues des abattoirs, le lactosérum des industries laitières, les déchets des industries de transformation de fruits et légumes, les coproduits de transformation de la betterave sucrière (pulpe et vinasse), les drêches de brasserie, les coproduits de l'industrie vinicole (marcs de raisin et vinasse), les grignons d'olive de la transformation oléicole, les matières résiduelles de l'amidonnerie et de la féculerie (pulpe et soluble de pomme de terre), etc.
- ▶ **Les effluents et résidus industriels** : certaines industries non agroalimentaires génèrent des effluents et des résidus riches en matière organique : les effluents de l'industrie papetière (liqueur noire), les résidus de la production de biodiesel (glycérine), les résidus de la production de bioéthanol (pulpe et vinasse de betterave), etc.
- ▶ **Les déchets organiques urbains** : ils regroupent les déchets générés par l'activité urbaine (résidus aussi bien solides que liquides) comme les déchets récoltés par les municipalités, les résidus alimentaires de la restauration commerciale et les déchets des supermarchés.

L'ensemble des gisements en France métropolitaine des intrants cités ci-dessus ont été évalués dans le cadre de cette étude. N'ont été retenus que les gisements les plus pertinents pour le développement de la filière gazéification hydrothermale sur des critères de taille du gisement (volume annuel produit), physico-chimiques (taux de matière en sèche, taux de matière organique, etc.) et d'accessibilité (voies

actuelles de valorisation, taux de mobilisation espéré, ou taille des sites de production). Les principaux développeurs européens ont par ailleurs été interrogés sur les intrants qu'ils ont déjà testés ou qu'ils considèrent pour leurs futurs tests.

Le *Tableau 1* ci-dessous présente les gisements de déchets et résidus organiques, parmi les plus pertinents en France métropolitaine, et leurs principales voies de valorisation actuelles.

	Typologie de déchets	Tonnage brut annuel (kt)	Principales voies de valorisation actuelles
Effluents d'élevage	Lisiers d'élevage (bovin, porcin, volailles)	48 000	Épandage direct, méthanisation
	Fumier d'élevage (bovin, porcin, volailles)	119 000	Épandage direct, méthanisation
Boues de STEP	Boues non digérées de stations urbaines d'épuration	19 000	Épandage, compost, méthanisation, incinération
	Digestats de méthanisation en 2018 (incl. boues digérées de STEP)	12 000	Épandage, compost
Digestats de méthanisation	Digestats de méthanisation à horizon 2030 (incl. boues digérées de STEP)	120 000	Compost et en partie épandage (selon les surfaces locales disponibles)
	Digestats de méthanisation à horizon 2050 (incl. boues digérées de STEP)	400 000	Compost et en partie épandage (selon les surfaces locales disponibles)
Industries Agro-Alimentaires (IAA)	Lactosérum des industries laitières	600	Poudre de lactosérum pour alimentation animale, méthanisation
	Matière organique issue des abattoirs	3 000	Protéines et corps gras pour alimentation animale ou industrie chimique, méthanisation
	Marc de raisin des industries viticoles	1 000	Distilleries (biocarburant), alimentation animale, alcools ménagers
	Transformation de la betterave sucrière	4 000	Alimentation animale, fertilisants, industries, méthanisation
Industries	Liqueur noire de l'industrie papetière	14 000	Chaudières de récupération pour production de chaleur ou d'électricité

Les tonnages des digestats de méthanisation à horizon 2030 et 2050 ont été estimés à partir respectivement des objectifs de développement du gaz renouvelable de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (2015), équivalents à 30 TWh_{PCS} ; et du potentiel à horizon 2050 proposé dans l'étude 2018 ADEME 100% gaz renouvelable⁸, équivalent à 103 TWh_{PCS}.

Tableau 1 – Gisement actuel de déchets organiques en France (non exhaustif) et principales voies de valorisation actuelles⁹

⁸ ADEME, *Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ?* (2018, scénario énergie-climat ADEME 2035-2050).

⁹ Les données présentées dans le tableau ont été principalement consolidées à partir des rapports suivants : ADEME-Solagro, *Gisement de substrats méthanisables* (2013) ; RESEDA, *Enquête sur les gisements et la valorisation des coproduits issus de l'agro-industrie* (2017) et ADEME, *Évaluation du potentiel de production de biométhane à partir des boues issues des stations d'épuration des eaux usées urbaines* (2014) ainsi qu'avec l'enquête Agreste sur la production de déchets non dangereux dans l'industrie agroalimentaire (2012).

