



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 227466 - 2816009 - v1.0

20/12/2024

## **Note relative à la gazéification hydrothermale : veille technologique et projets de développement en cours**

## **PRÉAMBULE**

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : SARRIQUET Aurore - KOUHILI YOUSSEF

Vérification : STOUVENEL MICKAEL; SARRIQUET AURORE

Approbation : Document approuvé le 20/12/2024 par BAROUDI HAFID

## Table des matières

1	Objectifs de la note.....	5
2	Introduction.....	6
3	Présentation de la technologie de gazéification hydrothermale .....	7
3.1	Principales technologies de valorisation de la biomasse .....	7
3.2	Technologies hydrothermales.....	8
3.2.1	Eau supercritique : élément clé pour les technologies hydrothermales.....	8
3.2.2	Familles des technologies .....	8
3.3	Gazéification hydrothermale .....	9
3.3.1	Description et familles de technologies de gazéification hydrothermale .....	9
3.3.2	Principales étapes de gazéification hydrothermale .....	10
4	Spécificités de chaque technologie de gazéification hydrothermale (catalytique et à haute température).....	11
4.1	La gazéification hydrothermale à haute température .....	11
4.2	La gazéification hydrothermale catalytique .....	11
4.3	Synthèse sur les technologies de gazéification hydrothermale .....	13
4.4	Les intrants de la gazéification hydrothermale .....	14
4.5	Atouts de la gazéification hydrothermale :.....	15
4.6	Faiblesses de la gazéification hydrothermale.....	16
5	Etat des lieux des installations de gazéification hydrothermale .....	18
5.1	Projets et installations de gazéification hydrothermale en Europe .....	18
5.2	Etat des lieux de la technologie en France.....	21
5.3	Description technique de quelques installations de gazéification hydrothermale.....	21
5.3.1	Pilote VERENA de Karlsruhe Institut of Technology (KIT) (Allemagne).....	21
5.3.2	Pilote HydroPilot de PSI + TreaTech (Suisse).....	23
5.3.3	Usine Industrielle SCW Systems (Alkmaar, Pay-Bas).....	25
6	Conclusions .....	27
7	Références .....	28

## **Résumé**

Ce rapport a pour objectif de fournir une synthèse bibliographique sur la technologie de gazéification hydrothermale, en mettant en évidence sa place parmi les technologies de traitement de la biomasse, ainsi que les différentes catégories de cette technologie et leurs spécificités techniques. Le rapport présente également un état des lieux des projets et installations relatives à cette technologie en Europe et en France.

## **Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :**

Institut national de l'environnement industriel et des risques, , Verneuil-en-Halatte : Ineris - 227466 - v1.0, 20/12/2024.

## **Mots-clés :**

Traitement thermique, gazéification hydrothermale, traitement hydrothermale, biomasse, eau supercritique, déchets, méthane, dihydrogène

# 1 Objectifs de la note

L'objectif principal de cette note est d'effectuer une revue bibliographique sur les technologies de gazéification hydrothermale pour le traitement des déchets. Elle décrit également les spécifications techniques de chaque technologie et réalise une veille sur les projets et installations en Europe et en France.

Le rapport est organisé en trois principaux chapitres, qui abordent respectivement :

- Les principales technologies de traitement thermique des déchets et le positionnement de la gazéification hydrothermale.
- Les caractéristiques de chaque technologie de gazéification hydrothermale, y compris la gazéification hydrothermale catalytique et à haute température, ainsi qu'une analyse de leurs forces et faiblesses respectives.
- Le contexte et l'état des lieux de l'utilisation de la gazéification hydrothermale, en étudiant les différentes initiatives en cours (pilotes, prototypes, démonstrateurs et installations industrielles) avec une attention particulière portée aux projets en cours en Europe et en France. Un descriptif technique et opérationnel de certaines installations en cours de fonctionnement, sélectionnées en raison de la disponibilité des données sur leur fonctionnement dans la littérature.

## 2 Introduction

La consommation énergétique mondiale a considérablement augmenté au cours des dernières décennies en raison principalement de la croissance démographique et du développement économique. Selon l'Administration américaine de l'information sur l'énergie (US EIA) [1], une augmentation de 50 % de la consommation mondiale d'énergie ainsi que de la demande de gaz naturel est prévue au cours des 30 prochaines années. A l'heure actuelle et selon l'IAE (l'Agence Internationale de l'Energie), les énergies fossiles dominent largement le bouquet énergétique mondial avec environ 80% de l'énergie consommée. Cependant, le problème de l'épuisement n'est pas le seul auquel font face les combustibles fossiles. Plus important encore, leur utilisation est associée à des problèmes environnementaux. Les émissions de CO<sub>2</sub> notamment ne cessent d'augmenter, passant de 35 à 38 milliards de tonnes métriques entre 2015 et 2024 [3].

Heureusement, l'intérêt pour les énergies renouvelables est également en hausse. La consommation d'énergie renouvelable dans les secteurs de l'électricité, de la chaleur et du transport devrait augmenter d'environ 60 % entre 2024 et 2030 [2]. Cette hausse portera la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie à près de 20 % d'ici 2030, contre 13 % en 2023 [2]. Les combustibles renouvelables, y compris la bioénergie liquide, gazeuse et solide, ainsi que l'hydrogène et les e-carburants, représentent environ 15 % de la croissance prévue de la demande en énergie renouvelable [2].

La biomasse jouera un rôle important parmi les sources d'énergie renouvelable à l'échelle mondiale, étant déjà la quatrième plus grande ressource énergétique après le charbon, le pétrole et le gaz naturel. En particulier, les lignocellulosiques non alimentaires sont parmi les sources d'énergie les plus durables, avec un potentiel de réduction de la consommation de combustibles fossiles. Il est possible d'obtenir des biocarburants gazeux, liquides ou solides à partir de la biomasse via des voies de conversion thermochimique ou biochimique. La conversion thermochimique comprend des technologies comme la pyrolyse, la liquéfaction, la gazéification, etc. Tandis que la conversion biochimique concerne principalement la fermentation et la digestion. Parmi ces méthodes, la gazéification est l'une des options les plus favorables car les produits peuvent alimenter tous les types de marchés énergétiques : chaleur, électricité et transport. Cependant, pour les biomasses humides avec une teneur élevée en humidité, l'impact sur l'efficacité énergétique du processus de gazéification est négatif car, pour certains types de biomasse, le séchage consomme plus d'énergie que le contenu énergétique du produit. Une méthode alternative pour la conversion de matières organiques humides, telles que les boues d'égout, le fumier de bétail et les déchets de l'industrie alimentaire, est la digestion anaérobie (conversion biochimique). Ce processus est toutefois caractérisé par une réaction lente, avec des temps de séjour typiques allant jusqu'à 2 à 4 semaines. De plus, certains déchets doivent être hygiénisés avant leur utilisation.

Le processus de gazéification en eau supercritique (gazéification hydrothermale) est une alternative à la fois à la gazéification conventionnelle et aux processus de digestion anaérobie pour la conversion de la biomasse humide. Ce processus ne nécessite pas de séchage et se déroule sur des temps de séjour beaucoup plus courts, de quelques minutes au maximum. La gazéification en eau supercritique est donc considérée comme une technologie prometteuse car elle permet de valoriser un grand nombre d'intrants et notamment de la biomasse humide en un gaz qui, après purification, peut être utilisé comme substitut du gaz naturel. Cette technologie permet également de produire de l'hydrogène. Les premières recherches remontent aux années 1970, et depuis, la gazéification en eau supercritique a fait l'objet de nombreuses études concernant la conversion thermochimique de la biomasse humide.

### 3 Présentation de la technologie de gazéification hydrothermale

#### 3.1 Principales technologies de valorisation de la biomasse

Généralement, il existe deux voies principales qui permettent de convertir la biomasse. La première voie est la valorisation matière, pour laquelle la biomasse est directement valorisée en tant que matière première pour une autre application (ex : épandage, alimentation animale). La seconde voie est la valorisation énergétique, qui consiste à transformer la biomasse pour produire des vecteurs énergétiques tel que la chaleur, l'électricité, le gaz ou encore des biocarburants liquides.

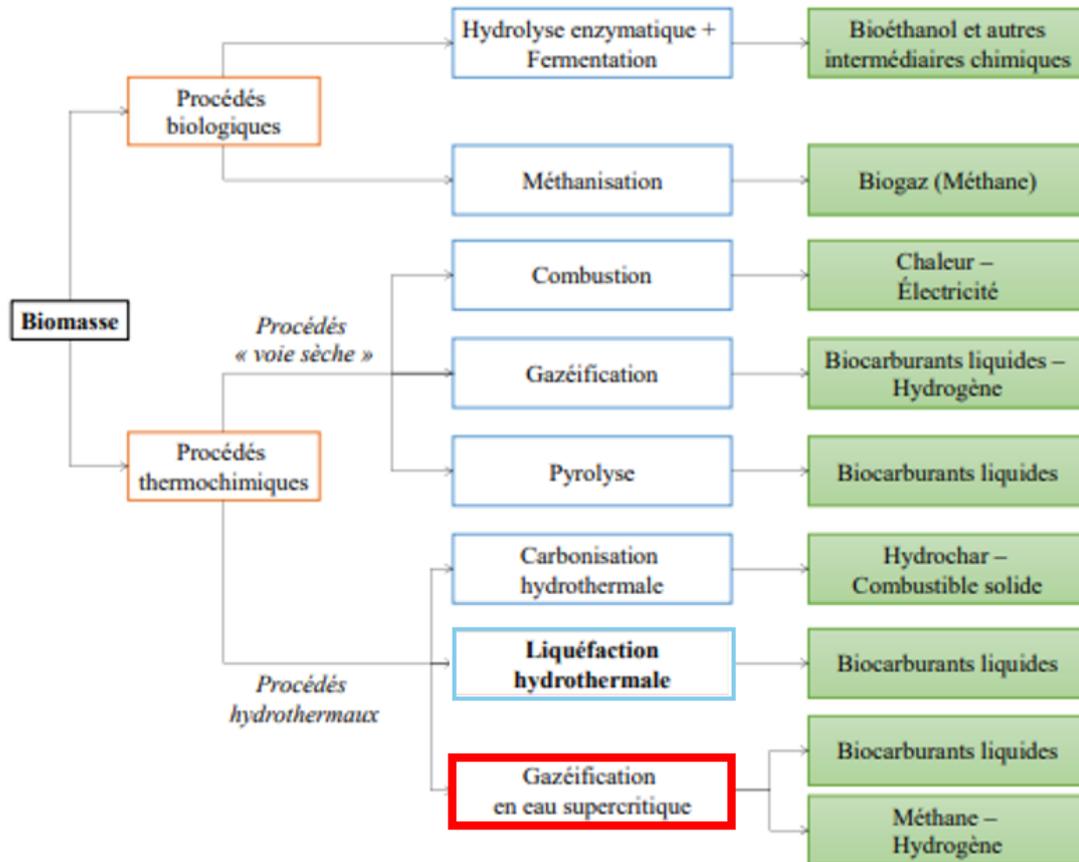


Figure 1: Récapitulatif des principaux procédés de valorisation énergétique de biomasse (adapté d'après [1]).

