

GAZÉIFI- CATION HYDRO- THERMALE

L I V R E B L A N C



GAZÉIFICATION
HYDROTHERMALE
VALORISER LES DÉCHETS ORGANIQUES

GAZÉIFICATION HYDROTHERMALE

LIVRE BLANC

Remerciements

De sincères et chaleureux remerciements aux membres du Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale ayant participé à la révision du présent document, leurs apports furent précieux pour faire de ce livre blanc un document de référence sur la Gazéification Hydrothermale !

Auteurs	Robert Muhlke (GRTgaz) Jean-Baptiste Castaing (Cerema) Mathieu Morel (Sia Partners) Violette Donat (Yélé Consulting)
Contributeurs	Leroux&Lotz Technologies VINCI Environnement TreaTech CEA AFRY VEOLIA SUEZ
Mise en page	Jean-Baptiste Castaing (Cerema)
Impression	REPROGRAPHIE TALLOT

GAZÉIFICATION HYDROTHERMALE LIVRE BLANC

Groupe de Travail National Gazéification Hydrothermale

Janvier 2023

Préambule

Ce livre blanc a été élaboré par le Groupe de Travail national Gazéification Hydrothermale dans l'objectif de présenter

- les principaux caractéristiques et atouts de ce nouveau procédé innovant de traitement et de valorisation des déchets organiques,
- un état de l'art des avancées technologiques de la Gazéification Hydrothermale pour son industrialisation,
- les gisements adressables à la technologie et son potentiel de production de gaz injectable dans le réseau,
- les enjeux environnementaux et économiques associés.

In fine, ce document a pour vocation d'apporter la base de connaissances nécessaire à l'État français, aux institutions, porteurs de projets, collectivités territoriales et locales, bureaux d'étude et de conseils et à l'ensemble des autres parties prenantes impactées par les enjeux d'énergie, de déchets, de décarbonation et de développement durable. L'objectif est de réussir à bâtir un cadre de soutien adapté à l'émergence de cette nouvelle filière en France, à l'image d'autres filières de production de gaz renouvelable et bas-carbone existantes.

Contexte d'écriture du Livre Blanc

Face à l'urgence climatique et à l'impérieuse nécessité d'opérer une transition écologique et énergétique dans les territoires, la France doit aujourd'hui renforcer **sa souveraineté énergétique tout en conciliant respect de l'environnement, développement économique et limitation maximale du changement climatique**. Aussi, le pays doit prendre en compte **l'ensemble de ses possibilités de production d'énergies renouvelables** pour développer un mix énergétique équilibré et durable tout en limitant les investissements pour les acteurs économiques. La place des gaz renouvelable et bas-carbone dans ce mix est encore incertaine alors que ce vecteur énergétique peut être un moyen **rapide à mettre en œuvre, efficace et économique** permettant de répondre aux besoins des territoires dans leurs efforts de transition, tant sur le plan **des politiques énergétique, écologique, agroalimentaire que celui d'une meilleure valorisation des déchets**.

Une telle démarche nécessite de disposer de solutions adaptées et rapidement déployables. Les récentes avancées techniques et scientifiques rendent possibles à court terme de mettre à disposition des territoires et des industriels de nouveaux outils permettant de **répondre efficacement aux enjeux nationaux**. Ainsi, la **Gazéification Hydrothermale apparaît comme étant une des technologies les plus efficaces pour la valorisation de nombreux déchets organiques et la production de gaz renouvelable et bas-carbone tout en permettant la destruction des micropolluants, la valorisation de minéraux d'intérêt agricole, de métaux et la préservation de la ressource eau**. Les premières études indiquent également un potentiel important de la Gazéification Hydrothermale en lien avec les **nombreuses externalités positives attendues et son intégration facilitée dans des boucles d'économie circulaire**. Par ailleurs, du fait de ses capacités en matière de dépollution et de maîtrise des flux sortants, la technologie permet de **garantir un maximum de sécurité sur les plans sanitaires et environnementaux**.

Posant une première pierre pour structurer et aider le développement de la filière en France, ce premier livre blanc a été élaboré pour permettre de partager avec les pouvoirs publics, collectivités locales et territoriales, industriels, agriculteurs et l'ensemble des acteurs des domaines de l'énergie, des déchets et du traitement d'eau, les connaissances élémentaires nécessaires pour appréhender au mieux la Gazéification Hydrothermale dans son ensemble.

Présentation du Groupe de Travail

Le Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale, auteur de ce livre, a été créé en mars 2021. Fin 2022, il constitue avec une cinquantaine d'acteurs publics et privés la filière française en couvrant toute la chaîne de valeur de la technologie. Son objectif est de développer, structurer cette filière innovante et de faciliter son implantation industrielle dans le paysage énergétique français. Dans cette optique, deux premiers industriels français, Leroux et Lotz Technologies et VINCI Environnement, se sont positionnés fin 2021 pour porter la technologie de Gazéification Hydrothermale et accompagner son industrialisation dans les territoires français puis à l'étranger.

Objectifs du Livre Blanc

Les objectifs centraux de ce livre blanc sont :

- d'intégrer la Gazéification Hydrothermale au sein de la Stratégie Française Énergie Climat (SNBC, PPE), aidant les pouvoirs publics à établir une base réglementaire propice au développement industriel de la Gazéification Hydrothermale en France ;
- d'appuyer la mise en place par les pouvoirs publics d'un environnement économique (mécanismes de soutien) facilitant l'émergence de la filière et le développement de premiers projets industriels dès 2026 ;
- de mettre en lumière une technologie de traitement et surtout de valorisation de déchets organiques contenant ou étant mélangeables à de l'eau en :
 - gaz renouvelable et bas-carbone injectables dans le réseau ;
 - nombreux co-produits (minéraux, métaux, azote et eau) qui sont récupérés et ainsi préservés comme ressources pouvant être amenés à une nouvelle valorisation au sein des territoires ;
- de souligner le rôle de la Gazéification Hydrothermale dans la transition énergétique et écologique tout en renforçant l'autonomie énergétique et la préservation des ressources dans les territoires ;
- de mettre en exergue les externalités positives de la technologie, notamment environnementales (dépollution, décarbonation...) ayant le potentiel de générer à terme des effets macro- et micro-économiques substantiels ;
- d'acculturer et faire connaître la technologie aux gestionnaires de déchets urbains, agricoles et industriels, porteurs de projets et scientifiques afin que la Gazéification Hydrothermale soit systématiquement prise en compte dans leurs choix possibles pour améliorer la valorisation de leurs déchets.

Qu'est-ce que la Gazéification Hydrothermale ?



Vidéo pédagogique sur la Gazéification Hydrothermale

www.youtube.com

tapez *Gazéification hydrothermale (version française)*
ou *hydrothermal gasification (version anglaise)*

Résumé exécutif

Le présent document est le résultat d'un **travail collectif impulsé par le Groupe de Travail national «Gazéification Hydrothermale» (GT Gazéification Hydrothermale) visant la mise en place d'une filière industrielle française pour la technologie à horizon 2025.** Il propose des **orientations stratégiques de filière en termes techniques, économique, et environnementaux** tout en fédérant un ensemble de collectivités territoriales, d'industriels et d'agriculteurs français s'y rattachant : gestion et traitement des déchets organiques et d'eaux usées, filières de production industrielle (agroalimentaire, manufacturière, production d'énergie, production de fertilisants...) et agricole.

Ce groupe de travail national a été officiellement lancé en mars 2021 lors du salon Bio360 à Nantes, donnant à cette solution technologique un **rayonnement important** au sein des filières de production de gaz renouvelable et bas-carbone et des filières du traitement et de la valorisation des déchets. Démarré à 27 membres, le collectif d'acteurs composant le groupe de travail – réunissant fin 2022 presque 50 membres – cherche à faire émerger et industrialiser la Gazéification Hydrothermale en France. **Il couvre aujourd'hui une majeure partie de la chaîne de valeur** et comprend : des développeurs de la technologies, des producteurs de gaz renouvelable et bas-carbone des sociétés de traitements et de valorisation de déchets, des utilisateurs, des équipementiers, des associations professionnelles, des industriels, des bureaux d'études et de conseil, des gestionnaires de réseaux de gaz, des laboratoires de recherche et des collectivités locales.

Vous trouverez la **liste des membres** ci-après (décembre 2022) : GRTgaz, GRDF, AFG, AFRY, AMORCE, Agence de l'Eau Loire-Bretagne, Arol Energy, Artelia Industrie, Bioeconomy For Change, BiogazVallée, Cerema Ouest, Clever Values, CARENE (Agglomération de Saint-Nazaire), Chambre d'Agriculture Pays de la Loire, CEA Liten, Engie Lab, DG Skid, Gazflo, IMT Mines Albi, Inéris, Inovertis, Khimod, Leroux&Lotz Technologies, Naldeo, Naskeo, Nevezus, N01zet, Prodeval, GreenMac, Banzo, GreenConsult, S3D, Saur, Suez, SIEL (Territoire d'Energie Loire), SETEC, SER, Sofresid, Tereos, Tenerrdis, Top Industrie, TreaTech, Voltigital, Veolia, VINCI Environnement, Yélé Consulting.

L'objectif de ce collectif d'acteurs est d'accompagner la **structuration industrielle de la filière à l'échelle française d'ici 2025** en la portant également, en collaboration avec des acteurs étrangers, au niveau européen. Plus largement le Groupe de Travail se mobilise pour **contribuer aux objectifs de la transition énergétique, de la transition écologique et de l'économie circulaire.**

Executive summary

This document is the result of a **collective work initiated by the National Working Group “Hydrothermal Gasification” aimed at setting up a French industrial sector by 2025**. It puts forward **strategic directions for this sector in regards to economic, technical and environmental aspects** by bringing together a group of local authorities, industries and French agricultural producers. Its activities consist of waste and wastewater management and treatment companies, industrial production sectors (food industry, manufacturing, energy production, fertilizer industry, etc.) and the agricultural sector.

It was officially launched in March 2021 during the Bio360 conference in Nantes, giving this technical solution a **significant influence** in the domain of renewable and low-carbon gas production, waste treatment and recovery. From 27 members to over 50 members since 2022, the collective of actors composing the working group supports the emergence and industrialization of Hydrothermal Gasification. Today, **it covers a most of the value chain**: developers, producers of renewable and low-carbon gases, waste treatment and recovery companies, users, equipment manufacturers, associations, industrial actors, engineering consultancies, gas network managers, research laboratories and local authorities.

The list of members is as follows (updated on september 30, 2022): GRTgaz, GRDF, AFG, AFRY, CEA Liten, Engie Lab, AMORCE, Agence de l'Eau Loire-Bretagne, Artelia Industrie, Bioeconomy For Change, Cerema Ouest, Clever Values, Inéris, CARENE (Agglomération de Saint-Nazaire), Chambre d'Agriculture Pays de la Loire, DG Skid, Gazflo, Leroux&Lotz Technologies, IMT Mines Albi, Inovertis, Khimod, Naldeo, Naskeo, Nevezus, N01zet, Prodeval, Arol Energy, GreenMac, Banzo, GreenConsult, S3D, Saur, Suez, SIEL (Territoire d'Energie Loire), SER, Sofresid, Tereos, Tenerrdis, Top Industrie, TreaTech, Voltigital, Veolia, VINCI Environnement, Yélé Consulting.

The main goal of this working group is to support **the organisation of the sector on a national level by 2025**, and growing it to a European level with the collaboration of foreign actors. In general, the working group aims to **contribute to the objectives of the energetic transition, the ecological transition and the circular economy**.

01

GAZÉIFICATION HYDROTHERMALE : GÉNÉRALITÉS ET CONTEXTE

- 1.1 Une technologie de traitement et de valorisation de déchets produisant des gaz renouvelable et bas-carbone 19
- 1.2 Contexte et enjeux environnementaux et énergétiques 24
- 1.3 L'état de développement de la technologie en Europe 25
- 1.4 État de développement de la filière Gazéification Hydrothermale française 26

02

PRÉSENTATION DE LA GAZÉIFICATION HYDROTHERMALE

- 2.1 Introduction à la technologie 31
- 2.2 Le prétraitement des intrants 33
- 2.3 Mise sous pression de l'intrant et montée en température 33
- 2.4 Le séparateur de sels 34
- 2.5 Les deux grandes familles du procédé de Gazéification Hydrothermale 35
- 2.6 La séparation des flux gazeux, liquides et de l'azote en aval du gazéifieur 38
- 2.7 Les avantages de la Gazéification Hydrothermale 40

03

POTENTIEL DE PRODUCTION DE GAZ RENOUVELABLE ET BAS-CARBONE

- 3.1 La Gazéification Hydrothermale, une solution de valorisation pour certains déchets 45
- 3.2 Un potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone d'au moins 63 TWh en 2050 47

04

MATURITÉ DE LA TECHNOLOGIE ET PANORAMA DES PROJETS EUROPÉENS

- 4.1 Les développeurs de la technologie Gazéification Hydrothermale en Europe 53
- 4.2 Les développeurs européens (hors France) 53
- 4.3 Les développeurs privés 58
- 4.4 Les développeurs français 60
- 4.5 Les principaux défis spécifiques à relever pour réussir le passage à l'échelle industrielle 63

05

UNE TECHNOLOGIE AU CŒUR DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

- 5.1 Un modèle d'économie circulaire au profit des territoires 69
- 5.2 Des voies de valorisation intéressantes aux impacts positifs 73

06

MODÈLE D'AFFAIRE DE LA TECHNOLOGIE ET POTENTIEL ÉCONOMIQUE

- 6.1 Évaluation des coûts CAPEX et OPEX de la technologie 80
- 6.2 Un modèle d'affaire évolutif dans le temps 84
- 6.3 Avec des perspectives de développement dynamiques 88

07

CONCLUSION & PERSPECTIVES

ANNEXES P.95

LISTE DES FIGURES P.101

LISTE DES TABLEAUX P.102

RÉFÉRENCES P.103

LISTE DES ABRÉVIATIONS P.105

01

GAZÉIFICATION HYDROTHERMALE : GÉNÉRALITÉS ET CONTEXTE

1.1	Une technologie de traitement et de valorisation de déchets produisant des gaz renouvelable et bas-carbone	19
1.1.1	Principe général	19
1.1.2	La Gazéification Hydrothermale : traiter et valoriser au mieux les déchets	20
1.1.3	Positionnement de la Gazéification Hydrothermale face aux autres filières de production de gaz	21
1.1.4	Une technologie ancrée dans l'économie circulaire	22
1.2	Contexte et enjeux environnementaux et énergétiques	24
1.2.1	Lutte contre le changement climatique et développement de l'économie circulaire	24
1.2.2	La production de gaz renouvelable et bas-carbone	24
1.3	L'état de développement de la technologie en Europe	25
1.4	État de développement de la filière Gazéification Hydrothermale française	26
1.4.1	La Gazéification Hydrothermale en France	26
1.4.2	Des premières initiatives concrètes de la filière...	27
1.4.3	... à compléter avec un cadre de soutien fort de la part des pouvoirs publics	27

1.1 Une technologie de traitement et de valorisation de déchets produisant des gaz renouvelable et bas-carbone

1.1.1 Principe général

La Gazéification Hydrothermale est un procédé de conversion thermochimique à haute pression (210 à 350 bar) et à haute température (360 à 700 °C) s'adressant tout particulièrement aux déchets organiques contenant ou étant mélangeables à de l'eau. Cette dernière est le réactif indispensable pour créer les conditions opératoires spécifiques et nécessaires à la technologie. Elles permettent autant, en base, la production de gaz (méthane et dihydrogène) que la destruction de polluants et pathogènes (virus, bactéries, organismes pathogènes, résidus médicamenteux, etc.) tout en préservant la ressource eau et les composants minéraux valorisables (métaux, phosphore, azote, etc.) contenus dans l'intrant et en limitant les déchets ultimes (exemple de certains métaux lourds) au strict minimum.

Parmi les déchets organiques visés, la Gazéification Hydrothermale cible tout d'abord ceux d'origine biogénique (certains pouvant être mélangés ou pollués à des déchets d'origine fossile^a), contenant en base de l'eau comme de :

- **Nombreux déchets et effluents agricoles** dont les effluents d'élevages ;

- **Nombreux déchets et effluents des industries agroalimentaires** ;
- **Boues issues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines et industrielles** ;
- **Boues de dragage et curage** ;
- **Nombreux déchets organiques et effluents urbains** issus de déchets ménagers (fraction organique), d'activités tertiaires (restauration...) et des biodéchets ;
- Les **digestats** issus d'installations de méthanisation en cas de contraintes d'épandage.

Mais aussi bon nombre de déchets d'origine fossile (tels que les plastiques plus ou moins souillés, les solvants, huiles, déchets d'industries chimiques et pétrochimiques...) et dont certains peuvent être solides et secs, souvent issus d'activités industrielles, non recyclés ou recyclables en l'état et finissant de ce fait dans des installations d'incinération, avec ou sans valorisation d'énergie, voire en enfouissement ou même en décharge avec les risques de pollution (air, sol, eau) associés.

^a Exemple : emballages de plastique ou d'autres déchets chimiques d'origine fossile ou d'hydrocarbures

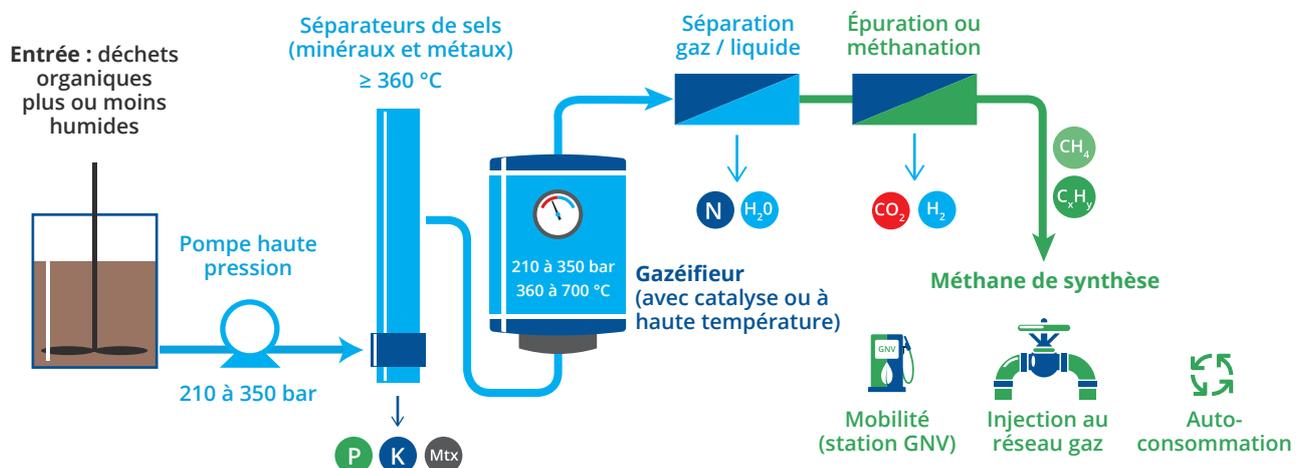


Figure 1 : Schéma de procédé simplifié de la Gazéification Hydrothermale (Source : GRTgaz/Cerema).

1.1.2 La Gazéification Hydrothermale : traiter et valoriser au mieux les déchets

Dans le respect de la hiérarchie des modes de traitement et valorisation des déchets, la Gazéification Hydrothermale vise les déchets organiques, humides voire secs non recyclables, non valorisables et/ou pollués orientés aujourd'hui vers une destruction par de l'incinération ou via un institut de stockage des déchets.

La Gazéification Hydrothermale permet la conversion thermo-chimique de la quasi-totalité du

carbone par la formation de co-produits à des fins de valorisation énergétique (biométhane, dihydrogène) et de récupération et revalorisation des matières (eau, azote, minéraux, métaux) contenus dans l'intrant.

La figure suivante présente le positionnement de la Gazéification Hydrothermale pour le traitement des déchets organiques, principalement humides :

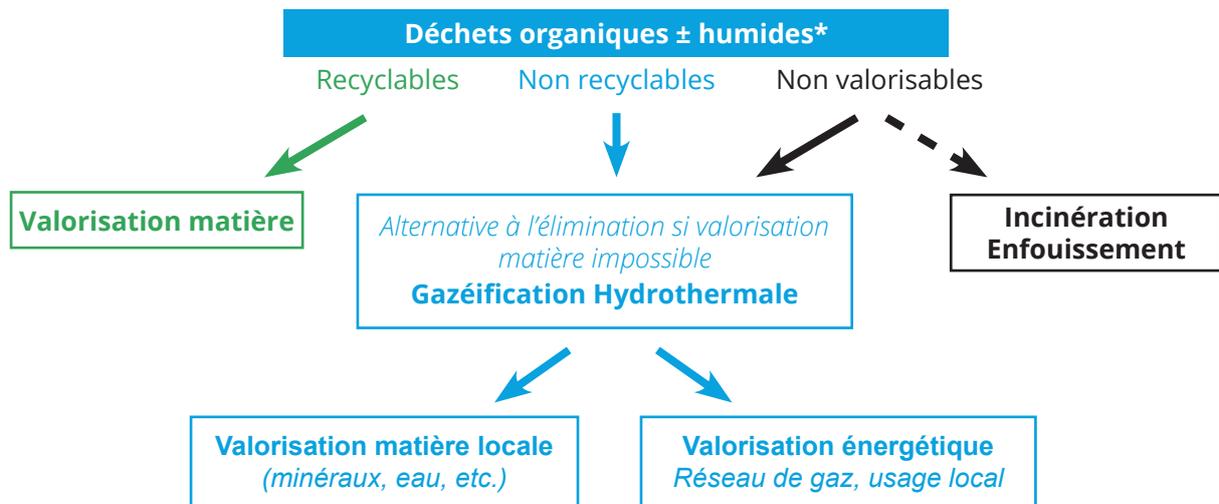


Figure 2 : Positionnement de la Gazéification Hydrothermale pour le traitement des déchets organiques ± humides (source : Cerema / GRTgaz). (* Déchets contenant de l'eau ou secs mais permettant un apport d'eau).

a) La Gazéification Hydrothermale évite l'incinération

Malgré leurs taux d'humidité parfois relativement élevés, un grand nombre de déchets organiques sont aujourd'hui préalablement séchés, générant une consommation d'énergie importante, avant d'être incinérés. Cette dernière étape se réalisant par des incinérateurs, avec ou sans valorisation énergétique (UIOM/UVE), ou des fours haute température (cimenteries, production de chaux...) se trouvant en France et à l'étranger.

Les bilans énergétiques globaux de ces traitements sont au mieux nuls et sinon négatifs avec un coût environnemental élevé ! Certains finissent même enfouis. Parmi eux, on retrouve par exemple :

- Des boues de STEU urbaines (26 % incinérée d'après AMORCE [1], soit 286 000 tonnes MS^a/an),

- Des boues industrielles classées comme « dangereuses »,
- Des déchets d'animaux (toutes catégories) issus d'abattoirs dont certains doivent être traités thermiquement en amont (production de farines animales), un procédé évitable et facilement substituable par la Gazéification Hydrothermale tout en augmentant nettement la valorisation globale de ce groupe d'intrant,
- La Fraction Organique des Ordures Ménagères (FOOM) issue du Tri Mécano Biologique (TMB) inapte à la valorisation en compostage et au-delà en épandage car non conforme,
- Les déchets spéciaux provenant de différents secteurs industriels (solvants, résidus de production, peinture, huile souillée, etc.) dont un certain nombre est, au moins en partie, d'origine fossile,

^a MS=Matière Sèche

- **Tout autre déchet humide qui ne respecte pas les critères d'innocuité agronomique permettant un retour au sol (présence élevée d'éléments-traces-métalliques, de micro plastiques^a, de pathogènes...).**

Ce recours à l'incinération (combustion) avec ou sans valorisation énergétique est problématique à plusieurs niveaux et peut être évité par la Gazéification Hydrothermale car :

- L'intrant humide doit être déshydraté et séché en amont de sa combustion **consommant donc une part non négligeable de l'énergie qu'il apporte à la combustion [2]** ;
- La valorisation de la chaleur est très variable selon la saison et **elle n'est stockable qu'en**

quantités limitées, à l'inverse du gaz renouvelable et bas-carbone qui l'est facilement dans les réseaux de gaz et ceci pendant toute l'année ;

- La combustion à très haute température (> 1000 °C) **génère des gaz très polluants et toxiques nécessitant des traitements très onéreux pour minimiser l'impact sur l'environnement ;**
- **L'incinération détruit la majeure partie des ressources contenues dans l'intrant** et rend leur valorisation quasi impossible.
- **Le coût de traitement par incinération est très élevé**, pouvant aller à plusieurs centaines d'euros par tonne.

b) La Gazéification Hydrothermale évite l'enfouissement et la mise en décharge

La Gazéification Hydrothermale a la capacité de traiter et valoriser, jusqu'à une certaine limite et en fonction du type de polluants, des déchets organiques plus ou moins pollués. Cet atout lui permet de se positionner comme une alternative vertueuse pour un certain nombre de déchets ultimes^b finissant aujourd'hui enfouis en Installation de Stockage des Déchets (ISD) faute de meilleures solutions. Dans le cas des décharges, bien que condamnées à disparaître, la

technologie pourrait également contribuer à réorienter certains de leurs déchets et les amener à une valorisation ultime.

Parallèlement, ces réorientations pourraient avoir un impact positif en contribuant à baisser la quantité de décharges sauvages et ainsi l'impact sur l'environnement.

1.1.3 Positionnement de la Gazéification Hydrothermale face aux autres filières de production de gaz

La **Gazéification Hydrothermale** se place comme une nouvelle voie de traitement et de valorisation de nombreux déchets organiques humides ou mélangeables à de l'eau, en tant que **solution complémentaire ou alternative** en fonction du type de déchets, de leur origine biogénique ou fossile et de leur composition (mêlé ou pas, présence de polluants, de pathogènes, de micro-organismes) (Tableau 1).

Elle se présente comme une alternative aux autres technologies de conversion en gaz renouvelable et bas-carbone en traitant le déchet ou le mélange de déchets organiques plus ou moins humides. La Gazéification Hydrothermale réduit drastiquement la part des déchets ultimes (supérieur d'un

facteur 15 à 20 par rapport à la quantité initiale) tout en produisant un gaz brut, appelé gaz de synthèse, riche en méthane et hydrogène :

- ▶ **Gazéification Hydrothermale avec catalyse** : 60 à 70 % CH₄ + 5 à 10 % H₂
- ▶ **Gazéification Hydrothermale à haute température** : 30 à 40 % CH₄ + 25 à 50 % H₂ + jusqu'à 12 % de C_xH_y^c

La Gazéification Hydrothermale peut également s'intégrer en aval des autres filières, par exemple d'une installation :

- **de méthanisation** : en sortie d'un méthaniseur, elle est capable de valoriser des digestats

^a La technologie Gazéification Hydrothermale permet de convertir les microplastiques en gaz riche en méthane. Cf partie Gisements.

^b Un déchet ultime – selon la loi du 13/07/92 – est un déchet qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux

^c C_xH_y = hydrocarbures plus élevés que le méthane (éthane, butane, propane) injectables dans le réseau gaz

Tableau 1 : Positionnement de la Gazéification Hydrothermale par rapport aux filières gaz renouvelable et bas-carbone (GRTgaz).

Filières	Intrants valorisés	Procédé de conversion/ Spécificités	Maturité (2022) (avec injection réseau gaz)
Méthanisation (par voie humide ou voie sèche)	Déchets organiques fermentescibles (mélangeables sous condition, non pollués et hygiénisés le cas échéant)	Digestion anaérobie Conversion carbone : moyenne (40 à 60%)	TRL 9 Industrielle
Pyrogazéification (différents procédés)	Déchets organiques solides d'origine biogénique ou fossile (lignocellulosiques, CSR, pneus...) ± pollués	Conversion thermochimique à haute température (850 à 1500 °C) ; Conversion carbone : élevée (> 80%)	TRL 6 à 9 En fonction du procédé Démonstrateurs industriels : Projet Gaya (F), Gobigas (S)
<i>Power-to-Méthane</i>	Eau + Électricité renouvelable (ou bas-carbone)	Électrolyse de l'eau + méthanation ($H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4$)	TRL 6/9 Démonstrateurs industriels : Jupiter 1000 (F) et de nombreux projets en Europe.
Gazéification Hydrothermale	Déchets organiques d'origine biogénique ou fossile conte- nant – ou étant mélangeables à – de l'eau	Conversion thermochimique (210 à 350 bar + 360 à 700 °C) Conversion carbone : entre 85 et 99%	TRL 5/9* Plusieurs pilotes, un démonstra- teur et une unité industrielle en Europe (voir chapitre 5). * La 1 ^{ère} installation industrielle au monde portée par SCW Systems sera mise en service d'ici fin 2022.

difficilement ou pas valorisables pour des raisons de limitation d'épandage (zone en excédent d'azote), d'interdiction d'épandage ou de compostage liée par exemple au dépassement de seuil de polluants (métaux, microplastiques) autorisés (voir évolution de la réglementation). Elle peut également éviter le besoin d'hygiénisation pour certains déchets appliqué en amont de la méthanisation en raison de présence potentielle de pathogènes.

- **de power-to-gaz générant de l'hydrogène** : dans le gaz de synthèse issu de la gazéification hydrothermale, il se trouve toujours un résidu de dioxyde de carbone. En le combinant avec de l'hydrogène issu d'une électrolyse, le débit de méthane en sortie d'une installation de Gazéification Hydrothermale peut être augmenté de manière significative, jusqu'au double !

1.1.4 Une technologie ancrée dans l'économie circulaire

La Gazéification Hydrothermale crée de nombreuses synergies, bénéfiques et externalités positives au niveau territorial dont un nombre croissant pourrait devenir monétisable. Elle permet notamment de :

- Augmenter la résilience et l'autonomie énergétique des territoires **via la production de gaz renouvelable et bas-carbone facilement stockables dans les réseaux de gaz** ;
- Fournir, après séparation et transformation par des procédés adaptés (certains restent encore à être mis au point), **des produits fertilisants** (potassium, azote et phosphore). Ces derniers **valorisables et dosables** en substitution
- Fournir **une eau** résiduelle du procédé Gazéification Hydrothermale, **de qualité industrielle**, contenant selon le type d'intrant traité, **plus ou moins d'azote** (ammonium (NH_4^+)), pouvant servir soit à :
 - > **couvrir, sans modification, des besoins d'irrigation en milieu agricole ou urbain** ;

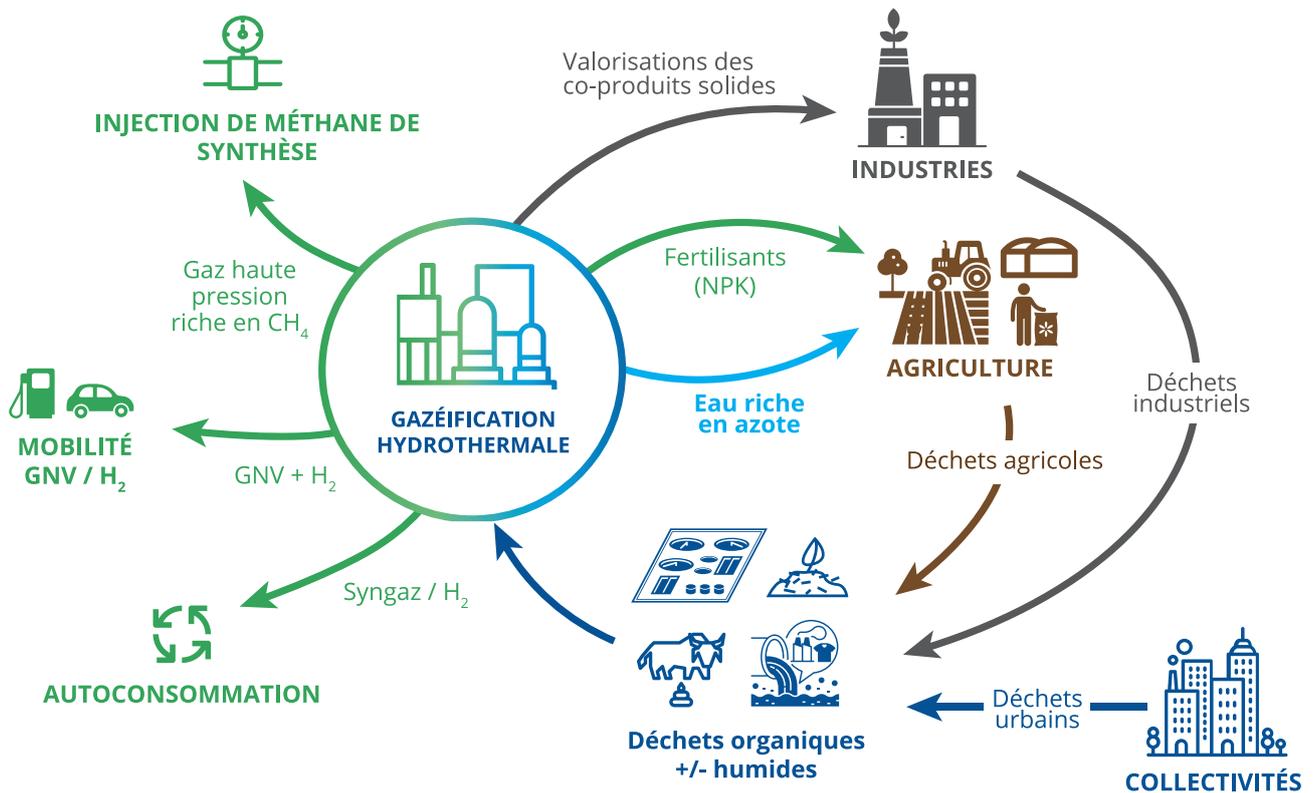


Figure 3 : Potentiel de valorisation des boues d'épuration par la Gazéification Hydrothermale (Source : GRTgaz/Cerema).