La gazéification hydrothermale est une solution pertinente de traitement et de valorisation pour les déchets à forte dominante liquide dont la gestion est coûteuse pour les producteurs, voire problématique (par exemple enjeux de métaux lourds dans les boues ou digestats de boues de STEP ou espace d'épandage limité).

Elle apparaît dans ce contexte comme une alternative économique crédible à l'incinération ou à d'autres filières de traitement ou de valorisation (épandage notamment) permettant une meilleure valorisation locale des déchets et des résidus. En revanche, pour certains résidus déjà valorisés autrement ou dont la valorisation participe déjà à la viabilité économique de la filière (lactosérum, marcs de raisin, résidus organiques du traitement de la betterave, etc.), elle devra démontrer sa plus-value dans la compétition des solutions les plus économiques.

1.3 Un procédé alternatif ou complémentaire aux autres technologies de conversion de biomasse

La gazéification hydrothermale se présente comme une alternative aux autres technologies de conversion en gaz renouvelable pour traiter de la biomasse liquide. En effet, elle peut permettre un taux de conversion en carbone très élevé (potentiellement supérieur à 90%) et atteindre, pour une biomasse liquide donnée, des taux de production de méthane supérieurs à ceux des autres procédés, aussi bien de la méthanisation (dont les taux de conversion de carbone sont généralement compris entre 40 et 70%)¹⁰ que de la pyrogazéification.

La gazéification hydrothermale apporte également un potentiel supplémentaire de valorisation pour des intrants difficilement traitables par d'autres méthodes de conversion pour des raisons de composition : liqueur noire par exemple, ou intrants contenant certains polluants (par exemple des microparticules de plastiques que le procédé serait aussi capable de convertir en gaz). De plus, le temps de séjour très court (entre 1 à 10 minutes) de la gazéification hydrothermale permet de traiter des débits importants en conservant une installation compacte, ayant une empreinte au sol limitée.

Le gaz de synthèse produit est disponible à pression élevée, ce qui permet d'envisager, après son épuration et sans besoin de compression, une injection directe dans le réseau de transport de gaz. De même, il est possible d'envisager l'alimentation directe d'une station bioGNV à proximité d'une installation de gazéification hydrothermale, en limitant l'énergie nécessaire à la compression du carburant (distribution du GNV à 200 bars).

Le procédé permet également d'extraire les sels minéraux et l'ammonium présents dans l'intrant qui, une fois séparés, pourront être valorisés sous forme de fertilisants par exemple. Enfin, la gazéification hydrothermale restitue une eau claire compatible pour un rejet dans le milieu naturel après dénitrification et filtration du carbone.

En plus de se positionner comme une alternative possible, la gazéification hydrothermale peut s'intégrer en complément en aval d'une installation de méthanisation. En installant une unité de gazéification hydrothermale en sortie d'un méthaniseur, on peut envisager le traitement de digestats difficilement ou pas du tout valorisables pour des raisons de limite de surfaces ou des interdictions d'épandage. Cette conversion supplémentaire permettrait une production additionnelle de gaz pour un même intrant initial. Elle évite ainsi tout transport de ces digestats et apporte une solution alternative à des interdictions éventuelles (par exemple pour cause de contenus en métaux lourds, microparticules de plastique, taux d'azote trop important). De plus, la gazéification hydrothermale non seulement permet de récupérer les sels minéraux et l'azote présents dans le digestat mais apporte

¹⁰ La gazéification hydrothermale comporte par ailleurs l'avantage de produire de l'hydrogène récupérable et valorisable à partir de l'eau contenue dans les phases liquides des intrants.

aussi la possibilité de les valoriser sous forme d'engrais séparés, après transformation spécifique permettant leur dosage précis.

La gazéification hydrothermale se positionne en solution alternative pour la conversion d'intrants humides non adressables à la pyrogazéification évitant une étape énergivore de séchage ou de concentration. En effet, à des niveaux de matière sèche compris entre 20 et 50%, il est plus efficient énergétiquement de diluer les intrants pour les valoriser en gazéification hydrothermale plutôt que de les sécher ou concentrer pour en tirer profit avec une installation de pyrogazéification. Sous réserve que l'intrant soit pompable, la gazéification hydrothermale est donc en général préférable à la pyrogazéification pour cette catégorie d'intrants humides.