Comme l'illustre la figure ci-dessus, de nombreux procédés cherchent à convertir la biomasse en vecteurs énergétiques renouvelables. Le choix du procédé le plus adapté dépend à la fois de la nature de la ressource (humidité, composition, etc.), et de l'application finale visée.

Les procédés thermochimiques, comme la pyrolyse et la liquéfaction hydrothermale, permettent de produire des bio-huiles raffinables aux caractéristiques proches des combustibles classiques [4].

La pyrolyse et la gazéification, bien adaptées aux biomasses sèches, présentent des limites pour le traitement des matières humides, en raison des coûts élevés associés au séchage préalable [5]. Ces contraintes rendent l'utilisation de procédés thermochimiques traditionnels moins viable dans ce contexte. Ainsi, les procédés hydrothermaux, et plus spécifiquement la gazéification hydrothermale, apparaissent comme une alternative prometteuse pour la valorisation des biomasses humides. Cette note se penche sur ces procédés, avec un focus particulier sur la gazéification hydrothermale.

## 3.2 Technologies hydrothermales

### 3.2.1 Eau supercritique : élément clé pour les technologies hydrothermales

L'eau supercritique est un état particulier de l'eau lorsque celle-ci est chauffée et mise sous pression au-delà de son point critique, c'est-à-dire au-dessus de sa température critique qui correspond à 374 °C et de sa pression critique autour de 221 bars [6]. A ces conditions, l'eau n'est ni totalement liquide ni totalement gazeuse. Au-delà de cette température et de cette pression, l'eau se trouve dans sa phase supercritique, comme le montre la Figure 2.

Dans des conditions supercritiques, l'eau agit à la fois comme milieu réactionnel et comme réactif [7]. Ses propriétés telles que la densité, la constante diélectrique et le produit ionique contribuent à la dégradation des composés organiques [8].

Le diagramme de phase pression-température de l'eau, illustré à la Figure 3, montre le positionnement de chaque technologie hydrothermale en fonction de la pression et de la température de l'eau.

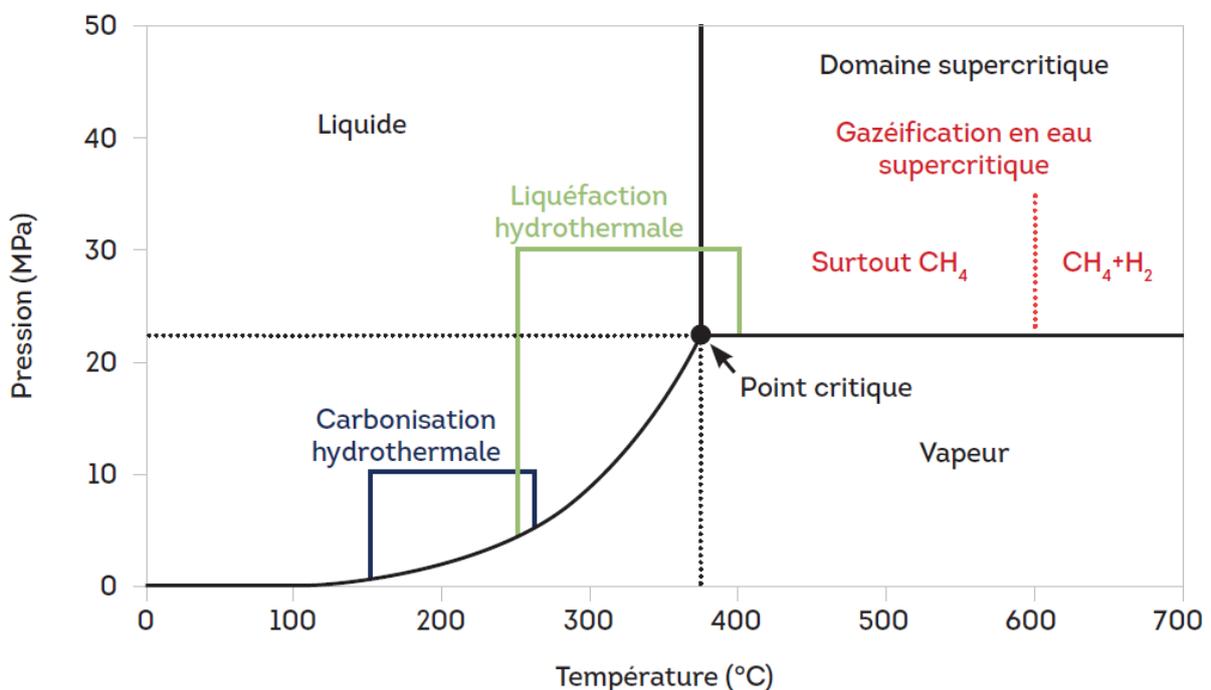


Figure 4: Diagramme de phases (Pression/Température) (source :[9])

### 3.2.2 Familles des technologies

La biomasse peut contenir des teneurs en humidité très élevées, pouvant atteindre dans la plupart des cas des valeurs supérieures à 95% en poids [10]. Dans ce contexte, les technologies hydrothermales de conversion de la biomasse se présentent comme des alternatives idéales pour des biomasse humides, généralement avec 70% en poids ou plus d'eau [10].

Le traitement hydrothermal utilise de l'eau sous-critique ou supercritique comme solvant et réactif pour convertir la biomasse humide en produits énergétiques et en matériaux utiles. Le traitement hydrothermal peut être classé en trois catégories selon les paramètres de réaction tels que la température et la pression [11] : la carbonisation hydrothermale, la liquéfaction hydrothermale et la gazéification hydrothermale. Le Tableau 1 représente les conditions opératoires clés de chaque technologie hydrothermale et le produit de sortie principal associé.

Tableau 2 : Récapitulatif des différentes technologies hydrothermales (source : Grtgaz)

Procédé hydrothermal	Intervalle de température et pression	Eau souscritique ou supercritique	Produit principal (en sortie)
Carbonisation hydrothermale	180 à 250 °C 10 à 50 bar	Eau souscritique	(Bio)char
Liquéfaction hydrothermale	250 à 350 °C 40 à 220 bar	Eau souscritique	(Bio) crude ( ≈ pétrole brut)
Gazéification hydrothermale	360 à 700°C 210 à 350 bar	Eau supercritique	Gaz de synthèse / Méthane de synthèse

### 3.3 Gazéification hydrothermale

#### 3.3.1 Description et familles de technologies de gazéification hydrothermale

La gazéification hydrothermale, également connue sous le nom de conversion hydrothermale, est un procédé de conversion thermochimique qui transforme la biomasse humide en gaz combustible, principalement du méthane ainsi que d'autre gaz ( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ), grâce à l'utilisation de l'eau sous des conditions de haute température (360 à 700 °C) et de haute pression (210 à 350 bars).

La composition du gaz à la sortie varie en fonction des caractéristiques des déchets organiques traités, des conditions opératoires (température, pression, débit, temps de séjour et présence ou non de séparateur de sels) et en particulier de la famille de technologie de gazéification hydrothermale [12]. Aujourd'hui, il existe deux grands types de procédés de gazéification hydrothermale : la gazéification catalytique et la gazéification à haute température (sans catalyseur).

- La gazéification catalytique : Dans ce type de procédés, le gazéifieur ou le réacteur de gazéification est chargé par un catalyseur qui permet notamment d'abaisser la température de réaction à des valeurs comprises généralement entre 300 et 400°C [13] [14]. L'utilisation de catalyseurs jouent un rôle dans l'amélioration du rendement de la gazéification et la sélectivité des gaz de synthèse [15]. L'utilisation d'un catalyseur permet de favoriser la production du méthane pour atteindre des valeurs allant jusqu'à 60-70% dans le gaz de synthèse généré [15].
- La gazéification à haute température : Le température de fonctionnement du gazéifieur pour ce type d'installations se situe à des niveaux élevés entre 550 et 700 °C. Dans ces conditions de haute température, la composition du dihydrogène dans le syngas est nettement plus riche que dans les procédés de la gazéification hydrothermale avec catalyse. La teneur en dihydrogène peut atteindre des valeurs allant de 30 à 50% dans le syngaz en sortie, voire sous certaines conditions, le syngaz peut être plus riche en dihydrogène qu'en méthane.

La Figure 5 représente un schéma général simplifié du fonctionnement du procédé de la gazéification hydrothermale.