- > être portée à un niveau potable, après séparation de l'azote et d'éventuels besoins de filtration ultime ;
- Assurer un **rôle de dépollution** des intrants par la destruction de l'ensemble des composés organiques complexes (résidus médicamenteux et autres micropolluants) et des microorganismes pathogènes ne résistant pas à la combinaison des conditions à haute pression et haute température ;
- Produire un résidu de CO₂ de pureté minimale supérieure à 98 % pouvant servir à alimenter de nombreuses valorisations : production de biostimulants via la **production de microalgues**, transformation en carbone solide couvrant des besoins très diversifiés et de nombreux procédés industriels y compris agroalimentaires utilisant du CO₂ après purification ultime ;
- Récupérer, séparer et revaloriser des métaux potentiellement présents dans les déchets traités ayant une valeur économique importante soit par leur quantité récupérée (fer, aluminium, cuivre, etc.) soit par leur rareté. Ce dernier point sera possible sous condition qu'une technologie de séparation et de revalorisation économiquement viable existe. Dans le cas contraire, ces résidus pourraient être adressés à la filière ciment.

Ces externalités ainsi que de nombreuses autres seront détaillées au chapitre 5 de ce livre blanc.

De ce fait, la Gazéification Hydrothermale apparaît comme un outil d'économie circulaire de premier plan au service des territoires. La figure suivante (Figure 3) présente un exemple de pistes de valorisation potentielles lors du traitement des boues de stations d'épuration par une installation de Gazéification Hydrothermale.

Dans cet exemple :

- ▶ **Le méthane de synthèse** généré est valorisé par injection dans le réseau de transport ou de distribution de gaz ou localement pour un usage « mobilité bioGNV décarbonée »,
- ▶ **L'eau résiduelle** est réutilisée pour l'irrigation des champs agricoles ou de parcs au niveau local,
- ▶ **Les métaux** (métaux rares, métaux lourds, etc.) sont valorisés dans l'industrie en substitution de ressources non durables.
- ▶ **Le phosphore, le potassium et l'azote** sont valorisés en tant que fertilisants dans l'agriculture destinée à l'alimentation humaine et animale.

1.2 Contexte et enjeux environnementaux et énergétiques

À la croisée des chemins du traitement, de la **valorisation des déchets et de la production d'énergie**, la Gazéification Hydrothermale s'intègre pleinement dans les politiques publiques en matière d'économie circulaire, de bioéconomie, de transition énergétique et de décarbonation des territoires.

1.2.1 Lutte contre le changement climatique et développement de l'économie circulaire

En 2021, la Commission européenne confirme son ambition d'atteindre la neutralité carbone avec la publication du paquet climat «Fit for 55» qui **fixe les objectifs de réduction d'émissions nettes de GES à 55 % en 2030 par rapport à leur niveau de 1990** et veut faire de l'Europe **le premier continent climatiquement neutre à horizon 2050** [3].

Afin de respecter l'Accord de Paris et les politiques européennes, la France dispose elle aussi d'un cadre législatif ambitieux avec les Lois «Énergie-Climat» (2019) puis «Climat et Résilience» (2021) et la Loi de transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV, 2015) dont l'objectif est **de diminuer de 40 % les émissions de GES d'ici 2030 et de les diviser par quatre à horizon 2050**.

Parallèlement, la Loi «AGEC (Anti-gaspillage pour une Économie Circulaire)» de février 2020, est présentée comme une priorité pour la France pour permettre une croissance verte et durable, et vient renforcer les lois précédemment citées. En effet, la décarbonation des territoires nécessite d'agir sur l'ensemble des chaînes de valeur : la diminution

des consommations finales brutes d'énergie (sobriété, efficacité énergétique), l'augmentation de la part des EnR, la préservation des ressources et une meilleure valorisation des déchets.

La Gazéification Hydrothermale, dotée de ses très nombreux atouts, permet d'apporter à terme une contribution non négligeable à ces lois et leurs objectifs. En plus de ses capacités de production d'énergies renouvelables ou bas-carbone, la Gazéification Hydrothermale permet de traiter et dépolluer efficacement des déchets organiques pouvant être mal, peu ou pas valorisés aujourd'hui en offrant une meilleure alternative à l'incinération et l'enfouissement, tout en favorisant une valorisation locale des co-produits qu'elle génère (eau, azote, minéraux, métaux, gaz renouvelable et bas-carbone). La Gazéification Hydrothermale permet ainsi de contribuer vertueusement aux efforts de lutte contre le réchauffement climatique, à la baisse des émissions de GES et du gaspillage des ressources tout en participant activement à la transition énergétique et au renforcement de l'autonomie énergétique française.

1.2.2 La production de gaz renouvelable et bas-carbone

Sur le plan énergétique, le gaz naturel représente environ 15,5 % (≈ 415 TWh, corrigée des variations climatiques) des consommations primaires annuelles en France en 2021 alors que les énergies renouvelables dont font partie les gaz renouvelable et bas-carbone ($4,3$ TWh_{PCS} injecté en 2021) ne représentent que 13 % de ces consommations [4]. L'avenir du marché du gaz, étant impacté de plus en plus par la forte volonté de réduire la dépendance liée aux énergies fossiles et à son impact climatique, repose sur sa capacité à parvenir à un marché 100 % gaz renouvelable et bas-carbone en 2050, et devient

un levier important pour rendre possible la décarbonation des territoires.

Dans le cadre de l'élaboration de la nouvelle **Loi de Programmation Énergie Climat (LPEC) prévue pour 2023** et plus particulièrement de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) et la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE), la filière gaz (GRTgaz, GRDF, FGR, ATEE Club Biogaz, Pyrogazéification et *Power-to-Gas*) a émis une note estimant le potentiel réaliste de la capacité de production de méthane renouvelable à **320 TWh_{PCS} d'ici 2050**, notamment à partir de la méthanisation et des technologies émergentes

telles que la pyrogazéification, la méthanation^a et la Gazéification Hydrothermale [5]. La seule filière Gazéification Hydrothermale permettrait d'assurer

a minima 50 TWh par an de production de biogaz (soit environ 15 % de la production globale de méthane renouvelable estimée en 2050).

1.3 L'état de développement de la technologie en Europe

En Europe, les premiers développements de la technologie ont été menés par le *Karlsruhe Institut of Technology* (KIT) en Allemagne avec un projet pilote inauguré en 2004, devenant la première installation préindustrielle de ce type au monde. Il a fallu ensuite attendre 10 ans pour que des projets de taille équivalente voient le jour au Japon et aux États-Unis, complétés par d'autres projets européens aux Pays-Bas, en Suisse avec le Paul-Scherrer-Institut (PSI), en Espagne et en France (CEA) depuis 2014. Au niveau scientifique, le KIT et le PSI, suivis de près par le CEA, ont permis d'établir les bases scientifiques et technologiques de la Gazéification Hydrothermale en Europe devenant ainsi les leaders du développement scientifique de la technologie au niveau mondial. Depuis 2015, différentes installations pilotes privées ont vu progressivement le jour à travers l'Europe, à un rythme plus soutenu montrant l'intérêt du secteur pour cette technologie de traitement et valorisation de déchets, avec notamment l'implication des sociétés SCW Systems ou TreaTech, représentant chacune les leaders de leur famille de technologie (SCW Systems : Gazéification Hydrothermale à haute température ; TreaTech : Gazéification Hydrothermale avec catalyse) en Europe et même au niveau mondial.

Le contexte français présentant de nombreuses spécificités en matière de gestion des déchets et

de production d'énergie en Europe, **la nouvelle filière Gazéification Hydrothermale devra s'inscrire dans la logique de l'écosystème français actuel** dont les orientations évoluent et ont tendance à s'approcher (à travers des mises à jour de directives européennes) à celles déjà en place chez nos homologues européens. Ainsi de nouvelles contraintes réglementaires, par exemple sur le respect des niveaux de polluants acceptés pour l'épandage de boues de STEU et de digestats en sortie de méthanisation, vont finir par ouvrir des gisements potentiels vers la Gazéification Hydrothermale, seule à même de pouvoir les traiter et valoriser à l'avenir.

Sur la question du retour au sol du carbone prédestinant les résidus de certaines technologies comme la méthanisation, la Gazéification Hydrothermale doit être regardée comme alternative dans les situations de contraintes sur l'épandage du digestat. Idem pour la question des voies alternatives de valorisation de matières des biodéchets organiques. À ce titre, l'émergence de la Gazéification Hydrothermale en Suisse et aux Pays-Bas, dans des contextes différents, mérite d'être *a minima* prise en compte afin de bénéficier de leurs Retours d'Expériences (REX) nécessaires au développement d'une filière française et européenne durable.

Le modèle Allemand

L'Allemagne a été le pionnier de la Gazéification Hydrothermale en Europe, avec la mise en œuvre de l'installation pilote VERENA du KIT en 2004. Cette usine pilote scientifique préindustrielle traitant jusqu'à 100 kg/h d'intrant, pouvant fonctionner à une température maximum de 700 °C avec des rendements gaz élevés (> 90 %), a été élaborée pour traiter tout un tas de déchets en démarrant avec des résidus de la production de bière, des boues de STEU, des déchets industriels, etc. La réussite de ce premier projet a inspiré

d'autres développeurs scientifiques et industriels en Europe à se positionner sur la technologie et a permis de nouer des collaborations scientifiques fructueuses, notamment avec des acteurs de premier rang hollandais et suisse (collaboration avec le PSI pour tester avec succès son premier séparateur de sel à une taille industrielle, voir paragraphe suivant).

^a Méthanation : autre nom donné par la filière gaz au « *Power-to-Gas* ».

Le modèle Suisse

En Suisse, la Gazéification Hydrothermale a été identifiée depuis ses premiers pas au début des années 2000 comme une technologie prometteuse méritant le soutien du Ministère fédérale de l'Energie qui cherchait une solution alternative à l'incinération des boues de STEU. **En effet, depuis 2006, l'épandage des boues ou des digestats de boues issues de STEU est interdit, obligeant les gestionnaires à sécher et incinérer la totalité de ces résidus. A cette contrainte se rajoutera, à partir de 2026, l'obligation de récupérer le phosphore dans les boues et leurs digestats.** Seule l'incinération (et plus particulièrement la

mono-incinération) permet, à ce jour, de traiter les boues et leurs digestats et à terme de récupérer également le phosphore contenu dans les cendres de boues. **La Gazéification Hydrothermale, grâce à sa capacité à précipiter les sels minéraux (phosphore en particulier) en amont du réacteur (voir partie 4), devient alors une alternative crédible, y compris à titre économique (voir partie 6).** En effet par comparaison, l'incinération des boues est énergétiquement inefficace : pour des intrants contenant une majorité d'eau^a son rendement énergétique global est nul.

Pays-Bas, leader de la Gazéification Hydrothermale en Europe

Les Pays-Bas sont aujourd'hui **incontestablement le pays où la technologie de la Gazéification Hydrothermale est la plus avancée au monde. La société SCW Systems** y démarre sa première usine industrielle Gazéification Hydrothermale (Alkmaar 1) d'une puissance de 20 MW_{th}^b traitant 16 t/h d'intrants : le passage à l'échelle commerciale est prévu d'ici la fin mars 2023. Pour ses deux premiers projets industriels d'expérimentation (Alkmaar 1 (20 MW) et 2A (40 MW)), la filière bénéficie d'un fort soutien public pour le méthane de

synthèse injecté dans le réseau : 73 à 75 €/MWh_{PCS}, garantie sur 12 ans. Ces deux projets font déjà partie de la feuille de route « groen gas 2030 » du pays dans laquelle la Gazéification Hydrothermale est inscrite comme le mode de production de gaz renouvelable privilégié :

- sa **capacité de production** de gaz globale est estimée à **11,5 TWh/an** ;
- **assurant jusqu'à 57% de la production de gaz renouvelable du pays en 2030.**

1.4 État de développement de la filière Gazéification Hydrothermale française

1.4.1 La Gazéification Hydrothermale en France

Le développement de la technologie Gazéification Hydrothermale en France a commencé au début des années 2010 avec des premiers travaux et publications scientifiques d'un certain nombre d'acteurs académiques, tel que les Mines IMT d'Albi, spécialiste des technologies hydrothermales, l'INP de Grenoble et d'autres acteurs académiques comme le CEA Liten qui dispose en 2022 du seul prototype Gazéification Hydrothermale (10 kg/h) en France.

Le Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale lancé officiellement en 2021, fort de presque

50 partenaires (académiques, développeurs, gaziers...) en 2023, a pour vocation de soutenir le développement de la technologie. Il appuie la constitution d'une véritable filière en facilitant la collaboration entre ses acteurs et en alimentant les réflexions des pouvoirs publics visant la mise en œuvre de mécanismes de soutien et de réglementations adaptés à la technologie Gazéification Hydrothermale. Le nombre croissant d'acteurs de la demande (industries, collectivités, etc.) reflète le besoin d'un développement rapide de la technologie en France et sa pertinence pour traiter des problématiques actuelles et futures

^a Le PSI et TreTech disposent d'une unité pilote d'une capacité de 100 kg/h (voir 4.2.2). Le séparateur de sels minéraux permet de récupérer la quasi-totalité du phosphore. Celui-ci est ensuite peut être ensuite transformé en acide phosphorique ou fertilisant (par ex. struvite).

^b MW_{th} : Méga watt thermique.

(renforcement des contraintes environnementales et climatiques). Le Groupe de Travail souhaite faire rayonner la technologie auprès des acteurs privés et publics afin que la Gazéification Hydrothermale fasse partie du paysage énergétique, au regard de ses nombreux atouts favorisant son implantation au cœur de l'économie circulaire.

Une avancée considérable a eu lieu début 2022 avec les annonces de deux premiers industriels français voulant se positionner dès à présent dans le développement et la promotion de la technologie Gazéification Hydrothermale :

- ▶ **Leroux & Lotz Technologies** : technologie Gazéification Hydrothermale à haute température s'appuyant sur celle initialement développée par le KIT (D),
- ▶ **VINCI Environnement** : technologie Gazéification Hydrothermale avec catalyse intégrant en amont une liquéfaction hydrothermale se basant sur la technologie

développée et fournie par la société américaine Genifuel (USA), un des pionniers mondiaux de la technologie.

En France, plusieurs initiatives sont entreprises pour mettre en œuvre d'abord de premiers projets pilotes et démonstrateurs industriels et, à partir de 2026, les premiers projets industriels. Le projet le plus avancé en 2022 est le **projet de démonstration GHAMa à Montoir-de-Bretagne (44)** qui constitue la volonté d'un groupement de partenaires de s'appuyer sur la technologie en développement par Leroux et Lotz Technologies pour créer un **1^{er} projet de démonstration sachant traiter 2 t/h (2 MW_{th}) de déchets dont notamment les boues de STEU de la CARENE^a, l'agglomération de Saint-Nazaire**. Sa mise en œuvre est prévue fin 2024, dépendant toutefois du cadre de soutien public (subventions en grande partie) accessible pour un tel projet dont le budget est relativement conséquent (>10 M€).

1.4.2 Des premières initiatives concrètes de la filière...

Depuis la création du **Groupe de Travail national Gazéification Hydrothermale, un travail d'identification des freins et difficultés à la mise en place des premiers démonstrateurs a été réalisé**. Il a été approfondi par un travail prospectif pour identifier les besoins d'appui nécessaires à la sortie de premiers projets industriels d'ici 2026.

Dans cette perspective, le Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale a déposé **un premier cahier d'acteur sur la Gazéification Hydrothermale qui a été publié en février 2022 [6] dans le cadre de la consultation du public sur la future Stratégie Française sur l'Énergie et le Climat (SFEC)**. L'objectif était d'informer les pouvoirs publics de la volonté des acteurs membres du Groupe de

Travail Gazéification Hydrothermale de retenir la Gazéification Hydrothermale dans un avenir proche (d'ici 2026) comme un outil crédible pour répondre aux enjeux énergétiques et environnementaux actuels et futures.

Sur le plan purement technique, le Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale a permis d'établir une liste non exhaustive permettant d'identifier les acteurs clés présents sur le territoire national capables de couvrir l'ensemble des équipements faisant partie de la chaîne de valeur de la filière Gazéification Hydrothermale et de lever à court terme les verrous technologiques encore existants.

1.4.3 ... à compléter avec un cadre de soutien fort de la part des pouvoirs publics

A l'instar des mesures de soutien déjà existantes pour développer la filière méthanisation et celles en discussion pour la filière Pyrogazéification, **la filière Gazéification Hydrothermale a également besoin au plus vite d'un cadre de soutien économique incitatif et réglementaire de la part des**

pouvoirs publics pour se développer d'abord en France puis rebondir à l'étranger en s'appuyant sur ses premières références :

- **Mise en place opérationnelle des contrats d'expérimentation et d'autres mesures incitatives et**

^a CARENE : Communauté d'Agglomération de la Région Nazairienne et de l'Estuaire

pérennes (injection dans le réseau gaz, garanties d'origine, fiscalité, dérogation administrative facilitant sa mise en œuvre...) pour lancer et sécuriser les premiers projets de taille industrielle pour la production de biométhane ou de méthane de synthèse bas-carbone utilisant la technologie Gazéification Hydrothermale,

- Définition d'un **cadre réglementaire propre à la technologie** pour éviter la mise en place d'actions injustifiées au regard du fonctionnement intrinsèque de la technologie (pas de combustion, pas d'odeurs, pas d'hygiénisation, pas de rejets atmosphériques...) et de préférence par la création d'une rubrique ICPE propre à la technologie Gazéification Hydrothermale.

Enfin, la **capacité de développement des entreprises françaises** investissant dans cette technologie innovante (cœur de procédé et briques amont et aval) **serait nettement améliorée** si un cadre de soutien public adapté existait (par exemple un élargissement des prêts sans garantie de Bpifrance). Il serait notamment nécessaire pour faciliter le passage d'un TRL (*Technology Readiness Level*) 5/6 à 8/9, une étape indispensable avant toute industrialisation d'une nouvelle technologie. Si des financements européens existent, il serait pertinent de les décliner au niveau national pour soutenir les demandes de financement, notamment lors de passage de niveaux de TRL de la technologie où le besoin de financement est relativement important (> 5 à 10 M€/entreprise). Créer des financements déclinés à différentes échelles (nationale, régionale, locale) faciliterait le développement de la technologie et son implantation au sein des territoires. Les compétiteurs étrangers les plus avancés comme SCW Systems et TreaTech ont pu avancer bien plus vite que d'autres dans le développement de la technologie Gazéification Hydrothermale. Une des raisons était la présence des soutiens financiers appropriés venant aussi bien du secteur public que privé. En Suisse, par exemple, chaque entreprise peut économiser des impôts en investissant la somme due dans le capital de *startups* ou d'entreprises innovantes avec l'opportunité d'en tirer potentiellement profit à terme.

Pour souligner le potentiel de la technologie à court terme et disposer d'un nombre de projets Gazéification Hydrothermale suffisants pour déclencher un 1^{er} marché en France, **les membres**

du Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale estiment qu'à l'horizon 2030 un objectif d'une capacité de production annuelle de gaz injectable de 2 TWh_{PCS}/an est tout à fait atteignable avec des mécanismes de soutien adaptés. La filière Gazéification Hydrothermale serait ainsi capable de contribuer à l'**objectif global de l'ensemble des filières visant une production annuelle de gaz renouvelable et bas-carbone de 60 TWh/an** à cet même horizon. Elle participera ainsi activement à un meilleur traitement local d'un grand nombre de déchets mal, pas, ou insuffisamment valorisés. Elle contribuera également à la décarbonation de nombreux secteurs d'activités, à l'autonomie énergétique du pays et de ses territoires 'et enfin à un mix de 100 % gaz renouvelable et bas-carbone dans les réseaux de gaz français et européens tout en favorisant le respect d'une approche d'économie circulaire.

02

PRÉSENTATION DE LA GAZÉIFICATION HYDROTHERMALE

2.1	Introduction à la technologie	31
2.2	Le prétraitement des intrants	33
2.3	Mise sous pression de l'intrant et montée en température	34
2.4	Le séparateur de sels	34
2.5	Les deux grandes familles du procédé de Gazéification Hydrothermale	35
2.5.1	Le procédé de Gazéification Hydrothermale à « haute température »	35
2.5.2	Le procédé de Gazéification Hydrothermale avec catalyse	35
2.5.3	Synthèse des technologies de Gazéification Hydrothermale	36
2.6	La séparation des flux gazeux, liquides et de l'azote en aval du gazéifieur	38
2.6.1	Le séparateur gaz – liquide	38
2.6.2	Le traitement et la valorisation de la phase liquide et de l'azote	39
2.7	Les avantages de la Gazéification Hydrothermale	40

2.1 Introduction à la technologie

La Gazéification Hydrothermale est une technologie de conversion thermo-chimique de déchets organiques en gaz de synthèse (mélange principalement constitué de méthane (CH_4), d'hydrogène (H_2) et de gaz carbonique (CO_2). Elle fait partie d'une large famille de technologies dites « hydrothermales » utilisant toutes l'eau comme milieu réactionnel et fonctionnant sans oxydant. Ces dernières se distinguent en fonction du niveau de pression et température en-dessous ou au-dessus du point critique de l'eau ($374\text{ }^\circ\text{C}$, $+221\text{ bar}$). Leur point commun est de permettre la conversion de la partie organique issue du déchet en différents produits valorisables. Parmi ces technologies, la Gazéification Hydrothermale est considérée comme la plus noble du fait des nombreuses possibilités qu'elle peut offrir en matière de valorisation du déchet et de production d'énergie.

Principe de fonctionnement de la Gazéification Hydrothermale

Le principe de fonctionnement de la Gazéification Hydrothermale repose sur la présence d'eau dans des conditions de haute pression et de haute température dites « supercritiques ». Dans cet état, à proximité et au-delà du point critique (Figure 4), l'eau présente une grande réactivité et permet en particulier de craquer les molécules carbonées et de précipiter les éléments inorganiques. Dans la nature, de telles conditions peuvent être réunies en grande profondeur comme dans la croûte terrestre ou dans les océans à proximité des dorsales océaniques au niveau des cheminées hydrothermales.

Dans le cas de la gazéification hydrothermale, l'eau est apportée par défaut à travers l'intrant ou artificiellement en direct dans le réacteur de gazéification. C'est le cas pour des déchets ou

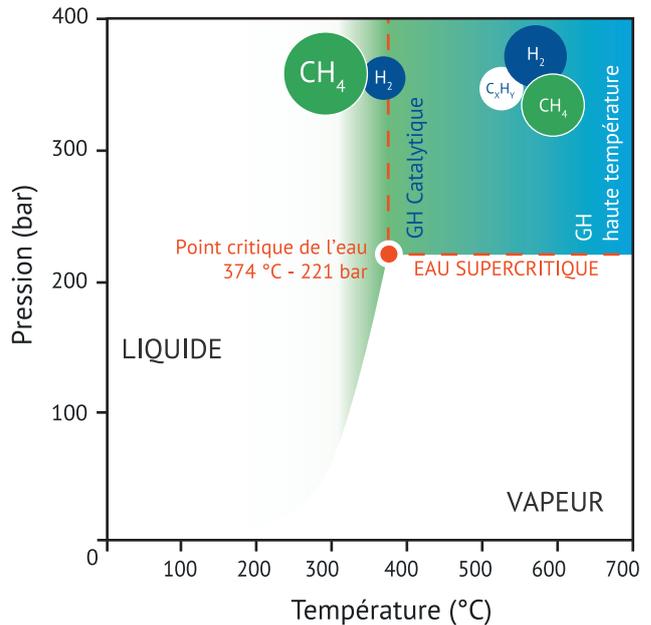


Figure 4 : Diagramme de phases (pression/température) de l'eau (Source : Cerema / GRTgaz).

effluents organiques ne contenant pas d'eau et dont le diamètre des particules ne dépasse pas quelques millimètres.

La technologie permet ainsi le traitement d'une très grande variété de déchets et effluents organiques, seuls ou en mélange, qu'ils soient d'origine biogénique (le plus souvent) ou fossile.

Plusieurs paramètres doivent être respectés pour qu'un déchet organique puisse être converti par gazéification hydrothermale. En effet, l'intrant doit être pompable (fluidité et granulométrie compatibles avec la pompe) et suffisamment énergétique pour permettre sa transformation en gaz renouvelable et bas-carbone.

Tableau 2 : Les technologies hydrothermales (GRTgaz).

Procédé hydrothermal (abréviation anglaise)	Niveau de température et de pression	Eau sous- ou supercritique	Produit principal (en sortie)
Carbonisation Hydrothermale (HTC)	180 à 250 °C 10 à 50 bar	Eau souscritique	(Bio) char
Liquéfaction Hydrothermale (HTL)	250 à 350 °C; 40 à 220 bar	Eau souscritique	(Bio) crude (≈ pétrole brut)
Gazéification Hydrothermale (HTG)	360 à 700 °C; 210 à 350 bar	Eau supercritique	Gaz de synthèse / Méthane de synthèse

Les principaux paramètres sont :

- **la teneur en eau** : Ce paramètre est déterminé par la mesure de la siccité^a, c'est-à-dire du taux en matière sèche (MS). Cette teneur est très variable, de 5 à plus de 85 %. Si l'intrant est trop pauvre en eau, un ajout peut être nécessaire.
- **La teneur en carbone** : Mesuré par le taux de matière organique (MO), ce paramètre est déterminant pour optimiser la production de gaz renouvelable et bas-carbone.

Ainsi, il est essentiel que la part de matière sèche du déchet ou du mélange de déchets contienne le plus possible de Matière Organique (MO) et donc de carbone, ressource essentielle pour la transformation du déchet en gaz de synthèse. **Un ratio MO/MS d'au moins 40 à 50 % est généralement recherché.**

Sous l'effet de l'augmentation de la pression et de la température jusqu'au point critique de l'eau, les propriétés physico-chimiques de l'eau se modifient fortement. Ainsi, l'eau supercritique se comporte autant qu'un gaz et qu'un liquide, liant les avantages de chacun de ces états avec une forte capacité de solvatation et d'extraction (faible viscosité, forte diffusivité, fort pouvoir de dissolution...). De ce fait, l'eau supercritique permet la dissolution et la réorganisation de très nombreux composés organiques et inorganiques. Bien que très complexe, la réaction peut se résumer par des conséquences sur les :

- **composés inorganiques ou minéraux** (minéraux comme le phosphore, le potassium et les métaux) de l'intrant qui précipitent sous forme de sels et se concentrent par gravité en bas du réacteur où ils sont séparés du fluide initial. Le séparateur de sels a été développé explicitement pour assurer cette fonction en amont du gazéifieur. Il permet ainsi que le gazéifieur, installé en aval du séparateur, ne reçoive plus que les composés organiques et de l'eau (pouvant contenir de l'azote). Les réactions chimiques visés sont alors grandement facilitées.
- **composés organiques** de l'intrant, une fois séparé des composés inorganiques, se trouvant sous forme de molécules plus ou moins complexes : ils sont « craqués » dans le gazéifieur, c'est-à-dire décomposés en éléments de plus faibles poids moléculaire (jusqu'au niveau élémentaire), pour ensuite permettre une recombinaison de ces éléments par plusieurs

réactions chimiques, en particulier de l'hydrogène et du carbone pour en former du méthane.

Le temps de séjour dans le gazéifieur (= réacteur de gazéification hydrothermale) étant assez court (quelques secondes tout au plus), la transformation du fluide riche en carbone et hydrogène (et accessoirement en azote) en gaz de synthèse n'est pas complète. La recombinaison des éléments génère ainsi :

- d'un côté un **gaz de synthèse à haute pression** (210 à 350 bar), riche en méthane et hydrogène complété par du gaz carbonique et parfois des alcanes (= hydrocarbures supérieures comme l'éthane, butane et propane),
- et de l'autre côté un **résidu liquide** (si l'intrant initial en contient) composé principalement de l'eau riche en azote ammoniacale (NH_4^+).

Des co-produits gazeux, solides et liquides en sortie

La composition du gaz varie en fonction des caractéristiques des déchets organiques traités, des conditions opératoires (température, pression, débit, temps de séjour et présence ou non d'un séparateur de sels) et en particulier de la famille de technologie de Gazéification Hydrothermale. On distingue ainsi deux familles :

- **« Avec catalyse »** intégré dans le gazéifieur à son entrée : la présence d'un catalyseur permet notamment d'abaisser ou de limiter le niveau de température de réaction à environ 360/400 °C et de favoriser la production de méthane pouvant atteindre une part allant jusqu'à 70 % dans le gaz de synthèse généré [7].
- **« À haute température »** : elle fonctionne avec des niveaux de température plus élevés se situant entre 550 et 700 °C. Dans ces conditions, la composition du syngaz en sortie est nettement plus riche en hydrogène (30 à 50 %) qui peut même dépasser la part du méthane (30 à 40 %) sous certaines conditions.

Avec un taux de conversion du carbone toujours très élevé, se situant entre 85 % pour des déchets plus complexes comme les boues et presque 100 % pour des déchets organiques plus simples comme du glycérol, cette technologie permet de valoriser la quasi-totalité du carbone contenu dans l'intrant.

^a Siccité : Taux de Matière Sèche dans la Matière Brute (% MS/MB).

La composition du gaz de synthèse, générant le produit avec la valeur économique la plus importante en sortie du réacteur, diffère toutefois en fonction de la famille de la technologie et des différents paramètres décrits et contient :

- **toujours une part plus ou moins riche de méthane (CH₄) et d'hydrogène (H₂) complété de gaz carbonique (CO₂) pouvant être traité en aval pour générer un méthane de synthèse injectable dans le réseau,**
- **parfois aussi une part pouvant aller jusqu'à 12 % d'hydrocarbures de contenu énergétique plus élevé que le méthane issu de la famille des alcanes (C_xH_y) comme l'éthane, le butane ou le propane.**

Comme vu plus haut, outre la production d'un gaz de synthèse, la Gazéification Hydrothermale permet également de récupérer et recycler l'eau et la

partie inorganique ou minérale contenue dans le déchet. Leurs parts dans les flux sortants varient en fonction de la nature de l'intrant générant des valorisations plus ou moins importantes. Ces dernières concernent principalement :

- **les minéraux (phosphore, potassium...) et l'azote**, présentant un intérêt agronomique car pouvant entrer dans la composition de nouveaux produits fertilisants,
- **les métaux**, en fonction de leur volume ou leur rareté, pouvant générer un intérêt économique,
- **l'eau** pouvant être revalorisée en direct ou après un traitement adapté (production d'eau potable) et
- **les autres composants solides** éventuels pouvant être orientés vers la production de ciments.

2.2 Le prétraitement des intrants

La première étape nécessaire à la Gazéification Hydrothermale est la préparation des intrants : elle dépend fortement du type ou de la composition de l'intrant, seul ou en mélange, et vise en priorité une homogénéisation de sa composition brute pour assurer sa bonne pompabilité. Cette première étape permet de faciliter la séparation des matières inorganiques de l'intrant et ainsi la réaction thermochimique visée. L'objectif est d'obtenir une viscosité suffisante en jouant sur la siccité, la granulométrie (quelques millimètres des particules tout au plus), la composition et la température tout en maximisant le contenu énergétique de l'intrant.