De manière plus générale, la gazéification hydrothermale présente des avantages sur le plan de l'empreinte au sol. La compacité des installations est liée au nombre restreint d'équipements nécessaires à son bon fonctionnement et au faible temps de séjour des intrants dans le gazéifieur. Pour les intrants humides visés, le gaz de synthèse obtenu par gazéification hydrothermale est généralement riche en méthane et essentiellement composé de CO₂ et H₂ par ailleurs. Ne générant pas ou très peu de rejets atmosphériques, l'installation ne nécessite a priori pas de système de dépollution spécifique. Le procédé produit un faible pourcentage de cendres et très peu de biochar¹¹.

La technologie de gazéification hydrothermale étant exploitée à une haute pression, le coût d'investissement et les contraintes techniques de certains de ses équipements (vanne, gazéifieur, échangeur thermique, etc.) augmentent très fortement avec la taille de l'installation. Il est ainsi préférable de limiter sa taille à des débits traitants entre 0,5 à 6 t/h par unité de production. Cette approche, retenue majoritairement par les développeurs de la technologie, permet de mettre en œuvre des installations de manière modulaire facilitant la production de séries de modules standardisés, moins coûteuses en production et en logistique que les installations sur mesure comme c'est généralement le cas pour les autres méthodes de conversion.

¹¹ Le pourcentage de cendres varie notamment en fonction des composants inertes contenus dans l'intrant et de sa siccité. La quantité de biochar produite est directement liée au taux de conversion du carbone.

2. Une technologie en développement avec des 1^{ers} projets à l'échelle industrielle à horizon 2023

En Europe, plusieurs acteurs développent ou exploitent actuellement des pilotes ou des démonstrateurs de gazéification hydrothermale, à des niveaux de TRL jusqu'à 7.

Les principaux développeurs de la technologie estiment que la technologie devrait atteindre l'échelle industrielle à l'horizon 2023/2025 et que les futures installations unitaires modulaires pourront à terme avoir des tailles comprises entre 0,5 et environ 6 t/h¹². Tout débit à traiter dépassant la taille maximale du module proposé sera couvert par rajout d'autant de modules nécessaires à couvrir le débit maximal.