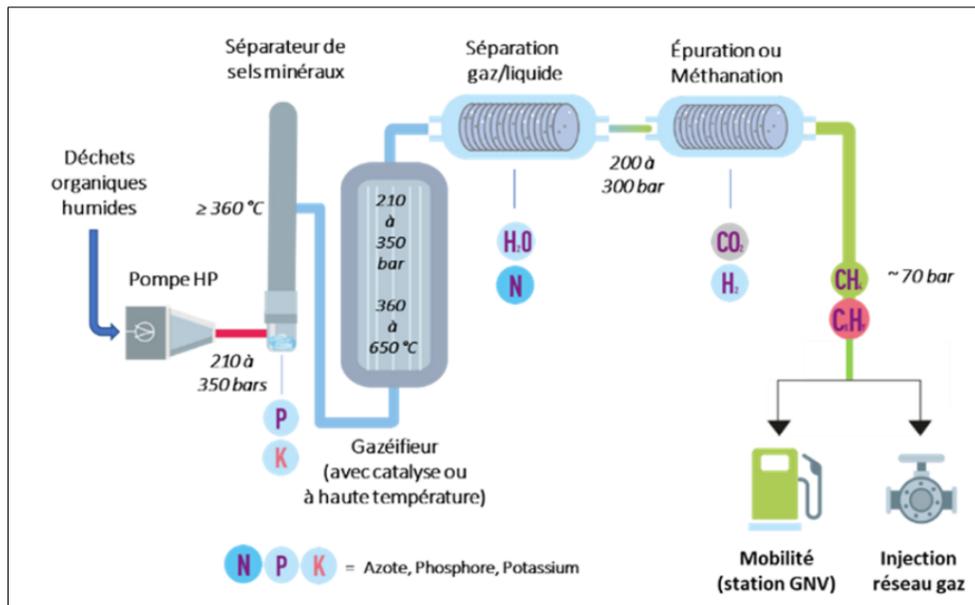


Figure 6: Schéma simplifié du procédé de la gazéification hydrothermale (Source : GRTgaz)

### 3.3.2 Principales étapes de gazéification hydrothermale

La première étape du processus de gazéification hydrothermale concerne la préparation des intrants. Cette phase est essentielle car elle dépend largement de la nature des intrants, principalement la biomasse brute. L'objectif principal est d'homogénéiser la composition de la biomasse afin de faciliter et d'optimiser la réaction thermochimique ultérieure. Pour ce faire, il est souvent nécessaire de réduire la taille des composants en utilisant des méthodes de tamisage ou de broyage [16]. Cette étape permet également d'éliminer certains éléments indésirables, tels que les matières inertes et les métaux lourds, et de concentrer ou de diluer la matière organique [16]. De plus, l'intrant doit être pompable, ce qui peut nécessiter l'ajout d'eau en fonction du taux de matières sèches.

Une fois l'intrant préparé, il est ensuite comprimé jusqu'à un niveau de pression se situant entre 280 et 300 bars, avant d'être préchauffé par la chaleur résiduelle générée par le procédé de gazéification et orienté vers la prochaine étape du procédé.

Dans le cas des procédés sans catalyseur, qui nécessitent des températures de réaction plus élevées, les intrants sont directement acheminés vers le réacteur de gazéification (le gazéifieur). Les conditions supercritiques entraînent une précipitation gravitaire des sels minéraux en bas du gazéifieur d'où ils peuvent être évacués [16].

Dans le cas d'un réacteur de gazéification catalytique, un séparateur de sels et un captage du soufre sont requis avant le gazéifieur pour garantir son bon fonctionnement et prolonger la durée de vie du catalyseur [17]. Ce séparateur élimine les solides, notamment les sels minéraux, et réduit les risques de corrosion des équipements soumis à haute pression [17].

À la sortie du réacteur de gazéification, le gaz de synthèse est séparé de son résidu liquide, puis purifié afin de devenir un gaz renouvelable conforme aux standards du gaz naturel du réseau. À ce stade, le gaz est encore sous une pression d'environ 70 bars et peut être injecté dans le réseau national de transport de gaz naturel, valorisant ainsi sa pression résiduelle. Il peut également être utilisé dans une station GNV fonctionnant à haute pression, ou pour d'autres applications nécessitant du gaz naturel, telles que la cogénération, le chauffage ou la production d'électricité via une turbine à gaz ou un cycle combiné.

## 4 Spécificités de chaque technologie de gazéification hydrothermale (catalytique et à haute température)

### 4.1 La gazéification hydrothermale à haute température

Dans la gazéification hydrothermale à haute température, la réaction thermochimique se produit en présence d'eau supercritique, à des températures comprises allant de 550 à 700 °C, avec ou sans présence de catalyseur [18] [19]. Ce procédé permet une conversion efficace de la biomasse en gaz renouvelable contenant principalement du dihydrogène ( $H_2$ ) et de dioxyde carbone ( $CO_2$ ) [18].

Historiquement, les systèmes de gazéification n'étaient pas équipés de séparateurs de sels en amont [19], ce qui signifiait que les sels minéraux présents dans la biomasse précipitaient sous forme solide dans le gazéifieur avant d'être évacués par un dispositif en bas de l'unité [19]. Cependant, les tendances actuelles favorisent l'intégration d'un séparateur de sels en amont, ce qui améliore l'efficacité des réactions thermochimiques et réduit l'encrassement du réacteur [19].

Les échangeurs de chaleur fonctionnent à haute pression, ce qui rend la récupération de chaleur possible [20]. De plus, les réacteurs dans des conditions supercritiques opèrent à haute pression, ce qui élimine la nécessité de pressuriser le gaz par la suite et réduit les pertes de chaleur minimale [21] [22].

La composition du gaz de synthèse à la sortie du gazéifieur contient environ 30% de méthane, 30% d'hydrogène, 30% de gaz carbonique (principalement du  $CO_2$ ) ainsi que 10% d'alcanes  $C_xH_y$  (mélange d'éthane  $C_2H_6$ , propane  $C_3H_8$ , et/ou butane  $C_4H_{10}$ ) [19] [15]. La composition du gaz de synthèse dépend toutefois du type d'intrant, des spécifications techniques des installations et des conditions opératoires [23] [24]. En ajustant les conditions du procédé et la nature du catalyseur, il est possible d'atteindre la composition de gaz de synthèse souhaitée. De plus, la conversion du flux à la sortie du réacteur en gaz de synthèse n'étant pas complète, le gaz, contenant de l'eau et de l'azote, transite par un séparateur gaz/liquide pour séparer l'eau du gaz de synthèse à haute pression [19]. Le gaz de synthèse brut, une fois séparé à haute pression, peut être traité de deux manières afin de [10] :

- Maximiser la production de méthane de synthèse et le rendre conforme aux spécifications d'injection dans le réseau de gaz.
- Séparer les molécules de gaz, permettant ainsi de valoriser d'une part le méthane et les alcanes pour le réseau de gaz, et d'autre part l'hydrogène de manière distincte.

### 4.2 La gazéification hydrothermale catalytique

Une dégradation efficace de la biomasse en composés gazeux de faible poids moléculaire nécessite des températures de fonctionnement élevées (jusqu'à 600 °C). Les températures élevées entraînent un rendement élevé ; cependant, la haute température réduit l'efficacité énergétique du processus [19], ce qui engendre des coûts supplémentaires. Par conséquent, la gazéification à une température plus basse est souhaitable et est souvent réalisée à l'aide de catalyseurs [25].

L'utilisation de catalyseurs améliore le rendement et la composition du gaz de synthèse [25] [15]. Il est également connu pour améliorer les performances de gazéification dans des conditions modérées, montrant ainsi un grand potentiel en tant que candidat approprié pour la gazéification hydrothermale supercritique (à très haute température). La Figure 4 montre un schéma simplifié du procédé de gazéification hydrothermale catalytique, mis au point par un développeur de la technologie (TreaTech).

Plusieurs types de catalyseurs ont été testés expérimentalement à l'échelle laboratoire et discutés dans la littérature [26] [27] [28] [29] [30], incluant les catalyseurs homogènes (ex : NaOH, KOH, etc.) et hétérogènes (ex : Ni/  $Al_2O_3$ , Ni/C, Ru/C, Ru/ $TiO_2$ , etc.). Les catalyseurs homogènes offrent des avantages en termes de coût et évitent des problèmes comme le colmatage [31]. Cependant, leur faible taux de récupération constitue un inconvénient, ce qui limite leur utilisation dans les réacteurs continus à l'échelle commerciale [15].

Parmi ces catalyseurs, le ruthénium (Ru) qui est parmi les plus utilisés en raison de ses avantages intéressants. Selon [19], ce catalyseur permet d'avoir :

- **Un taux de conversion élevé** : l'utilisation de ce catalyseur permet un taux de conversion de la biomasse en méthane pouvant atteindre jusqu'à 70 % dans le gaz de synthèse, ce qui maximise la valorisation de la biomasse ;
- **Efficacité énergétique améliorée** : l'utilisation de ce catalyseur permet de réduire considérablement la consommation énergétique du procédé en abaissant la température de fonctionnement du gazéifieur à environ 360-400°C, avec un gain de rendement global pouvant atteindre 85% ;
- **Production d'effluents de qualité** : L'eau résiduelle produite est de qualité valorisable dans les installations qui sont équipées de séparateurs de sels et des systèmes de captage de soufre.

L'utilisation de ce catalyseur engendre toutefois quelques contraintes :

- La présence de soufre dans les intrants impacte l'efficacité du catalyseur [31]. En effet, le soufre peut entraîner un empoisonnement du réacteur ou un endommagement de l'alliage des parois du réacteur [32] [33]. Dans ce cas, il est nécessaire d'équiper l'installation de la gazéification d'un séparateur de sels et d'un système de captage de soufre en amont aval du gazéifieur [19].
- Un renouvellement périodique du catalyseur est nécessaire car le catalyseur perd de son efficacité dans le temps [31]. Toutefois, la mise en œuvre d'un système de captage du catalyseur peut être utilisé comme solution pour , régénérer le catalyseur et limiter les coûts de renouvellement du catalyseur [19].