Pour ce faire, on peut limiter la taille des particules de l'intrant (à quelques millimètres) dans le système via un tamisage ou un broyage, séparer certains éléments indésirables (inertes organiques, composés corrosifs, etc.) et concentrer ou diluer la matière organique de l'intrant pour optimiser sa conversion en gaz.

Il peut être également utile de préchauffer les déchets organiques visés jusqu'à 80 ou 90 °C en amont de la pompe haute pression : pour certains intrants tels que les boues de STEU devenant très compactes à relativement faible concentration (dès 17 % MS/MB), l'augmentation de la température est utile pour améliorer leur pompabilité et la montée en pression par la modification de la viscosité. Il est ainsi possible de concentrer et enrichir énergétiquement (apport de carbone plus important) encore un peu plus les boues (à 20 % ou plus) sans risque de bloquer la pompe haute pression. Un autre moyen, plus économe, pour améliorer la pompabilité est de mélanger certains déchets organiques dont les propriétés se complètent : combiner par exemple des boues avec des graisses ou des huiles augmente autant la pompabilité, la siccité que le contenu énergétique moyen de l'ensemble.

2.3 Mise sous pression de l'intrant et montée en température

L'intrant ainsi préparé est comprimé via une pompe haute pression jusqu'à un niveau de pression se situant entre 210 et 350 bar, variable selon les conditions opératoires définies par le développeur. Il est ensuite (pré)chauffé jusqu'à l'atteinte des conditions supercritiques (ou proches). La chaleur est fournie soit par un apport de chaleur externe (lors du démarrage de l'installation), soit par la chaleur résiduelle récupérée

dans le gazéifieur lui-même. La source thermique externe peut par exemple être assurée par une chaudière gaz ou biomasse ou une résistance électrique et à pour rôle d'assurer le maintien de la température nominale du gazéifieur, située entre 360 et 700 °C selon les besoins de la famille de Gazéification Hydrothermale (avec catalyse ou à haute température).

2.4 Le séparateur de sels

Une bonne partie des déchets organiques pouvant être convertis dans une installation de Gazéification Hydrothermale contient des composés inorganiques tels que des minéraux (phosphore, potassium, calcium...) et parfois aussi des métaux. Ne participant pas aux réactions thermochimiques visées, ces composés, sous l'effet des conditions supercritiques de l'eau (§ 2.1), précipitent et se concentrent par gravité à la base du réacteur de gazéification.

Afin de faciliter cette séparation des sels, différents développeurs de la technologie (KIT, PSI, TreaTech, etc.) ont travaillé sur le concept d'un appareil distinct, appelé le **séparateur de sels**, optimisant la séparation des minéraux et métaux en amont du gazéifieur. PSI et TreaTech ont réussi à démontrer la plus-value de leurs systèmes ce qui a encouragé d'autres développeurs de la technologie à s'y intéresser.

Les solides inorganiques ainsi récupérés sont évacués du séparateur par un dispositif de type « chasse d'eau » fonctionnant par dépressurisation en circuit semi-ouvert. Ce dernier, situé dans la partie basse du séparateur, ne permet pas d'éviter qu'une petite partie du flux carboné soit également captée. Une « saumure » est ainsi récupérée suite à cette séparation. Pour limiter au strict minimum ces pertes du flux carbonés, des dispositifs de recyclage à haute pression sont prévus pour réinjecter le carbone (piégé dans la saumure) en

aval de la pompe haute pression dans le procédé principal.

La saumure concentrée restante, riche en minéraux et métaux, doit alors subir un ou plusieurs traitements hors champ de l'installation de Gazéification Hydrothermale pour être valorisée en produits finis. Ainsi, pour sa faculté de recyclage des métaux, la Gazéification Hydrothermale est également utilisée en laboratoire pour le recyclage des cartes électroniques (projet REMETOX, CNRS).

Dans le cas de certains minéraux, leur récupération dans la saumure peut être réalisée par différents procédés tels que la lixiviation acide. Par exemple, le phosphore^a peut ainsi être récupéré sous forme d'acide phosphorique pour être valorisé en fertilisant. Par ailleurs, plusieurs technologies prometteuses permettant la valorisation du phosphore des boues d'épuration sont en cours de développement ou en test à l'échelle européenne^b. Ces avancées techniques pourraient venir compléter la Gazéification Hydrothermale pour optimiser ses capacités de récupération du phosphore.

In fine, en fonction de la composition du résidu après séparation des minéraux d'intérêt, le sous-produit résiduel peut trouver des applications dans certaines industries comme les cimentiers (ex : cru cimentier).

^a La France, comme tous les autres pays européens, dépend des imports de phosphore fossile essentiellement issu de mines au Maroc ou en Russie. L'agriculture intensive en consomme beaucoup notamment via l'utilisation d'engrais artificiels. La Gazéification Hydrothermale peut être un moyen très efficace de récupérer la quasi-totalité de ce phosphore qui se retrouve plus particulièrement dans certains intrants comme les boues de STEU et de dragage qu'elle transforme (voir cas « Suisse » 1.3)

^b www.phosphorusplatform.eu

2.5 Les deux grandes familles du procédé de Gazéification Hydrothermale

2.5.1 Le procédé de Gazéification Hydrothermale à « haute température »

Dans le cas du procédé à haute température, la réaction hydrothermale a besoin d'atteindre des températures de réaction dans le gazéifieur se situant entre 550 et 700 °C pour pouvoir convertir efficacement le fluide en gaz renouvelable et bas-carbone. Historiquement, chez la plupart des développeurs de cette famille de procédé, le fluide introduit dans le gazéifieur contient encore ses composants solides (pas de séparateur de sels en amont) : les conditions supercritiques entraînent ici d'abord la séparation des sels minéraux par précipitation gravitaire en bas du gazéifieur d'où ils peuvent être évacués par un dispositif approprié (voir chapitre précédent). La tendance actuelle des développeurs est toutefois la mise en œuvre d'un séparateur de sels en amont du gazéifieur pour que les réactions de conversion thermochimique du fluide carboné puissent être facilitées au maximum.

Le fluide carboné restant dans le gazéifieur, composé essentiellement d'eau, de carbone et d'azote, est ensuite converti en un maximum de gaz de synthèse. Sa composition est en première approche d'environ 30 % de méthane (CH_4), 30 % d'hydrogène (H_2), 30 % de gaz carbonique (CO_2) ainsi que 10 % d'alcanes dont principalement de l'éthane (C_2H_6). La répartition entre ces quatre composants peut toutefois varier plus ou moins fortement en fonction du type d'intrant, des conditions opératoires et d'autres paramètres (voir Tableau 2).

La conversion du fluide en gaz de synthèse n'étant pas complète, une partie du fluide est préservée contenant principalement de l'eau et de l'azote et nécessitant la mise en œuvre d'un séparateur gaz/liquide pour séparer l'eau du gaz de synthèse à haute pression.

Le gaz de synthèse brut à haute pression ainsi séparé peut être soit :

- **traité pour maximiser la production d'un méthane de synthèse** et le rendre conforme aux spécifications d'injection dans le réseau de gaz : il servirait ainsi à alimenter n'importe quel consommateur habituel de gaz naturel, sans la moindre modification sur son installation ;
- **traité par épuration** (= séparation des molécules de gaz entre eux) pour valoriser d'un côté le méthane et les alcanes dans le réseau de gaz et de l'autre côté l'hydrogène séparément ;
- **directement autoconsommé** sur site car étant un gaz combustible sans modification ;

L'eau résiduelle contenant principalement de l'azote pouvant, en fonction de la présence d'autres composants résiduels mineurs, soit être valorisée directement pour couvrir des besoins d'irrigation soit être épurée jusqu'à un niveau d'eau potable en séparant l'azote et les impuretés.

2.5.2 Le procédé de Gazéification Hydrothermale avec catalyse

La particularité de cette famille de procédé est la présence d'un catalyseur installé à l'entrée du gazéifieur hydrothermale, aujourd'hui composé par défaut de ruthénium, un métal rare, générant plusieurs avantages très intéressants tels que :

- **Assurer un taux de conversion de carbone très élevé** et inégalé de 99 % favorisant la conversion du carbone en méthane, pouvant atteindre jusqu'à 70 % dans le gaz de synthèse !
- **Abaisser la température de réaction dans le gazéifieur à environ 360 à 400 °C.** Cette baisse

permet de réduire de manière importante le besoin thermique pour cette famille de procédé et d'augmenter le rendement énergétique global de l'installation jusqu'à 85 % *a minima*,

- **Générer** indirectement, en cas de présence d'un séparateur de sels et d'un captage de soufre, **une eau résiduelle claire**, de qualité au moins industrielle, valorisable directement pour couvrir *a minima* des besoins d'irrigation,
- **Simplifier le traitement de gaz** : la présence élevée de méthane, la relativement faible présence

d'hydrogène (5 à 10 %), le restant étant du dioxyde de carbone, ne nécessite qu'une simple épuration. Cette solution est comparable à ce qui se pratique en méthanisation avec la différence que dans le cas de la gazéification hydrothermale, la pression du gaz lors du traitement est bien plus élevée (≈ 80 bar versus ≤ 10 bar) améliorant nettement son efficacité. Cet avantage permet de compenser le surcoût de la solution et l'injection d'un gaz dans le réseau haute pression par simple détente (évitant ainsi tout besoin de compression).

Mais apportant aussi quelques contraintes :

- Dans le cas d'intrants contenant du soufre (poison du catalyseur), il est nécessaire d'équiper l'installation d'un séparateur de sels et d'un système de captage de soufre en amont du réacteur et du catalyseur. Ces dispositifs permettent en effet un abattement quasi-totale du soufre (jusqu'à quelques parties par million).

- Le catalyseur perdant de son efficacité dans le temps, un renouvellement périodique du capteur de soufre est nécessaire car consommé en continu. Ces contraintes entraînent un impact relativement important dans le coût de fonctionnement du système. Deux points positifs sont toutefois à citer ici :

- > Les deux dispositifs diminuent ensemble le risque de corrosion du gazéifieur et de tous les autres équipements exposés aux conditions supercritiques en aval du séparateur de sels.
- > Malgré un surcoût supplémentaire au départ pour sa mise en œuvre, la présence d'un système de captage du catalyseur est fortement conseillée pour permettre de récupérer jusqu'à 75 % du catalyseur et limiter l'achat de nouvelles recharges et donc les coûts d'exploitation.

2.5.3 Synthèse des technologies de Gazéification Hydrothermale

Le Tableau 3 ci-dessous récapitule la plage des conditions opératoires et de la composition (en 1^{ère} approche et à titre indicatif) du syngaz en sortie des gazéifieurs selon leur famille technologique.

En résumé, que le procédé Gazéification Hydrothermale soit « à haute température » ou « avec catalyse », soit équipé ou non d'un séparateur de sels, la chaîne de valeur globale de la Gazéification Hydrothermale est sensiblement la même et se compose toujours des mêmes étapes (Figure 5).

Aujourd'hui, avec le faible nombre de projets existants (voir partie 4), les acteurs de la filière Gazéification Hydrothermale ne peuvent prédire quelle part de marché chacune des deux familles de procédés de Gazéification Hydrothermale va être capable d'atteindre à l'avenir.

Chacune a ses forces et faiblesses :

► Gazéification Hydrothermale avec catalyse

- des **surcoûts de CAPEX** liés à la présence du catalyseur doté d'un métal rare, d'un séparateur de sels et d'un captage de soufre, sont **compensés par des économies potentielles** au niveau des systèmes de traitement de gaz et du système d'apport thermique nettement plus simples qu'avec la famille à haute température,
- un **OPEX plus élevé** pour couvrir les recharges de catalyseur et de capteur de soufre **peut être compensé, au moins en partie**, par des besoins thermiques relativement faibles et d'autres économies potentielles liées au traitement simplifié du syngaz et de l'eau résiduelle nécessitant pas ou peu de traitement pour être valorisable *a minima*.

Tableau 3 : Synthèse des technologies de Gazéification Hydrothermale (GRTgaz).

Type de technologie Gazéification Hydrothermale	Conditions opératoires			Composition gaz de synthèse (%vol)		
	T (°C)	P (bar)	CH ₄ (%vol)	H ₂ (%vol)	CO ₂ (%vol)	C _x H _y (%vol)
Avec catalyse	360–450	210–300	60–70	0–10	20–35	-
A haute température	550–700	250–350	20–40	20–50	20–30	6–12*

C_xH_y = mélange d'Éthane (C₂H₆), Propane (C₃H₈) et/ ou Butane (C₄H₁₀) : se retrouve aussi dans le gaz naturel

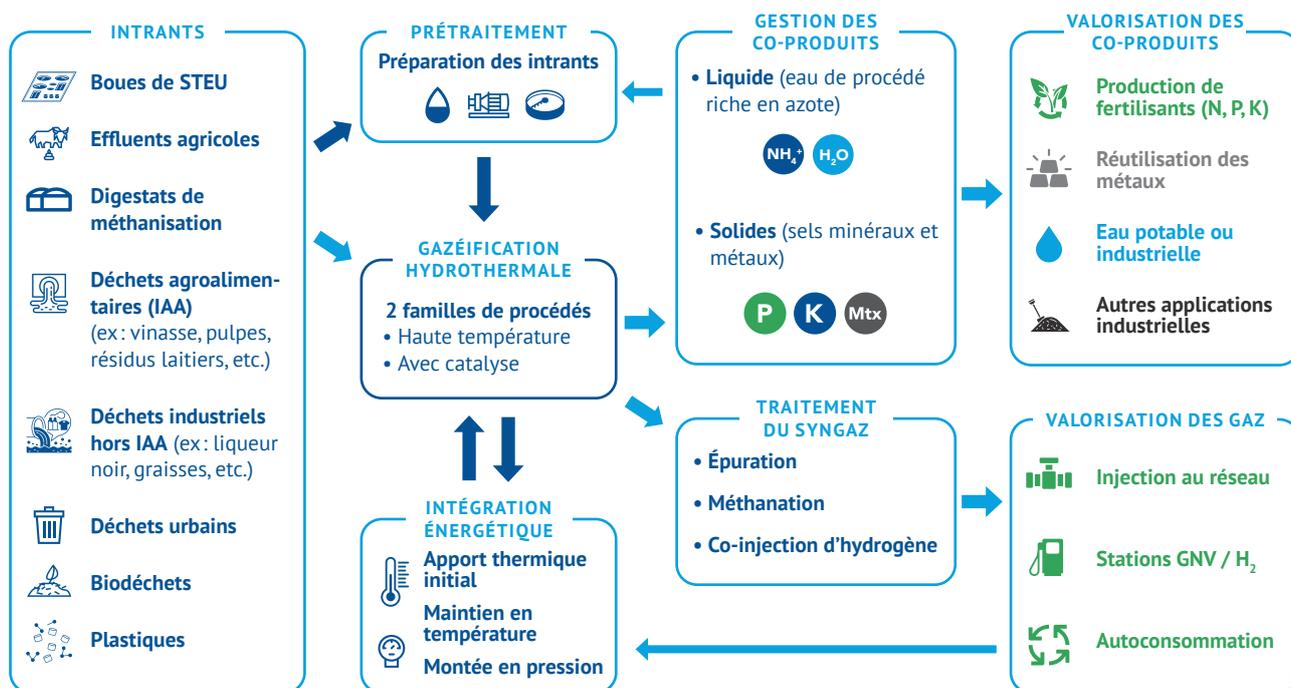


Figure 5 : Schéma de la chaîne de valeur de la Gazéification Hydrothermale, GT Gazéification Hydrothermale, 2021 (Source : Cerema / GRTgaz).

► Gazéification Hydrothermale à haute température

- Un niveau CAPEX en 1^{ère} approche potentiellement moins élevé mais pouvant être révisé à la hausse en fonction du choix du système de traitement de gaz, de la présence ou non de soufre dans l'intrant et de la qualité d'eau résiduelle souhaitée en sortie nécessitant la mise en place d'un traitement *a minima* pour être valorisée,
- Un niveau d'OPEX *a priori* plus élevé lié à son niveau de température relativement haut nécessitant un apport énergétique plus élevé. En fonction du choix du système de traitement de gaz retenu, le coût de fonctionnement comme le besoin énergétique peuvent faire augmenter comme baisser ce coût.
- Au global les coûts CAPEX et OPEX liés au traitement de gaz sont au moins égaux et souvent supérieurs à ceux de la famille « avec catalyse ».
- Le syngaz pouvant contenir des quantités d'hydrogène relativement importantes (jusqu'à ≈ 50 %) à côté du méthane et des hydrocarbures de poids moléculaire plus élevé (totalisant jusqu'à environ 30 à 35 %), cette famille de

technologie dispose de quelques atouts pour s'adapter à l'évolution des marchés du méthane et de l'hydrogène.

Enfin, d'autres critères peuvent encore impacter la balance, pour un projet précis, de l'une à l'autre technologie : la situation de référence, le contexte local, les types d'intrants, seuls ou en mélange, nécessitant ou pas la présence d'un séparateur de sels, etc.

2.6 La séparation des flux gazeux, liquides et de l'azote en aval du gazéifieur

2.6.1 Le séparateur gaz – liquide

Lié au fait que le temps de séjour du fluide carboné dans le gazéifieur est relativement court, sa conversion en gaz de synthèse n'est pas totale préservant ainsi en sortie du gazéifieur un reliquat liquide. Il est essentiellement composé d'eau, d'azote et d'éventuels autres composants devant être séparés du flux gazeux, tous encore à l'état supercritique. Afin de pouvoir exploiter le gaz de synthèse en aval, il faut le séparer de la part liquide à travers un séparateur gaz – liquide, appelé aussi *flash*, pour récupérer :

- D'un côté, le « gaz de synthèse » à haute pression doté de la quasi-totalité du méthane, hydrogène et des autres hydrocarbures potentiels (C_xH_y) et d'une fraction du gaz carbonique ;
- Et de l'autre côté, le « résidu liquide » chargé principalement en ammonium et d'éventuelles traces d'autres éléments. Cette phase est également saturée en gaz carbonique et peut contenir quelques traces d'hydrogène et de méthane.

a) Le traitement et la valorisation de la phase gazeuse

Pour pouvoir être rendu conforme à une injection dans le réseau, le « gaz de synthèse » doit être traité en aval, à travers différentes voies de traitement de gaz possibles dont les performances et l'adaptabilité varient en fonction de la composition du gaz de synthèse à traiter.

A la base, il existe deux grandes familles potentielles de traitement du gaz de synthèse qui, pour des raisons d'efficacité énergétique, devraient fonctionner à relativement haute pression (80 à 120 bar) pour permettre une injection du méthane de synthèse^a, par simple détente dans les réseaux de gaz de moyenne et haute pression (16 à 67,7 bar) :

1. L'épuration : Cette technique représente la voie par défaut pour la technologie « avec catalyse ». Elle s'appuie principalement sur la séparation membranaire pour isoler le méthane (CH_4) d'un côté et de l'hydrogène (H_2) et du gaz carbonique (CO_2) de l'autre.

L'épuration peut être également utilisée pour séparer le gaz de synthèse issu d'une Gazéification Hydrothermale à « haute température » si l'objectif est d'injecter le méthane et les éventuels hydrocarbures plus élevés (C_xH_y) dans le réseau gaz naturel tout en valorisant séparément l'hydrogène.

2. La méthanation : représente la voie par défaut pour la technologie « à haute température ». Il s'agit d'une réaction chimique ou biochimique permettant la synthèse de méthane à partir de monoxyde de carbone (CO) et/ou du dioxyde de carbone (CO_2) avec du dihydrogène (H_2). Trois technologies de méthanation sont aujourd'hui envisageables :

a. La méthanation catalytique : la réaction recherchée est favorisée à l'aide d'un catalyseur, le plus souvent à base de nickel. Ce dernier, sensible à la présence de soufre qui provoque une diminution de son efficacité et de sa durée de vie, doit être protégé en amont par un procédé de désulfuration permettant l'abattement de toute présence éventuelle de sulfure d'hydrogène (H_2S). Cette réaction étant exothermique (environ 200 °C), la chaleur produite peut être valorisée dans le procédé afin d'améliorer son rendement énergétique global. Le gaz de synthèse ne contenant en règle générale pas assez d'hydrogène pour faire réagir tout le CO_2 qu'il contient, le CO_2 résiduel doit être séparé (procédé membranaire) du gaz de synthèse avant injection.

b. La méthanation biologique : cette technologie de méthanation fonctionne selon les mêmes règles chimiques que celle à catalyse avec la différence que les réactions sont de nature biochimique. Elles sont mises en œuvre avec l'aide de différentes souches

^a gaz traité conforme à la norme gaz naturel

de bactéries méthanogènes se développant en milieux aqueux dans un réacteur dédié alimenté en continu par des éléments nutritifs. L'éventuelle présence de soufre est consommée par les bactéries qui en sont gourmandes et le surplus de CO₂ en sortie est traité de la même manière que dans le cas de la méthanation catalytique.

c. **Catalytique plasma** : il s'agit d'une variante innovante de la méthanation catalytique en cours de développement par la société française **Energo** qui nécessite nettement moins d'énergie (- 40 %) en créant un plasma à travers un champ électrique faisant réagir les molécules ciblées. Comme dans les deux précédents cas, le CO₂ résiduel doit être également séparé du méthane de synthèse avant injection. Pour le moment, la technologie ne fonctionne qu'à pression quasi atmosphérique.

3. Il existe une 3^e voie possible, appelée « **co-injection d'hydrogène^a** » qui fonctionne avec un apport externe d'hydrogène dont le but est de maximiser la production de méthane en sortie de la Gazéification Hydrothermale. En effet, présent en excès, l'hydrogène réagira avec un maximum de dioxyde de carbone contenu dans le syngaz. Selon la famille de procédé Gazéification Hydrothermale, l'apport se fait à travers deux mécanismes distincts :

- « **Gazéification Hydrothermale avec catalyse** » : l'hydrogène est amené à pression et température du fluide puis injecté directement et en parallèle du fluide carboné dans le gazéifieur. Des tests effectués par le Paul-Scherrer-Institut en Suisse ont démontré qu'il est possible d'atteindre un syngaz avec un taux de méthane supérieur à 90 % dans ces conditions.
- « **Gazéification Hydrothermale à haute température** » : l'hydrogène est injecté directement dans l'installation de méthanation (catalytique avec ou sans plasma ou biologique) où il réagit avec la totalité du monoxyde et surtout du dioxyde de carbone contenus dans le gaz de synthèse. L'objectif visé en sortie de la méthanation est de maximiser la production de méthane et de minimiser les résidus de CO et CO₂ dans le méthane de synthèse ainsi produit. La qualité obtenue en méthane de synthèse devrait permettre l'injection d'un gaz conforme dans le réseau évitant tout autre traitement du gaz en amont.

Avec la co-injection d'hydrogène, la production de méthane peut être augmentée jusqu'au double du débit de méthane de synthèse atteignable sans cet apport d'hydrogène. Avec un coût de l'hydrogène apporté inférieur à environ 4 €/kg, cette voie supplémentaire semble pouvoir atteindre le seuil de rentabilité économique.

2.6.2 Le traitement et la valorisation de la phase liquide et de l'azote

Le résidu liquide en sortie du séparateur gaz – liquide est composé d'eau contenant du gaz carbonique jusqu'au point de saturation. Si l'intrant initial contient de l'azote, il se retrouvera également dans ce résidu liquide sous forme d'ammonium (NH₄⁺). Il est généralement incolore mais peut, pour certains intrants comme des boues et dans le cas de la Gazéification Hydrothermale à haute température, prendre une couleur brunâtre (les experts parlent de « *brown water* »), contenant encore quelques traces d'impuretés.

L'eau résiduelle issue de la technologie avec catalyse présente la particularité d'être **claire et transparente** et ne contient pas ou peu d'impuretés. Cette eau peut alors être utilisée quasiment en l'état (après analyse) pour couvrir des besoins d'irrigations agricoles ou d'espaces verts en milieu urbain.

À l'inverse, l'eau résiduelle issue de la technologie à haute température nécessite la mise en place de systèmes de filtration et de purification spécifiques. Ainsi, le développeur SCW Systems aux Pays-Bas assure avoir installé dans sa 1^{ère} usine industrielle de 20 MW_{th} un système lui permettant de traiter son eau résiduelle jusqu'à la qualité d'eau potable.

En fonction de la valorisation envisagée pour l'eau résiduelle et de sa teneur en azote, des procédés spécifiques de séparation ou de concentration de l'ammoniacale devront être envisagés (stripping, échangeur ionique, précipitation, absorption gaz-liquide, etc.).

^a Uniquement pour la technologie Gazéification Hydrothermale catalytique.

2.7 Les avantages de la Gazéification Hydrothermale

La Gazéification Hydrothermale présente un certain nombre d'avantages spécifiques, comme présenté en Figure 6 :

Ces atouts font de la Gazéification Hydrothermale une alternative pertinente au traitement classique et à la gestion actuelle de certains déchets au sein des territoires, permettant le développement de boucles d'économie circulaire locales. Les avantages suivants peuvent être cités :

► **Aucun besoin de séchage des déchets organiques humides valorisés**

Comme le procédé Gazéification Hydrothermale est capable de valoriser des déchets organiques de relativement faible concentration en matière sèche (≈ 15 à 20% *a minima*), il **ne requiert pas de processus de déshydratation** pouvant consommer des quantités importantes d'énergie. Ceci contraste avec des technologies de déshydratation mécanique ou thermique nécessaires pour rendre un déchet combustible (par exemple pour l'incinération). L'apport énergétique nécessaire ne pouvant être compensé par la valeur énergétique récupérée après la combustion de l'intrant, rend cette combinaison de technologies particulièrement inefficace et coûteuse.

De plus, à l'intérieur du procédé Gazéification Hydrothermale, une fois les étapes de séparation des composants inorganiques et de gazéification effectuées, le fluide gaz – liquide supercritique en sortie dispose toujours d'un niveau de température élevé. L'art des développeurs de la technologie Gazéification Hydrothermale se situe notamment dans le bon dimensionnement des échangeurs de chaleur permettant de transférer un maximum de la chaleur contenue dans le fluide vers l'intrant qui rentre à travers la pompe haute pression dans le système Gazéification Hydrothermale. Des rendements de transfert de chaleur de plus de 85% ont déjà été démontrés par des développeurs.

Ce niveau de performance énergétique est crucial pour pouvoir atteindre des rendements énergétiques globaux supérieurs à 75% avec la technologie Gazéification Hydrothermale.

► **Le recyclage des éléments minéraux, de l'azote et des métaux contenus dans le déchet**

La Gazéification Hydrothermale entre pleinement dans l'économie circulaire dans le sens où la ressource « eau » est préservée, « lavée » de tout type de pathogènes, virus ou encore microplastiques contenus dans l'intrant. Elle permet également le recyclage des minéraux (phosphore, potassium, azote...) pouvant potentiellement servir, après transformation, en tant que fertilisants.

La récupération et la séparation d'une éventuelle présence de métaux se trouvant notamment dans de nombreux déchets industriels est également un atout précieux car certains de ces métaux, par leur quantité ou par leur rareté (cherté), peuvent générer des économies supplémentaires intéressantes.

► **Un design compact et modulaire**

La Gazéification Hydrothermale réalise la conversion en gaz en quelques minutes dans une installation très compacte où les échangeurs de chaleur prennent le plus de place. Le choix de la modularité d'une installation de Gazéification Hydrothermale, définissant la capacité de traitement maximale par module à un niveau de $4 - 6$ t/h est lié à la volonté des développeurs de maîtriser au mieux les coûts de certains de leurs sous-équipements. En effet le coût de ces derniers peut fortement augmenter avec la taille des pièces devant durablement faire face à la haute pression et température. Un effet de standardisation de ces modules se traduit par une certaine flexibilité d'adaptation et une maîtrise des coûts de la conception à la réalisation. De plus, en phase d'exploitation, la modularité de la Gazéification Hydrothermale permet une plus grande adaptabilité de l'unité en fonction des fluctuations des tonnages de déchets devant être traités.

Atouts de la Gazéification Hydrothermale



Valorisation jusqu'à 100 % de l'intrant = jusqu'à 100 % de suppression du déchet ultime



Conversion rapide (quelques minutes) et très élevée du carbone (85 à 100 %) intégrant les microplastiques



Élimination des microorganismes pathogènes et des micropolluants



Pas de polluants atmosphériques



Technologie modulable à très faible empreinte au sol



Absence de nuisances sonores et olfactives



Suppression de traitement thermique des intrants



Récupération des minéraux et métaux



Production de gaz injectable, stockable et valorisable ou utilisable au même titre que le gaz naturel



Technologie capable de produire du méthane et de l'hydrogène en fonction des besoins



Récupération d'une eau de qualité industrielle pouvant devenir potable après filtration



Alternative vertueuse à l'incinération, l'enfouissement et la mise en décharge

Figure 6 : Atouts de la Gazéification Hydrothermale (Source : Cerema / GRTgaz).

03

POTENTIEL DE PRODUCTION DE GAZ RENOUVELABLE ET BAS-CARBONE

3.1	La Gazéification Hydrothermale, une solution de valorisation pour certains déchets	45
3.1.1	Les limites du retour au sol pour certains déchets biogéniques	45
3.1.2	De nombreuses interrogations pour certains déchets industriels	46
<hr/>		
3.2	Un potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone d'au moins 63 TWh en 2050	47
3.2.1	Les familles d'intrants adressables en première priorité par la Gazéification Hydrothermale	49
3.2.2	Les familles d'intrants adressables en priorité 2 et 3 par la Gazéification Hydrothermale	50

L'évaluation du potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone par la Gazéification Hydrothermale a été réalisée à travers l'estimation du potentiel de mobilisation de certains déchets à l'horizon 2050. Il s'agit de déchets identifiés comme adressables à la technologie qui en grande partie **sont de nature organique et d'origine biogénique ou non**. La liste de ces intrants s'allonge au fur et à mesure du temps et des avancées techniques de la technologie.

Au total, une quantité annuelle de déchets organiques globale adressable à la gazéification hydrothermale est estimée à plus de **400 millions de tonnes dont environ 150 millions de tonnes sont estimées mobilisables**. Cependant, ces quantités sont probablement amenées à augmenter. En

effet, avec la montée en puissance de la méthanisation dont les digestats, le résidu ultime, ne peuvent tous être valorisés localement dans l'agriculture, les quantités citées sont amenées à encore augmenter dans les années à venir. De même, parmi les déchets adressables de nature non biogénique, l'estimation est probablement sous-évaluée. Ces derniers étant principalement issus des activités industrielles et notamment des secteurs de la chimie et de la pétrochimie, peu de données sont disponibles. De plus, les volumes concernés sont d'autant plus importants que ces industriels génèrent autant leurs propres déchets que des produits qui deviennent, une fois utilisés ou consommés, également des déchets (exemple emballage en plastique).

3.1 La Gazéification Hydrothermale, une solution de valorisation pour certains déchets

3.1.1 Les limites du retour au sol pour certains déchets biogéniques

Certains pays ont fait le choix d'une approche radicalement différente de la position française en interdisant pour certains types de déchets le retour au sol. Ceci est par exemple le cas pour les boues de station de traitement des eaux usées en Suisse, Danemark, Pays-Bas et bientôt en Allemagne (2029). Un cas intéressant est celui des Pays-Bas (Figure 9) où la fin de l'utilisation des boues de STEU dans l'agriculture date de 1995 et

est corrélée à la diminution significative de leur enfouissement durant ces 30 dernières années ainsi qu'à la montée en puissance de solutions alternatives.