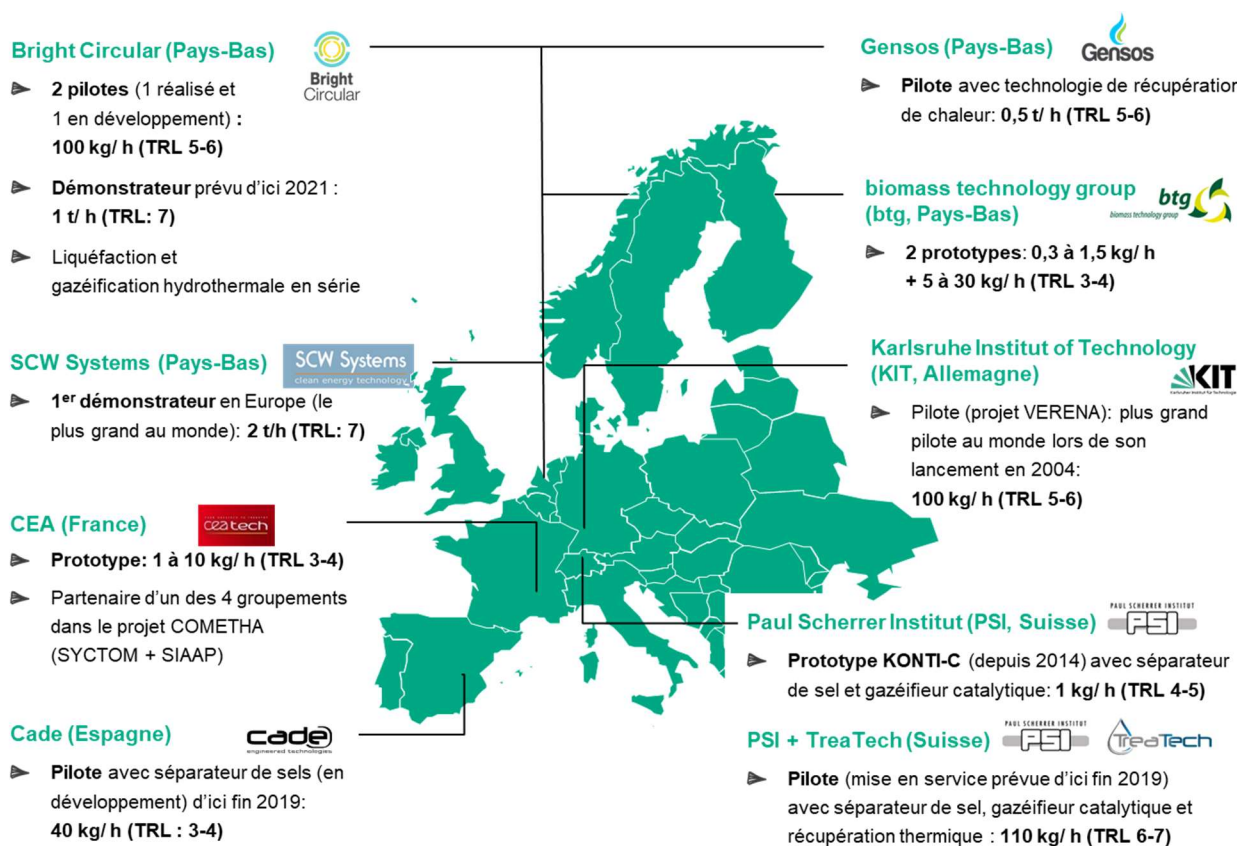


Figure 2 – Principaux développements technologiques sur la gazéification hydrothermale en Europe

Selon le contexte national et les intrants traités, le modèle d'affaires des futures installations de gazéification hydrothermale pourra reposer sur trois principaux types de rémunérations :

- ▶ services rendus liés au traitement des déchets et résidus,
- ▶ valorisation du gaz renouvelable produit conforme à la norme gaz naturel, et
- ▶ valorisation des autres composants récupérés en sortie du procédé, en particulier les sels minéraux, l'eau et l'ammonium.

¹² Échanges avec PSI, CEA, KIT et Cade.

En Suisse, un des premiers marchés visés par le PSI (Paul Scherrer Institut) est la valorisation des boues et de digestats de boues issues des stations d'épuration¹³. Les opérateurs de gazéification hydrothermale seraient rémunérés à la fois pour le traitement des boues, la vente de gaz renouvelable produit (dont injection dans le réseau de gaz) et de sels minéraux. La séparation de sels et la séparation des phases gaz-liquide du procédé permettent de récupérer aussi bien des minéraux (principalement du phosphore, du potassium) que de l'ammonium¹⁴ pouvant être transformés et valorisés en engrais. La technologie de gazéification hydrothermale devient ainsi un potentiel outil de traitement de déchets évitant la mise en place d'un incinérateur. En effet, il semblerait possible d'atteindre avec cette technologie un coût global de traitement des boues plus compétitif que celui pour une installation équivalente par incinération.

Afin d'arriver au stade de commercialisation de la technologie, attendue à l'horizon 2023/ 2025, il est nécessaire que les développeurs réussissent d'une part à optimiser leur procédé et d'autre part à répondre au challenge de l'« upscale », c'est-à-dire la mise à l'échelle industrielle de leur technologie.

Selon le procédé choisi (avec ou sans catalyseur), des travaux sont ainsi menés, par exemple :

- ▶ sur la régénération du catalyseur, pour limiter au maximum les coûts opérationnels et baisser au maximum la fréquence de renouvellement du réacteur catalytique,
- ▶ sur l'optimisation du gazéifieur pour augmenter le taux de conversion du carbone en méthane¹⁵,
- ▶ sur l'optimisation de la conception des séparateurs de sels afin qu'ils séparent au mieux la phase solide pour un intrant donné (pour atteindre des taux de récupération pour chaque sel minéral supérieur à 90%).