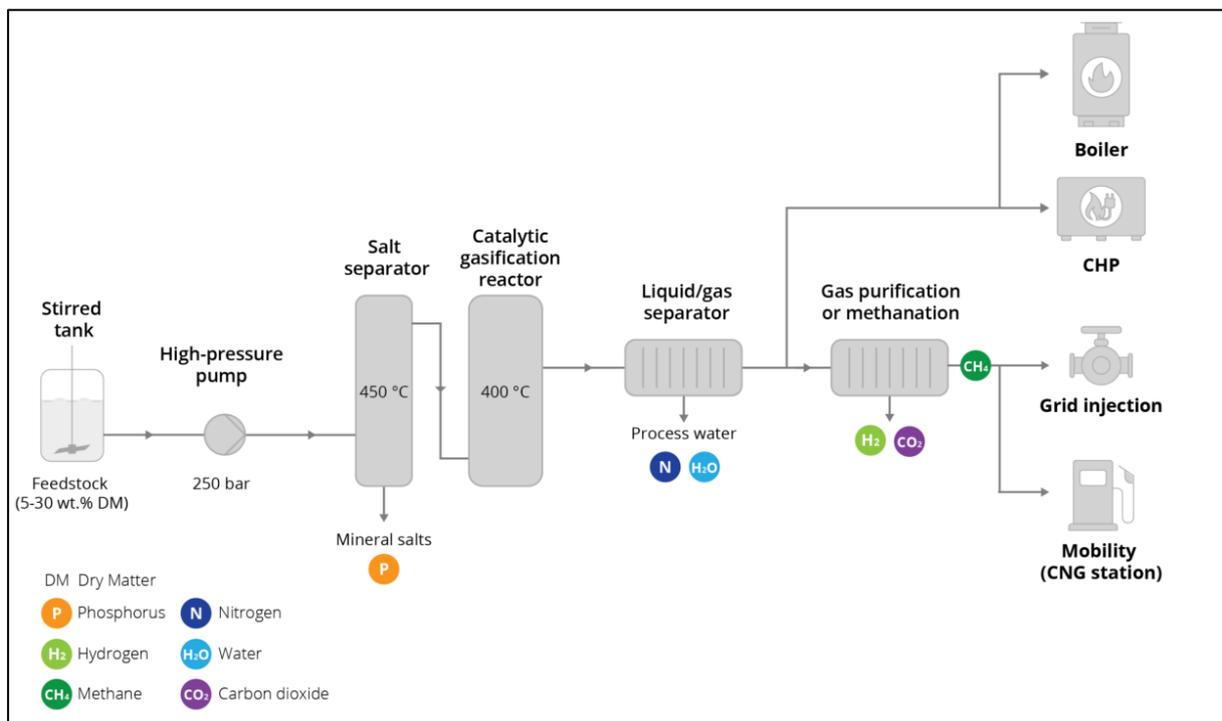


Figure 4 : Schéma simplifié de la gazéification hydrothermale développée par TreaTech (source : <https://trea-tech.com/technology/>)

Note : L'utilisation d'un système de captage de soufre et d'un système de séparation de sels sont bénéfiques pour les deux technologies de gazéifications, car ces deux dispositifs contribuent à réduire les risques de corrosion tant au niveau du gazéifieur que dans les autres installations en aval du séparateur de sels.

### 4.3 Synthèse sur les technologies de gazéification hydrothermale

La principale différence entre les deux technologies de gazéification hydrothermale réside dans les conditions de températures de fonctionnement et dans l'utilisation ou pas d'un catalyseur. Cependant, il a été démontré qu'un catalyseur est également utilisé dans le cas de la gazéification hydrothermale supercritique (à haute température) afin d'améliorer les réactions de gazéification et de modifier sélectivement la composition des produits gazeux [25].

Néanmoins, malgré ces spécificités, la chaîne de valeur globale de la gazéification hydrothermale reste similaire, quelle que soit la technologie utilisée (Figure 3). Elle comprend généralement les étapes de prétraitement de la biomasse, de gazéification, de traitement des effluents et de valorisation des produits.

Chaque technologie est fonctionnelle selon des conditions opératoires ou des plages opérationnelles différentes, comme la température, la pression, le temps de séjour, etc. Le Tableau 3, synthétise les paramètres opératoires clés de chaque technologie et la composition du gaz de synthèse.

*Tableau 3: Exemple de conditions opératoires et composition du gaz de synthèse selon chaque technologie de gazéification hydrothermale [19]*

Technologie de gazéification hydrothermale	Conditions opératoires		Composition du gaz de synthèse (%vol)			
	Température (°C)	Pression (bar)	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> (%vol)	CO <sub>2</sub> (%vol)	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> (Alcanes) (%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

D'après le Tableau 3, l'utilisation de catalyseurs permet de favoriser les réactions produisant du méthane, ce qui permet d'atteindre un taux de méthane allant jusqu'à 70% dans le gaz de synthèse avant purification. Tandis que la gazéification hydrothermale à haute température permet d'obtenir un taux de méthane et de dihydrogène presque équivalent. Il est bien à noter que ces constats permettent d'avoir un ordre de grandeurs sur la composition du gaz de synthèse, et que d'autres paramètres influencent cette composition, principalement [34]: la température, la pression, la composition des intrants, le temps de séjour et le type de catalyseur.

La température est considérée comme le paramètre le plus dominant qui affecte l'efficacité de la gazéification et la composition des produits [35]. Des températures plus élevées favorisent la formation de H<sub>2</sub> et de CO<sub>2</sub>, tandis que des températures plus basses sont associées à une augmentation des rendements en CH<sub>4</sub> et en CO.

## 4.4 Les intrants de la gazéification hydrothermale

La gazéification hydrothermale requiert des intrants pompables, aussi bien à basse qu'à haute pression. Cette propriété est déterminée par plusieurs facteurs intrinsèques à chaque matière première : sa viscosité, son taux de matière sèche, la taille des particules et sa composition [17].

Afin d'optimiser la valorisation de la biomasse par gazéification hydrothermale, il est possible de combiner des intrants présentant des caractéristiques différentes [17]. Par exemple, des biomasses sèches peuvent être mélangées à des biomasses plus humides pour obtenir un mélange homogène et traitable. Cependant, cette approche nécessite une adaptation spécifique du procédé, qui doit être ajusté en fonction de la composition exacte du mélange [17].

La présence de certains composants dans les intrants peut compromettre le fonctionnement de la gazéification hydrothermale et réduire la durée de vie des équipements comme par exemple le soufre, les chlorures, les minéraux (tels que le silicium et le calcium), les inertes (cailloux, sable) et les métaux [13] [34].

Plusieurs groupes d'intrants répondent aux caractéristiques techniques requises par la gazéification hydrothermale, notamment [17]:

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

Le Tableau 4 récapitule les différentes familles de déchets qui peuvent être utilisées comme des intrants pour le procédé de la gazéification hydrothermale.

Tableau 5 : Exemple d'intrants pour la gazéification hydrothermale (adapté depuis le club ATEE)

Familles des déchets			
Déchets municipaux	Déchets industriels	Déchets industries agro-alimentaires	Déchets agricoles
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boues de STEP ;</li> <li>- Fraction organique souillée ou polluée des déchets municipaux ;</li> <li>- Déchets organiques des déchetteries (solvant, peinture, ...)</li> <li>- Déchets alimentaires issus de restauration ;</li> <li>- Sciure, poussière et fines particules de bois,</li> <li>- Etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boues industrielles polluées ;</li> <li>- Déchets issus d'usines chimiques (acide acrylique, solvant, monomères, etc.) ;</li> <li>- Divers déchets de sites industriels (peinture, vernis, encre, etc.) ;</li> <li>- Déchets de plastique et de papier non recyclables ;</li> <li>- Liqueur noire ;</li> <li>- Etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boues industrielles ;</li> <li>- Déchets Issus de la production de biofuel (glycérol, ester, ...)</li> <li>- Marc de café ;</li> <li>- Pulpe de betteraves ;</li> <li>- Vinasse, mélasse, drèche (distillerie) ;</li> <li>- Déchets de pommes de terre (amidon, son de blé, ...)</li> <li>- Déchets animaliers y compris poissons ;</li> <li>- Graisses, huiles ;</li> <li>- Etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lisier et fumier d'élevage (porcins, bovins, volailles, ...)</li> <li>- Peaux de banane, orange, citron, ...)</li> <li>- Micro-/Macroalgue</li> <li>- Déchets de légumes, fruits, pommes de terre, céréales, ... ;</li> <li>- Digestats issus de méthanisation ;</li> <li>- Déchets de produits laitiers dont fromage ;</li> <li>- ...</li> <li>- Etc.</li> </ul>

#### 4.5 Atouts de la gazéification hydrothermale :

La gazéification hydrothermale présente plusieurs atouts et avantages, parmi eux :

- La flexibilité des matières premières à traiter une large gamme de biomasses, y compris celles à haute teneur en humidité, sans nécessiter de pré-séchage [24]. (voir Tableau 6).
- Grâce à sa capacité à traiter une large gamme d'intrants, la gazéification hydrothermale peut être mise en place en tant qu'installation complémentaire à une unité de méthanisation pour le traitement des digestats.
- Les composés intermédiaires liquides se dissolvent dans l'eau supercritique, réduisant ainsi la formation de goudrons et de charbon [37]. De plus, en abaissant la pression et/ou la température, il est possible de séparer facilement les gaz de la phase liquide, permettant leur récupération sous pression pour des étapes de valorisation ultérieures.
- Les gaz produits sont exempts de polluants [37]. Les gaz indésirables comme le H<sub>2</sub>S, le CO<sub>2</sub> et NH<sub>3</sub>, qui présentent une forte solubilité dans l'eau sous haute pression, sont éliminés dans la phase aqueuse. Cela permet également une première étape de séparation et de séquestration du CO<sub>2</sub> [37].
- La conversion rapide et complète. En effet, la haute température accélère les réactions chimiques, permettant une conversion rapide de la biomasse [35], contrairement à certains procédés de digestion anaérobie ou de fermentation.
- L'élimination des microorganismes et pathogènes et des micropolluants présents dans les intrants [38]. Contrairement aux procédés de digestion anaérobie et de fermentation, cette technologie permet en principe une conversion complète de la matière première et sa stérilisation [24].