Le cas Suisse illustre l'étape d'après : en effet la totalité des boues de STEU, digérées ou pas, partent en incinération malgré les impacts négatifs (voir chapitre 1) ce qui a poussé au développement de

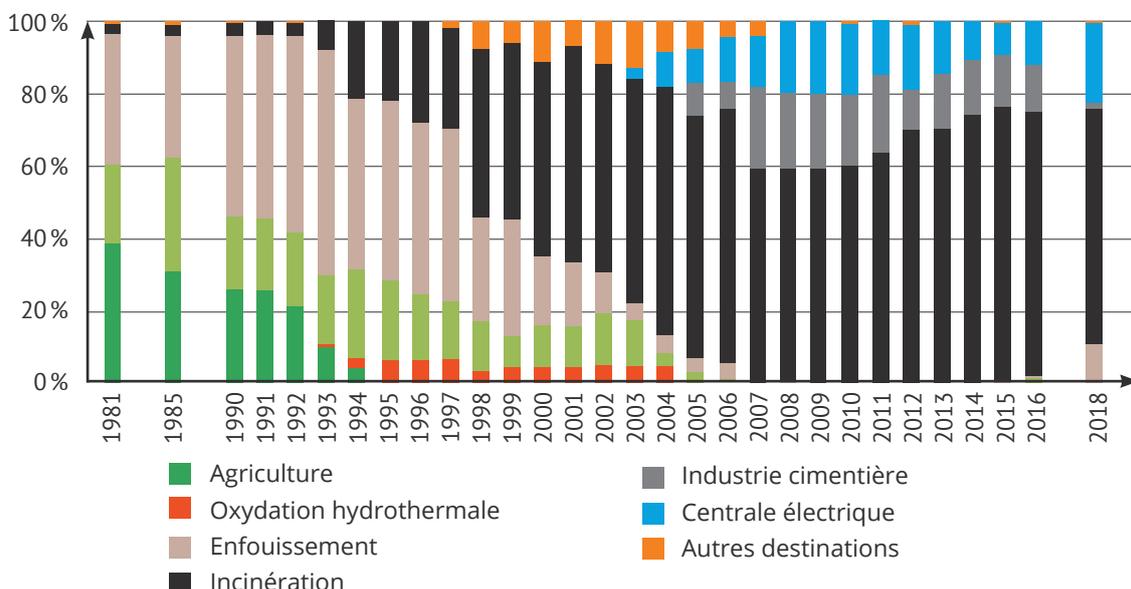


Figure 7 : Évolution de la destination finale des boues de STEU aux Pays-Bas depuis 1981 (source : clo.nl).

la Gazéification Hydrothermale, soutenu financièrement par l'État suisse, en tant qu'alternative pertinente de valorisation énergétique et de préservation de ressources précieuses. Le fait que la Gazéification Hydrothermale permette l'obtention de nombreux co-produits valorisables au niveau agricole et économique comme le phosphore, l'azote, d'autres minéraux mais aussi un certain nombre de métaux a également contribué à obtenir le soutien du ministère fédéral de l'énergie Suisse afin de proposer rapidement une alternative à l'incinération.

En France, il est commun d'observer des phénomènes de pollutions locales dues à une mauvaise gestion des matières fertilisantes. Par exemple, certains composts issus des Tri Mécano-Biologique (TMB) peuvent contenir des traces de microplastiques qui, au fur et à mesure des épandages agricoles, laissent des traces durables dans les sols [8]. Pour d'autres effluents organiques comme certains lisiers, boues de stations d'épuration ou encore digestats, il arrive également que des dépassements de seuils limites en azote, phosphore ou d'Éléments Traces Métalliques (ETM) tels que le cuivre, le fer, le zinc, le cadmium... soient constatés.

Par ailleurs ces gisements de biomasses sont bien souvent répartis inégalement sur le territoire et une large part de celles-ci peuvent voyager plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres pour trouver un exutoire. Au-delà des désagréments locaux (bruit, odeur, circulation difficile...) cela engendre également de fortes émissions de GES imputables au transport par camion.

3.1.2 De nombreuses interrogations pour certains déchets industriels

Outre les déchets organiques biogéniques dont la valorisation matière n'est pas possible ou souhaitable comme vu précédemment, de nombreux déchets riches en carbone fossile ou non semblent ne pas toujours suivre des voies de valorisation vertueuses. En effet, principalement d'origine industrielle, ces déchets sont peu connus, quantifiés et/ou cartographiés malgré la forte activité économique et les fortes productions du secteur industriel Français.

Ainsi, plusieurs interrogations demeurent quant aux quantités, à la composition, aux modes de gestion et volumes d'exportation de certains déchets

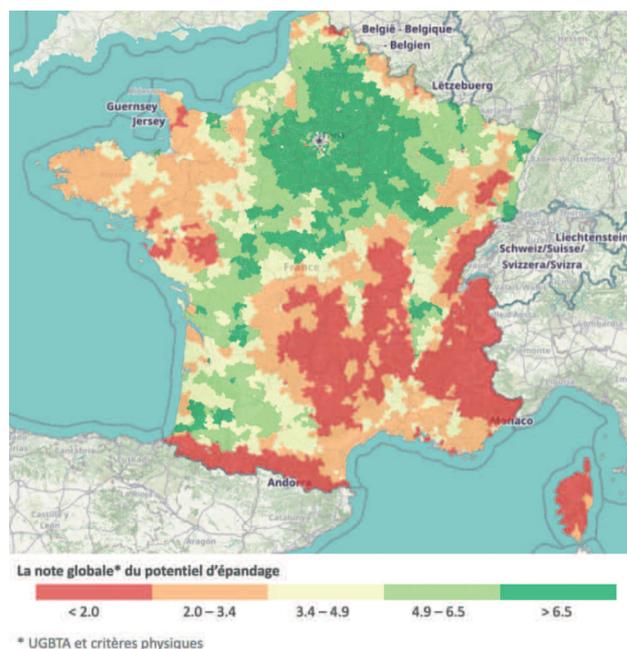


Figure 8 : Difficulté d'épandages sur les terres agricoles en France (source : ValorMap).

Enfin, le projet ValorMap a édité une carte au niveau national reprenant les limitations d'épandages sur le territoire national **selon des critères physiques** (topographie des sols et rivières), **des critères agronomiques** (types de cultures / agricultures) et la **présence des élevages**. La Figure 8 montre qu'environ **40 % du territoire national est déjà limité par des contraintes d'épandages**.

La Gazéification Hydrothermale se présente ainsi comme une **alternative pertinente pour traiter ces effluents agricoles d'élevage** qui ne peuvent plus être retournés au sol à cause de la surproduction ou survalorisation locale de la part des activités agricoles et des industries agroalimentaires.

issus de l'industrie et en particulier dans les secteurs de la chimie et de la pétrochimie.

Également, de nombreux déchets sont riches en plastiques (emballages et divers produits plastiques seuls, souillés ou mélangés à d'autres déchets) mais peu d'informations sur leurs compositions, volumes et modes de gestion sont accessibles.

Pour ces catégories de déchets, il est fort probable que la Gazéification Hydrothermale puisse être une solution adaptée afin d'éviter les exportations, l'enfouissement et l'incinération.

3.2 Un potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone d'au moins 63 TWh en 2050

Méthodologie

L'évaluation et l'estimation du potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone associé à la Gazéification Hydrothermale est fonction de nombreux paramètres tels que la nature et la composition des gisements, leur disponibilité, leur répartition sur le territoire et le type de gestion dont ils font l'objet. La méthodologie d'évaluation a été réalisée en plusieurs phases :

1. Identification des familles et des typologies de gisements (uniquement d'origine biogénique).
2. Identification de leur répartition et des volumes concernés.
3. Identification des filières mises en place ou non pour leur gestion.
4. Évaluation du pouvoir calorifique de chaque gisement.

5. Estimation du taux de mobilisation des gisements identifiés.

6. Estimation du potentiel réaliste de gaz renouvelable et bas-carbone pouvant être produit par la Gazéification Hydrothermale (inspirée de la méthode proposée par Louw *et al.*, 2014 [9]^a).

Cette nouvelle évaluation, réalisée en 2022, s'appuie en partie sur les premiers travaux effectués par ENEA Consulting publiés par GRTgaz en octobre 2019 [10]. Elle tient compte d'un ensemble de données issues d'autres publications d'acteurs de notoriété publique (voir les exemples de sources plus loin) qui ont été complétées en partie par une recherche de données géolocalisées utilisant des algorithmes pour tenter de combler les manques d'informations existantes en termes de données publiquement accessibles.

Limites de l'exercice

En France, il est très difficile d'obtenir des données et une estimation précise des volumes de déchets organiques publiquement accessibles ainsi que la répartition des différents types de gisements de déchets et des matières organiques d'intérêt sur le territoire. Il existe cependant quelques bases de données publiques et publications disponibles sur lesquelles le Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale s'est appuyé pour identifier les gisements accessibles et mobilisables et ainsi calculer le potentiel de production de gaz de la filière. Afin de pouvoir présenter les chiffres les plus globaux et cohérents possibles, le Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale s'est concentré sur les **18 gisements de déchets organiques d'origine biogénique** représentant les plus grands volumes et étant les mieux renseignés dans des bases de données (Figure 9).

Ce sont notamment les déchets organiques d'origine industrielle qui sont peu documentés et qui présentent des imprécisions ne permettant pas leur bonne exploitation statistique. La

gazéification hydrothermale ayant besoin d'un certain nombre de détails pour son évaluation comme le taux en matière sèche et matière organique du tonnage brut affiché, il est difficile de présenter avec précision les véritables volumes existants et adressables pouvant être convertis en gaz avec la technologie. Par exemple, les volumes de déchets de l'industrie pétrochimique sont introuvables. Il n'est ainsi pas surprenant qu'il soit parfois quasiment impossible de connaître la part fossile dans certains déchets organiques générés par un certain nombre d'acteurs du secteur industriel.

Les principales ressources utilisées lors de cette étude sont principalement issues de bases de données « *Open data* », d'études publiques et de sources privées provenant des filières elles-mêmes :

- **Bases de données publiques :** assainissement.developpement-durable.gouv.fr, Insee, Agreste, etc.

^a Pour définir ce potentiel, le Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale s'est appuyé sur les travaux présentés dans l'étude de Louw *et al.* (2014), qui indique que $PCS_{gaz} (kWh/kg_{biomasse}) \approx 90\% \times PCS_{biomasse} (kWh/kg_{biomasse})$. Par mesure conservatoire et pour coller plus sincèrement aux premiers tests expérimentaux réalisés sur des pilotes, un taux de conversion de 85 % a finalement été retenu par le Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale pour effectuer les calculs de conversion.

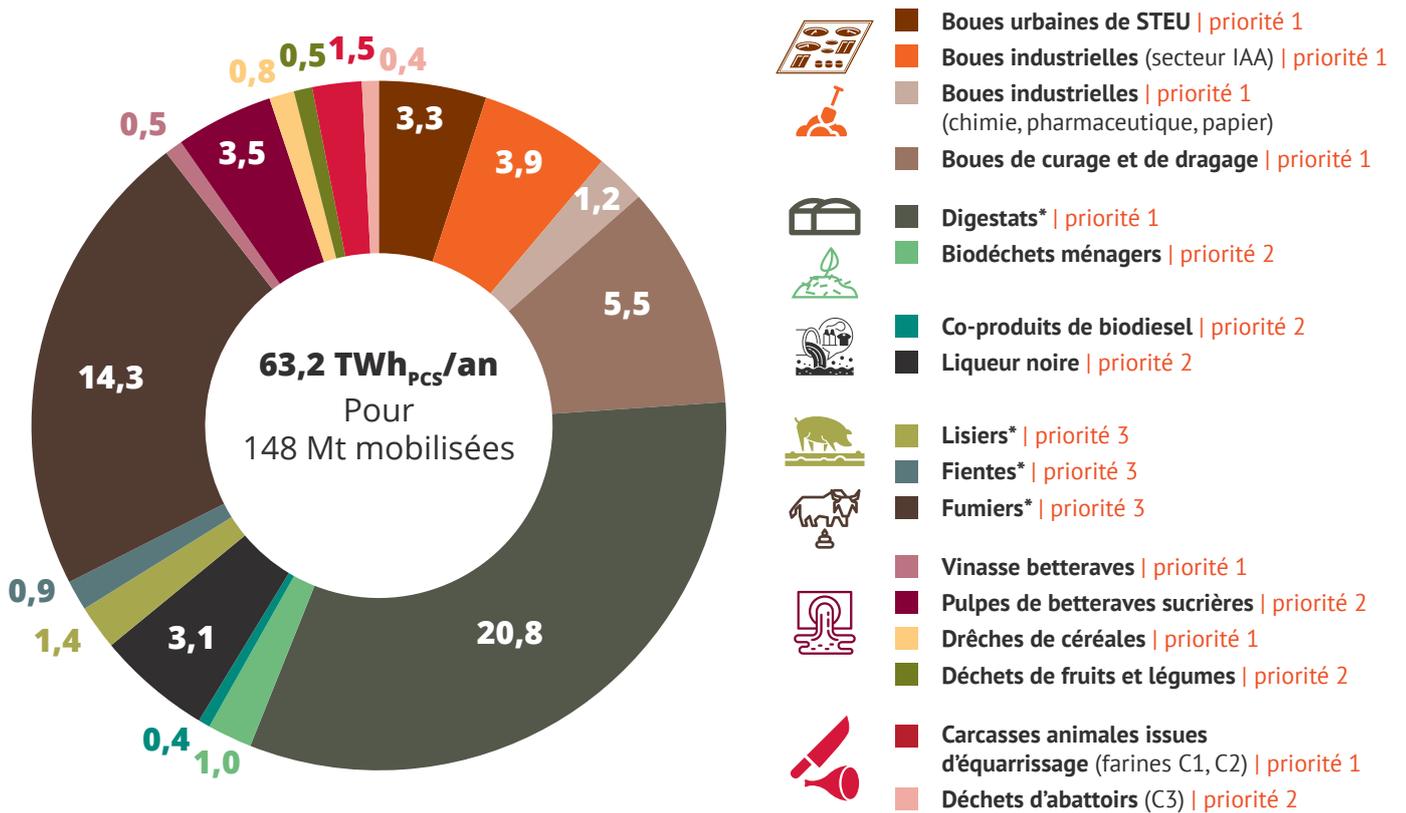


Figure 9 : Estimation de la production de gaz injectable par GH pour les 18 intrants majeurs d'origine biogénique à horizon 2050 (63,2 TWh/an) – *estimation en 2050.

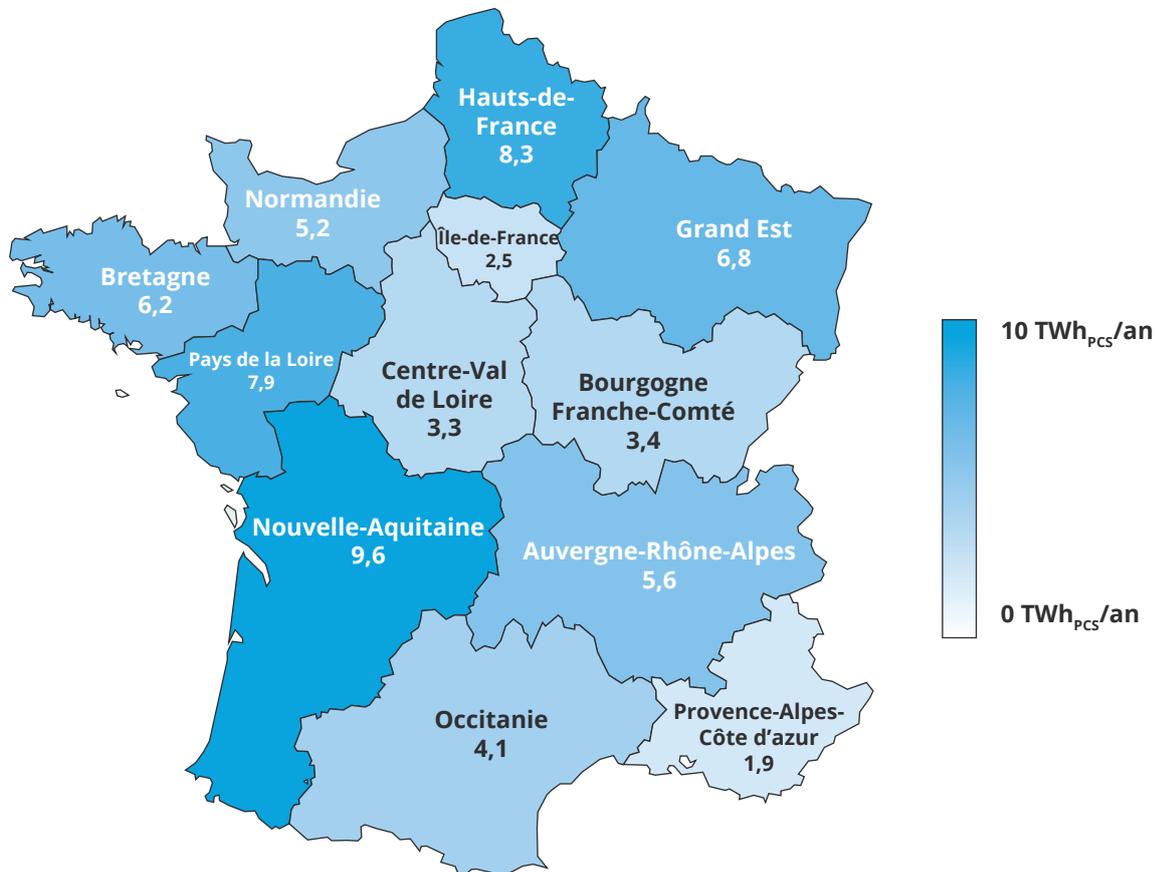


Figure 10 : Estimation de la production par région de gaz injectable par GH en 2050 (63,2 TWh/an).

► **Rapports et publications :** Enquête Réséda sur les gisements et la valorisation des co-produits issus de l'agro-industrie [11], évaluation des ressources agricoles et agroalimentaires de l'ONRB [12], études ADEME [13][14], Cerema [15] et autres publications scientifiques [16] [17].

Les différents types de sources de données utilisées étant marqués par des imprécisions rendant des comparaisons difficiles voire impossibles, les résultats présentés sont semi-quantitatifs et n'ont pas vocation à estimer et présenter de manière précise et définitive le potentiel de production de gaz par la filière Gazéification Hydrothermale à horizon 2050. **Le travail fourni, résumé dans la Figure 9 et la Figure 10, se comprend comme une estimation le plus proche possible s'appuyant sur les meilleures informations disponibles à ce jour**

et tenant compte aussi bien que possible d'évolutions probables de certains volumes projetés par certains experts (exemple : données de Solagro prévoyant une baisse notable des gisements d'effluents d'élevage à horizon 2050 versus 2018, déjà intégrée dans l'étude d'ENEA Consulting).

Cette première approche souligne donc, dans le cas du scénario réaliste, un **potentiel de production de gaz d'environ 63 TWh/an d'ici à 2050** via la Gazéification Hydrothermale, en comptant la mobilisation d'effluents d'élevages et certains déchets organiques dont l'origine n'est pas systématiquement d'origine biogénique à 100 % (pollués par la présence de déchets d'origine fossile comme des plastiques ou issues de certaines activités industrielles spécifiques (chimie)).

3.2.1 Les familles d'intrants adressables en première priorité par la Gazéification Hydrothermale

Plusieurs familles d'intrants répondent aux caractéristiques techniques requises par la Gazéification Hydrothermale et présentent une valorisation aujourd'hui limitée voire inexistante (boues de dragages) pouvant être sources de tensions au niveau local couplé avec un potentiel Gazéification Hydrothermale intéressant :

- **Les boues de STEU urbaines et boues industrielles** (provenant des Industries agricoles et alimentaires, de la chimie, des industries pharmaceutiques ou papier, etc.) : le renforcement des contraintes réglementaires autour du retour au sol des boues d'ici 2027 et l'objectif d'une diminution du recours à l'incinération^a, peu efficace pour des intrants contenant au moins 70 % d'eau, devraient permettre à la Gazéification Hydrothermale de capter un maximum de ce gisement d'ici à 2050. Pour les boues urbaines, 65 % des volumes (agglomérations > 50 000 EH^b) devrait être à terme accessible à la Gazéification Hydrothermale, même si quelques installations de méthanisation subsistent. Les boues industrielles issu des secteurs « IAA » et chimie, pharmaceutique et papier représentent un gisement global très conséquent et plus important que les boues urbaines. De plus, elles sont souvent plus « riches » (en carbone).

- **Potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone 2050 : 8,4 TWh/an**

- **Boues de curage et dragage** : la réglementation se renforce et interdira en 2025 le rejet en mer des boues polluées. Malgré un faible taux de matière organique (entre 6 et 30 % selon origine (estuaire, fleuve, port)), ces boues sont par leur volume (> 50 Mt/an) un intrant potentiellement intéressant pour la Gazéification Hydrothermale sous condition que la séparation des phases organiques et inorganiques (sable) devienne techniquement et économiquement faisable.

- **Potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone 2050 : 5,5 TWh/an**

- **Les digestats de méthanisation en cas de contraintes d'épandage** : les digestats sont orientés aujourd'hui de préférence vers un retour au sol très encadré en lien avec le contexte local et les contraintes saisonnières d'épandage (en fonction des cultures). La Gazéification Hydrothermale pourrait alors devenir un exutoire permanent pour un volume croissant de digestats face aux contraintes actuelles dont certaines pourraient se renforcer. La Gazéification Hydrothermale pourrait ainsi « débloquer » les contraintes locales d'épandage pour des projets de méthanisation dans un certain nombre de régions présentant déjà des

^a 20 % des boues sont actuellement incinérées en France.

^b Équivalent-Habitant

contraintes telles que les régions Sud, Bretagne, Hauts-de-France, Grand-Est et Île-de-France.

- > **Potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone 2050 : 20,8 TWh/an**
- **Vinasses et drêches (betteraves, céréales) issues de distilleries** : générées sur une bonne dizaine de sites de production en France, les industriels concernés cherchent à valoriser mieux ces intrants qu'à travers l'épandage offrant peu de valeur agronomique au sol.
 - > **Potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone 2050 : 1,3 TWh/an**
- **Sous-produits animaux (carcasses animales d'abattoirs)** : La réglementation contraignante sur l'utilisation et la valorisation des sous-produits animaux de catégorie 1^a limite aujourd'hui

leur valorisation énergétique (hors graisses en biocarburants). La Gazéification Hydrothermale pourrait apporter avec la récupération de résidus solides (minéraux) et liquide (eau) une valorisation bien supérieure à l'incinération (aujourd'hui le seul traitement autorisé), tout en supprimant tout risque sanitaire à travers le couple hautes pression et température. La technologie pourrait également être utilisée comme alternative de valorisation pour les sous-produits animaux de catégorie 2 présentant un risque moins important pour la santé publique et étant autorisés à être valorisés en vue d'autres utilisations que l'alimentation des animaux (lisier et fumier par exemple).

- > **Potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone 2050 : 1,5 TWh/an**

3.2.2 Les familles d'intrants adressables en priorité 2 et 3 par la Gazéification Hydrothermale

Les gisements « priorité 2 & 3 » sont aujourd'hui valorisés à 100 % mais disposent de **voies de valorisation évolutives**, ce qui permettrait d'envisager la mobilisation de ces derniers pour la Gazéification Hydrothermale selon le contexte local :

- **Pulpes de betteraves sucrières** : aujourd'hui valorisées surtout en alimentation animale^b et méthanisation, les sucriers confrontés à la baisse des cheptels cherchent des valorisations alternatives avec une production de sucre devant rester plutôt stable.
 - > **Potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone 2050 : 3,5 TWh/an**
- **Autres intrants (marcs de raisins, biodéchets, déchets de fruits et légumes, co-produits de biodiesel et liqueur noire)** : ces types de déchets souvent générés dans des lieux spécifiques ont souvent déjà une voie de valorisation existante. La Gazéification Hydrothermale peut apporter, en fonction du contexte local, une solution alternative avec une plus-value technico-économique globale encore améliorée pour les parties prenantes.

- > **Potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone 2050 : 5,6 TWh/an**

Enfin et comme évoqué dans la partie précédente, si certains gisements agricoles disposent de voies de valorisation énergétiques aujourd'hui, leur concentration et l'évolution des réglementations amèneront à les considérer comme potentiel d'intrants pour la Gazéification Hydrothermale :

- **Effluents agricoles d'élevages** : aujourd'hui valorisés par épandage direct ou après méthanisation, la concentration locale des volumes^c se heurte à des difficultés de valorisation et d'excédents d'azote dans certaines régions (Bretagne, Pays-de-Loire, etc.)
 - > **Potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone 2050 : 16,6 TWh/an**

^a Le règlement européen (CE) n°1069/2009 classe en catégorie 1 les sous-produits animaux présentant un risque important pour la santé publique : risques d'EST (Encéphalopathies Spongiformes Transmissibles), de MRS (Matériels à Risque Spécifiés), risques de présence de substance interdite ou d'un contaminant pour l'environnement, risque sanitaire émergent...

^b 50 % en pulpes surpressées valorisées pendant la récolte et 50 % en pulpes déshydratées le long de l'année.

^c Le potentiel total tient compte d'une baisse importante du cheptel global d'ici 2050.

04

MATURITÉ DE LA TECHNOLOGIE ET PANORAMA DES PROJETS EUROPÉENS

4.1 Les développeurs de la technologie Gazéification Hydrothermale en Europe	53
4.2 Les développeurs européens (hors France)	53
4.2.1 Le Karlsruhe Institut of Technology (KIT) et son pilote VERENA (2004)	53
4.2.2 PSI – TreaTech et l’HydroPilot (110 kg/h)	55
4.3 Les développeurs privés	58
4.3.1 SCW Systems et l’usine industrielle d’Alkmaar (16 t/h)	58
4.3.2 ProBiomass B.V et le projet SUPERSLUDGE	59
4.4 Les développeurs français	60
4.4.1 Le CEA LITEN et le prototype Gaseau	60
4.4.2 Leroux & Lotz Technologies, 1 ^{er} équipementier français à se lancer dans le développement de la technologie	61
4.4.3 VINCI Environnement, un intégrateur qui s’investit dans la technologie	62
4.5 Les principaux défis spécifiques à relever pour réussir le passage à l’échelle industrielle	63
4.5.1 Optimiser la récupération et la gestion de la chaleur dans le procédé	63
4.5.2 Assurer au mieux la séparation de la matière inorganique (sels minéraux et métaux) pour faciliter la gazéification de la matière organique	65
4.5.3 Optimiser le choix des alliages aciers en fonction de la localisation des contraintes mécaniques et des risques de corrosion	65
4.5.4 Optimiser la conversion du carbone : définir les bons paramètres opératoires	66
4.5.5 Optimiser la récupération des sortants : définir les bons paramètres opératoires	66

Les premières expériences de procédés hydrothermaux ont été menées en 1913 avec la carbonisation hydrothermale de cellulose pour obtenir un matériau similaire au charbon. Des travaux sur ces procédés ont également été menés dans les années 1970 et 1980 par le *Pittsburgh Energy Research Center* (USA), la *Royal Institute of Technology* à Stockholm (S) ou encore à l'université de Toronto (CA). De manière générale la recherche dans les procédés hydrothermaux s'est accélérée depuis le milieu des années 2000.

Concernant la Gazéification Hydrothermale, c'est au MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), institut de recherche et université très réputée des États-Unis, qu'on rapporte la première expérience avec cette technologie convertissant de la biomasse [18]. À la suite de cette première approche, le PNNL (*Pacific Northwest National Laboratory* – Californie) et l'université de Hawaï se sont penchés sur la question, testant notamment la conversion à hautes températures. Le PNNL, suite à

ses efforts sur la maîtrise de la liquéfaction hydrothermale, s'est intéressé au développement d'une solution de gazéification hydrothermale intégrant un catalyseur dans le gazéifieur. Tous ces travaux sont venus nourrir la réflexion des chercheurs du *Karlsruhe Institute of Technology* (KIT) qui ont été les premiers au monde à réaliser un projet pilote préindustriel à haute température en 2004. Son équivalent suisse, le *Paul Scherrer Institut*, a repris un peu plus tard les travaux du PNNL sur la gazéification hydrothermale avec catalyse intégrée puis a amélioré le procédé pour prendre finalement le *leadership* de cette famille de technologie. Au Japon, plusieurs acteurs comme les Universités de Tokyo, Hiroshima et Osaka ont également travaillé en parallèle sur le développement de la gazéification hydrothermale avec catalyse. Aujourd'hui, il existe plus d'une dizaine de développeurs de la technologie issus du monde académique et, de plus en plus, du secteur industriel dont en particulier en Europe.

4.1 Les développeurs de la technologie Gazéification Hydrothermale en Europe

Comme on peut le voir sur la Figure 11 ci-après, en Europe, l'essentiel des développeurs de la technologie Gazéification Hydrothermale ont réalisé des installations de :

- Prototype (TRL \leq 4) : 1 à 10 kg/h,
- Pilote préindustriel (TRL 4 – 6) : 40 à 150 kg/h,
- Démonstrateur industriel (TRL 7 – 9) : 500 kg à 2 t/h,

Fonctionnant tous « en continu », ces unités de Gazéification Hydrothermales se concentrent dans cinq pays : Allemagne, France, Espagne, Pays-Bas et Suisse.

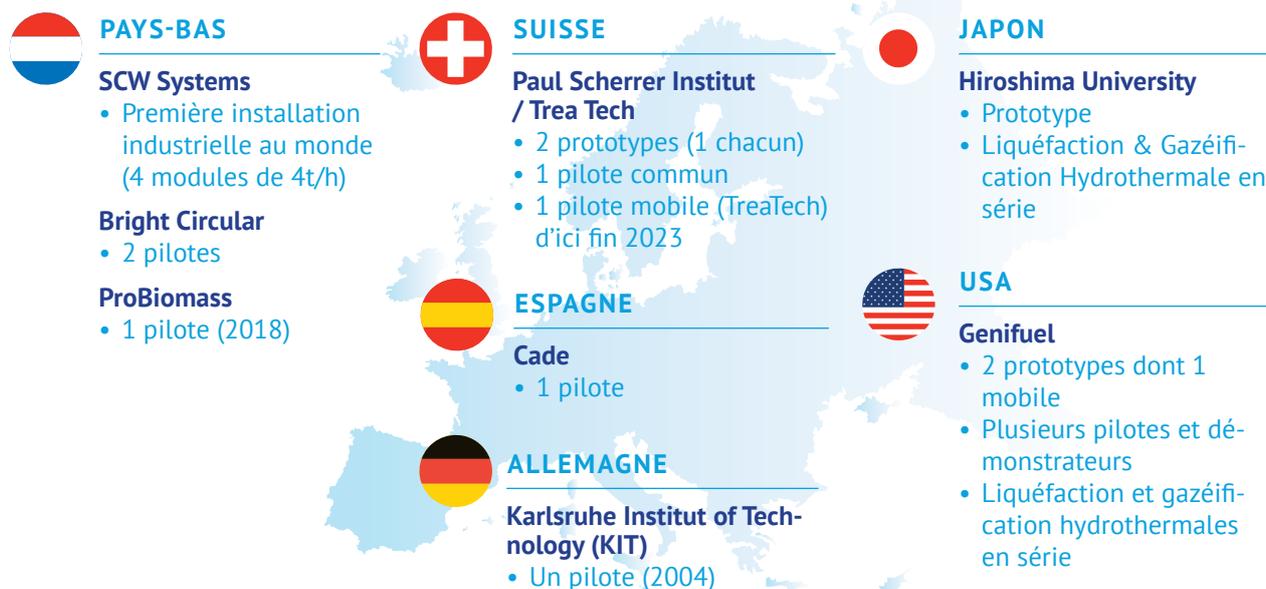
4.2 Les développeurs européens (hors France)

4.2.1 Le Karlsruhe Institut of Technology (KIT) et son pilote VERENA (2004)

Le KIT est autant un pôle de recherche d'excellence et la plus ancienne des grandes écoles d'ingénieurs de renommée en Allemagne. Dès les années 90, ses chercheurs se sont intéressés à la technologie de Gazéification Hydrothermale à haute température. Ils ont développé ses bases en Europe et déposé de nombreux brevets dans la suite. Avec le projet VERENA en 2004, ils ont

accompli la réalisation de la première unité pilote préindustrielle de la technologie au monde. Début 2021, dans l'objectif de soutenir l'émergence d'une filière dédiée à la Gazéification Hydrothermale, Dr. Boukis, le responsable de l'activité Gazéification Hydrothermale du KIT, publie un article scientifique dans la revue « *Processes* » présentant un retour d'expérience étoffé du pilote VERENA [19]

LA GAZÉIFICATION HYDROTHERMALE EN EUROPE ET DANS LE MONDE



LA GAZÉIFICATION HYDROTHERMALE EN FRANCE

Leroux & Lotz Technologies

- Coopération avec KIT
- 1 projet de démonstrateur (GHAMa) d'ici fin 2024 (en cours de développement)



VINCI Environnement

- Coopération avec Genifuel
- 1 projet pilote ou démonstrateur d'ici 2025 en France (Transfert de technologie)



CEA Liten

- 1 Prototype
- Développement d'un pilote d'ici 2025.



Figure 11 : Carte des développeurs actuels en Europe et dans le monde (situation à mi-2022) (Source Cerema & GRTgaz).

depuis sa création en 2004 (détails du pilote présentés Tableau 4).