Par ailleurs, la montée en taille des installations rend utile dès la phase pilote (débit traité d'environ 100 kg/h) l'intégration d'une solution industrielle économiquement valable maximisant la récupération de chaleur. L'objectif est de recycler au maximum la chaleur haute température récupérée sur les phases liquide et gazeuse du procédé afin de pouvoir préchauffer les intrants et d'atteindre un rendement énergétique global de l'installation élevé. Une valeur cible comprise entre 60 et 70% (selon l'intrant et le niveau de température maximale visé) est jugée atteignable par les développeurs de la technologie, avec les technologies de récupération thermiques connues. Ce rendement pourrait encore être amélioré en valorisant la chaleur fatale (< 150 °C) en sortie de l'échangeur de préchauffage des intrants dans un réseau de chaleur ou sur un site industriel à proximité.

Du fait de l'exploitation du procédé à haute pression (250 à 300 bars), le meilleur compromis doit aussi être trouvé pour le choix des matériaux à utiliser pour les principaux équipements de l'installation industrielle. Afin d'assurer son optimum en termes de dimensionnement, de longévité et de coût, plusieurs critères sont à considérer (dont taille, corrosion, encrassement et nombre de cycles). Il sera important d'utiliser autant que possible des composants industriels déjà existants.

Par ailleurs, l'étape d'industrialisation et de commercialisation du procédé devra permettre de « simplifier » le fonctionnement des installations (notamment pour déterminer les plages de bon fonctionnement selon le couple température et pression choisi¹⁶) afin de faciliter leur prise en mains

¹³ D'après une étude de marché menée par le PSI, il a été estimé que les boues de 80% des sites d'assainissement d'eau en Suisse pourraient être traitées avec une installation traitant un débit de biomasse brute entre 3 et 6 t/h.

¹⁴ La composition des sels minéraux récupérés dépend de l'intrant traité. L'eau du procédé peut être recirculée (en cas de besoin de dilution de l'intrant) ou réutilisée pour d'autres usages après d'éventuels traitements (en fonction de sa composition, déterminée par les intrants, et de la technologie de gazéification hydrothermale retenue).

¹⁵ La montée en taille des installations facilite le travail de stabilisation des intrants dans la mesure où un débit suffisant rend possible le traitement d'intrants comportant 20% de matière sèche qui apportent beaucoup de carbone dans la réaction et produisent un gaz de synthèse plus fortement chargé en méthane.

¹⁶ L'objectif étant d'atteindre un fonctionnement de l'installation d'environ 8000 h/an.

par les clients, de minimiser le coût d'exploitation-maintenance tout en garantissant un niveau de sécurité optimal et de limiter l'investissement global avec une production en série des modules.

Ces mesures d'optimisation technique et économique permettront d'améliorer la rentabilité des projets en diminuant les coûts du traitement des intrants et de la production du gaz.

Deux options envisageables peuvent augmenter davantage le taux de méthane dans le gaz de synthèse final et potentiellement améliorer la rentabilité économique des installations :

- ▶ L'injection de l'hydrogène en amont du gazéifieur permet d'augmenter la production de méthane en améliorant la réaction avec le gaz carbonique (effet de méthanation).. Ce surplus externe d'hydrogène issu d'un procédé industriel (H_2 fatal) ou d'une installation Power-to-Gas dans le procédé permet d'augmenter le taux de méthane jusqu'à des valeurs proches de 85 à 90 %¹⁷ et de baisser dans le même temps les taux de gaz carbonique et d'hydrogène résiduels dans le gaz final.
- ▶ L'ajout d'une étape de méthanation (biologique ou chimique) en aval du procédé de gazéification hydrothermale permet de faire réagir le gaz carbonique et l'hydrogène résiduels dans le gaz de synthèse pour produire davantage de méthane et augmenter ainsi le taux global de sa production (jusqu'à environ 70%). Cette solution, alternative à l'injection d' H_2 en amont du gazéifieur, n'est pertinente que si la proportion d' H_2 et de CO_2 dans le gaz de synthèse est relativement élevée et s'il y a davantage de H_2 que de CO_2 . Ceci est généralement le cas dans les procédés à plus haute température (600 à 700 °C) sans catalyse.

¹⁷ Le PSI a effectué des premiers essais concluants.

3. La gazéification hydrothermale a un potentiel significatif de production de gaz additionnel

Pour rendre rentables les installations de production en gaz renouvelable, les intrants liquides à faible taux de matière sèche mais contenant de la matière organique doivent être convertis avec des taux de conversion carbone les plus élevés possibles.