- Production de gaz renouvelable bas carbone en fonction des besoins avec la possibilité de favoriser la production de l'un sur l'autre. La sélectivité pour le méthane ou l'hydrogène peut être contrôlée par la température, la pression et l'application de catalyseurs [25][35].
- Le gaz produit est disponible à haute pression, ce qui permet d'éviter une compression coûteuse pour son utilisation [24].
- Récupération d'une eau de qualité industrielle pouvant devenir potable après filtration ou traitement adapté. Cette eau peut être aussi recyclée et réutilisée dans le processus de la gazéification dans l'étape de préparation des intrants.
- Une alternative écologique à l'incinération, à l'enfouissement et à la mise en décharge des déchets.
- La récupération de l'azote et des minéraux comme le phosphore et le potassium [16]. Ces éléments peuvent être valorisés dans la production de fertilisants.
- Ce procédé permet de convertir l'intrant en gaz en seulement quelques minutes, avec un rendement énergétique global oscillant entre 70 et 85 % (sans compter la valorisation de la chaleur fatale) [38].

En plus des atouts mentionnés ci-dessus, l'utilisation de la gazéification hydrothermale avec catalyseur offre :

- Une efficacité énergétique : Les catalyseurs abaissent les températures requises pour la gazéification, réduisant la consommation énergétique et augmentant l'efficacité du processus [15] ;
- Une sélectivité des produits : Les catalyseurs peuvent être conçus pour favoriser la production de certains gaz par rapport à d'autres [25], en contribuant également à la simplification du traitement du gaz [16]. En effet, la forte concentration de méthane et la faible présence d'hydrogène (5 à 10 %) avec un reste de dioxyde de carbone, nécessitent uniquement une simple purification [16].
- Une réduction des résidus solides et liquides : Les catalyseurs favorisent des réactions plus complètes, réduisant la quantité de résidus solides et liquides.

## 4.6 Faiblesses de la gazéification hydrothermale

Malgré les atouts considérables de la gazéification hydrothermale, cette technologie présente plusieurs faiblesses :

- La consommation énergétique élevée : Le maintien de hautes températures conduit à une consommation énergétique importante, réduisant l'efficacité globale du processus [10]. Cette consommation est particulièrement élevée dans le cas de la gazéification à haute température, encore plus que pour la gazéification catalytique ;
- Complexité du système : Les installations doivent être capables de supporter des conditions extrêmes, augmentant la complexité et le coût des équipements [31]. Avec nécessité de maîtriser au mieux la tenue mécanique des matériaux ;
- Corrosion : Les températures élevées peuvent accélérer la corrosion des matériaux, nécessitant des matériaux spéciaux et des coûts de maintenance accrus [25] [27]. La corrosion est principalement causée par l'exposition des parois du réacteur et des canalisations à de l'eau compressée à haute température, ainsi qu'à la présence de sels [31].

D'autres faiblesses peuvent également être soulignées, liées à l'utilisation de catalyseurs :

- Coût des catalyseurs : Les catalyseurs, en particulier ceux à base de métaux précieux, peuvent être coûteux, augmentant les coûts d'exploitation [19] [25].

- Dégradation des catalyseurs : Les catalyseurs peuvent se dégrader ou s'empoisonner avec le temps [32] [33], nécessitant des remplacements périodiques et une gestion rigoureuse.
- Sensibilité aux impuretés : Les impuretés dans la biomasse ou la présence de soufre peuvent inhiber les performances des catalyseurs [31] , réduisant ainsi les performances des catalyseurs.
- Les catalyseurs hétérogènes peuvent conduire à des problèmes de colmatage [31].
- Complexité du processus : L'intégration de catalyseurs dans le processus ajoute une couche de complexité, nécessitant une expertise technique et une surveillance accrue.

## 5 Etat des lieux des installations de gazéification hydrothermale

### 5.1 Projets et installations de gazéification hydrothermale en Europe

En Europe, la gazéification hydrothermale suscite un intérêt croissant, avec plusieurs acteurs qui développent ou exploitent des pilotes et démonstrateurs à des niveaux de maturité technologique (TRL) allant jusqu'à 7. Cette technologie, qui vise à convertir des matières organiques humides en gaz de synthèse ou en biogaz sans avoir besoin de les sécher, est perçue comme une solution prometteuse pour la valorisation des déchets organiques et des boues d'épuration. Les principaux développeurs prévoient que la gazéification hydrothermale pourrait atteindre une échelle industrielle d'ici 2023/2025 [16]. De nombreux projets pilotes, démonstrateurs et une installation industrielle en Europe, comme ceux en Allemagne, aux Pays-Bas et en France, sont actuellement en cours pour affiner la technologie et démontrer sa viabilité technique, économique et environnementale (Cf. Figure 5).

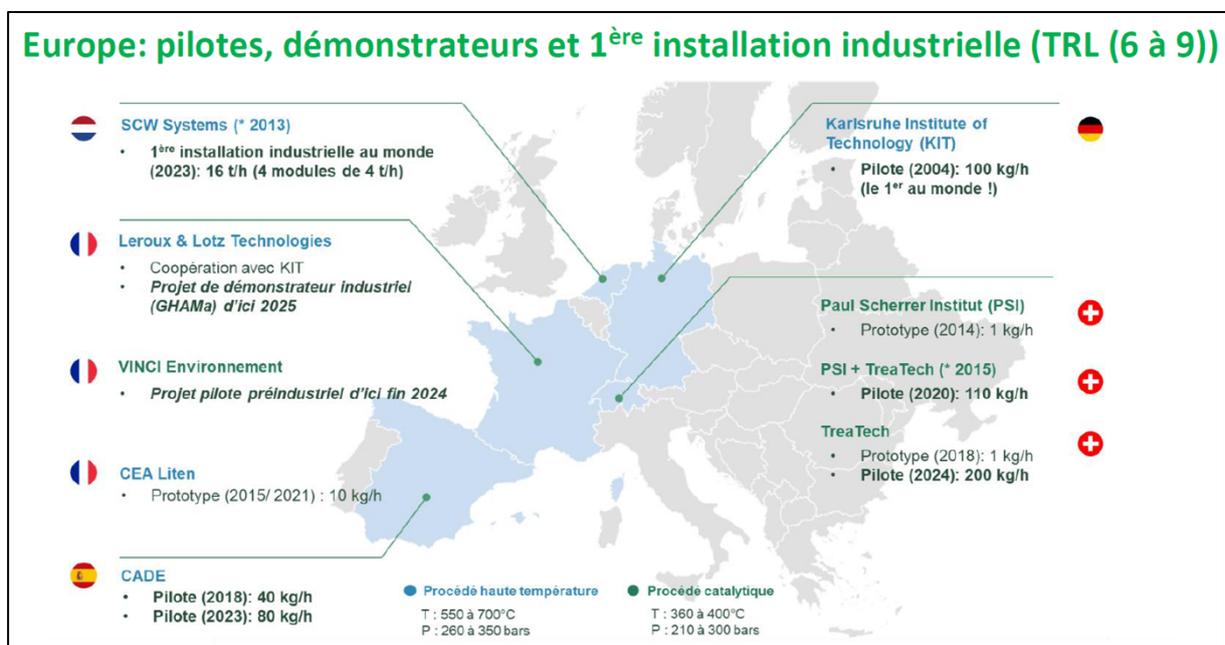


Figure 5 : Installations de gazéification hydrothermale en Europe : pilotes, démonstrateur et 1<sup>ère</sup> installation industrielles (source ATEE)

Le Tableau 7 présente un aperçu des développements de la technologie de gazéification hydrothermale par différents pays et développeurs, en se concentrant sur l'évolution de la technologie, le stade de développement et les capacités d'intrants.

Aux Pays-Bas, à Alkmaar, où la société SCW Systems a mis en service, en 2023, la première unité industrielle de ce type. SCW Systems est aujourd'hui considérée comme l'entreprise la plus avancée au monde dans le domaine, grâce à cette installation pionnière. SCW Systems, est à l'avant-garde avec des projets de grande envergure. Après un démonstrateur en 2018 capable de traiter 2000 kg/h, ils ont atteint une capacité industrielle de 16 000 kg/h en 2023. SCW Systems mise sur des procédés à haute température, mais se distingue par sa montée en échelle rapide et son ambition de dominer ce marché à l'échelle industrielle.

KIT (Karlsruhe Institut of Technology) en Allemagne est un acteur précoce, ayant développé un pilote en 2004, capable de traiter 100 kg/h, fonctionnant à haute température. Ils sont parmi les pionniers dans le domaine, mais leur capacité n'a pas évolué aussi rapidement que celle des Pays-Bas.

Enfin, CADE, en Espagne, a également choisi la voie de la haute température avec le lancement en 2018 d'un pilote de 40 kg/h. Bien que plus modeste en termes de capacité, ce projet reflète la diversité des approches en Europe, entre catalyse et haute température, pour répondre aux défis du traitement des déchets et de la production énergétique durable.

TreaTech, basée en suisse, a commencé avec un prototype en 2018, traitant 1 kg/h, et prévoit de lancer un pilote en 2024 avec une capacité accrue à 200 kg/h. La spécificité de TreaTech repose sur l'utilisation de la technologie avec catalyseurs.

En Suisse, le PSI (Paul Scherrer Institut) collabore avec TreaTech sur un projet pilote lancé en 2020, traitant 110 kg/h. Ici aussi, l'utilisation de la catalyse est privilégiée, suivant la même logique que les projets développés par TreaTech.