Dans le pilote VERENA, nous retrouvons déjà réalisé le principe de fonctionnement de base qui est toujours valable dans n'importe quelle autre évolution de la technologie jusqu'à aujourd'hui : l'intrant prétraité si besoin (ex. : broyage) est comprimé lors de son injection dans le système passant ainsi de la pression atmosphérique à la

haute pression (300 bar ici). L'énergie thermique nécessaire au préchauffage de l'intrant jusqu'à l'atteinte des conditions supercritiques (au moins 360 °C) est captée au moyen d'un échangeur de chaleur qui récupère lui-même son énergie du flux sortant du gazéifieur en le refroidissant. Après un passage dans un séparateur de sel (cyclone), l'intrant allégé de sa charge minérale est gazéifié à une température d'environ 600 °C. Le préchauffeur et le réacteur de gazéification sont alimentés

en chaleur par des gaz chauds issus d'une chaudière. Dans le gazéifieur se forme principalement du méthane, de l'hydrogène et du dioxyde de carbone.

Le succès du pilote VERENA a permis plusieurs collaborations académiques et industrielles du KIT avec différents partenaires. Parmi les principales collaborations sont à citer celle avec le PSI (Paul Scherrer Institut en Suisse) pour tester son 1^{er} séparateur de sel vertical à taille industrielle et surtout celles avec deux des trois principaux développeurs aux Pays-Bas, Pro Biomass B.V et Bright-Circular, ce dernier à travers l'université de Delft. Le 3^{ème} développeur hollandais, SCW Systems, le plus avancé aujourd'hui, a réalisé ses différentes étapes de développement de la technologie (prototype (10 kg/h), démonstrateur (2 t/h et maintenant installation industrielle (16 t/h)) sans le moindre appui académique. À ce jour, chacune des trois entreprises néerlandaises citées ainsi que le PSI ont tous au moins développé et réalisé une installation pilote (entre 50 et 110 kg/h) ou un démonstrateur (2 t/h).

Tableau 4 : Carte d'identité du pilote Verena via données publiques.

Nom du projet	VERENA
Porteur du projet / partenaires	Karlsruhe Institute of technology (KIT)
Localisation	Karlsruhe, Allemagne
Année de MES	2004
Capacité maximale	100 kg/h, 20%MS
TRL	5
Type de technologie	Haute température avec séparateur de sel par séparation cyclone intégré
Conditions opératoires	600–700 °C, 250–300 bar
Intrants	Boues STEU, ensilage de maïs, méthanol, glycérol... plus d'une dizaine d'intrants différents
Valorisation du gaz	Bouteilles hautes pression
Valorisation des co-produits	Non (élimination sur une STEU)
Coûts de réalisation	2 M€*

*Valeur 2004 - Webinaire : NEW R&D ADVANCES IN HYDROTHERMAL GASIFICATION FOR BIOFUEL PRODUCTION 2021 (<https://vimeo.com/510267625>).

4.2.2 PSI – TreaTech et l'HydroPilot (110 kg/h)

En Suisse, c'est le Paul Scherrer Institut (PSI), pôle de recherche dédié à l'énergie, qui est à l'origine du développement de la technologie Gazéification Hydrothermale en Suisse (début des années 2000). A l'inverse des autres développeurs, le PSI s'investit dans le développement de la Gazéification Hydrothermale « avec catalyse intégrée », largement inspiré au départ par les travaux réalisés par le *Pacific Northwest National Laboratory*, (PNNL), appartenant à l'*US Department of Energy*.

Fort des connaissances acquises, une première unité « prototype » (KONTI-C, 1-2 kg/h) a d'abord été construite en 2014 dans le cadre du projet SunChem. Cela a permis de tester et d'éprouver à la fois un 1^{er} concept d'un séparateur de sels et d'un catalyseur. Les premiers essais ont été réalisés avec la catalyse. Des tests sur des microalgues et du glycérol ont été réalisés dans un premier temps avant d'ouvrir la voie à des intrants plus complexes comme des boues de STEU. En parallèle, la conception du séparateur de sels a été améliorée et un équipement à taille industrielle réalisé puis testé avec le support du KIT à travers son pilote VERENA : ce séparateur se retrouve

aujourd'hui intégré dans l'installation pilote pré-industrielle (voir figure 12) du PSI et de TreaTech.

Tandis qu'une saumure plus ou moins riche en nutriments (P, K, Ca, S...) et en métaux est récupérée en sortie du séparateur de sels, l'effluent aqueux en sortie du procédé catalytique contient la quasi-totalité de l'azote et un très faible taux de carbone organique. Jusqu'à 99 % du carbone de l'intrant initial est converti en syngaz démontrant les excellentes performances de conversion du réacteur catalytique.

Deux pionniers suisses – Frédéric Juillard et Gaël Peng – s'intéressant à l'industrialisation de la technologie développée par le PSI, créent en 2015 la *start-up* TreaTech. Les deux entités ont collaboré sur la conception et réalisation de leur première installation pilote quasi industrielle sachant traiter jusqu'à 110 kg/h d'intrants (voir Tableau 5 suivant). TreaTech dispose par ailleurs de son propre prototype équipé d'un séparateur de sels optimisé pour le traitement de boues de STEU, une conception brevetée bien différente de celle développée par le PSI.

Les travaux de développement scientifique du PSI sur la Gazéification Hydrothermale avec catalyse et la réalisation de son pilote commun avec TreaTech ont été très fortement soutenus par l'Office Fédéral de l'Énergie Suisse. Sa principale motivation était dès le départ d'appuyer le développement d'une solution alternative à l'incinération des boues et digestats de boues de STEU. Il faut savoir que depuis l'interdiction de l'épandage des boues sur les terres agricoles en 2006, l'incinération est la seule solution de traitement autorisée en Suisse.

Ce projet pilote est censé également apporter une réponse à la nouvelle réglementation nationale applicable à partir de 2026 en Suisse qui imposera la récupération maximale du phosphore des boues de STEU à tous leurs exploitants. À ce titre, PSI et TreaTech travaillent avec des partenaires pour identifier et rendre industrialisable un procédé technico-économique valable de récupération, transformation et revalorisation du phosphore en un produit commercialisable.

La société TreaTech se concentre prioritairement sur le développement d'unités industrielles opérationnelles dès 2025 visant le marché du traitement des boues issues de STEU et des déchets organiques industriels. Elle a lancé la mise en place de sa 1^{ère} installation pilote qui sera mobilisable sur un site client et disponible dès fin

Tableau 5 : Carte d'identité du projet HydroPilot.

Nom du projet	Hydropilot
Porteur du projet / partenaires	TreaTech / PSI, KASAG, Exergo, Afry
Localisation	Paul Scherrer Institut (Suisse, Villigen)
Année de MES	2020
Capacité maximale	110 kg/h, 20 % MS
TRL	6
Type de technologie	Catalytique avec séparateur de sel intégré
Conditions opératoires	400–450 °C, 250–280 bar
Intrants	Boues et digestats de boues de STEU
Valorisation du gaz	Non, torchère
Valorisation des co-produits	Des recherches sont en cours pour valoriser le phosphore
Coûts de réalisation	CAPEX: 2 M€

2023. Sa conception tient compte du retour d'expérience réalisée sur le pilote commun avec le PSI. Le déploiement d'un 1^{er} projet de démonstration à taille industrielle est envisagé à partir de 2025 avec une capacité de traitement entre 2 et 4 t/h d'intrants.



Figure 12 : Photo du PSI de l'installation «Hydropilot» installée en 2020 à Villigen (CH) en collaboration avec TreaTech (source : M. Fischer, Paul Scherrer Institute, 2020).

La technologie développée autant par PSI que TreaTech se base sur la Gazéification Hydrothermale avec catalyse intégrée dont la particularité est d'abaisser la température de réaction dans le réacteur à environ 400 °C et de générer un syngaz particulièrement riche en méthane (jusqu'à 70 % sans ajout artificiel d'hydrogène).

Le déchet introduit dans le pilote est tout d'abord comprimé à 280 bar et ensuite préchauffé à travers un échangeur de chaleur à environ 360 °C permettant de valoriser au mieux la chaleur résiduelle du réacteur de gazéification et de limiter les pertes du système au strict minimum. Le séparateur de sels est chauffé à environ 450 °C et accueille en premier l'intrant pour séparer les composants solides (minéraux, métaux) du flux carboné visé pour la Gazéification Hydrothermale. Après un passage dans un capteur de soufre lui retirant définitivement toute trace de soufre nuisible pour le fonctionnement du catalyseur, le flux carboné rentre dans le réacteur de gazéification catalytique pour être transformé en un mélange de syngaz et d'eau résiduelle contenant principalement de l'azote (ammonium). Après une séparation des deux phases gazeuse et liquide en sortie, on obtient un syngaz toujours à haute pression contenant principalement du méthane ($\text{CH}_4 \leq 70\%$), de l'hydrogène ($\text{H}_2 : 0 \text{ à } 10\%$) et du gaz carbonique ($\text{CO}_2 : 30 \text{ à } 35\%$). Le rendement de conversion du carbone atteint entre 85 et 99 % selon la complexité du type d'intrant ou de mélange d'intrant valorisé. Par ailleurs, plus de 98 % du carbone organique total (COT) contenu dans les boues d'épuration est dégradé avec un taux de récupération de phosphore et d'ammonium supérieur à 80 %.

Tableau 6 : Exemple de flux massiques pour une unité commerciale de Gazéification Hydrothermale catalytique de 6 t/h (Source : TreaTech).

Intrants	Produits, coproduits et effluents	
Matière sèche 20 %m	Gaz renouvelable	17 %m*
	Phosphore	0,4 %m
	Ammonium	≈ 20 g/l
	Matière organique recyclé dans le procédé	1 %m
Eau 80 %m	Déchets ultimes	7 %m
	Eau recyclée dans le procédé	11 %m
	Eau de procédé	62 %m

* %m = pourcentage massique

Le Tableau 6 montre un exemple de répartition des sous-produits issus de la Gazéification Hydrothermale catalytique d'une unité commerciale de 6 t/h traitant des boues digérées.

Dans le cadre d'un partenariat construit et réalisé en 2022 entre l'Institut Paul Scherrer (PSI), TreaTech et GRTgaz testant la chaîne complète du procédé de l'unité de Gazéification Hydrothermale "Hydropilot", une analyse complète** de la production de gaz de synthèse a montré que sa qualité pouvait être facilement conforme à la norme européenne de qualité du biométhane*** pour son injection dans le réseau de gaz.

** Résumé de l'analyse en Annexe.

*** EN 16726 ou EN 16723-1

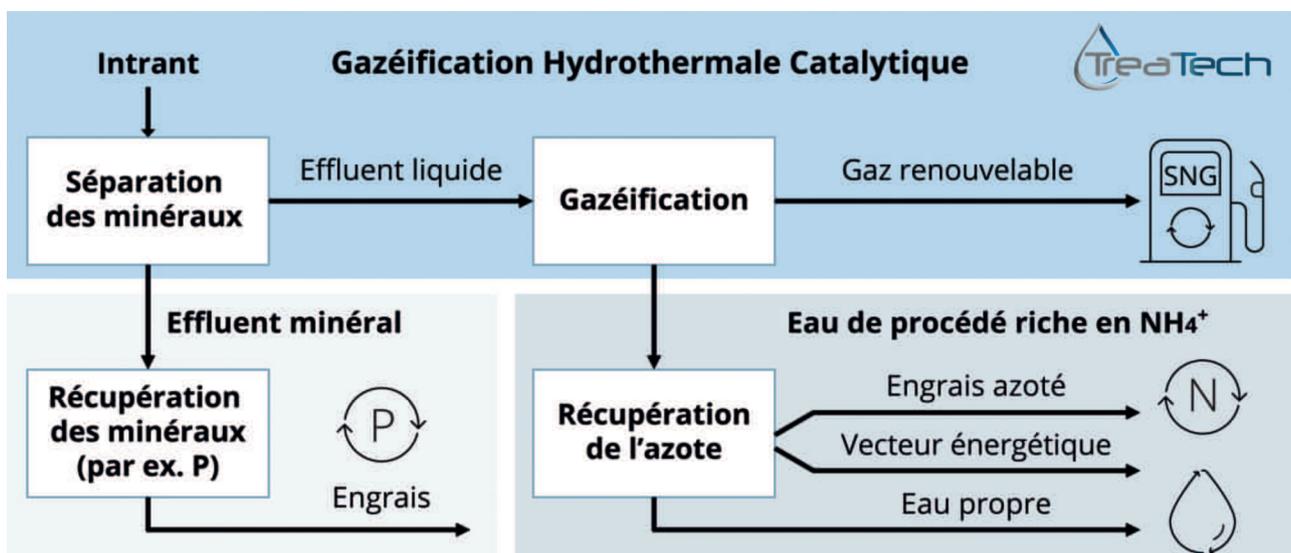


Figure 13 : Schéma de principe du pilote de Gazéification Hydrothermale (source : TreaTech).

4.3 Les développeurs privés

4.3.1 SCW Systems et l'usine industrielle d'Alkmaar (16 t/h)

SCW Systems est à ce jour la société au monde la plus avancée de la technologie avec la mise en service courant 2023 de sa première installation industrielle. Elle sait traiter en continu ($\approx 7\,500$ à $8\,000$ h/an) jusqu'à 16 t/h d'intrants et totalise une puissance installée d'environ 20 MW thermique (dépendant du type d'intrant/mélange d'intrants et de sa concentration). La photo ci-après illustre les installations actuelles (Figure 14) et le Tableau 7 leurs détails.

- L'activité de SCW Systems a commencé en 2014 par le développement d'un 1^{er} pilote de 100 L/h fonctionnant à 10% de glycérol construit à Alkmaar. Il était alimenté par un réchauffeur électrique pour assurer la montée en température. Un obstacle majeur du procédé à l'époque était l'évacuation des inorganiques de l'installation, dû notamment à des dépôts de sels et de carbone. SCW Systems a déposé plusieurs brevets avec des solutions ayant levé cet obstacle (non encore rendus publics).
- Ce prototype, une fois largement testé et amélioré, SCW Systems a lancé en 2016 le développement montage d'un projet de démonstration industrielle avec une capacité de traitement de 2 t/h ($\approx 2\text{ MW}_{\text{th}}$) qui a été réalisé en 2018. Pour appuyer le projet, une collaboration avec Gasunie New Energy a été signée avec un apport financier de 15 M€ assurant l'essentiel du financement lié au développement et la réalisation du projet de démonstration (passage

Tableau 7 : Carte d'identité du projet SCW Systems.

Nom du projet	Usine d'Alkmaar 1
Porteur du projet / partenaires	Société projet commun entre SCW Systems et Gasunie New Energy
Localisation	Alkmaar, Pays Bas
Année de MES	Avant fin 2022
Capacité maximale	16 t/h (4 modules de 4 t/h), 20 MW_{th}
TRL	8
Type de technologie	Haute température (sans catalyse)
Traitement de gaz	Enchaînement en série d'une désulfuration, une méthanation catalytique et d'une séparation membranaire du CO_2
Valorisation des co-produits (liquide, gazeux, solide)	Eau résiduelle : préparé en qualité potable CO_2 : minéralisation (poussière carbonée) Métaux : volonté de récupération des métaux économiquement les plus intéressants (volume et/ou valeur)
Conditions opératoires	Supérieur à 374 °C , $250\text{--}300\text{ bar}$
Intrants	Boues STEU, déchets agricoles, déchets agroalimentaires, déchets ménagers, biodéchets, effluents industriels, plastiques.
Coûts de réalisation (estimation)	CAPEX du projet démonstrateur : $\approx 15\text{ M€}$ Projet Alkmaar 1 : entre 45 à 55 M€



Figure 14 : Vue aérienne du site d'Alkmaar de SCW Systems (source : invest-nl.nl).

d'un TRL 6 à 8). Fin 2018, les premiers tests de démarrage ont été mis en œuvre. En décembre 2019, le projet de SCW Systems est devenu **le premier projet Gazéification Hydrothermale au monde ayant réussi une injection d'un gaz conforme dans le réseau de Gasunie**, l'équivalent de GRTgaz au Pays-Bas. Durant la phase de test et d'optimisation le démonstrateur a vécu plusieurs phases d'amélioration testant autant la conversion de différents intrants avec l'injection d'un gaz conforme dans le réseau que la résistance des matériaux mis en œuvre. Sur une partie du démonstrateur le choix des alliages a été repris et remplacé par des matériaux plus résistants ayant finalement donné satisfaction après une nouvelle phase de tests approfondis.

- Dès 2018, SCW Systems a déposé un 1^{er} projet Gazéification Hydrothermale à vocation industrielle (Alkmaar 1, capacité de traitement : 16 t/h (20 MW_{th}), voir tableau 7) dans le cadre de l'appel à projet annuel de l'État néerlandais finançant des projets d'expérimentation de production d'énergies renouvelables. SCW Systems a ainsi obtenu pour son projet une rémunération garantie sur 12 ans découpée à travers l'obtention d'une subvention de 55 €/MWh_{PCS} et d'un prix de vente du gaz injecté de 20 €/MWh_{PCS}. Devant fonctionner en continu, le projet Alkmaar 1 de SCW Systems peut ainsi espérer atteindre une rémunération globale d'environ 112 M€ sur la durée du contrat.

Jouant sur la massification des installations avec le souhait de développer des projets de plusieurs dizaines voire centaines de mégawatt par site, SCW Systems mise également sur la minéralisation du CO₂ en excès : elle a développé et breveté un procédé spécifique le transformant dans une poudre de carbone^a. Sa valorisation intéresse des industriels des secteurs du ciment, du papier... aussi pour son éligibilité à l'obtention de crédit carbone.

Enfin SCW Systems ne s'arrête pas là dans ses ambitions et sa feuille de route pour les prochaines années est dense :

- D'ici 2024/2025, mise en œuvre de deux autres projets Gazéification Hydrothermale de 40 MW_{th} chacun totalisant une puissance de 100 MW_{th} avec une capacité de production de gaz d'environ 0,5 TWh/an. Le projet Alkmaar2A a déjà été approuvé par l'État hollandais en 2020 et devrait être réalisé pour 2024 au plus tard.

En parallèle, SCW Systems a déjà lancé le développement d'autres sites en plus de celui d'Alkmaar qui cumulera une puissance installée de 100 MW_{th} d'ici 2025 : l'entreprise vise en particulier des sites industriels proches des grands ports néerlandais intéressés par une meilleure valorisation de leurs déchets. D'ici 2030, elle veut ainsi développer une puissance thermique globale installée de 650 MW_{th} dans les grands ports de Rotterdam et d'Eemshaven (proche de la frontière allemande). Ensemble, avec les installations sur le site d'Alkmaar, SCW Systems projette à cet même horizon d'atteindre un parc d'installations industrielles totalisant en base une capacité globale de production de gaz injectable d'au moins **10 TWh/an aux Pays-Bas et d'environ 40 TWh/ an dans toute l'Europe**. Pour précision, le gouvernement néerlandais table sur une production nationale de gaz renouvelable et bas-carbone minimale à partir de Gazéification Hydrothermale de 11,2 TWh en 2030 assurant ainsi 57 % de la production globale de gaz renouvelable et bas-carbone visée en 2030^b.

À noter que SCW Systems ayant rendu public que très peu de détails, l'essentiel des informations ci-dessus est issu du rapport « *BTG openbaar eindrapport vergassing 11 maart 2021* » [20] complétées par des informations oralement communiquées par le directeur du développement commercial de SCW Systems.

4.3.2 ProBiomass B.V et le projet SUPERSLUDGE

S'appuyant sur une technologie du KIT, ProBiomass a pu concevoir un premier prototype (capacité d'environ 0,2 L/h) dès 2011 et construit dans le cadre du consortium SUPERSLUDGE (Tableau 8). L'objectif principal était de mieux connaître les effets d'une conversion des boues de station d'épuration par Gazéification Hydrothermale. C'est pour cette raison que le projet a été fortement

subventionné par les agences de l'eau du Pays-Bas (les agences de De Dommel et d'Aa en Maas sont impliquées dans le projet).

Complétées par deux essais à l'échelle pilote (capacité 50 L/h) avec des boues d'épuration sur l'installation VERENA du KIT, une première conception préliminaire pour la mise en œuvre

^a Projet COCOMINE-2 (<https://www.kansenvoorwest2.nl/en/projecten/cocomine-2>).

^b Kamerbrief Routekaart Groen Gas (archive parlement néerlandais, consulté le 12/01/2022)

finale d'un démonstrateur sachant traiter 1 t/h de boues a été développée jusqu'en 2016.

Pour des raisons économiques, il a été décidé de construire d'abord une installation pilote pré-industrielle de 150 kg/h à petit budget (0,7 M€), chose faite dès début 2018 avec le lancement d'une phase de prise en main du pilote. Cette phase fut suivie de deux années de tests d'exploitation destinés à optimiser le procédé. L'objectif était de statuer sur une base de conception finale permettant de lancer la réalisation du projet démonstrateur 1 t/h comme ultime étape de développement de leur procédé.

Concernant la séparation des sels, le consortium a utilisé un séparateur cyclone dont la gestion a été modifiée pour optimiser la séparation des sels et limiter ainsi la perte de matière organique dans le flux destiné à être transformé en gaz dans le gazéifieur [20].

Concernant la brique de traitement du syngaz, ProBiomass a fait appel à l'équipementier allemand MicroEnergy, spécialiste de la méthanation biologique [21], lui apportant à travers une étude de faisabilité la preuve (*Proof of concept*) que son procédé de méthanation est capable de s'adapter pour rendre conforme à l'injection le syngaz issu du procédé Gazéification Hydrothermale de ProBiomass.

En 2020, ProBiomass évaluait le coût d'investissement (CAPEX^a) global moyen d'un futur projet industriel avec sa technologie, en fonction de sa taille (intégration d'effets d'échelle), à :

- 5,5 M€ pour une Gazéification Hydrothermale de 1 t/h
- 7,3 M€ pour une Gazéification Hydrothermale de 1,5 t/h
- 17,9 M€ pour une Gazéification Hydrothermale de 5 t/h

4.4 Les développeurs français

4.4.1 Le CEA LITEN et le prototype Gaseau

En France, le CEA LITEN à Grenoble s'intéresse depuis le début des années 2010 à la technologie Gazéification Hydrothermale à haute

Tableau 8 : Carte d'identité du projet SUPERSLUDGE.

Nom du projet	SUPERSLUDGE
Porteur du projet / partenaires	ProBiomass / Agences de l'eau «Aa en Maas» et «Dommel», Entreprises SNB et Glaesum
Localisation	Pays Bas
Année de MES	2018
Capacité maximale	150 kg/h, ≥ 17% MS
TRL	6
Type de technologie	Non catalytique
Conditions opératoires	650 °C, 350 bar
Intrants	Boues de STEU
Valorisation du gaz	Non (torchère) + Collaboration R&D avec la société MicroEnergy (All) rachetée depuis par depuis par Pietro Fiorentini Group (Italy).
Valorisation des co-produits	N.C
Coûts de réalisation	0,7 M€

De même, ProBiomass a fait varier certains paramètres pour connaître leur impact sur le CAPEX et la rentabilité de potentiels projets traitant des boues de STEU :

- Une durée de fonctionnement de 8 000 h/an associée à un rendement thermique de 88 %, un taux de conversion de 95 %, un PCS de 21,6 MJ/kg MS et une siccité d'au moins 17 % de l'intrant donnaient les meilleurs résultats.

^a Présentation de la société Pro-Biomass envoyée à GRTgaz, données publiques mais présentation confidentielle ne pouvant être jointe à cette étude.

d'intrants. En 2019, la conception d'une installation pilote traitant environ 100 kg/h a été initiée dans le cadre du projet Cométhath en collaboration avec VINCI Environnement^a. Depuis, le prototype a été remplacé par un nouveau, de taille identique, bénéficiant des travaux d'amélioration dans la conception du procédé. Au printemps 2022, **le CEA et GRDF se sont associés** pour dynamiser et finaliser les travaux de développement du procédé Gazéification Hydrothermale dans le but de réaliser au plus tôt, avec un industriel intéressé, le projet pilote préindustriel visé.

Le prototype GASEAU est un réacteur d'étude avec fonctionnement en continu, sur des plages de débits allant de 1 à 10 kg/h maximum. L'énergie thermique nécessaire au procédé est apportée par l'extérieur avec un chauffage électrique sans récupération de chaleur.

La séparation des inorganiques se fait par effet gravitaire en bas à l'intérieur du gazéifieur, via la présence d'une zone froide pour piéger ces derniers. Le CEA a testé plus d'une dizaine d'intrants, comme des liqueurs noires, algues, digestats, boues et digestats de boues, vinasses...

Selon le CEA les principaux verrous technologiques à lever pour développer la Gazéification Hydrothermale sont la gestion de l'énergie (et la récupération de chaleur), la gestion des sels (avec

Tableau 9 : Carte d'identité du prototype Gaseau.

Nom du projet	GASEAU
Porteur du projet / partenaires	CEA LITEN
Localisation	Grenoble, France
Année de MES	2016/ 2021
Capacité maximale	10 kg/h, 10 % (prototype en continu)
TRL	4
Type de technologie	Haute température
Conditions opératoires	600 à 700 °C, 250 à 300 bar
Intrants	Boues et digestats de boues de STEU, liqueur noire, micro-algues...
Valorisation du gaz	Non (torché)
Valorisation des co-produits	Non
Coûts de réalisation	N.C

ou sans séparateur de sels dédié), la corrosion et la tenue mécanique des équipements, la bonne conversion du carbone contenu dans la matière organique et enfin la valorisation des sortants (eau riche en ammonium et des solides comme des minéraux et métaux).

4.4.2 Leroux & Lotz Technologies, 1^{er} équipementier français à se lancer dans le développement de la technologie

Dernier spécialiste français de la conversion de « Biomass and Waste to Energy », Leroux & Lotz Technologies est une société nantaise de 90 collaborateurs faisant partie du groupe Altawest. Fort de son expérience de plus de 35 ans, Leroux & Lotz Technologies réalise la conception, la réalisation et la mise en service d'installations de conversion (combustion par chaudière, pyrogazéification, oxydation hydrothermale) et de valorisation de différents types de combustibles renouvelables et/ou fossiles (biomasses, CSR, déchets urbains et industriels...) en énergie (thermique, électrique et gaz).

Venant initialement des chaudières biomasse, Leroux & Lotz Technologies a développé ces dernières années avec la pyrogazéification et



Figure 15 : Démonstrateur d'oxydation hydrothermale réalisée par Leroux & Lotz Technologies dans le cadre du projet Leanships H2020.

^a Cométhath Matinée Technique – 21 sept. 2018 (https://www.syctom-paris.fr/fileadmin/mediatheque/documentation/comethath/Comethath_Dossier-information.pdf)

l'oxydation hydrothermale (OHT) deux nouvelles technologies innovantes pour différents types de marchés aussi bien en France qu'à l'étranger. Dans sa stratégie d'innovation, le pas n'était pas loin pour que l'entreprise s'intéresse à la Gazéification Hydrothermale ce qui a été fait en s'associant dès 2019 au 1^{er} projet de démonstration GHAMa (2 t/h, $\approx 2 \text{ MW}_{\text{th}}$) à Saint-Nazaire d'abord en tant qu'intégrateur de la technologie Gazéification Hydrothermale. Fin 2021, Leroux & Lotz Technologies a décidé d'aller encore plus loin en lançant le développement de sa propre technologie (Gazéification Hydrothermale haute température) en signant un partenariat avec le KIT en Allemagne, le 1^{er} développeur scientifique de la technologie en Europe (voir chapitre 4.2.1).

L'ambition de Leroux & Lotz Technologies est de déployer cette technologie avec une première commercialisation à partir de 2025/2026 grâce au retour d'expérience acquis dans le cadre du projet de démonstration GHAMa. Au même titre que pour les autres technologies, Leroux & Lotz Technologies se positionne avec la Gazéification Hydrothermale comme fournisseur d'équipement de la brique « cœur du procédé » clé en main visant en particulier des tailles d'installations traitant entre 4 et 8 t/h de déchets organiques issus d'activités gérées par des collectivités territoriales (STEU, déchets ménagers, biodéchets), industriels et agriculteurs.

4.4.3 VINCI Environnement, un intégrateur qui s'investit dans la technologie

VINCI Environnement, filiale de VINCI Construction Grands Projets, est un acteur historique français pour la réalisation de projets industriels de traitement et valorisation de déchets. La centaine de ses collaborateurs s'appuie sur les fonctions supports pluridisciplinaires du Groupe VINCI pour mener à bien ses projets, en particulier dans sa division hydraulique (conception/construction de station d'épuration des eaux et traitement des boues) mais aussi depuis plusieurs années dans le domaine des installations de méthanisation dans lequel VINCI Environnement s'est positionné avec son propre procédé (à voie sèche).

Compte-tenu des enjeux et des opportunités à venir dans le domaine des gaz renouvelable et bas-carbone incluant l'hydrogène, VINCI Environnement souhaite élargir son offre en prenant toute sa place dans le futur développement et le déploiement de

la Gazéification Hydrothermale en France et en Europe.

Afin de répondre à ses ambitions, elle a signé un accord de partenariat avec la société **GENIFUEL CORPORATION**, développeur historique reconnu de la technologie Gazéification Hydrothermale aux USA, dont le niveau de maturité technologique est suffisamment élevé pour intégrer à terme cette « brique procédé » dans une installation clef en main.

La technologie développée est un procédé catalytique en deux étapes qui aligne une liquéfaction avec une Gazéification Hydrothermale et dont plusieurs installations de démonstration (capacité de traitement : $\approx 0,5 \text{ t/h}$) sont en fonctionnement. Elles ont d'ailleurs fourni ces dernières années l'opportunité de tester un grand nombre d'intrants



Figure 16 : Installation mobile de GENIFUEL.

différents : la première installation fonctionne depuis 2017 sur des algues ; parmi celles en cours de développement, GENIFUEL travaille aussi sur d'autres intrants comme différents types de boues de station d'épuration (STEU de Vancouver

et STEU en Floride). Les installations sont montées en container ce qui les rend facilement transportables d'un site à l'autre permettant de démultiplier les expériences avec différents prospects et intrants (Figure 16).

4.5 Les principaux défis spécifiques à relever pour réussir le passage à l'échelle industrielle

Tous les développeurs de la technologie doivent faire face aux conditions opératoires très spécifiques (supercritiques) de la Gazéification Hydrothermale. Plusieurs défis technologiques sont ainsi à relever par chacun afin de développer et industrialiser la technologie :

- Optimiser les apports et la gestion de l'énergie thermique dans le procédé ;
- Maîtriser au mieux la corrosion et la tenue mécanique des matériaux ;

- Maîtriser au mieux la séparation des solides (sels minéraux, métaux...);
- Optimiser le taux de conversion du carbone pour chaque type ou mélange d'intrants ;
- Optimiser la récupération des sortants (gazeux, liquides et solides).

4.5.1 Optimiser la récupération et la gestion de la chaleur dans le procédé

Il existe deux critères pour évaluer l'efficacité énergétique du procédé Gazéification Hydrothermale :

$$\text{Rendement de conversion énergétique} = \frac{\text{Energie des gaz récupérés}}{\text{Energie contenue dans l'intrant}}$$

$$\text{Rendement énergétique global} = \frac{\text{Energie des gaz récupérés} - \text{Consommation énergétique}}{\text{Energie contenue dans l'intrant}}$$

Pour la consommation énergétique du système et le calcul du rendement énergétique global il faut distinguer deux cas de figure :

1. La phase de démarrage ou mise en chauffe de l'installation : c'est la phase qui génère la plus grande consommation énergétique essentiellement thermique servant à préchauffer l'installation de la température ambiante à la température de consigne permettant le passage au fonctionnement en continu. Le besoin en énergie électrique est très limité et concerne essentiellement le fonctionnement de la pompe haute pression (plus quelques consommateurs annexes : vannes, sondes...) comprimant l'intrant en phase liquide ce qui ne nécessite par nature que très peu d'énergie.
2. La phase de fonctionnement en continu : outre les besoins inchangés en énergie électrique, l'essentiel des consommations thermiques est lié à la compensation des pertes thermiques de l'équipement ayant le plus haut besoin de température du système, soit le séparateur de sels (Gazéification Hydrothermale avec catalyse) soit le gazéifieur (Gazéification Hydrothermale haute température). D'autres pertes thermiques faibles sont liées aux résidus solides et liquides générés en sortie du séparateur de sels et du séparateur de phase.