La gazéification hydrothermale comporte l'avantage d'atteindre des taux de conversion en carbone de l'ordre de 90%¹⁸, ce qui est nettement supérieur à ceux atteints par la méthanisation (en général entre 40 et 70%). **La technologie représente donc une alternative prometteuse pour mieux valoriser des biomasses liquides contenant une quantité minimale de carbone et pour lesquelles on observe un plafonnement du pouvoir méthanogène avec d'autres technologies de conversion.** Par exemple, le carbone des lisiers bovins, porcins et de volailles, seulement partiellement accessible à la conversion par méthanisation, pourrait être valorisé plus significativement par gazéification hydrothermale. Son haut taux de conversion permettrait à des unités d'élevage de générer d'importants volumes de gaz additionnels (jusqu'à +30% de gaz produit par exemple pour les lisiers bovins et porcins en comparaison à la méthanisation). De plus, tous les composants fertilisants (N, P, K notamment) et l'eau résiduelle claire riche en ammonium peuvent être récupérés et valorisés en tant qu'engrais à haute valeur ajoutée.

Dans l'hypothèse où la gazéification hydrothermale traiterait 20% des lisiers et des fumiers disponibles en France métropolitaine (bovins, porcins et avicoles), elle pourrait produire annuellement environ 35 TWh_{PCS} de gaz renouvelable¹⁹ en plus de ce qui a été estimé par l'ADEME pour la méthanisation des déjections d'élevage à horizon 2050.

La gazéification hydrothermale apparaît également comme une alternative pertinente pour des intrants comme des digestats issus d'installations de méthanisation agricole ou de STEP pour lesquels aucune technologie de conversion en gaz renouvelable n'est aujourd'hui économiquement viable. Le potentiel de la filière des digestats est significatif au vu de la forte croissance attendue dans les années à venir des volumes produits sur le sol français. Cette croissance est liée aux objectifs ambitieux de la France en matière de gaz renouvelable. La loi relative à la transition énergétique pour une croissance verte de 2015 (LTECV) fixe en effet pour 2030 un objectif de 10% de la consommation française de gaz (hors production électrique et carburant) sous forme de gaz renouvelable injecté dans les réseaux en 2030, équivalent à 30 TWh_{PCS} de production de gaz renouvelable. Cette production issue principalement (~ 90%) de procédés de méthanisation générera des volumes conséquents de digestats estimés à environ 120 millions de tonnes en 2030 (contre environ 12 millions de tonnes²⁰ en 2018).

La gestion de ces volumes est un enjeu important pour le développement de la filière méthanisation. En effet, une pression s'exerce déjà sur les surfaces d'épandage de certaines régions françaises du fait des capacités limitées des zones agricoles (exemple : régions PACA et Bretagne) à accepter un retour au sol. Ces limites sont parfois confirmées par des décisions administratives nationales (en Suisse par exemple) ou européennes (à venir) qui restreignent les volumes de boues ou de digestats autorisés à l'épandage. D'une part, **la gazéification hydrothermale pourrait offrir une voie de traitement pertinente pour ces digestats** et ainsi contribuer à l'essor de la méthanisation dans ces régions sous tension. D'autre part, **la gazéification hydrothermale peut être une alternative à la méthanisation pour le traitement direct de biomasse agricole liquide ou des boues brutes**

¹⁸ Des taux de conversion carbone allant jusqu'à 99% ont déjà été atteints pour certains intrants

¹⁹ Selon l'hypothèse d'une conversion de 90% du carbone dans le procédé et d'une part de 50% de CH₄ dans le gaz final.

²⁰ Ce chiffre intègre aussi les digestats issus d'installations de cogénération fonctionnant au biogaz

présentes sur ces territoires, sans impacter négativement la capacité d'un retour au sol des composants fertilisants.

Dans une vision prospective où la gazéification hydrothermale traiterait 30 % des volumes de digestats en 2030 et 40% en 2050, cela correspondrait à une production annuelle additionnelle de gaz renouvelable estimée à 22 TWh_{PCS} en 2030 et à presque 100 TWh_{PCS} en 2050²¹.