Tableau 8 : Principaux projets et installations de la technologie de gazéification hydrothermale en Europe

Pays	Développeur de la technologique	Nom du projet	Stade technologique	Année de lancement	Année de mise en service	Débit maximal d'intrants (kg/h)	Famille de la technologies	Source
Allemagne	KIT	VERENA	Pilote	-	2004	100	A haute température	[39]
Pays-Bas	SCW Systems	-	Démonstrateur	2016	2018	2000	A haute température	Scw systems, [16]
Pays-Bas	SCW Systems	Usine d'Alkmaar 1	Installation industrielle	-	2023	16000	A haute température	[16]
France	CEA	Gaseau	Prototype	2010	2016	10	A haute température	[16]
France	CEA+VINCI Environnement	Cométha	Prototype	2019	-	100	A haute température	[16]
France	Leroux & Lotz Technologies	Ghama	Démonstrateur	2019	2024-2025	2000	A haute température	[40] [16]
France	Leroux & Lotz Technologies + KIT	-	Installation industrielle	2021	2025/2026	-	A haute température	[16]
France	VINCI Environnement+ Genifuel (USA)	-	Démonstrateur	2022	-	500	Avec catalyse	[16]
Suisse	PSI	SunCHem	Prototype	-	2014	1-2	Avec catalyse	[16]
Suisse	PSI + TreaTech	Hydropilot	Pilote	2015	2020	110	Avec catalyse	[41]
Suisse	TreaTech	-	Prototype	2018	-	1	Avec catalyse	data.gouv.fr
Suisse	TreaTech	-	Démonstrateur	2024	-	200	Avec catalyse	[41] [16]
Suisse	TreaTech	-	Installation industrielle	-	2025	2000-4000	Avec catalyse	[41] [16]
Espagne	CADE	-	Pilote	2018	-	40	A haute température	[17]
Espagne	CADE	-	Pilote	2023	-	80	-	GRTgaz

## 5.2 Etat des lieux de la technologie en France

En France, la technologie de gazéification hydrothermale est en pleine évolution, portée par plusieurs projets innovants et divers acteurs. Le CEA (Commissariat à l'énergie atomique) Liten a lancé dès 2010 le projet Gaseau, qui a atteint le stade de prototype en 2016 avec une capacité de traitement de 10 kg/h, en utilisant une technologie à haute température. Ce projet illustre les premiers efforts du pays dans le développement de cette technologie. En parallèle, le CEA, en collaboration avec VINCI Environnement, a lancé en 2019 le projet Cométhà, un prototype plus ambitieux, avec un débit plus important de 100 kg/h, toujours basé sur une technologie à haute température.

Le secteur privé s'est également investi dans cette démarche. Leroux & Lotz Technologies a lancé deux projets en cours de développement. Le premier, Ghama, est un démonstrateur lancé en 2019 à Saint-Nazaire avec une capacité de traitement de 2000 kg/h, utilisant la gazéification hydrothermale à haute température. Il est prévu une mise en service en 2024/2025. Le deuxième projet, en collaboration avec le KIT (Karlsruhe Institute of Technology), a été lancé en 2021. Leroux & Lotz Technologies vise à commercialiser cette technologie à partir de 2025/2026 [16].

Un autre acteur important, VINCI Environnement, en partenariat avec l'entreprise américaine Genifuel, a lancé en 2022 un démonstrateur d'une capacité de 500 kg/h, en utilisant la gazéification hydrothermale catalytique.

Ces projets montrent une diversification des approches, avec un intérêt à la fois pour les procédés à haute température et catalytiques, reflétant l'ambition de la France d'accélérer l'industrialisation de cette technologie.

## 5.3 Description technique de quelques installations de gazéification hydrothermale

Étant donné que la technologie de la gazéification hydrothermale est encore en phase de déploiement à travers des prototypes, pilotes, démonstrateurs et une seule installation industrielle, cette section du rapport présente une description technique de certains projets et installations, basée sur les données disponibles dans la littérature concernant les spécifications techniques, les schémas de procédés et les caractéristiques des différentes infrastructures. Cette analyse offre un aperçu des progrès accomplis ainsi que des approches technologiques mises en œuvre.

### 5.3.1 Pilote VERENA de Karlsruhe Institut of Technology (KIT) (Allemagne)

En Allemagne, le pilote VERENA, mis en service en 2004, est considéré comme étant la première unité pilote préindustrielle de la technologie de gazéification hydrothermale au monde [16]. Un schéma simplifié du procédé est représenté dans la Figure 7.

La biomasse, éventuellement mélangée à de l'eau, est introduite dans le procédé à l'aide d'une pompe. La teneur en eau de l'intrant est ajustée pour obtenir un mélange homogène adapté au pompage. Selon la composition de la biomasse, notamment la taille et la texture des particules, des étapes de prétraitement mécanique, comme le broyage, peuvent être nécessaires en amont [39]. Ensuite, l'intrant est porté à une haute pression d'environ 350 bars, puis chauffé en passant par deux échangeurs de chaleur. Le premier échangeur de chaleur utilise la chaleur récupérée des effluents du réacteur de gazéification, permettant également de refroidir ces effluents.

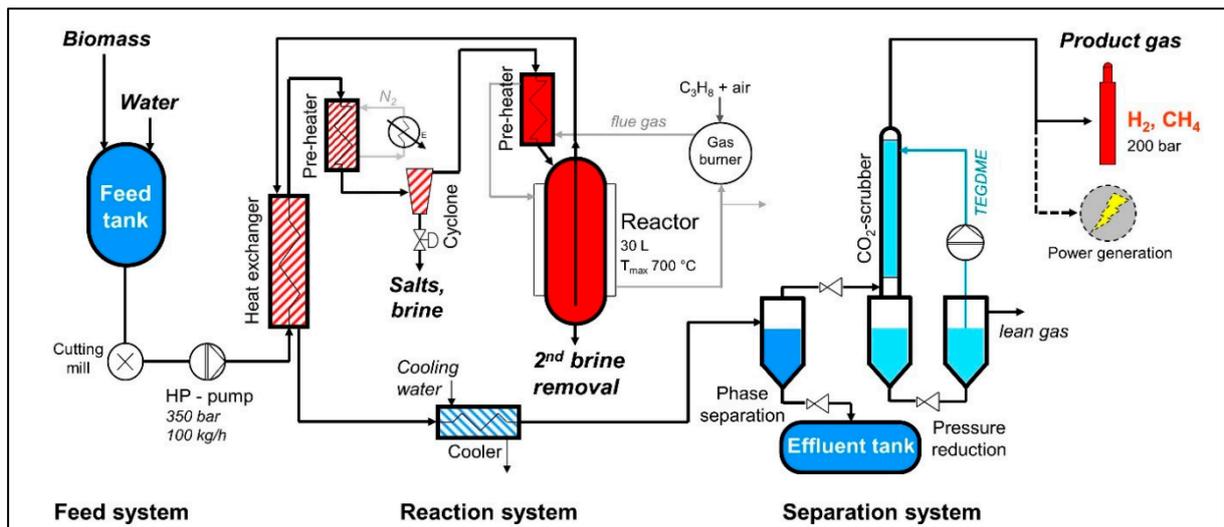


Figure 6: Schéma procédé du pilote VERENA de Karlsruhe Institut of Technology (KIT)[39]

Le mélange passe ensuite dans un cyclone pour capter les sels. Le préchauffeur situé avant le gazéifieur et le gazéifieur lui-même sont chauffés à l'aide d'un flux de chaleur provenant des gaz chauds d'une chaudière. Le flux gazeux en sortie du gazéifieur, en conditions supercritiques, est refroidi avant de passer dans un séparateur de phase. L'effluent liquide est collecté dans un réservoir, puis évacué vers une station de traitement. Le gaz récupéré est dirigé vers une colonne de lavage pour éliminer le CO<sub>2</sub>. En dissolvant le CO<sub>2</sub> dans de l'eau froide ou du tétraéthylène glycol diméthyl éther (TEGDME), sa teneur dans le gaz produit est réduite. Le gaz restant, contenant de l'hydrogène et du méthane peut alors être stocké dans des bouteilles de gaz haute pression à 200 bars.

Tableau 9: Fiche technique du projet VERENA (adapté de [16] [39])

Nom du projet	VERENA
Porteur du projet	Karlsruhe Institut of Technology
Localisation	Karlsruhe, Allemagne
Année de mise en service	2004
Intrants	Plusieurs intrants : boues et digestats de STEU, glycérol, ensilage de maïs, etc.
Capacité maximale d'intrants	100 kg/h de biomasse humide (max 20% MS)
TRL	5
Technologie	Haute température avec séparateur de sels
Conditions opératoires (Réacteur de gazéification)	600 - 700 °C et 250 – 300 bar
Valorisation du gaz	Stockage dans des bouteilles hautes pression
Valorisation des co-produits	non

### 5.3.2 Pilote HydroPilot de PSI + TreaTech (Suisse)

HydroPilot est une installation pilote de gazéification hydrothermale catalytique. Actuellement, il s'agit de la plus grande installation de gazéification hydrothermale de technologie catalytique (<https://www.psi.ch/en/cpe/hydropilot>), avec une capacité de 110 kg/h de déchets humides traités. Cette installation pilote a été conçue et construite par un consortium piloté par Paul Scherrer Institut (PSI), incluant KASAG SWISS AG, Treatech sàrl, ExerGo sàrl, et Afry Schweiz AG. Le projet a bénéficié d'un financement du programme : *Pilot and Demonstration* de l'office fédéral de l'énergie suisse.

Ce projet pilote a été conçu pour traiter et valoriser les déchets provenant des stations d'épuration des eaux usées (STEP), en particulier les boues et les digestats de boues. L'objectif était de rechercher et de développer des solutions alternatives à l'incinération des boues, car depuis 2006, cette méthode est la seule autorisée en Suisse suite à l'interdiction de l'épandage des boues sur les terres agricoles.

Le schéma procédé du pilote HydroPilot est illustré par la Figure 7.