Un rendement élevé des échangeurs de chaleur (> 85 %) est essentiel pour atteindre des rendements énergétiques globaux élevés ciblés pour les installations industrielles (> 70 à 75 % *a minima*) !

Le procédé à haute température, s'opérant à des températures se situant entre 550 à 700 °C, nécessite par nature un apport énergétique plus conséquent que le procédé avec catalyse, fonctionnant entre 360 et 400 °C. La conception et le rendement des échangeurs de chaleur et le choix des moyens de production thermique les mieux adaptés sont ainsi au centre de la conception des différents développeurs de la technologie.

Dans le pilote Hydropilot de PSI/TreaTech, le rendement des échangeurs de chaleur installé a été mesuré à 88 % rendant ainsi caduque l'équipement de refroidissement (installé par précaution) du flux principal en sortie du gazéifieur Gazéification Hydrothermale.

Dans le cas de la Gazéification Hydrothermale avec catalyse, c'est le séparateur de sels qui est chauffé et maintenu à la plus haute température du système (environ 450 °C chez TreaTech), tous les autres équipements du procédé (gazéifieur, préchauffage de l'intrant) sont alimentés par le seul échangeur de chaleur. La fourniture thermique peut être assurée, autant pour la phase de démarrage que pour la phase de fonctionnement en continu, par un seul équipement de production de chaleur dont le choix de l'énergie primaire est complètement libre (gaz, bois, électrique, solaire...).

Dans le cas de la Gazéification Hydrothermale haute température, c'est le gazéifieur qui dispose du plus haut niveau de température et c'est le séparateur de sels et les autres équipements qui sont alimentés par un ou plusieurs (en cascade) échangeurs de chaleur. Pour la fourniture thermique, il peut être judicieux d'opérer une distinction entre un moyen de production dédié à atteindre les conditions supercritiques (≈ 374 °C) et un autre, bénéficiant d'un mode de chauffe plus fin (résistance électrique par exemple) qui ajuste le niveau de température dans le gazéifieur.

Le contenu énergétique du gaz de synthèse généré est directement lié au taux de conversion du procédé Gazéification Hydrothermale mis en œuvre (pression, température, temps de séjour) et au contenu énergétique de l'intrant qui dépend de son contenu en matière organique, notamment celui en carbone.

À tonnage d'intrant traité constant, plus l'intrant est riche en énergie plus le débit de gaz et son contenu énergétique sera élevé, à consommation énergétique quasi constante dans le système

Gazéification Hydrothermale. **En conséquence, plus un intrant est énergétiquement riche, plus sa production de syngaz et le rendement énergétique global du procédé augmentent.**

- En augmentant le taux de matière sèche d'un mélange ou d'un déchet organique, son contenu en carbone augmente et proportionnellement le pouvoir calorifique brut de l'intrant et indirectement celui du gaz de synthèse. À noter : le taux de conversion énergétique est généralement compris entre 85 et 99 % selon la teneur en cendre / minéraux de l'intrant
- Le rendement thermique des échangeurs a atteint plus de 85 % avec les pilotes actuels

Le taux de Matières Sèches (dont son taux de MO et de carbone) dans l'intrant et son pouvoir calorifique associé sont donc deux éléments clefs pour l'efficacité énergétique de la technologie. Cependant, son augmentation peut avoir des conséquences :

- ▶ **Intrants plus difficilement manipulables :** certaines ressources visées se comportent « comme de l'eau » jusqu'à un taux de matières sèches de l'ordre de 20 % mais d'autres deviennent beaucoup plus difficiles à manipuler et à injecter dans un réacteur. La rhéologie de ces produits peut rendre problématique la pressurisation de la ressource. Des pompes de pressurisation à fort débit et à haute pression n'existent pas sur le marché. Cependant il existe de nombreux intrants avec des siccités bien supérieures à 20 % qui peuvent être convertis et pour lesquels une offre de pompes adaptées existe. À noter qu'il est possible d'améliorer la viscosité en préchauffant l'intrant avant son entrée dans la pompe ou d'injecter certains intrants en parallèle de l'eau dans le gazéifieur ou le séparateur de sel selon le type de technologie Gazéification Hydrothermale.

Le taux de MS est généralement limité à ≈ 20 % pour les biomasses d'origines biogéniques (taux au-delà duquel d'une part la ressource peut devenir difficile à injecter et d'autre part la réactivité de l'eau supercritique devient moins efficace).

Toutefois, après échanges avec au moins un développeur, ce taux peut monter à 35 % dans le cas d'un mélange glycérol, boues de STEU et plastiques et jusqu'à 80 % à l'échelle laboratoire si des intrants non biogéniques sont utilisés

(plastiques, monomères, polymères...) dilués dans de l'eau et solvants.

Les leviers d'optimisation pour fiabiliser le procédé Gazéification Hydrothermale sont les suivants :

- > Le rendement des échangeurs de chaleur
- > L'efficacité des apports énergétiques (moyens de production thermiques en fonction du niveau de température cible)
- > Le taux de récupération thermique de la chaleur se trouvant dans les sortants liquides et solides

Le procédé Gazéification Hydrothermale avec catalyse permet de travailler à des températures plus faibles (360 à 450 °C) avec des enjeux énergétiques certes moins importants mais restant primordiaux. Plusieurs paramètres sont à prendre en compte pour assurer l'efficacité de la technologie :

► **Nature du catalyseur**

► **Régénération du catalyseur et captage du soufre en amont** : le soufre en trop grande concentration vient raccourcir fortement la durée de vie et l'efficacité du catalyseur. Il doit être éliminé ou séparé en amont du gazéifieur catalytique. Des taux élevés de séparation minérale et de captage (>90 %) du soufre sont indispensables pour garantir un fonctionnement dans la durée.

Le captage du soufre en amont du catalyseur comme le recyclage et remplacement du catalyseur génèrent des coûts induits pesant dans les budgets d'OPEX. Un taux de recyclage du catalyseur >75 % permet de limiter sensiblement la dépense récurrente lors du renouvellement du catalyseur.

4.5.2 Assurer au mieux la séparation de la matière inorganique (sels minéraux et métaux) pour faciliter la gazéification de la matière organique

Un certain nombre d'intrants de la Gazéification Hydrothermale dont les boues de station d'épuration en sont un parfait exemple, contenant une fraction importante de matière minérale dissoute ou non dans l'eau. En conditions supercritiques, la solubilité de ces minéraux diminue drastiquement et ces derniers précipitent dans l'eau. D'après la littérature, on distingue deux types de sels :

- **Les sels de type 1** caractérisés par l'existence d'une phase liquide dense au-delà du point critique de l'eau. Ces sels ne provoquent, en principe, aucun problème.
- **Les sels de type 2** caractérisés par leur précipitation quand on s'approche du point critique de l'eau. Ils forment une phase « collante » sur les

parois. Ces sels posent des problèmes de bouchage/agglomération dans les réacteurs.

Trois solutions permettent de remédier aux problèmes de bouchage et d'agglomération dans les réacteurs :

1. Éliminer les sels en amont du réacteur par exemple par un traitement chimique.
2. Gérer les sels par la mise en œuvre d'un séparateur de sels en amont du réacteur (technologie TreaTech)
3. Gérer les sels par la mise en œuvre d'une séparation par cyclone en amont du réacteur (technologie KIT).

4.5.3 Optimiser le choix des alliages aciers en fonction de la localisation des contraintes mécaniques et des risques de corrosion

La tenue mécanique des réacteurs sous les conditions supercritiques (température supérieure à 500 degrés) est impactée par le phénomène de

corrosion due à l'agressivité de l'eau supercritique et des minéraux contenus dans l'intrant.

À noter qu'il est intéressant de passer par une phase de test longue durée de ces échantillons d'alliage afin de trouver ceux qui seront adaptés pour la conception de réacteurs dotés d'une capacité de traitement supérieure.

Pour établir la réaction le procédé Gazéification Hydrothermale, il faut apporter de l'énergie à la ressource. En chauffant par l'extérieur la ressource

(par exemple au travers d'une paroi), la partie externe du réacteur sera plus chaude que la ressource à l'intérieur de celui-ci. Cette différence de température va créer des contraintes mécaniques importantes pouvant limiter la durée de vie du réacteur. D'autre part, si le chauffage s'opère à l'intérieur du réacteur par oxydation d'une partie de l'intrant, le rendement énergétique peut être affecté.

4.5.4 Optimiser la conversion du carbone : définir les bons paramètres opératoires

Le taux de conversion du carbone en méthane de synthèse est l'un des critères de performances du procédé Gazéification Hydrothermale dès lors qu'on recherche à produire des gaz de synthèse le plus riche possible en CH_4 , H_2 et potentiellement aussi en d'autres hydrocarbures (C_xH_y). La

décomposition des éléments constituant le bio-char est un paramètre clef de dimensionnement des réacteurs. Certaines molécules carbonées sont très facilement converties (exemple : éthanol, glucose), d'autres le sont plus difficilement (exemple : la lignine).

4.5.5 Optimiser la récupération des sortants : définir les bons paramètres opératoires

Les sortants générés par la Gazéification Hydrothermale se déclinent par type de phases, chacune avec ses challenges et contraintes :

- Sortants en phase gazeuse : ce sont les molécules à haute valeur énergétique qui intéressent le plus car elles apportent le plus de valeur économique. Toute autre molécule (CO , CO_2 , H_2S ...) doit être soit séparée (CO_2 , H_2S) soit convertie (CO).
- Sortants en phases liquide et solide : outre le résidu liquide du procédé contenant principalement de l'ammonium ce sont les résidus solides inorganiques (minéraux et métaux) qui peuvent porter des molécules d'intérêt qui méritent d'être valorisées en aval et pour lesquels le statut déchet ne devrait pas/plus s'appliquer après transformation dans un produit commercialisable. Il est ainsi d'intérêt de mettre en œuvre des procédés permettant de revaloriser au mieux le résidu liquide ainsi que de séparer et récupérer un très haut taux de solide du flux introduit dans le système. Cela permettra de valoriser au mieux :
 - > Les molécules de phosphate, de potassium et/ou d'ammonium pour la production de fertilisants.
 - > Les métaux (fer, aluminium, métaux rares...) portant par leur rareté (ressource) et/ou

leur valeur économique relativement élevée (unitaire ou en volume absolu) un intérêt spécifique pour être récupéré et réutilisé comme nouvelle ressource plus ou moins précieuse

Dans ces exemples, le taux de récupération et séparation global de ces molécules est un élément important pour l'appréciation de la viabilité technico-économique de la chaîne de procédés à mettre en œuvre pour leur valorisation commerciale.

En résumé, en base, chaque développeur de la technologie a globalement les mêmes types de défis à relever pour optimiser le fonctionnement et la rentabilité économique et énergétique de leur procédé de Gazéification Hydrothermale. Leur réussite passe autant à travers de travaux de recherche, d'études et de développements spécifiques, souvent très innovantes que de partenariats pertinents avec des spécialistes issus d'autres secteurs adaptant des solutions ayant déjà fait leurs preuves face à des contraintes similaires.

05

UNE TECHNOLOGIE AU CŒUR DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

5.1	Un modèle d'économie circulaire au profit des territoires	69
5.1.1	Typologies de co-produits	69
5.1.2	Co-produits énergétiques	69
5.1.3	Co-produits matières	71

5.2	Des voies de valorisation intéressantes aux impacts positifs	73
5.2.1	Des co-produits à haute valeur ajoutée pour le territoire	73
5.2.2	Un écosystème local d'acteurs à créer ou amplifier pour maximiser la recherche de plus-values	73
5.2.3	Générateur d'externalités positives	74

5.1 Un modèle d'économie circulaire au profit des territoires

La filière Gazéification Hydrothermale propose un modèle industriel basé sur la transformation thermo-chimique d'un large panel d'intrants en différents co-produits qui sont autant que possible à valoriser à l'échelle du territoire. Produisant en base un gaz renouvelable ou bas-carbone plus ou moins riche en méthane et hydrogène, la technologie permet en plus la récupération des résidus solides et liquides qui, après transformation, deviennent des co-produits

augmentant encore la valorisation globale d'un intrant donné.

En s'appuyant sur ces atouts, elle cherche à s'intégrer dans une bio-économie locale qui, renforcée par le déploiement d'unités compactes et modulaires, peut faire émerger de nombreuses autres externalités positives.

5.1.1 Typologies de co-produits

L'ADEME définit le « co-produit » comme une matière qui est créée au cours d'un processus de fabrication d'un produit, de manière intentionnelle ou non. La Gazéification Hydrothermale fait ainsi émerger deux types de co-produits en fonction de leur usage final :

- **Les co-produits énergétiques** : gaz renouvelable et bas-carbone.
- **Les co-produits matières** (solides et liquide) générés après transformation des matières solides et liquides résiduelles récupérées en aval du procédé.

Chaque co-produit a une valeur économique définie normalement dans des marchés spécifiques.

Ces derniers se fondent en règle générale sur une référence fossile souvent très bon marché, les co-produits d'origine biogénique ont souvent besoin d'un soutien financier et réglementaire des pouvoirs publics pour exister et permettre l'émergence des technologies nécessaires à leur génération.

Pour s'affranchir de cet obstacle supplémentaire en phase d'émergence, les premiers modèles d'affaire de la filière Gazéification Hydrothermale s'appuient essentiellement sur la valorisation de sa production énergétique (co-produit gaz rendu injectable dans le réseau) afin de pouvoir atteindre une rentabilité minimale pour les premiers projets industriels.

5.1.2 Co-produits énergétiques

a) Production de méthane de synthèse (> 95 % de CH₄)

Comme souvent rappelé au sein de ce livre blanc, la Gazéification Hydrothermale permet de produire, en fonction du type d'intrant, un gaz de synthèse qui est soit du gaz renouvelable soit du gaz bas-carbone en fonction de la composition de la part biogénique et fossile de l'intrant initial. Après avoir passé différents procédés de traitement (séparation gaz-liquide, épuration ou méthanation), le gaz de synthèse est transformé et mis aux normes^a en méthane de synthèse injectable dans le réseau de gaz. Il est alors essentiellement composé de méthane (> 95 %).

Dans un contexte où l'autonomie énergétique aussi bien gazière qu'électrique est devenue un enjeu majeur pour les territoires, le développement de capacités locales de production de gaz renouvelable et bas-carbone avec la même qualité et composition que le gaz naturel est un atout stratégique de la Gazéification Hydrothermale, aussi bien au niveau territorial que national.

^a Norme : la composition du gaz injecté doit être conforme à la norme gaz naturel du réseau de gaz.

b) Production de dioxyde de carbone (CO₂)

La Gazéification Hydrothermale génère un gaz de synthèse avec un taux de conversion très élevé du carbone (entre 85 % et jusqu'à 99 %). Il contient toujours du gaz carbonique (aussi bien avec la Gazéification Hydrothermale avec catalyse qu'avec celle à haute température). Sa quote-part dépend des intrants, des paramètres de conversion de l'installation et du fonctionnement opérationnel.

À la suite de la séparation des phases gazeuse et liquide, un pourcentage significatif du gaz carbonique contenu dans le gaz de synthèse se retrouve capté et stocké jusqu'à saturation dans le résidu liquide. La part restante en phase gazeuse du gaz carbonique est traitée en aval avec les autres molécules gazeuses (méthane, hydrogène...).

Le syngaz, ainsi allégé en gaz carbonique, est ensuite traité par épuration ou méthanation et enfin séparé de son contenu résiduel en gaz de carbonique pour devenir un gaz conforme à l'injection, le méthane de synthèse. Le gaz carbonique résiduel peut être dirigé vers différentes voies de valorisation plus ou moins directes en fonction de sa pureté (utilisation en serres agricoles, puits de carbone synthétique soit par minéralisation ou soit par séquestration dans les sols, projets de *Power-to-gas*...).

Il existe toutefois une variante permettant d'éviter le traitement du syngaz décrit ci-dessus : dans le cas d'un apport volontaires d'hydrogène dans le procédé, soit directement dans le gazéifieur (procédé avec catalyse), soit dans l'équipement de méthanation (procédé à haute température), la part gaz carbonique est « consommée » par l'hydrogène injecté. Cet apport permet non seulement d'augmenter sensiblement (jusqu'au double du débit normal) la production de méthane mais

aussi de quasiment parvenir à une composition du méthane de synthèse conforme à l'injection.

Comme présenté dans les chapitres précédents, quelle que soit la famille de techniques, le CO₂ est un co-produit ayant une part significative (entre 20-35 % en termes de quantité) parmi les sortants. La valorisation du CO₂ est nécessaire car elle pourrait faire émerger des boucles d'économie circulaire en réduisant les émissions globales du procédé, tout en s'alignant sur les objectifs climatiques fixés aux niveaux national et européen.

Le CO₂ est valorisable selon trois voies potentielles et avec des exigences au niveau des taux de pureté à respecter qui peuvent varier :

- 1. Valorisation sans transformation :** récupération assistée des hydrocarbures, géothermie profonde, secteur alimentaire ou pharmaceutiques, etc.
- 2. Valorisation avec transformation chimique :** synthèse organique, la minéralisation, la méthanation, etc.
- 3. Valorisation avec transformation biologique** pour l'usage énergétique : par exemple la culture des microalgues.

Certaines voies de valorisation ont été identifiées comme prometteuses (Tableau 10), par exemple l'usage dans la géothermie profonde, la méthanation et la production de méthanol, car elles envisagent soit le stockage du CO₂ à long terme, soit l'utilisation directe du produit final, qui réduisent les impacts environnementaux du procédé. Il est à noter que ces impacts peuvent être considérablement atténués dans le cas où la consommation énergétique liée à ces procédés

Tableau 10 : Synthèse des procédés de valorisation du CO₂ en fonction des puretés minimales requises, de la maturité des technologies de valorisation et de la quantité de produits issues de l'utilisation d'une tonne de CO₂ (source GRTgaz).

Procédé	Pureté minimale requise	Quantité produite pour une tonne de CO ₂ valorisée	Maturité (TRL)
Géothermie profonde	≥ 95 %	1 MWh d'électricité	6-8
Production des polycarbonates	≥ 20 %	10 t de carbonate	9
Méthanation	≥ 10 %	0,36 t de méthane	6-9
Hydrogénation (méthanol)	≥ 70 %	0,73 t de méthanol	7
Minéralisation <i>ex situ</i>	≥ 20 %	2,64 t de minéraux carbonatés	7-9
Culture de microalgues	≥ 20 %	0,20 t d'algocarburant	7-9

est assurée par le gaz de synthèse produit directement par la Gazéification Hydrothermale.

En Europe, les deux développeurs de la technologie de gazéification hydrothermale, TreaTech et SCW Systems, se sont penchés sur la question de la valorisation du gaz carbonique résiduel avec des résultats intéressants. SCW Systems a développé, dans le cadre du projet CoCoMine^a, un procédé de minéralisation faisant réagir le gaz

carbonique avec de l'olivine, un minéral commun, pour permettre sa conversion en carbone solide. En le baptisant « *Clean-up* », SCW Systems est en train d'en faire un produit et une marque commerciale : une 1^{ère} réalisation à taille industrielle a été lancée en 2022 sur le site d'Alkmaar pour capter au moins 10 000 tonnes de CO₂/an. Cet exemple témoigne de l'effet d'accélérateur que le soutien européen peut apporter à ces filières et aux technologies de valorisation associées

c) Production d'hydrogène (H₂)

La production d'hydrogène décarboné est fortement soutenue et attendue en Europe ainsi qu'en France pour soutenir la transition énergétique et répondre aux objectifs de neutralité carbone. La Gazéification Hydrothermale permet de produire un gaz de synthèse plus ou moins riche en hydrogène (pourcentage volumique de 0 à 50 %) en fonction de la famille de procédé et d'un certain nombre de paramètres de la technologie choisie.

Après avoir séparé la production d'hydrogène du flux gazeux initial, elle peut être valorisée plus ou moins directement en fonction de sa pureté et de la tolérance de l'équipement d'usage choisi.

Cette capacité versatile de la Gazéification Hydrothermale permet d'orienter sa production gazeuse vers un taux plus ou moins riche en méthane ou en hydrogène. De ce fait, les futurs porteurs de projet pourront adapter leur production selon les besoins du marché.

5.1.3 Co-produits matières

a) Les minéraux dont en particulier le phosphore (P) et le potassium (K)

Les conditions supercritiques de l'eau dans le procédé provoquent la précipitation des minéraux sous forme de sels dans la partie basse du réacteur ce qui permet leur séparation du fluide carboné. Afin d'éviter que ce phénomène se réalise dans le gazéifieur lui-même et perturbe potentiellement son fonctionnement, de plus en plus de développeurs de la technologie prévoient l'installation d'un séparateur de sels spécifique en amont du gazéifieur pour effectuer cette tâche. Visés en particulier pour leur qualité essentielle pour la croissance des plantes, la récupération des éléments phosphore (P) et potassium (K)

permet, au même titre que l'azote (N) récupéré à travers l'eau de procédé en aval (voir chapitre suivant), de produire, après une transformation adaptée, des fertilisants pouvant servir d'engrais dans l'agriculture. La récupération et la valorisation du phosphore sous une forme assimilable par les plantes n'étant pas directe, sa valorisation potentielle sur le marché est soumise encore à la levée de contraintes réglementaires (autorisation) et économiques (rentabilité de sa production et présence d'un véritable marché dédié) comme expliqué dans la suite du document (Chapitre 6, modèle d'affaire).

b) Les métaux

En fonction de la composition des déchets organiques traités, il est possible de trouver parmi les minéraux un certain nombre de métaux. Certains déchets notamment issus d'activités industrielles peuvent contenir des métaux précieux ou d'une valeur économique importante par leur rareté

(métaux rares) ou au contraire par leur volume relativement importante (fer, aluminium...).

Une publication conjointe Inrae, INSA, Deep, Agence de l'eau Rhône méditerranée et Reseed [22] a présenté le potentiel économique des différents

^a Minéralisation continue du CO₂ pour émissions négatives.

Tableau 11 : Métaux intéressants pour la récupération pour chaque matrice (concentration) (Varenes E. *et al.*, 2020).

Eau usée brute	Eau traitée	Boues	Cendres
Cuivre, Titane, Baryum	Bore Rubidium Lithium	Fer Manganèse Cuivre Zinc Phosphore*	Aluminium

*phosphore : ajout par le GT Gazéification Hydrothermale

Tableau 12 : Classement des métaux par potentiel financier sur une base d'un million d'EH (Varenes E. *et al.*, 2020).

>10 ⁶ €/an soit 1 €/EH.an	>10 ⁵ €/an soit 1 €/EH.an	>10 ⁴ €/an soit 1 €/EH.an	>10 ³ €/an soit 1 €/EH.an	<10 ³ €/an soit 1 €/EH.an
Baryum	Aluminium	Cuivre	Bore	Antimoine
Calcium	Hafnium	Gallium	Chrome	Argent
Césium	Or	Germanium	Étain	Arsenic
Magnésium	Palladium	Lithium	Fer	Bismuth
Rubidium	Platine	Manganèse	Molybdène	Cadmium
	Potassium	Niobium	Nickel	Cobalt
	Silicium	Rhodium	Tungstène	Indium
	Sodium	Titane	Vanadium	Mercure
		Zinc	Phosphore	Plomb

métaux que l'on peut retrouver couramment dans les eaux usées domestiques (Tableau 11).

La Gazéification Hydrothermale serait ainsi en mesure de récupérer les métaux contenus non seulement dans les boues de STEU urbaines et industrielles mais aussi dans un certain nombre de déchets organiques industriels spécifiques. Le Tableau 12 montre la valeur économique de ces

métaux rapportés à la taille (Équivalent-Habitant – EH) de l'installation.

Les valeurs marchandes « brutes » affichées ne permettent toutefois pas de conclure sur la viabilité économique de la récupération de chacun de ces métaux. Certains ont besoin d'une ou de plusieurs étapes de transformation successives, plus ou moins coûteuses, pour devenir valorisables.

c) L'eau (H₂O) et l'azote (N)

L'azote est dilué sous forme d'ammonium (NH₄⁺) dans l'eau de procédé récupéré à basse pression (≈ 5 à 10 bar) en sortie du séparateur gaz-liquide. Selon le type d'intrant valorisé, les deux résidus peuvent représenter ensemble jusqu'à 75 à 80 % de la masse sortante résiduelle du procédé.

L'azote, une fois séparé de l'eau par une technologie adaptée (stripping membranaire par exemple) permet l'obtention d'une eau purifiée. Cette dernière peut même être valorisée sans épuration de l'azote dans la filière microalgues ou en irriguant des sols agricoles. Des projets de REUT (Réutilisation des Eaux Usées Traitées) sont également possibles et pourraient faire l'objet

d'investigation depuis la publication du décret du 10 mars 2022 relatif aux usages et conditions de réutilisation des eaux usées traitées.

L'azote, et encore plus sous forme d'ammonium, est un élément essentiel de la croissance de tous les végétaux et fait partie de la composition de nombreux engrais. Les coûts de fertilisation et des engrais azotés ayant augmentés conjonctuellement, disposer d'une capacité d'approvisionnement locale d'azote d'origine biogénique sera un atout pour tous les acteurs de la chaîne de valeur.

d) Conclusion

Au final, la Gazéification Hydrothermale apporte, outre sa capacité de valorisation d'un déchet organique en production de gaz, également la possibilité de récupérer tous ses résidus solides et liquides en les valorisant en tant que co-produits

complémentaires. La technologie propose ainsi une solution alternative très complète et économiquement intéressante pour la valorisation d'un déchet organique capable de concurrencer avec succès les technologies existantes.

5.2 Des voies de valorisation intéressantes aux impacts positifs

Avec la parution de la loi AGEC (loi Anti-Gaspillage pour une Économie Circulaire) en 2022, la réutilisation des matériaux devient une pratique nécessaire pour atteindre les objectifs de

neutralité carbone des territoires. Le développement de la Gazéification Hydrothermale s'inscrit dans cette trajectoire en développant des pistes de valorisation pour ses co-produits.

5.2.1 Des co-produits à haute valeur ajoutée pour le territoire

Comme décrit dans le paragraphe précédent, des co-produits énergétiques et matières résultent du procédé de Gazéification Hydrothermale. La situation climatique et la conjoncture des marchés de ressources fossiles font notamment peser une pression particulière sur les co-produits suivants :

- **Les sels minéraux et l'azote :** les effets liés au changement climatique et le contexte géopolitique qui soulève en permanence la question de l'accès aux ressources fossiles impactent fortement le secteur agricole générant ainsi des enjeux économiques et environnementaux forts. La récupération de l'azote, du phosphore et du potassium par la Gazéification Hydrothermale permet de répondre en partie à ces enjeux. Elle propose, après transformation, des engrais issus d'un circuit court aux territoires tout en sécurisant *a minima* la production agricole. Un agriculteur peut ainsi tirer une double plus-value directe de la technologie : valoriser ses déchets et récupérer des minéraux, de l'azote et de l'eau à un coût maîtrisé durablement. Ces engrais seraient une alternative économique

à l'usage d'engrais chimiques moins vertueux pour les sols.

- **Les métaux :** l'extraction des métaux génère très souvent, et malgré les progrès technologiques, un impact environnemental important. Son coût économique spécifique varie, pour chaque métal, en fonction des gisements qui se déplètent à vitesse variable, des besoins des marchés respectifs et du contrôle exercé par certains pays clés dominant l'exploitation de certaines ressources fossiles. Les métaux étant des matériaux pour lesquels le recyclage (circuit court) s'impose autant que possible par l'effet volume ou coût (rareté), les perspectives de revalorisation sont multiples. Elles sont par ailleurs capables de répondre aux exigences économiques et réglementaires qui pèsent sur eux. Ainsi, La récupération locale des métaux en sortie d'une installation de Gazéification Hydrothermale traitant des intrants qui en contiennent augmente l'autonomie des industriels d'un territoire qui en consomment.

5.2.2 Un écosystème local d'acteurs à créer ou amplifier pour maximiser la recherche de plus-values

La valorisation de ces co-produits ne peut se faire qu'avec l'investissement et la mise en commun d'acteurs locaux pour créer ou amplifier les filières de recyclage territoriales de ces matériaux tout

en garantissant un équilibre économique pour les futurs consommateurs (industrie, agriculture, etc.).

La valorisation des co-produits ne pourra se faire sans un investissement de la part du territoire sur de nouveaux procédés (chimiques, biologiques) de recyclage de ces co-produits pour atteindre cet optimum économique qui permettra leur valorisation locale.

La Gazéification Hydrothermale se positionne comme un catalyseur de cette dynamique de recyclage et d'économie circulaire mais doit être accompagnée par l'ensemble des acteurs territoriaux de la chaîne de valeur des co-produits pour concrétiser les différentes voies de valorisation. Un soutien public sera enfin un facteur clé de la mobilisation des écosystèmes.

5.2.3 Générateur d'externalités positives

La mise en place de ces nouveaux écosystèmes circulaires sera bénéfique pour le territoire à plusieurs niveaux et notamment par la création d'emplois durables, directs et indirects, non délocalisables de tous niveaux de qualification :

- Pour l'approvisionnement des déchets organiques et ressources ;
- Pour les études, la construction et l'exploitation du site accueillant la technologie ;
- Pour la génération et/ou la valorisation locale ou régionale des co-produits gazeux, solides et liquide.

L'estimation précise des emplois pouvant être générés par la filière reste à réaliser, le Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale y prendra toute sa part.

Outre les emplois, d'autres externalités positives ayant une valeur intrinsèque réelle pour la collectivité, tant au niveau national que territorial pourront émerger.

Néanmoins, ces dernières restent à quantifier et à monétiser à ce stade :

- Santé publique : diminution des quantités de NO_x émises dans l'atmosphère lors de la combustion des boues de stations d'épurations et des épandages non maîtrisés ;

- Environnement : très forte réduction des émissions de GES, empreinte au sol réduite vis-à-vis des solutions conventionnelles ;
- Contribution à la mise en place des territoires à énergie positive et à une mobilité propre à l'échelle locale ;
- Balance commerciale : réduction des importations de gaz naturel.

La Gazéification Hydrothermale offre également des opportunités de développement voire de *leadership* aux TPE et PME françaises, en pointe sur les briques innovantes de la chaîne de valeur, et qui se mobilisent dès aujourd'hui à travers le Groupe de Travail national.

En synthèse, la figure ci-joint (Figure 17) présente les externalités positives et les bénéfiques liées à la technologie Gazéification Hydrothermale. Non exhaustive, cette représentation illustre les premiers résultats obtenus lors des travaux d'un sous-groupe du Groupe de Travail national. Comme évoqué plus haut, il est encore difficile de quantifier ces externalités sur le plan monétaire. Elles devront faire l'objet d'études spécifiques menées à cet effet. L'intégration croissante d'une part plus respectueuse des objectifs du développement durable dans les marchés devrait augmenter leurs valeurs micro- comme macroéconomiques dans la durée.