En plus du traitement des digestats, la gazéification hydrothermale permettrait également de produire des volumes de gaz additionnels en valorisant d'autres intrants trop humides ou pas assez riches en matière organique pour être traités par la méthanisation ou la pyrogazéification. En effet, l'utilisation de l'eau dans son état supercritique facilite le traitement d'intrants disposant de faibles taux de matière sèche. C'est ainsi que la gazéification hydrothermale se présente également comme une technologie prometteuse pour traiter et valoriser au mieux des effluents organiques industriels à faible taux de matière sèche. Enfin, à court-moyen terme, elle offre une solution pour des résidus de biomasse algale (macro- ou microalgues) ayant peu ou plus de valeur ajoutée à l'issue d'extractions de molécules à haute et moyenne valeur ajoutée, mais pouvant être encore convertis en méthane.

Une synthèse des estimations des potentiels de production de méthane par gazéification hydrothermale à partir des gisements d'intrants les plus pertinents en France métropolitaine est présentée ci-dessous (Tableau 2) à titre prospectif. Le calcul s'appuie sur des hypothèses d'un taux de conversion du carbone de 90% et un taux moyen de CH₄ dans le gaz produit de 50%. Par ailleurs, un taux de mobilisation prospectif de 20% a été fixé pour les effluents d'élevage étant donné le niveau actuel de valorisation, de 40% pour les boues de STEP au vu de l'intérêt technico-économique élevé que pourrait représenter la gazéification hydrothermale pour la filière et un taux progressif allant de 20% à 40% entre aujourd'hui et 2050 pour les digestats de méthanisation²².

	Typologie de déchets	Tonnage brut annuel (kt)	Hypothèse de mobilisation	Production théorique annuelle de méthane renouvelable (TWh _{PCS})
Effluents d'élevage	Lisiers d'élevage (bovin, porcin, volailles)	48 000	20%	4,7
	Fumier d'élevage (bovin, porcin, volailles)	119 000	20%	29,3
Boues de STEP	Boues non digérées de stations urbaines d'épuration	19 000	40%	3,1
	Digestats de méthanisation en 2018 (incl. boues digérées de STEP)	12 000	20%	1,5
Digestats de méthanisation	Digestats de méthanisation à horizon 2030 (incl. boues digérées de STEP)	120 000	30%	22,1
	Digestats de méthanisation à horizon 2050 (incl. boues digérées de STEP)	400 000	40%	98,4

Tableau 2 Potentiel de production de méthane renouvelable par gazéification hydrothermale

²¹ En conservant l'hypothèse d'une conversion de 90% du carbone dans le procédé et d'une part de 50% de CH₄ dans le gaz final.

²² L'hypothèse faite ici est que le taux de valorisation par épandage sera d'autant plus limité en 2050, soit par manque de surfaces agricoles disponibles localement, soit par des restrictions ou interdictions réglementaires.

Selon les hypothèses de mobilisation présentées précédemment, le seul traitement des effluents d'élevage, des boues de STEP et des digestats de méthanisation produirait ainsi à horizon 2050 un volume annuel de gaz renouvelable compris entre 58 et 138 TWh_{PCS}²³.

La gazéification hydrothermale offre donc des perspectives significatives de production de gaz renouvelable à partir des effluents d'élevage, des boues de station d'épuration municipales et industrielles ainsi que des digestats de méthanisation. Elle pourrait également produire des volumes conséquents de méthane à partir des résidus liquides agricoles et des déchets organiques de nombreuses industries dont en particulier des secteurs agroalimentaires, papetiers et pharmaceutiques, particulièrement présents en France.

²³ La borne minimale correspondant à une production plus restreinte sur les digestats de méthanisation (correspondant au potentiel tel que calculé à horizon 2030)

4. Conclusion

La gazéification hydrothermale offre une possibilité de conversion de nombreux types de biomasses humides (digestats de méthanisation, effluents d'élevage, résidus liquides agricoles, boues de stations d'épuration, effluents des industries agroalimentaires, effluents industriels) en un gaz de synthèse contenant principalement du méthane. Elle présente l'avantage de pouvoir être exploitée selon des modèles d'affaires variés dont les modes de rémunération peuvent répondre à plusieurs besoins économiques et contraintes locales. La gazéification hydrothermale permet non seulement de produire du méthane valorisable énergétiquement par injection ou consommation directe, d'extraire les sels minéraux des biomasses converties pour une utilisation en tant que fertilisants mais aussi de fournir des services de traitement de déchets organiques utiles aux collectivités locales et à un certain nombre d'acteurs industriels.