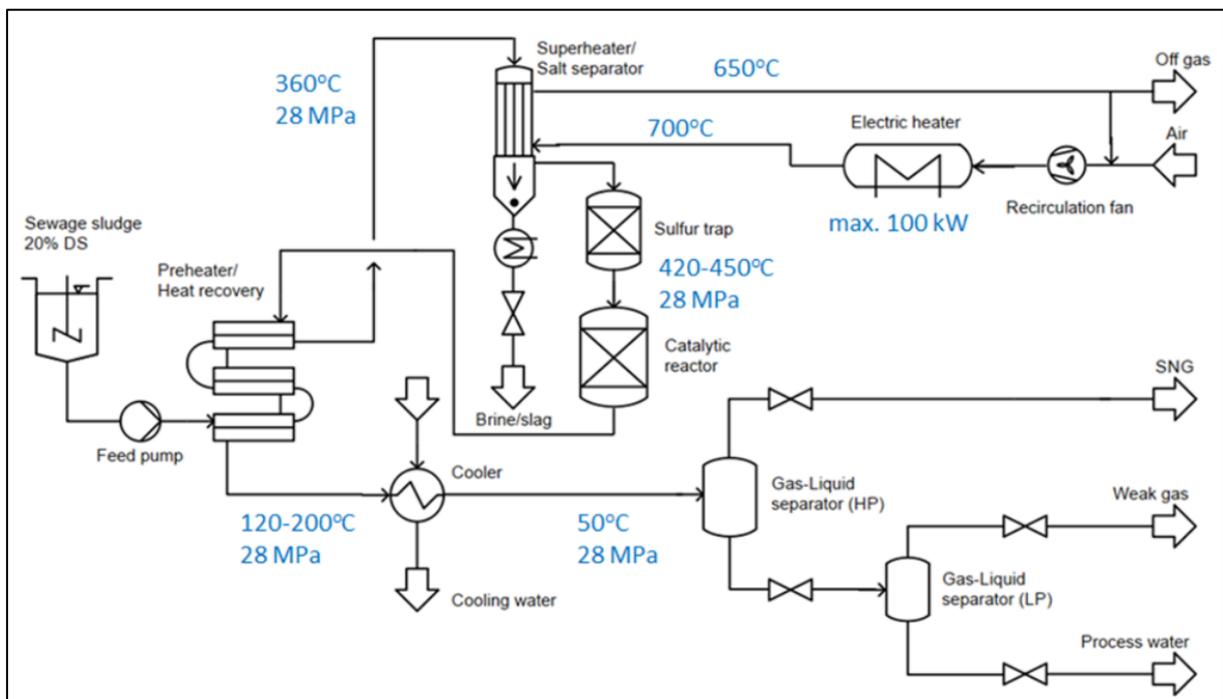


Figure 7: Schéma de principe du pilote de la gazéification hydrothermale HydroPilot [41]

Le procédé peut se décomposer en trois principales étapes : une étape de préparation des intrants avec séparation des sels, une étape de gazéification et une étape de séparation de gaz produit.

Après la préparation de l'alimentation et la réduction de taille, le déchet introduit dans le pilote est tout d'abord comprimé à l'aide d'une pompe à 28 Mpa et ensuite préchauffé par un échangeur de chaleur à des température de l'ordre de 360 °C.

Les intrants sont ensuite dirigés vers un séparateur de sels chauffé à environ 420 – 450 °C. A la sortie de ce premier séparateur, les composants solides, tels que les minéraux et les métaux sont séparés du flux. Ce flux passe par la suite dans un absorbeur, rempli d'oxyde de zinc, afin de capter le soufre présent dans le flux avant son entrée dans le réacteur de gazéification. Le but de ce séparateur est d'éliminer les traces de soufre qui peut agir comme agent affectant le fonctionnement du catalyseur.

Dans ce projet, le réacteur de gazéification est chargé de catalyseur de ruthénium sur charbon actif granulaire. A la sortie du réacteur, le mélange de produits est refroidi dans un échangeur de chaleur à environ 50 °C, ce mélange de produits contient principalement du syngaz et de l'eau résiduelle contenant principalement de l'azote. Le mélange de produits est refroidi et séparé en gaz naturel de synthèse (GNS) et en eau de procédé via un séparateur de phase fonctionnant sous haute pression. L'eau est ensuite dépressurisée dans un deuxième séparateur à basse pression, produisant un flux moins important de gaz ainsi qu'une eau de qualité industrielle.

Le Tableau 10 présente la fiche technique de Hydropilot.

Tableau 11 : Fiche technique du pilote Hydropilot (source : [41])

Nom du projet	HydroPilot
Porteur du projet/ partenaires	TreaTech/ PSI, KASAG, Exergo, Afry
Localisation	Paul Scherrer Institut (Villigen, Suisse)
Année de mise en service	2020
Intrants	Boues et digestats de boues de STEU
Capacité maximale d'intrants	110 kg/h de biomasse humide (max 20% MS)
Capacité minimale d'intrants	25 kg/h
TRL	6
Technologie	Catalytique avec séparateur de sels
Conditions opératoires (Réacteur de gazéification)	400 - 450 °C et 250 – 350 bar
Valorisation du gaz	Non précisé
Valorisation des co-produits	Des travaux de recherche en cours pour valoriser le phosphore
Coût de réalisation	CAPEX : 2 millions d'euros

Cette installation pilote est le résultat de recherches et d'études de développement entamées en 2015. Elle a fourni de nombreux indicateurs sur les défis technologiques et les voies d'optimisation, ce qui aidera TreTech dans sa stratégie d'industrialisation et de commercialisation de la technologie. Une première unité de démonstration industrielle chez un client est prévue pour 2024. En outre, comme illustré dans la Figure 8 [41], TreTech prévoit d'installer sa première unité industrielle de grande taille, destinée au traitement des effluents industriels, en 2025, ainsi que sa première unité à pleine échelle pour le traitement des boues d'épuration municipales en 2026.

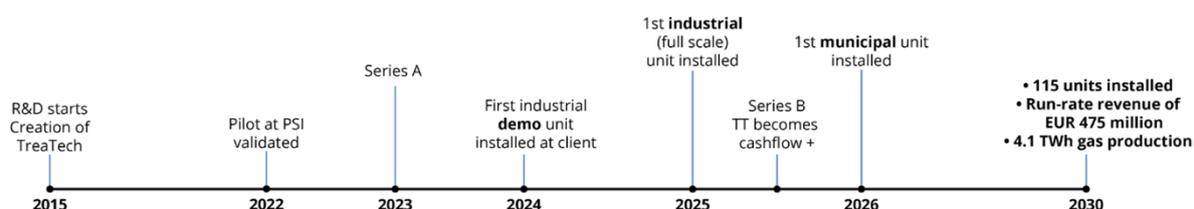


Figure 8 : feuille de route adaptée par TreTech pour l'industrialisation de la gazéification hydrothermale [41]

### 5.3.3 Usine Industrielle SCW Systems (Alkmaar, Pays-Bas)

La société SCW Systems est aujourd'hui la société la plus avancée au monde de la technologie de gazéification hydrothermale haute température avec la mise en service en 2021 de sa première installation à l'échelle industrielle. L'ensemble de la chaîne de la gazéification hydrothermale a été démontré comprenant le mélange des matières premières, la conversion, le traitement du gaz et l'intégration dans le réseau de gaz haute pression du Pays-Bas. En été 2022, SCW a mis en service 4 modules avec injection du gaz issu des 4 modules de 4 t/h, ( $\sim 20 \text{ MW}_{\text{th}}$ ) (source : ATEE). Pour Fin 2025, 2 projets supplémentaires de  $40 \text{ MW}_{\text{th}}$  seront installés, avec une montée en puissance à  $5,5 \text{ TWh/an}$  d'ici 2027 et jusqu'à  $40 \text{ TWh/an}$  d'ici 2030 (source : SCW Systems).

Cela est le fruit des années de recherche et de développement. L'acteur néerlandais a développé son premier pilote de 100 L/h en 2014.



Figure 9 : Vue de l'installation de SCW Systems (source : <https://www.alleima.com/en/news-media/archive/2022/12/supporting-a-renewable-future-with-supercritical-water-gasification/>)

Tableau 12 : Fiche technique de l'installation industrielle de SCW Systems (Source : 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 mise en service	2023
Intrants	Boues STEU, déchets agricoles, déchets agroalimentaires, déchets ménagers, biodéchets, effluents industriels, plastiques
Capacité maximale d'intrants	16000 kg/h
Capacité minimale d'intrants	-
TRL	8
Technologie	Haute température sans catalyse
Conditions opératoires (Réacteur de gazéification)	-
Valorisation du gaz	Injection dans le réseau
Valorisation des co-produits	-
Coût de réalisation (estimation)	CAPEX du projet démonstrateur : $\approx$ 15 Millions d'euros Projet Alkmaar 1 : entre 45 à 55 Millions d'euros

## 6 Conclusions

La gazéification hydrothermale se présente comme un procédé alternatif ou complémentaire aux technologies existantes de conversion de la biomasse en gaz renouvelable comme la méthanisation et la pyrogazéification. Elle se distingue par l'absence de nécessité de séchage et par des temps de séjour beaucoup plus courts, de quelques minutes seulement. Grâce aux changements radicaux dans les propriétés thermo-physiques de l'eau lorsqu'elle passe à l'état supercritique, cette technologie s'avère prometteuse pour convertir la biomasse humide en gaz renouvelable ou bas carbone, riche en méthane et en hydrogène. Elle permet également de récupérer des résidus solides et liquides, tels que le phosphore, le potassium, l'azote et l'eau, tout en éliminant les polluants organiques présents dans les intrants (microorganismes pathogènes, pesticides, etc.). Dans le cadre d'une installation de méthanisation existante, la gazéification en eau supercritique peut être intégrée comme une unité complémentaire pour traiter les digestats en sortie.

Cependant, malgré son fort potentiel, cette technologie rencontre encore des défis techniques, notamment la formation de dépôts et de char dans les réacteurs, provoquant des blocages. Des solutions, comme les réacteurs continus à lit fluidisé et l'utilisation de catalyseurs, sont en cours d'exploration pour améliorer la productivité et la stabilité du procédé. De plus, la corrosion des matériaux sous les conditions extrêmes de température et de pression, ainsi que les coûts liés au choix et à la maintenance de matériaux d'équipements (ex : réacteurs, échangeurs de chaleur, canalisations, etc.), posent des défis supplémentaires. L'utilisation de catalyseurs, bien qu'essentielle pour la sélectivité et la production de gaz renouvelable, présente des difficultés techniques, notamment en raison de la dégradation avec le temps, ajoutant ainsi des contraintes opérationnelles et des coûts supplémentaires.

Un état des lieux des projets d'installations en France révèle que plusieurs initiatives sont en cours de développement. Bien que la plupart de ces projets soient encore au stade de prototype ou de démonstrateur, leur nombre et leur diversité illustrent les efforts significatifs déployés par la France pour rattraper des pays comme l'Allemagne, les Pays-Bas et la Suisse, qui disposent déjà d'installations à plus grande échelle. La France se positionne ainsi comme un acteur clé dans cette technologie émergente, avec un potentiel industriel prometteur, soutenu par des collaborations et des projets ambitieux. Parmi ceux-ci, figurent des partenariats internationaux entre Leroux & Lotz Technologies et le Karlsruhe Institute of Technology (KIT), ainsi que la collaboration entre VINCI Environnement et l'entreprise américaine Genifuel. Ces initiatives témoignent de l'ambition française de mettre en place des installations industrielles opérationnelles d'ici 2026.