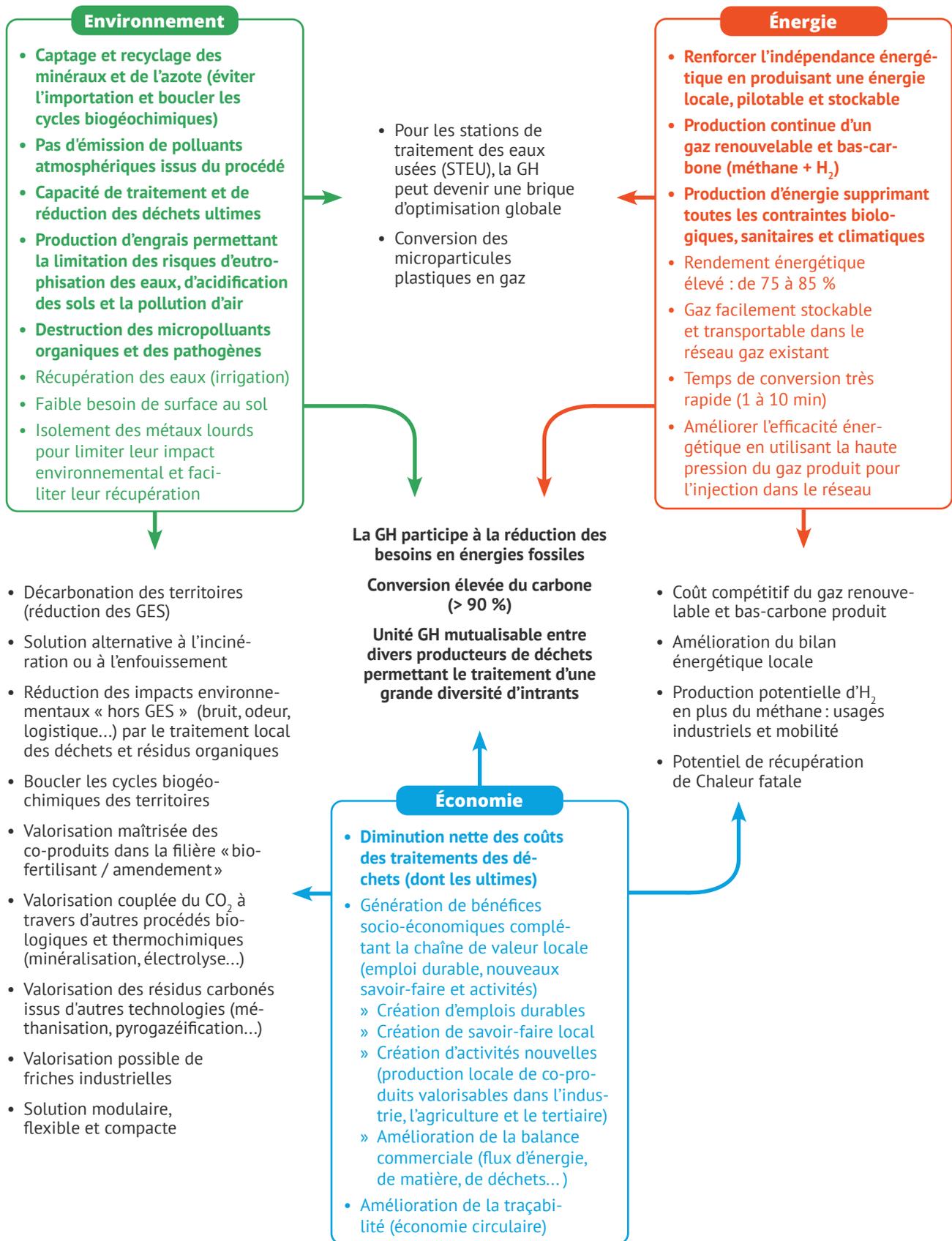


Figure 17 : Exemple d'externalités positives et de bénéfices liées à une installation de Gazéification Hydrothermale (GH) à l'interface des enjeux environnementaux, d'énergie et d'économie (source : GT GH).

06

MODÈLE D'AFFAIRE DE LA TECHNOLOGIE ET POTENTIEL ÉCONOMIQUE

6.1	Évaluation des coûts CAPEX et OPEX de la technologie	80
6.1.1	CAPEX	81
6.1.2	Évaluation des coûts d'exploitation « OPEX »	82
<hr/>		
6.2	Un modèle d'affaire évolutif dans le temps	84
6.2.1	Valorisation économique du gaz produit	84
6.2.2	Valorisation économique du traitement de déchets	86
<hr/>		
6.3	Avec des perspectives de développement dynamiques	87

Bien que le principe scientifique de la «gazéification en eau supercritique ou hydrothermale» ne soit pas nouveau^a, il fallait attendre jusqu'en 2004 pour que la technologie passe le premier pas vers un fonctionnement en continu et une future industrialisation : la mise en service de la 1^{ère} installation pilote au monde, le projet VERENA (100 kg/h) du *Karlsruhe Institut of Technology* (KIT) en Allemagne !

Depuis 2010, de nombreux autres pilotes pré-industriels et, encore plus tard, de premiers démonstrateurs quasi industriels (Osaka Gas (J), SCW Systems (NL), Genifuel (USA)...) ont été réalisés et ont fait beaucoup avancer le développement de la technologie, avec catalyse comme à haute température.

Enfin, plus récemment, tirés par les développeurs privés s'intéressant activement à la technologie depuis une dizaine d'années, le sujet est en train de franchir le cap du niveau industriel : avec la mise en service commerciale prévue début 2023 du 1^{er} projet industriel au monde, appelé « Alkmaar 1 » (20 MW_{th}), le développeur SCW Systems (NL) crée la preuve. Pour la société, il s'agit du début d'une série de trois projets consécutifs (avec « Alkmaar 2A et 2B », chacun de 40 MW_{th}) prévus d'être installés sur le même site d'ici fin 2025. Les premiers éléments disponibles indiquent qu'à partir d'une rémunération du gaz injecté d'environ 75 €/MWh_{PCS} (tient compte des niveaux de prix fixés entre 2018 et 2020), les deux premiers des trois projets visés devraient être capables de couvrir leurs coûts (CAPEX et OPEX) sur une durée globale d'exploitation de 12 ans. À ce jour, il est encore trop tôt pour disposer d'un REX global suffisant pour construire un véritable modèle d'affaire et estimer un potentiel économique précis de la technologie. Toutefois, il est possible d'en définir une 1^{ère} base et les grandes lignes de l'évolution potentielle du futur marché Gazéification Hydrothermale en France.

En effet, en-dehors d'informations confidentielles partagées par certains développeurs privés, seule une poignée de publications scientifiques [23] se risquent à les estimer. De plus, les périmètres des chiffres avancés par certains acteurs ne sont pas toujours identiques ce qui a obligé le Groupe de Travail à compléter certains paramètres (exemple : technologie de traitement de gaz, financement du CAPEX...) et de tenir compte des spécificités liées à

l'appartenance à l'une ou l'autre des deux familles de la technologie Gazéification Hydrothermale (avec catalyse et à haute température).

De même, au-delà de l'analyse des coûts complets de la technologie (projet global), le calcul des revenus potentiels générés par un projet a dû se limiter, pour le moment, à la seule rémunération du gaz injecté.

Une valeur économique supplémentaire pourrait être générée, selon le type de déchets valorisés, par exemple à travers le service rendu lié au traitement des déchets et/ou la possibilité de pouvoir revaloriser les résidus liquides et solides récupérés. Ces exemples de revenus peuvent être plus ou moins importants et, souvent, sont peu communs aux autres technologies de production de gaz renouvelable et bas-carbone. Il n'est pas aisé de les évaluer dans leur globalité, une approche au cas par cas est préférable tout en tenant compte de la situation de référence qui peut générer un impact plus ou moins important sur la rentabilité d'un projet donné.

^a Premières publications de recherche au MIT dans les années 1970, <https://bit.ly/3OR897r>.

6.1 Évaluation des coûts CAPEX et OPEX de la technologie

Diverses tailles d'installations existent au niveau mondial et/ou sont actuellement en construction en Europe :

- Pilotes et démonstrateurs de quelques centaines de kg/h:
 - > KIT (D), TreaTech (CH) + ProBiomass (NL) : 100 à 150 kg/h,
 - > Osaka Gas (J) : 350 kg/h et Genifuel (USA) : 500 kg/h
- Démonstrateur et installations industrielles t/h (SCW Systems = 1^{er} industriel Gazéification Hydrothermale au monde):
 - > Démonstrateur industriel (2 MW_{th}) : 1 module de 2 t/h optimisé entre 2018 et 2020,
 - > 1^{er} projet industriel au monde (Alkmaar 1 (20 MW_{th})) : 4 modules de 4 t/h,
 - Fonctionnement commercial du projet annoncé au plus tard pour fin 2022 !
 - > Projets Alkmaar 2A et 2B (40 MW_{th} chacun) : 8 modules de 4 t/h,
 - Fonctionnement commercial prévus d'ici fin 2024 et 2025.

Cette diversité d'installations rend l'analyse, la comparaison et la définition d'un modèle d'affaire plus difficile mais tend à montrer la taille minimale à partir de laquelle une viabilité économique semble atteignable.

Un projet Gazéification Hydrothermale doit faire face à des contraintes de coûts qui sont directement liées à la capacité de traitement du module qui :

- Dimensionné trop petit, se voit confronté à un plafonnement des coûts indépendamment de sa taille.
 - > En-dessous d'une taille de 1 à 2 t/h (selon le type d'intrant traité), pour plusieurs sous-équipements les coûts de fabrication ne peuvent plus être diminués avec la taille.
- Dimensionné trop grand, se voit confronté à une évolution exponentielle des coûts pour certains sous-équipements (robinets et vannes par exemple) dont la hausse des diamètres atteint vite des limites physiques (pour faire face aux

conditions supercritiques) à ne pas dépasser si on veut maîtriser les coûts à un niveau compétitif.

- > la taille maximale d'un module devrait ainsi se situer entre 4 t/h (choix de SCW Systems) et 6 t/h ; tout projet dépassant ces capacités de traitement d'intrant sera équipé d'au moins 2 modules de taille identique.

D'autres éléments impactent également les coûts et la rentabilité potentielle d'une installation qui est toujours dimensionnée pour un débit (= tonnage horaire) brut de déchets maximal donné : le débit de gaz de synthèse en sortie du gazéifieur dépendant directement du contenu en carbone de l'intrant, plus ce dernier est concentré et riche en contenu énergétique (= carbone), plus le débit du gaz de synthèse en sortie va être important.

Quant à la consommation énergétique du procédé de gazéification hydrothermale, elle dépend quasi entièrement du débit brut de déchets pour lequel l'installation a été dimensionnée : en 1^{ère} approche, elle peut ainsi être considérée comme constante : un intrant plus concentré et riche en carbone génère ainsi aucun surcoût énergétique à débit brut égal de l'intrant traité !

L'exemple hollandais de SCW Systems s'oriente volontairement vers des projets uniques de grande puissance (au moins 20 à 40 MWh) sur des sites de production pouvant cumuler des puissances thermiques globales installées dépassant largement les 100 MW_{th} par site. Nécessitant une alimentation abondante de déchets organiques toute l'année, SCW Systems cible tout d'abord des sites à proximité immédiate de grands ports maritimes ou de grands sites industriels (Rotterdam, Alkmaar, Delfzijl...) à proximité de voies de transport maritimes ou fluviaux permettant le transport à moindre coût des déchets vers les usines Gazéification Hydrothermale de traitement et de valorisation.

En France, confronté à une géographie bien différente et une localisation des grands volumes de déchets plus diversifiée, les acteurs de la filière Gazéification Hydrothermale pensent que l'essentiel des projets se situera dans une gamme de capacité de traitement située entre 4 et 8 t/h de déchets. Par la taille importante de certains sites

(stations d'épuration des plus grandes agglomérations telles que Paris, Marseille, Lyon... et grands sites industriels) et à la présence de très grandes quantités de déchets (> 25 000 tMS/an), il pourrait

y avoir aussi en France un certain nombre de très grands projets de Gazéification Hydrothermale pouvant atteindre une puissance installée de 40 MW_{th} et plus par projet et site.

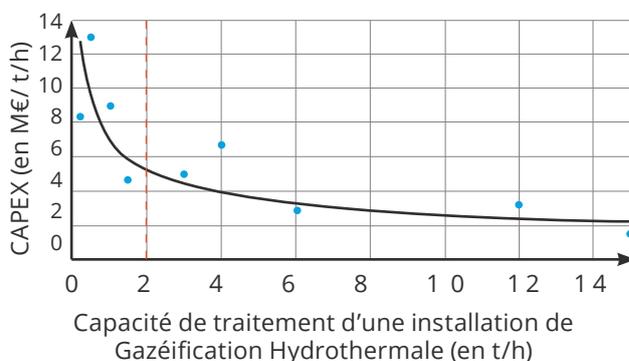
6.1.1 CAPEX

Les chiffrages de CAPEX récupérés entendent bien souvent des périmètres un peu différents rendant la comparaison à périmètre égal plus difficile, ceci vaut à la fois pour ceux dans la littérature scientifique que pour ceux communiqués de la part des développeurs privés de la technologie. De plus, la Gazéification Hydrothermale débutant sa phase d'industrialisation, il est prévisible que les chiffres puissent encore bouger à la baisse, soit par l'effet de la concurrence entre les acteurs soit par des effets de série et de standardisation de la fabrication industrielle des modules et du montage des installations Gazéification Hydrothermale globales. Les développeurs aujourd'hui les plus avancés pensent pouvoir atteindre des économies d'échelle pouvant aller jusqu'à -30 % sous cinq ans après leur lancement commercial.

Il est entendu que les chiffres affichés et rassemblés ci-après par les auteurs ne peuvent être qu'une photo à un moment donné (juin 2022) et n'intègrent aucun effet financier lié à l'inflation ou aux perturbations des marchés d'approvisionnement en matériaux et ressources spécifiques !

Malgré l'incertitude sur laquelle se place les acteurs de la filière Gazéification Hydrothermale, il est néanmoins possible de tracer une première courbe des coûts d'investissements (CAPEX) en fonction de la capacité de traitement de l'installation visée, intégrant les deux familles de technologie (avec catalyse ou à haute température) et s'appuyant sur les sources disponibles (données bibliographiques, publication scientifiques, etc.), des premiers estimatifs de projets industriels de certains développeurs et des chiffres récupérés sur les tous premiers projets industriels en phase de réalisation ou de démarrage.

On remarque ainsi qu'unitairement, en partant dans la figure 19 ci-dessus à gauche du seuil « 2 t/h » (symbolisé par la ligne rouge pointillée), **les coûts CAPEX montent de manière exponentielle (allant d'environ 5,5 à 13 M€ par t/h traité) pour des tailles d'installations avec des capacités de traitement de déchets inférieures à 2 t/h.** Une installation Gazéification Hydrothermale



Le tonnage affiché du déchet organique traité se réfère à une siccité maximale de 20 % MS et un pouvoir calorifique moyen d'environ 20 MJ/kg MS

Figure 18 : Évolution du coût d'investissement (M€/ t/h) d'un projet Gazéification Hydrothermale en fonction de sa capacité de traitement de déchets.

de 2 t/h correspond aujourd'hui au seuil « taille haute » d'un projet de démonstration industrielle permettant à un développeur d'optimiser et de faire passer sa technologie d'un TRL 6–7 à 8–9. Cette taille est en même temps bien représentative pour la commercialisation d'un futur produit (module de 3 à 6 t/h).

Dans le sens inverse, en augmentant la capacité de traitement d'une installation, on constate d'abord une baisse moins sensible des coûts d'environ 5,5 à 4 M€/t/h traité en passant de 2 à 4 t/h et ensuite une évolution de manière linéaire des coûts se rapprochant d'un seuil bas tangentiel de 2 M€ par t/h traité jusqu'à des capacités de traitement très élevées (> 14 t/h).

En variant les types de déchets traités, il a été constaté que le seuil de rentabilité potentielle d'une installation ne dépend pas que de sa taille mais aussi, pour une partie non négligeable, du type de déchet ou de mélange de déchets converti. Ainsi, plus le déchet organique est doté d'une siccité élevée (≥ 20 % MS), d'un contenu en carbone élevé dans la matière sèche et ainsi d'un pouvoir calorifique important ($\gg 20$ MJ/kg MS), avec une consommation énergétique du système qui reste constante à débit brut inchangé, plus le débit de gaz généré en sortie sera important. En conséquence, plus le contenu énergétique d'un

intrans et ainsi sa production de gaz donnée sont élevés, plus bas est situé le seuil de rentabilité d'une installation de gazéification hydrothermale. Par exemple, une usine traitant 4 t/h de boues de STEU urbaines de relativement faible contenu énergétique peut être moins rentable qu'une usine traitant un déchet riche énergétiquement d'une usine de 2 t/h.

En partant d'une rémunération du gaz injecté comparable à celle appliquée au lancement de la filière méthanisation, les simulations réalisées par les membres du Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale ont démontré que le seuil de rentabilité des premiers projets Gazéification Hydrothermale en France devrait pouvoir être atteint à partir d'une capacité de traitement de 4 t/h et d'un ratio CAPEX de 4 M€ par t/h de déchet traité.

Pour les très grands projets traitant des déchets les plus riches énergétiquement, il semble à terme possible de s'approcher d'un ratio de CAPEX d'environ 1 M€ par t/h.

Le rapport néerlandais « BTG – État de l'art et perspectives sur la gazéification aux Pays-Bas, Mars 2021 » [20] semble confirmer les estimations réalisées en France affichant **un ratio de coûts (CAPEX) par MW gaz injecté d'environ $\approx 1,5 \text{ M€}/\text{MW}_{\text{CH}_4}$, pour les installations néerlandaises de grandes puissances gaz légèrement inférieures à $50 \text{ MW}_{\text{CH}_4}$.**

Cependant, comme le montre le chapitre suivant, le facteur décisif est la comparaison des dépenses opérationnelles (OPEX), y compris les coûts de maintenance et d'amortissement, qui donnent une image réelle des coûts effectifs de l'élimination des boues en tenant compte des recettes générées (vente de gaz, d'éléments minéraux, etc.).

Cas d'étude Suisse (CAPEX)

Les coûts d'investissement pour différentes filières de traitement des boues ont été analysés dans une étude réalisée par AFRY Suisse SA en 2018. L'étude a considéré les scénarios suivants et se base sur une capacité d'une STEU de 200 000 Équivalent habitant.

Le cas de référence en Suisse (scénario 1a) pour le traitement des boues de STEU est :

- Une digestion anaérobie des boues sur site dont les digestats sont épaissies à 20–30 % de MS pour être ensuite transportés et incinérés (en Suisse, les boues ou digestats de boues doivent être incinérés obligatoirement et n'ont pas le droit d'être valorisés autrement).

En comparant **les coûts d'investissements CAPEX de cette référence avec d'autres scénarios**, l'étude démontre que :

- **Le couplage d'une solution « Gazéification Hydrothermale en aval d'une méthanisation » est 40 % plus onéreux (scénario 2a).**
- **À l'inverse, si on remplace complètement le procédé de traitement de méthanisation des boues par le procédé de Gazéification Hydrothermale traitant directement les boues (scénario 2b), alors cette solution serait au moins 20 % moins chère à l'investissement que le cas de référence.**

→ Cet avantage en faveur de la Gazéification Hydrothermale **peut augmenter jusqu'à 40 voire 50 %** (cas des boues de STEU) en tenant compte de **la suppression du prétraitement thermique supplémentaire** (exemple de l'hydrolyse thermique : 10 bar, 200 °C) nécessaire pour rendre les boues méthanisables (~ 80 % des boues en France), **du besoin de séchage additionnel pour atteindre une siccité suffisante** (~ 29 %) des digestats permettant leur combustion dans un incinérateur spécifique, **de la réduction voire suppression des besoins de transport** (liés à la baisse sensible des quantités de résidus finaux à transporter).

6.1.2 Évaluation des coûts d'exploitation « OPEX »

Les données disponibles concernant les coûts d'exploitations (OPEX) de la technologie sont peu nombreuses, néanmoins, il est possible d'en distinguer les postes centraux. L'OPEX est ainsi

composé principalement (hors coût éventuel de l'intrans) de :

- **La main d'œuvre** (emplois qualifiés nécessitant une surveillance *a minima* à distance et une équipe territoriale d'intervention rapide gérant

plusieurs projets. Hormis dans les tous premiers projets, il n'est pas prévu d'avoir du personnel spécifique à la technologie sur le site).

- **L'énergie à apporter** au procédé (principalement de la chaleur pour la montée en température au démarrage et, au-delà, pour assurer la température de consigne dans le gazéifieur, le pompage de l'intrant contenant de l'eau est par contre peu énergivore).
- **La maintenance** des équipements, en particulier ceux soumis à la haute pression et relative haute température.
- **Des consommables**, comme par exemple, pour la Gazéification Hydrothermale avec catalyse, le remplacement de la charge du catalyseur (sachant que 75 % du catalyseur est récupéré).
- **Des coûts administratifs.**
- **Les coûts de financement** du CAPEX du projet.

Cas d'étude Suisse (OPEX)

L'étude exécutée par AFRY Suisse SA en 2018 montre que pour les coûts d'exploitation, les solutions de Gazéification Hydrothermale tirent leur épingle du jeu comparativement aux coûts élevés d'élimination des boues en mono-incinération. Ainsi, même dans le cas où la Gazéification Hydrothermale vient en complément d'une installation de méthanisation des boues (scénario 2a), les OPEX sont légèrement inférieurs au cas de référence bien que l'amortissement des actifs soit supérieur (voir Figure 19).

Dans le cas d'un traitement direct des effluents par la Gazéification Hydrothermale, les OPEX sont presque divisés par deux !

Vous trouverez ci-dessous une brève description de chaque scénario :

- **Scénario 1a** : Digestion et incinération externe en tenant compte des coûts supplémentaires pour le transport des boues. L'énergie dérivée de l'incinération des boues ne peut pas être utilisée sur place.
- **Scénario 1b** : Digestion et incinération sur site, qui présente des avantages en termes de transport et d'intégration énergétique sur site.
- **Scénario 2a** : Digestion et SCWG, la fraction organique restante des boues après le processus de digestion anaérobie est gazéifiée par hydrothermie. Les deux digesteurs anaérobies et l'installation Gazéification Hydrothermale doivent être construits.
- **Scénario 2b** : Seulement Gazéification Hydrothermale, cela présente l'avantage d'éviter les investissements coûteux pour l'ensemble de l'infrastructure de digestion anaérobie.
- **Scénario 3** : Processus d'hydrolyse thermique (THP) suivi de digestions anaérobies et d'une incinération.

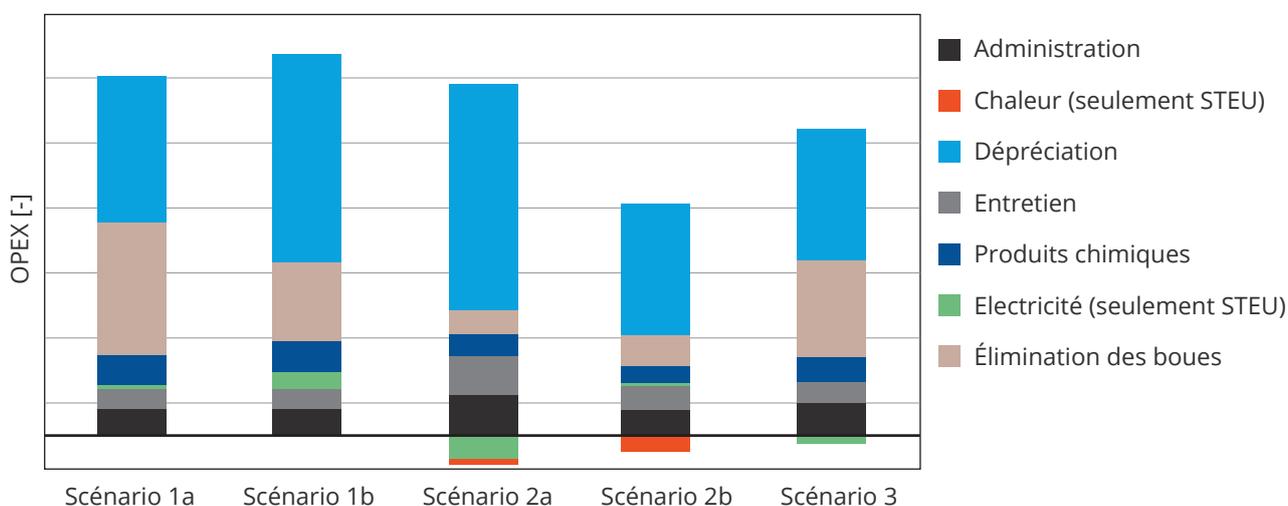


Figure 19 : OPEX pour les différents scénarios. La vente de chaleur et d'électricité grâce au biogaz généré par la Gazéification Hydrothermale à travers une cogénération (scénario 2a) permet de diminuer sensiblement les OPEX.

6.2 Un modèle d'affaire évolutif dans le temps

Par sa capacité à traiter et valoriser complètement le déchet organique, la Gazéification Hydrothermale permet d'éviter des coûts de traitement ultérieurs comme l'incinération ou l'enfouissement, de produire un gaz renouvelable et bas-carbone injectable et de récupérer une grande quantité d'eau, d'azote, sels minéraux et même métaux.

S'appuyant sur ces atouts, la Gazéification Hydrothermale peut adresser différents secteurs, des industries agroalimentaires aux collectivités, afin de proposer une solution pertinente et économique pour leurs déchets et la production d'énergie renouvelable. La diversité des intrants

et des solutions technologiques implique qu'il n'y ait pas **un modèle d'affaires mais plusieurs selon des critères multiples**, dont les besoins spécifiques des acteurs de la demande. Par ailleurs la Gazéification Hydrothermale s'intégrant également dans de nombreuses thématiques connexes (décarbonation, autonomie énergétique, etc.), les variables qui viennent impacter son modèle d'affaire sont multiples et évolutives.

Ces modèles d'affaires aux multiples inducteurs peuvent s'appuyer sur plusieurs leviers de rémunération, tels que la vente du gaz renouvelable et bas-carbone ou la valorisation des co-produits.

6.2.1 Valorisation économique du gaz produit

La rémunération du gaz renouvelable et bas-carbone est un point central pour permettre la réalisation des premiers projets de la filière et donner une impulsion. Cette rémunération devrait

refléter les risques pris par les développeurs de la technologie ainsi que le contexte économique (prix de marché).

a) Contexte réglementaire général sur la commercialisation du gaz produit

- Cas du **biométhane issu d'installation de méthanisation** :

Deux mécanismes financiers soutiennent aujourd'hui le développement de l'injection de biométhane.

- > Des subventions à l'investissement pour faciliter le financement du projet. Le principal guichet au niveau national est l'ADEME, mais les régions ont certains syndicats d'énergies au niveau local qui peuvent apporter une subvention, n'excédant généralement pas 15 à 20 % des CAPEX.
- > Un tarif d'obligation d'achat qui garantit au producteur la vente de son biométhane à un tarif fixé pour une durée de 15 ans. Ce tarif est compris entre 64 et 139 €/MWh^a. Il comprend le tarif de référence ainsi que la prime aux intrants qui peut varier de 5 € à 39 € du MWh en fonction du type d'intrants et du débit de l'installation.

Toutefois ces mécanismes sont en cours d'évolution avec notamment :

- > La publication des modalités des appels d'offres « biométhane » par le ministère de la transition écologique le 28/04/2022. Ils se dérouleront en trois tranches, pour une capacité totale de 1,6 TWh/an. La première tranche met aux enchères une capacité de 500 GWh/an et les offres sont recevables jusqu'à décembre 2022. Ces appels d'offres sont notamment nécessaires aux grandes installations ne pouvant plus faire appel au tarif de rachat (> 25 GWh/an)
- > La publication d'un décret^b ouvrant la voie à la mise en place des certificats de production de biogaz (CPB), mécanisme extrabudgétaire donnant la responsabilité aux fournisseurs de gaz naturel de s'acquitter de certificats de production auprès des producteurs pour attester de la bonne tenue du taux d'incorporation de biométhane dans leur bouquet énergétique.

- **Cas des installations de méthane de synthèse telles que la pyrogazéification ou la Gazéification Hydrothermale :**

^a Fourchette de valeurs théoriques car ce tarif est amené à diminuer chaque année de 2 % mais l'inflation étant importante au S1 2022, cela pourrait réévaluer les coûts à la hausse.

^b Décret n° 2022-640 du 25 avril 2022

L'injection de méthane de synthèse bénéficie du même système de garantie d'origine que le biométhane en vertu du décret 2021-1273 du 30 septembre 2021 mais sans le système de tarif de rachat associé.

Pour obtenir un complément de rémunération au gaz produit, les porteurs de projet de ces nouvelles filières pourront utiliser un nouveau

mécanisme introduit dans la loi climat résilience « les contrats d'expérimentations ». Ces contrats ont été introduits par le décret 2021-1280 du 1^{er} octobre 2021 et des appels à projets devraient être mis en place dans les mois à venir. La mise en œuvre rapide de ces contrats permettrait de donner de la visibilité aux porteurs de projets et faciliterait le développement de la filière.

b) Première piste d'évaluation du soutien attendu

L'estimation de la rémunération du gaz produit par une installation de Gazéification Hydrothermale est complexe car elle implique de nombreux facteurs.

Dans le cas de la Gazéification Hydrothermale, le niveau de soutien public attendu pour la rémunération du gaz se situera dans la fourchette de prix de la méthanisation. Cela dépendra de la taille et du type d'intrant traité. Une fois les premiers projets sortis de terre, la filière Gazéification Hydrothermale pourrait envisager à moyen terme une baisse des coûts de production en se

positionnant à **110 € du MWh_{PCS}** grâce à l'effet d'apprentissage, des gains d'échelle, de standardisation et de progrès technologiques.

À titre d'exemple les premiers projets de Gazéification Hydrothermale aux **Pays-Bas** sont d'ores et déjà compétitifs avec un niveau de rémunération du gaz à hauteur de **75 €/MWh**.

La compétitivité des projets hollandais par rapport au biométhane injecté en France est illustrée dans le tableau page suivante (Tableau 13).

Tableau 13 : Compétitivité des projets hollandais rapport au biométhane injecté en France.

Année d'approbation de la subvention	Projet	Puissance (nombre de modules)	Subvention (complément de rémunération) (€/MWh)	Vente du gaz (€/MWh)	Total
2018	Alkmaar 1	18,6 MW _{th} (4 modules de 4 t/h)	55 €/MWh	20 €/MWh	75 €/MWh
2020	Alkmaar 2.A	40 MW _{th}	56 €/MWh	16 €/MWh	72 €/MWh

c) Valorisation des sels minéraux et de l'azote

i) Récupération du phosphore

La récupération du phosphore est un enjeu majeur pour l'Europe qui dépend quasi totalement de l'importation de phosphore fossile^a nécessaire à assurer sa sécurité alimentaire. De ce fait, la récupération de cette ressource critique mais abondante dans beaucoup de nos déchets est aujourd'hui une nécessité.

Dans le cadre de cette étude, une première piste de valorisation du phosphore s'appuie sur une étude de marché exhaustive réalisée par le canton de Zürich en Suisse. Celle-ci a montré que chaque kilogramme de phosphore récupéré à partir des cendres de boues d'épuration coûte

environ 5 € [24]. La valeur marchande du produit phosphoré primaire peut être utilisée comme une autre valeur comparative. Pour l'acide phosphorique, elle est de l'ordre de 2 à 3 €/kg P.

Toutefois, comme on l'a vu plus haut, les prix actuels de récupération du phosphore sont plus élevés que le prix actuel du marché. Néanmoins, il faut tenir compte de la durabilité du phosphore recyclé par rapport au phosphore conventionnel issu de l'exploitation minière.

^a En Europe, l'unique mine de phosphates en activité est exploitée par Yara, en Finlande. Les principaux producteurs sont la Chine, le Maroc, les USA et la Russie.

ii) Récupération de l'azote

L'aspect économique de la récupération de l'azote n'en est encore qu'à ses débuts. Contrairement à l'incinération des boues, la Gazéification Hydrothermale permet de récupérer l'azote de l'effluent liquide. Plus de 95 % de l'azote se trouve dans l'effluent liquide sous forme de NH_4^+ [25]. Dans le cas de l'incinération des boues [26], l'azote contenu dans la biomasse est perdu sous forme de NO_x ou de N_2 . Le N_2O est un gaz à effet de serre puissant, 300 fois plus puissant que le CO_2 . Typiquement, pour chaque Équivalent-Habitant (EH), 0,025 kg de CO_2 /EH/jour sont émis par l'incinération des boues. À titre illustratif, en Suisse les stations de traitement des eaux usées ont obtenu des prix compris entre 20 et 45 €/t de

sulfate d'ammonium, mais les coûts de production sont supérieurs aux prix du marché. Actuellement, seules les STEU d'Yverdon-les-Bains et d'Altenrein exploitent des unités de récupération de l'azote.

Comme l'effluent final de la Gazéification Hydrothermale est en grande partie exempt de toute matière organique et que la concentration en azote est beaucoup plus élevée que l'effluent liquide issu de la déshydratation des boues, on peut s'attendre à une diminution des coûts de récupération. Dans l'optique d'une future économie circulaire, il s'agit toutefois d'une occasion supplémentaire de fermer les cycles des nutriments.

d) Valorisation du CO_2

Comme indiqué précédemment, l'un des résultats les plus prometteurs est l'utilisation du flux de CO_2 concentré en combinaison avec de l'hydrogène renouvelable, ce qui fait de ce procédé une solution de stockage d'énergie pour l'énergie solaire et éolienne renouvelable. Ce procédé, communément

appelé « *Power-to-Gas* », est aujourd'hui déjà disponible au niveau commercial, le principal obstacle étant la disponibilité de flux de CO_2 concentrés et d'hydrogène renouvelable rentables. Une installation commerciale est en service dans une station d'épuration des eaux usées en Suisse^a.