En fonction de l'intrant et de l'écosystème local, la gazéification hydrothermale s'inscrit donc comme technologie complémentaire ou alternative au schéma industriel de la méthanisation ou de la pyrogazéification. En effet, elle apparaît comme particulièrement pertinente pour valoriser les digestats en aval des unités de méthanisation agricole et de STEP et pourrait jouer un rôle essentiel dans la gestion des importants volumes générés par le développement de cette filière. Elle peut même devenir une alternative à la méthanisation pour les régions qui sont privées de valorisations pour les digestats (par exemple parce qu'elle manque de surface d'épandage) dans lesquelles le développement de la méthanisation est compliqué. La gazéification hydrothermale se présente également comme une voie de traitement possible dans le cas des biomasses agricoles liquides très carbonées tels les effluents d'élevage, permettant de générer une production de gaz renouvelable importante. En France métropolitaine, pour les seuls gisements des effluents d'élevage, des boues de stations d'épuration et des digestats de méthanisation, le potentiel de production annuelle théorique de méthane renouvelable via la gazéification hydrothermale est estimé à l'horizon 2050 à au moins 58 TWh, pouvant monter jusqu'à 138 TWh²⁴.

La technologie est encore en phase de développement mais a déjà dépassé le stade de recherche pure (le cœur du procédé est maîtrisé). Elle apparaît comme prometteuse avec plusieurs acteurs européens exploitant des projets pilote et de démonstration (à des niveaux de TRL jusqu'à 7) avec des approches visant l'industrialisation des premiers produits à horizon 2023/2025.

Étant donné le potentiel élevé de production de gaz par gazéification hydrothermale, GRTgaz soutient l'émergence de cette filière. GRTgaz s'implique notamment auprès des futurs utilisateurs potentiels pour mieux qualifier leurs besoins, appuie les industriels et les équipementiers dans leurs projets pilote et de démonstration, et travaille en amont auprès des investisseurs pour atteindre l'objectif de commercialisation de la technologie à court terme. GRTgaz s'implique également dans les études économiques et environnementales générales pour orienter les politiques publiques et les décideurs et tirer le meilleur parti de la gazéification hydrothermale en complément des autres voies de valorisations des effluents et des déchets en gaz renouvelables.

²⁴ Estimations réalisées en prenant en compte les gisements des déchets organiques en France métropolitaine et les spécificités de la technologie de gazéification hydrothermale (pour plus de détails, se référer à la Partie 3.)



GRTgaz est l'un des leaders européens du transport de gaz naturel et un expert mondial des réseaux et systèmes de transport gazier. En France, GRTgaz emploie 3 000 collaborateurs, possède et exploite plus de 32 500 km de canalisations enterrées et 26 stations de compression pour acheminer le gaz entre fournisseurs et consommateurs (distributeurs ou industriels directement raccordés au réseau de transport). GRTgaz assure des missions de service public visant à garantir la continuité d'acheminement du gaz et propose aux utilisateurs ou futurs utilisateurs des prestations d'accès à son réseau de transport de gaz. Acteur de la transition énergétique, GRTgaz investit dans des solutions innovantes pour adapter son réseau et concilier compétitivité, sécurité d'approvisionnement et préservation de l'environnement



ENEA est une société de conseil en stratégie contribuant à la mise en œuvre de la transition énergétique et environnementale. Basée à Paris, à Melbourne et à Hong Kong, ENEA Consulting fédère plus de 60 consultants experts et passionnés des nouveaux marchés, des nouvelles technologies et des nouveaux businessmodels offerts par la transition énergétique et environnementale. Depuis 2007, ENEA Consulting conseille et accompagne les acteurs industriels, les institutionnels et les acteurs de la finance sur l'ensemble des filières et des marchés de la transition énergétique et environnementale.

Structurée autour d'un modèle à fort impact sociétal, ENEA Consulting accompagne à travers un programme dédié, des entrepreneurs sociaux à accélérer leur développement sur les marchés de l'accès à l'énergie dans le monde