6.2.2 Valorisation économique du traitement de déchets

Même si tous les déchets organiques adressables à la technologie ne sont pas nécessairement des déchets avec une redevance à la clé et que le développement des autres filières gaz renouvelable et bas-carbone amène une certaine tension sur ces ressources, la Gazéification Hydrothermale est la seule technologie permettant leur valorisation complète pour produire du gaz renouvelable et bas-carbone.

Ainsi, tout déchet qui ne pourrait pas être valorisé in-situ via du recyclage ou du réemploi est voué à être traité par une filière dédiée. Comme indiqué dans la Figure 2 de ce livre blanc, la Gazéification

Hydrothermale intervient en bas de la hiérarchie du traitement des déchets mais avec l'avantage de pouvoir recycler un grand nombre d'éléments.

► Étude de cas : le coût de la gestion des boues de STEU en France (données AMORCE)

L'association AMORCE, a publié en 2019 un rapport mentionnant les coûts de l'élimination ou valorisation des boues de STEU (généralement concentrées entre 25 et 30 % de MS/MB) selon qu'elles soient incinérées, compostées ou épanchées [27].

Tableau 14 : Coût d'élimination des boues d'épuration selon la filière de traitement (AMORCE).

Filière	Coût (tMB)*	Répartition
Épandage (enquête AMORCE)	23 € (7–45 €)	70 – 80 % dont 16 % d'épandage de compost
Compostage (enquête AMORCE)	53 € (40–81 €)	
Incinération (valeurs usuelles)	90–150 €	18 % (donnée de 2010)
Co-incinération avec ordures ménagères (valeurs usuelles)	70–120 €	

*Matière Brute (MB) contenant entre 25 et 30 % de Matière Sèche (MS).

^a <https://www.cng-mobility.ch/fr/article/la-technologie-power-to-gas-remporte-le-watt-dor-2020/>

Le Tableau 14 indique qu'à la tonne, le coût d'élimination des boues se situe entre 23 € pour de l'épandage (35 % des volumes) et jusqu'à 150 € pour de l'incinération (\approx 26 % des volumes) [27]. La Gazéification Hydrothermale pourra donc capter une large part des volumes dont les coûts supportés par les collectivités sont aujourd'hui les plus élevés.

La valeur économique du traitement de déchet par la Gazéification Hydrothermale est donc le coût évité pour les collectivités d'une dépense largement réduite dans les filières de valorisation actuelle. À terme, la filière Gazéification Hydrothermale devra démontrer sa capacité à

être compétitive par rapport aux filières les moins onéreuses comme le compostage, toujours dans le respect des besoins du sol en amendement de matières organiques.

De plus, comme indiqué dans le cas Suisse présenté ci-dessus, la Gazéification Hydrothermale pourra à l'avenir devenir le mode de traitement privilégié des effluents arrivants directement sur le site de traitement, moyennant un pré-traitement largement limité par rapport aux nombreuses étapes des installations actuelles (bassins de clarification, épaissement à l'aide d'adjuvants chimiques, centrifugation...) fortement consommatrice d'énergie et de consommables.

6.3 Avec des perspectives de développement dynamiques

La filière gaz représentée par GRTgaz, GRDF, France Gaz Renouvelables, le Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale et les clubs Biogaz, Pyrogazéification et *Power-to-Gas* de l'ATEE a publié dans le cadre des discussions sur la SFEC^a un document d'analyse soulignant un potentiel de production estimée à 320 TWh/an de gaz renouvelable et bas-carbone en 2050 pour contribuer à la trajectoire de décarbonation française. Dans ce potentiel au moins 50 TWh/an proviennent de la Gazéification Hydrothermale, chiffre qui pourrait même monter bien au-delà si on oriente bien davantage de quantités de gisements de déchets organiques vers la Gazéification Hydrothermale (à l'exemple des effluents d'élevage non épandables localement).

Afin d'arriver à cet objectif ambitieux, le Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale a émis un premier scénario définissant la trajectoire d'évolution annuelle pour les futurs projets industriels de Gazéification Hydrothermale en France injectant leur production dans le réseau de gaz :

1. Un démarrage commercial des tous premiers projets dès 2026.
2. Une bonne vingtaine de projets lancés d'ici fin 2028 cumulant une capacité potentielle de production annuelle de 1 TWh/an de gaz injectable.
3. En 2030, une bonne soixantaine de projets seraient en route injectant au moins 2 TWh/an dans le réseau.

4. À la fin de la prochaine période de la PPE, en 2033, la filière devrait avoir réussi la mise en œuvre opérationnelle d'environ 140 projets injectant au moins 6,8 TWh_{PCS}/an de gaz dans le réseau.

Cette ambition nécessite que des mécanismes de soutien sous forme de contrats d'expérimentation tenant compte des spécificités de la filière et de la technologie de gazéification hydrothermale viennent appuyer le démarrage des premiers projets industriels en 2026.

Ces premières orientations soulignent par ailleurs l'importance du foisonnement de projets de tailles variables démarrant avec des puissances thermiques moyennes situés à 4,5 MW_{th} par projet et visant en priorité le traitement de déchets industriels et urbains dont les coûts de traitement de référence sont jugés trop élevés. Puis, avec la diminution des coûts liés à l'amélioration de la technologie et de la production des modules en série, la mise en œuvre de projets plus conséquents traitant une diversité de déchets plus importante peut être envisagée. La puissance thermique moyenne des nouveaux projets pourrait augmenter ainsi à 6 MW_{th} par projet à partir de 2030. Ils seront complétés par un ou plusieurs très grands projets par an pouvant atteindre des puissances thermiques unitaires allant jusqu'à 40 MW_{th} et plus par projet.

^a Stratégie Française pour l'Énergie et le Climat

Ces objectifs ambitieux ne peuvent se réaliser sans :

- **la collaboration accrue de l'ensemble des acteurs de la filière de gazéification hydrothermale** dont au cœur les développeurs français de la technologie capables de rivaliser avec leurs concurrents étrangers qui sont également les bienvenus.
- **Un soutien adapté des pouvoirs publics permettant une rémunération juste du gaz renouvelable et bas-carbone injecté** couvrant les risques des investisseurs et acteurs de la filière, en particulier au lancement de la filière en France.
- **L'évolution du prix du marché de gaz (PEG^a)** en France qui va certes être la référence pour la profession.
- Outre l'effet lié aux crises géopolitiques et énergétiques vécues en 2022 à une ampleur inédite, **l'évolution des prix du méthane et du CO₂** devraient être telle que les acteurs de la filière soient confiants de pouvoir proposer à terme des coûts de revient couverts par une rémunération du prix de gaz compatible avec les attentes des acteurs économiques présents sur le marché français.

^a PEG : Point d'Échange de gaz

07

CONCLUSION & PERSPECTIVES

Élaboré à partir de l'ensemble des retours d'expériences et des données aujourd'hui disponibles, ce livre blanc synthétise les principales caractéristiques techniques, atouts et le potentiel attendu à 2050 pour la technologie de Gazéification Hydrothermale.

Positionnement

En premier lieu, elle se positionne comme une alternative vertueuse à l'incinération et à l'enfouissement pour de nombreux déchets organiques aujourd'hui peu, pas ou mal valorisés. En effet, la capacité de la technologie à produire très efficacement des gaz renouvelables et bas-carbone tout en permettant la récupération et revalorisation potentielle des co-produits eau, minéraux et métaux, place la Gazéification Hydrothermale au centre des enjeux des territoires en matière **d'indépendance énergétique, d'économie circulaire et de limitation du changement climatique**.

Elle s'adresse aujourd'hui non seulement au traitement et la valorisation de très nombreux déchets organiques d'origine urbain ou agricole mais, de plus en plus, aussi à des déchets issus de nombreux secteurs industriels qui sont, pour partie, pas seulement d'origine biogénique. La Gazéification Hydrothermale est depuis 2022 très recherchée par un nombre croissant d'industriels issus notamment des secteurs de la chimie et pétrochimie : ils voient dans la technologie une alternative intéressante apportant des effets positifs cumulés dont :

1. Une capacité de traitement améliorée de leurs déchets organiques pouvant être contaminés, au moins en partie, par différents composés organiques (hydrocarbures, plastiques, etc.) générant des coûts élevés dans les filières de traitement existantes,
2. une simplification des procédures administratives actuelles jugées complexes ou laborieuses liées à l'obligation de traitement de leurs déchets dans des incinérateurs nationaux voire étrangers en cas d'absence de moyens de traitement adaptés en France,
3. une piste de décarbonation intéressante dans le cadre de leurs activités et la possibilité de transformer leurs déchets en ressources abaissant globalement leur coût de traitement à travers leur valorisation bien plus complète.

4. une bien meilleure capacité d'adaptation aux futures contraintes environnementales dont les exigences montent sans cesse.

En effet, capable de traiter des déchets organiques complexes, seuls ou mélangés à d'autres, la Gazéification Hydrothermale pourrait devenir assez rapidement un outil de valorisation des déchets puissant, compact, relativement économique et rapide à mettre en œuvre servant les intérêts aussi bien d'acteurs économiques publics et privés générant ou gérant des déchets et cherchant une alternative performante aux solutions existantes.

État des lieux et atouts

En termes de développement, la forte dynamique européenne et plus particulièrement Néerlandaise et Suisse, a permis l'émergence des premiers démonstrateurs industriels et une structuration de cette nouvelle filière. En France, deux industriels se sont positionnés sur la technologie (Leroux & Lotz Technologies et VINCI Environnement) et de nombreux acteurs académiques, institutionnels et privés travaillent aujourd'hui ensemble pour accompagner au mieux la filière française.

Sur le plan technologique, la Gazéification Hydrothermale se distingue des autres procédés de traitement des déchets par son principe de fonctionnement reposant sur le pouvoir de l'eau supercritique (374 °C et 221 bar). En effet, ces conditions physico-chimiques particulières vont permettre, avec des prétraitements de l'intrant réduits au strict minimum, une valorisation optimisée de toute la matière organique contenue dans le déchet afin de permettre :

- **la production de gaz renouvelable et bas-carbone injectables ou utilisables localement** (mobilité et autoconsommation) profitant d'un taux de conversion particulièrement élevé (entre 85 et 99%) du carbone en gaz,

Tout en récupérant et préservant

- **de l'azote et des minéraux essentiels** (phosphore et potassium) pour la fabrication potentielle de fertilisants (N, P, K) et
- **des métaux** en quantité et/ou en valeur économique plus ou moins importante.

De plus, la quasi-totalité des polluants organiques (pesticides, détergents, résidus médicamenteux, microorganismes pathogènes, etc.) et l'éventuelle

présence de microplastiques sont détruits et/ou convertis en gaz. Egalement, de nombreuses autres externalités positives en lien avec l'ensemble de la chaîne de valeur sont à attendre générant des impacts positifs et durables sur l'emploi, l'émergence de nouvelles filières de valorisation des co-produits, de synergies industrielles, etc.

Enfin, la technologie présente de nombreux autres atouts lui permettant une intégration facilitée dans de nombreuses configurations : temps de conversion globale ne durant que quelques minutes, installation très compacte (besoin de surface au sol très faible), technologie modulaire, absence de pollutions atmosphériques et très faibles nuisances sonore et olfactive pour ne citer que les plus importants.

Potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone

Une première projection limitée à une vingtaine de familles d'intrants biogéniques disponibles en quantité importante révèle un potentiel de production, avec des hypothèses de mobilisation prudentes, estimé à **au moins 63 TWh/an d'ici 2050** (uniquement 50 TWh/an ont été retenus).

Néanmoins, sachant que certains déchets industriels étant au moins pour partie d'origine fossile n'ont pas été comptabilisés et que les évolutions réglementaires concernant le retour au sol de certains déchets pourraient évoluer dans un futur proche, **de nouveaux gisements pour la Gazéification Hydrothermale pourraient rapidement devenir mobilisables** en France pour augmenter encore l'estimation de son potentiel de production de gaz injectable.

Perspectives de développement

Dans une perspective d'industrialisation, la gazéification hydrothermale voit s'esquisser un modèle d'affaire intéressant. Cependant son évaluation exacte est délicate au regard de la diversité d'intrants et de co-produits, de l'évolution de la technologie et du potentiel lié à l'augmentation de l'échelle de production. Ainsi, l'approche est plutôt évolutive en fonction des différents cas d'étude.

Bénéficiant de l'avance de certains autres pays en Europe, la filière française est aujourd'hui en mesure d'assurer un déploiement rapide de démonstrateurs sur le territoire français afin de

contribuer à la mise au point d'**unités industrielles opérationnelles et performantes dès 2026**. Ces premiers démonstrateurs auront pour objectif de construire des Analyses de Cycle de Vie (ACV), des modèles économiques viables et de valider les nombreuses optimisations techniques en cours de développement.

Dans l'objectif commun de viser et de rendre possible à 2050 l'atteinte des objectifs nationaux en matière de décarbonation, de souveraineté énergétique et de développement de l'économie circulaire, le Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale confirme pouvoir atteindre **un potentiel de production de gaz renouvelable et bas-carbone issu de la Gazéification Hydrothermale estimé à au moins 50 TWh/an à cet horizon**. Cette capacité couvrirait environ 15 % de la production globale de gaz renouvelable et bas-carbone (320 TWh/an) estimée par la filière gazière.

Pour atteindre cet objectif, plusieurs jalons à court et moyen terme ont été définis :

- **D'ici 2026** : le montage, la réalisation et la mise en fonctionnement commercial des premiers projets industriels.
- **D'ici 2030** : la production et l'injection d'au moins 2 TWh/an de gaz renouvelable et bas carbone dans le réseau de gaz avec environ 60 projets de gazéification hydrothermale en fonctionnement.
- **D'ici 2033** : la production et l'injection d'au moins 6,8 TWh/an de gaz renouvelable et bas carbone dans le réseau de gaz avec environ 140 projets de gazéification hydrothermale en fonctionnement.

L'avancement technologique déjà atteint par les développeurs les plus avancés, pour la plupart des étrangers, confirme certes la pertinence de la technologie pour la valorisation de nombreux déchets organiques et la production de gaz renouvelable et bas-carbone sur le territoire français. Toutefois l'émergence d'une véritable filière industrielle de gazéification hydrothermale en France ne sera possible qu'à travers l'implication de tous les acteurs concernés par la transition écologique et énergétique : un rôle décisif revient aux pouvoirs publics devant apporter un coup de pouce décisif minimal aux développeurs français de la technologie impliqués et aux investisseurs pionniers pour soutenir le démarrage des premiers

projets industriels permettant de limiter au mieux leurs risques.

Le soutien public devrait être complété par la mise en œuvre d'autres dispositifs, dont l'absence a déjà été identifiée par la filière comme freinant voire empêchant le développement potentiel de la technologie et l'implication des acteurs engagés dans son émergence en France, comme :

- un financement public adapté au montage financier de démonstrateurs industriels permettant aux deux ou trois développeurs français de la technologie de réaliser l'étape indispensable d'optimisation de leur technologie en amont de leur commercialisation finale ;
- une diversité de mécanismes de soutien pour la rémunération des gaz renouvelables et bas-carbone injectables (ex : *Biogas Purchase agreement*, certificats d'origine pour la production de gaz renouvelable ou bas-carbone, contrats d'expérimentation méthane de synthèse adaptés à la filière, etc.);
- un cadre administratif réglementaire ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) adapté à la typologie du procédé et facilitant la mise en œuvre des projets industriels ;
- des dispositifs financiers spécifiques permettant d'accompagner les efforts de recherche et développement des industriels investis dans la technologie de gazéification hydrothermale et leur permettre d'égaliser avec leurs homologues étrangers. Ces soutiens peuvent être également nécessaires pour le développement de briques technologiques situées en amont (exemple : prétraitements) ou en aval (traitements du syngas de synthèse pour le rendre conforme à l'injection, procédés de transformation des résidus solides et liquides en produits commercialisables, procédé de valorisation durable du CO₂ ou de décarbonation...).

Enfin, parmi les objectifs de travail visés par le Groupe de Travail Gazéification Hydrothermale représentant les acteurs de la filière en France, ses membres prévoient que leurs demandes de soutien précédemment citées fassent l'objet d'études spécifiques. Celles-ci auront notamment pour but de mettre à disposition au plus tôt des pouvoirs publics les éléments nécessaires permettant de :

- lever ces verrous et d'accompagner au mieux le lancement des premiers projets industriels et
- de prendre en compte la Gazéification Hydrothermale dans les prochains textes légaux (SFEC, PPE...) afin que son potentiel soit pleinement pris en compte dans la future feuille de route énergétique française et lui permettre de contribuer à l'atteinte de la neutralité carbone à horizon 2050.

ANNEXE

HYDROPILOT

**Résultats de la campagne de mesures
pilotee par RICE à l'Institut Paul
Scherrer en décembre 2022**

Peu de données sont disponibles concernant la qualité détaillée du gaz produit par gazéification hydrothermale. L'Institut Paul Scherrer (PSI), TreaTech et GRTgaz ont établi un partenariat dans le but de tester la chaîne complète de production de l'HydroPilot et réaliser des analyses approfondies du gaz de synthèse brut produit, après séparation des phases. L'HydroPilot, localisé à PSI (Suisse) est une unité de gazéification hydrothermale catalytique d'une capacité de traitement de 110 kg/h de déchets locaux, qu'ils proviennent de la biomasse ou des déchets d'origine fossile. En décembre 2022, le fonctionnement du pilote a été testé avec des déchets alimentaires et d'emballages plastiques. Une campagne d'échantillonnage a été menée en collaboration entre le PSI et TreaTech. Les analyses ont ensuite été réalisées aux laboratoires de RICE (Research & Innovation Center for Energy) de GRTgaz. Cette campagne avait pour but d'élargir nos connaissances et notre compréhension des gaz produits par ce type procédé.

Les résultats des analyses ont montré que la qualité du syngaz produit peut facilement être conforme avec les normes de qualité européennes gaz naturel et biométhane pour l'injection dans le réseau.

Les analyses montrent une **bonne conversion** en méthane du carbone contenu dans la matière organique. Les concentrations mesurées pour les composés majeurs sont similaires à celles attendues par PSI et TreaTech, mais également cohérentes avec celles reportées dans la littérature. Comme attendu pour un gaz non épuré, la qualité du syngaz produit n'atteint actuellement

pas la qualité requise pour être conforme aux normes européennes (EN 16726 et/ou EN 16723-1) pour son injection dans le réseau (Tableau 1), en raison des teneurs de CO₂ and H₂. Cependant, ce syngaz peut aisément être conforme grâce aux technologies d'épuration déjà existantes sur le marché. A noter que la teneur significative de N₂ (9,3 %) est due à la purge du système avant sa mise en route. Il devrait être complètement balayé avec une opération en continu du pilote.

Le *screening* des COV (Composés Organiques Volatiles) a montré la **prépondérance des hydrocarbures** dans le syngaz brut, principalement entre C₆ et C₁₀, ce qui est favorable au pouvoir calorifique du gaz. Sur la base de l'expérience de RICE, la répartition obtenue des concentrations des COV est **très similaire à celle observée dans le gaz naturel**, mais elles sont cinq fois inférieures. **De ce fait, cette composition de gaz ne présente pas de problème potentiel pour son épuration, injection, transport et utilisation.**

Concentrations des composés ciblés dans le gaz de synthèse brut produit par l'HydroPilot (décembre 2022) et conformité avec les normes européennes :

Composés / paramètres	Syngaz brut 14 décembre 2022	Prescriptions techniques françaises	Normes européennes EN 16726 ¹ & EN 16723-1 ²	Conformité
CH ₄	65,9 %	-	> 60 %	Conforme
CO ₂	18,5 %	≤ 2,5 %	≤ 2,5 or 4 %	Non conforme**
CO	0,02 %	≤ 2 % Spec. ≤ 0,1 %*	≤ 0,1 %	Conforme
O ₂	0,0025 %	≤ 0,75 % ²	≤ 0,001 or 1 %	Conforme
H ₂	6,0 %	≤ 6 % Spec. ≤ 2 %*	≤ 6 %	Non conforme**
C ₂ H ₆	0,19 %	-	-	-
C ₃ H ₈	0,05 %	-	-	-
iC ₄ H ₁₀	0,02 %	-	-	-
nC ₄ H ₁₀	0,03 %	-	-	-
neoC ₅ H ₁₂	4,4 ppm	-	-	-
iC ₅ H ₁₂	0,01 %	-	-	-
nC ₅ H ₁₂	0,01 %	-	-	-
iC ₆ H ₁₄	23 ppm	-	-	-
nC ₆ H ₁₄	28 ppm	-	-	-
Autres C ₅₊ (équivalent à nC ₆)	85 ppm	-	-	-
H ₂ S + COS	< 3 mgS/Nm ³	≤ 6 mgS/Nm ³	-	Conforme
Soufre mercaptique	< 2 mgS/Nm ³	≤ 6 mgS/Nm ³	-	Conforme
Soufre total	< 5 mgS/ Nm ³	≤ 20 mgS/Nm ³	≤ 20 mgS/Nm ³	Conforme
NH ₃	< 0,94 mg/Nm ³	≤ 3 mg/Nm ³	≤ 10 mg/Nm ³	Conforme
Screening des COV à l'état de traces	255 COV détectés 229 COV identifiés Eq. à 200 mg/m ³	-	-	**

¹EN 16726 : Infrastructures gazières – Qualité du gaz – Groupe H

²EN 16723-1 : Gaz naturel et biométhane pour utilisation dans le transport et biométhane pour injection dans les réseaux de gaz naturel – Partie 1 : Spécifications du biométhane pour injection dans les réseaux de gaz naturel.

*Nouvelles spécifications pour l'injection de méthane de synthèse.

** Peut être rendu conforme après un traitement adapté

*** Les composés organiques volatils des mêmes familles chimiques sont aussi présents dans le gaz naturel et à des concentrations plus élevées. Cette composition de gaz ne présente donc pas de problème pour l'épuration, l'injection, le transport et l'utilisation.

LISTE DES FIGURES, TABLEAUX, RÉFÉRENCES ET ABRÉVIATIONS

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de procédé simplifié de la Gazéification Hydrothermale (Source : GRTgaz/Cerema).....	19
Figure 2 : Positionnement de la Gazéification Hydrothermale pour le traitement des déchets organiques ± humides (source : Cerema / GRTgaz). (* Déchets contenant de l'eau ou secs mais permettant un apport d'eau).	20
Figure 3 : Potentiel de valorisation des boues d'épuration par la Gazéification Hydrothermale (Source : GRTgaz/Cerema).....	23
Figure 4 : Diagramme de phases (pression/température) de l'eau (Source : Cerema / GRTgaz).....	31
Figure 5 : Schéma de la chaîne de valeur de la Gazéification Hydrothermale, GT Gazéification Hydrothermale, 2021 (Source : Cerema / GRTgaz).	37
Figure 6 : Atouts de la Gazéification Hydrothermale (Source : Cerema / GRTgaz).	41
Figure 7 : Évolution de la destination finale des boues de STEU aux Pays-Bas depuis 1981 (source : clo.nl).	45
Figure 8 : Difficulté d'épandages sur les terres agricoles en France (source : ValorMap).	46
Figure 9 : Estimation de la production de gaz injectable par GH pour les 18 intrants majeurs d'origine biogénique à horizon 2050 (63,2 TWh/an) – *estimation en 2050.	48
Figure 10 : Estimation de la production par région de gaz injectable par GH en 2050 (63,2 TWh/an).	48
Figure 11 : Carte des développeurs actuels en Europe et dans le monde (situation à mi-2022) (Source Cerema & GRTgaz).	54
Figure 12 : Photo du PSI de l'installation «Hydropilot» installée en 2020 à Villigen (CH) en collaboration avec TreaTech (source : M. Fischer, Paul Scherrer Institute, 2020).....	56
Figure 13 : schéma de principe du pilote de Gazéification Hydrothermale (source : TreaTech).	57
Figure 14 : Vue aérienne du site d'Alkmaar de SCW Systems (source : invest-nl.nl).	58
Figure 15 : Démonstrateur d'oxydation hydrothermale réalisée par Leroux & Lotz Technologies dans le cadre du projet Leanships H2020.	61
Figure 16 : Installation mobile de GENIFUEL.	62
Figure 17 : Exemple d'externalités positives et de bénéfices liées à une installation de Gazéification Hydrothermale (GH) à l'interface des enjeux environnementaux, d'énergie et d'économie (source : GT GH).	75
Figure 18 : Évolution du coût d'investissement (M€/ t/h) d'un projet Gazéification Hydrothermale en fonction de sa capacité de traitement de déchets.....	81
Figure 19 : OPEX pour les différents scénarios. La vente de chaleur et d'électricité grâce au biogaz généré par la Gazéification Hydrothermale à travers une cogénération (scénario 2a) permet de diminuer sensiblement les OPEX.....	83

Liste des tableaux

Tableau 1 : Positionnement de la Gazéification Hydrothermale par rapport aux filières gaz renouvelable et bas-carbone (GRTgaz).	22
Tableau 2 : Les technologies hydrothermales (GRTgaz).....	31
Tableau 3 : Synthèse des technologies de Gazéification Hydrothermale (GRTgaz).	36
Tableau 4 : Carte d'identité du pilote Verena via données publiques.	55
Tableau 5 : Carte d'identité du projet HydroPilot.	56
Tableau 6 : Exemple de flux massiques pour une unité commerciale de Gazéification Hydrothermale catalytique de 6 t/h (Source : TreaTech).	57
Tableau 7 : Carte d'identité du projet SCW Systems.	58
Tableau 8 : Carte d'identité du projet SUPERSLUDGE.	60
Tableau 9 : Carte d'identité du prototype Gaseau.....	61
Tableau 10 : Synthèse des procédés de valorisation du CO ₂ en fonction des puretés minimales requises, de la maturité des technologies de valorisation et de la quantité de produits issues de l'utilisation d'une tonne de CO ₂ (source GRTgaz).....	70
Tableau 11 : Métaux intéressants pour la récupération pour chaque matrice (concentration) (Varenes E. <i>et al.</i> , 2020).....	72
Tableau 12 : Classement des métaux par potentiel financier sur une base d'un million d'EH (Varenes E. <i>et al.</i> , 2020).....	72
Tableau 13 : Compétitivité des projets hollandais rapport au biométhane injecté en France.	85
Tableau 14 : Coût d'élimination des boues d'épuration selon la filière de traitement (AMORCE).	86

Références

- [1] AMORCE. Enquête sur la valorisation des boues d'épuration. 2019 sept p. 31. Report No.: AMORCE EAT05 b.
- [2] Lecomte D, Arlabosse P. Valorisation énergétique de la biomasse et des déchets humides. Sud Sciences & Technologies [Internet]. 2009;18. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01843955/document>.
- [3] Conseil Européen. « Ajustement à l'objectif 55 ». 2022. <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>.
- [4] SDES, Bilan énergétique de la France Édition 2022.
- [5] GT GAZÉIFICATION HYDROTHERMALE. « La Gazéification Hydrothermale. Une nouvelle technologie innovante de valorisation de déchets humides ». 2022. / GRTgaz. « GT GAZÉIFICATION HYDROTHERMALE. Processus SFEC & vision potentiels ». 2022.
- [6] Cahier d'acteurs de la consultation sur la future Stratégie française sur l'énergie et le climat (SFEC) n°71 : Groupe de Travail National Gazéification Hydrothermale. 2022.
- [7] Vogel F. Hydrothermal production of SNG from wet biomass. In 2016. p. 249 78.
- [8] Weithmann N, Möller JN, Löder MGJ, Piehl S, Laforsch C, Freitag R. Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. Science Advances [Internet]. 2018;4(4).
- [9] Louw J, Schwarz CE, Knoetze JH, Burger AJ. Thermodynamic modelling of supercritical water gasification: Investigating the effect of biomass composition to aid in the selection of appropriate feedstock material. Bioresource Technology. 2014;174:11 23.
- [10] Enea Consulting et GRTgaz. 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. [Internet]. GRTgaz; 2019 oct p. 18.
- [11] Réséda. Enquête sur les gisements et la valorisation des coproduits issus de l'agro-industrie. [Internet]. 2017 p. 120
- [12] FranceAgriMer - Observatoire national des ressources en biomasse (ONRB). Évaluation des ressources agricoles et agro-alimentaires disponibles en France – édition 2020 [Internet]. 2020 p. 93.
- [13] ADEME, TECH2MARKET, FRD. Panorama des coproduits et résidus biomasse à usage des filières chimie et matériaux biosources en France. [Internet]. 2045 p. 70. (Expertises).
- [14] ADEME, GRTgaz, GRDF. Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ? [Internet]. 2018 p. 283. Report No.: Référence : 010503.
- [15] Cerema. Enquête dragage 2017 - Enquête nationale sur les dragages des ports maritimes - Cerema, 2020. Collection : Données. ISBN : 978-2-37180-483-8 [Internet]. 2020 p. 33. (Données). Report No.: Numéro ISBN : 978-2-37180-483-8.
- [16] Amar M, Benzerzour M, Kleib J, Abriak NE. From dredged sediment to supplementary cementitious material: characterization, treatment, and reuse. International Journal of Sediment Research. 2021;36(1):92 109.
- [17] Huet M. Valorisation hydrothermales de la liqueur noire à des fins énergétiques et de chimie verte [Internet] [Theses]. Université Grenoble Alpes ; 2015.
- [18] Biller P, Ross AB. Production of biofuels via hydrothermal conversion. In: Luque R, Lin CK, Wilson K, Clark J, éditeurs. Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies [Internet]. Woodhead Publishing ; 2016. p. 509 47.
- [19] Boukis N, Stoll IK. Gasification of Biomass in Supercritical Water, Challenges for the Process Design—Lessons Learned from the Operation Experience of the First Dedicated Pilot Plant. Processes [Internet]. 2021;9(3).
- [20] RVO. BTG openbaar eindrapport vergassing 11 maart 2021 - Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. [Internet]. 2021 p. 83. Report No.: TSE2200012.
- [21] Koppejan J, Zeevalkink JA, Böhm R, Waterbeheer STO. Toepassing van biologische methanisering op rioolwaterzuiveringen [Internet]. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA); 2021 p. 66.
- [22] Varennes E, Blanc-Biscarat D, Gueret L, Lagarrigue C, Choubert JM. Etude technico-économique sur l'opportunité de récupération des métaux contenus dans les eaux usées domestiques [Internet]. INRAE ; INSA Lyon ; Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse ; 2020 sept. Report No.: 70.

- [23] Chen J, Liang J, Xu Z, E J. Assessment of supercritical water gasification process for combustible gas production from thermodynamic, environmental and techno-economic perspectives: A review. *Energy Conversion and Management*. 2020;226:113497.
- [24] Morf L. Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad. [Internet]. Kanton Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL); 2018 p. 100.
- [25] Brandenberger M. Process Development for Catalytic Supercritical Water Gasification of Algae Feedstocks. Lausanne, EPFL [Internet]. 2014.
- [26] Morgenroth, basé sur Siegrist, Wunderlin, Joss (2014), présentation à Stuttgart le 09.10.2014.
- [27] AMORCE. Quelles solutions pour valoriser les boues d'épuration ? AMORCE ; 2019 septembre p. 45. Report No.: AMORCE EAT05 a.

Liste des abréviations

AGEC	Loi Anti-Gaspillage pour une Économie Circulaire
CAPEX	Dépenses d'investissement (de l'anglais <i>CApital EXpenditure</i>)
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CSR	Combustible Solide de Récupération
EH	Équivalent-Habitant
ETM	Élément Trace Métallique
FFOM	Fraction Fermentescible des Ordures Ménagères
GH	Gazéification Hydrothermale
GNV	Gaz Naturel pour Véhicules
IAA	Industrie Agro-Alimentaire
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
ISD	Installation de Stockage des Déchets
KIT	<i>Karlsruhe Institut of Technology</i>
LPEC	Loi de Programmation Energie Climat
MB	Matière Brute
MO	Matière Organique
MS	Matière Sèche
MW_{th}	Méga watt thermique
OPEX	Dépenses d'exploitation (de l'anglais <i>OPerational EXpenditure</i>)
PCI	Pouvoir Calorique Inférieur
PCS	Pouvoir Calorique Supérieur
PEG	Point d'Échange de Gaz
PPE	Programmation Pluriannuelle de l'Énergie
PSI	Paul-Scherrer-Institut
REUT	Réutilisation des Eaux Usées Traitées
REX	Retour d'expérience
SFEC	Stratégie Française sur l'Énergie et le Climat
SNBC	Stratégie Nationale Bas Carbone
STEU	Station de Traitement des Eaux Usées
TRL	<i>Technology Readiness Level</i> : indice de maturité technologique
UIOM	Usine d'Incinération d'Ordures Ménagères
UVE	Unité de Valorisation Énergétique