## 7 Références

- [1] « <https://www.eia.gov/international/overview/world> ».
- [2] « <https://www.iea.org/reports/renewables-2024/global-overview> ».
- [3] « <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024/executive-summary> ».
- [4] A. N. Oumer, M. M. Hasan, A. T. Baheta, R. Mamat, et A. A. Abdullah, « Bio-based liquid fuels as a source of renewable energy: A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 88, p. 82-98, mai 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.02.022.
- [5] M. Déniel, « Etude de la production de bio-huile par liquéfaction hydrothermale de résidus agroalimentaires et de leurs molécules modèles ».
- [6] H. Zheng, T. Yu, C. Qu, W. Li, et Y. Wang, « Basic Characteristics and Application Progress of Supercritical Water », *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 555, n° 1, p. 012036, août 2020, doi: 10.1088/1755-1315/555/1/012036.
- [7] O. Yakaboylu, J. Harinck, K. G. Smit, et W. Jong, « Supercritical Water Gasification of Biomass: A Literature and Technology Overview », *Energies*, vol. 8, p. 859-894, févr. 2015, doi: 10.3390/en8020859.
- [8] L. Qian, S. Wang, D. Xu, Y. Guo, X. Tang, et L. Wang, « Treatment of municipal sewage sludge in supercritical water: A review », *Water Res.*, vol. 89, p. 118-131, févr. 2016, doi: 10.1016/j.watres.2015.11.047.
- [9] « Cométha, Partenariat d'innovation Cotraitement des boues des eaux usées du SIAAP et de la fraction organique des ordures ménagères résiduelles du Syctom ». 2021.
- [10] M. R. Chandraratne et A. G. Daful, « Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass », in *Recent Perspectives in Pyrolysis Research*, M. Bartoli et M. Giorcelli, Éd., IntechOpen, 2022. doi: 10.5772/intechopen.100060.
- [11] A. Álvarez-Murillo, B. Ledesma, S. Román, E. Sabio, et J. Gañán, « Biomass pyrolysis toward hydrocarbonization. Influence on subsequent steam gasification processes », *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 113, p. 380-389, mai 2015, doi: 10.1016/j.jaap.2015.02.030.
- [12] N. Kumar et S. K. Gupta, « Advances in Thermochemical Valorization of Agricultural Waste », in *Agricultural Waste to Value-Added Products: Technical, Economic and Sustainable Aspects*, R. Neelancherry, B. Gao, et A. Wisniewski Jr, Éd., Singapore: Springer Nature, 2023, p. 159-176. doi: 10.1007/978-981-99-4472-9\_8.
- [13] D. C. Elliott *et al.*, « Hydrothermal Processing of Macroalgal Feedstocks in Continuous-Flow Reactors », *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 2, n° 2, p. 207-215, févr. 2014, doi: 10.1021/sc400251p.
- [14] S. Nanda, M. Gong, H. N. Hunter, A. K. Dalai, I. Gökalp, et J. A. Kozinski, « An assessment of pinecone gasification in subcritical, near-critical and supercritical water », *Fuel Process. Technol.*, vol. 168, p. 84-96, déc. 2017, doi: 10.1016/j.fuproc.2017.08.017.
- [15] E. Galiwango, J. Butler, et S. Lotfi, « A Review of Catalyst Integration in Hydrothermal Gasification », *Fuels*, vol. 5, n° 3, Art. n° 3, sept. 2024, doi: 10.3390/fuels5030022.
- [16] *Gazéification hydrothermale, Livre Blanc, Groupe de Travail National Gazéification Hydrothermale*. 2023.
- [17] GRT Gaz, *Potentiel de la Gazéification Hydrothermale en France*. 2019.
- [18] M. Kumar, A. Olajire Oyedun, et A. Kumar, « A review on the current status of various hydrothermal technologies on biomass feedstock », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, p. 1742-1770, janv. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.270.
- [19] Groupe de Travail National Gazéification Hydrothermale, « GAZÉIFICATION HYDROTHERMALE LIVRE BLANC ». Consulté le: 29 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.grtgaz.com/medias/communiqués-de-presse/livre-blanc-gazeification-hydrothermale>
- [20] A. Kruse, « Hydrothermal biomass gasification », *J. Supercrit. Fluids*, vol. 47, n° 3, p. 391-399, janv. 2009, doi: 10.1016/j.supflu.2008.10.009.

- [21] P. T. Williams et J. Onwudili, « Composition of Products from the Supercritical Water Gasification of Glucose: A Model Biomass Compound », *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 44, n° 23, p. 8739-8749, nov. 2005, doi: 10.1021/ie050733y.
- [22] D. A. Cantero, M. Dolores Bermejo, et M. José Cocero, « Reaction engineering for process intensification of supercritical water biomass refining », *J. Supercrit. Fluids*, vol. 96, p. 21-35, janv. 2015, doi: 10.1016/j.supflu.2014.07.003.
- [23] M. Bagnoud-Velásquez, M. Brandenberger, F. Vogel, et C. Ludwig, « Continuous catalytic hydrothermal gasification of algal biomass and case study on toxicity of aluminum as a step toward effluents recycling », *Catal. Today*, vol. 223, p. 35-43, mars 2014, doi: 10.1016/j.cattod.2013.12.001.
- [24] G. Van Rossum, B. Potic, S. R. A. Kersten, et W. P. M. Van Swaaij, « Catalytic gasification of dry and wet biomass », *Catal. Today*, vol. 145, n° 1-2, p. 10-18, juill. 2009, doi: 10.1016/j.cattod.2008.04.048.
- [25] K. Khandelwal, P. Boahene, S. Nanda, et A. K. Dalai, « A Review of the Design and Performance of Catalysts for Hydrothermal Gasification of Biomass to Produce Hydrogen-Rich Gas Fuel », *Molecules*, vol. 28, n° 13, Art. n° 13, janv. 2023, doi: 10.3390/molecules28135137.
- [26] H. Feng *et al.*, « Effect of alkali additives on desulfurization of syngas during supercritical water gasification of sewage sludge », *Waste Manag.*, vol. 131, p. 394-402, juill. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.06.029.
- [27] I. Rönnlund, L. Myréen, K. Lundqvist, J. Ahlbeck, et T. Westerlund, « Waste to energy by industrially integrated supercritical water gasification – Effects of alkali salts in residual by-products from the pulp and paper industry », *Energy*, vol. 36, n° 4, p. 2151-2163, avr. 2011, doi: 10.1016/j.energy.2010.03.027.
- [28] K. Kang, R. Azargohar, A. K. Dalai, et H. Wang, « Hydrogen production from lignin, cellulose and waste biomass via supercritical water gasification: Catalyst activity and process optimization study », *Energy Convers. Manag.*, vol. 117, p. 528-537, juin 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.03.008.
- [29] T. Güngören Madenoğlu, M. Sağlam, M. Yüksel, et L. Ballice, « Hydrothermal gasification of biomass model compounds (cellulose and lignin alkali) and model mixtures », *J. Supercrit. Fluids*, vol. 115, p. 79-85, sept. 2016, doi: 10.1016/j.supflu.2016.04.017.
- [30] S. Nanda, A. K. Dalai, et J. A. Kozinski, « Supercritical water gasification of timothy grass as an energy crop in the presence of alkali carbonate and hydroxide catalysts », *Biomass Bioenergy*, vol. 95, p. 378-387, déc. 2016, doi: 10.1016/j.biombioe.2016.05.023.
- [31] N. Ghavami, K. Özdenkçi, G. Salierno, M. Björklund-Sänkiaho, et C. De Blasio, « Analysis of operational issues in hydrothermal liquefaction and supercritical water gasification processes: a review », *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 13, n° 14, p. 12367-12394, sept. 2023, doi: 10.1007/s13399-021-02176-4.
- [32] F. L. P. Resende, S. A. Fraley, M. J. Berger, et P. E. Savage, « Noncatalytic Gasification of Lignin in Supercritical Water », *Energy Fuels*, vol. 22, n° 2, p. 1328-1334, mars 2008, doi: 10.1021/ef700574k.
- [33] M. Schubert, J. W. Regler, et F. Vogel, « Continuous salt precipitation and separation from supercritical water. Part 1: Type 1 salts », *J. Supercrit. Fluids*, vol. 52, n° 1, p. 99-112, févr. 2010, doi: 10.1016/j.supflu.2009.10.002.
- [34] S. N. Reddy, S. Nanda, A. K. Dalai, et J. A. Kozinski, « Supercritical water gasification of biomass for hydrogen production », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 39, n° 13, p. 6912-6926, avr. 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.02.125.
- [35] P. Kladisios, « A Review on Supercritical Water Gasification of Biomass », *Open Access*, vol. 3, n° 4, 2022.
- [36] A. Pandey, T. Bhaskar, M. Stöcker, et R. Sukumaran, *Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass*. Elsevier, 2015.
- [37] Olivier BOUTIN et Jean-Christophe RUIZ, « Gazéification de biomasse en eau supercritique », Techniques de l'Ingénieur. Consulté le: 16 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur:

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/energie-durable-et-biocarburants-42494210/gazeification-de-biomasse-en-eau-supercritique-j7010/>

- [38] SER, GRDF, GRTgaz, SPEGNN, Teréga, *PANORAMA DES GAZ RENOUVELABLES EN 2021*. 2021.
- [39] N. Boukis et I. K. Stoll, « Gasification of Biomass in Supercritical Water, Challenges for the Process Design—Lessons Learned from the Operation Experience of the First Dedicated Pilot Plant », *Processes*, vol. 9, n° 3, p. 455, mars 2021, doi: 10.3390/pr9030455.
- [40] GRTgaz, « La Gazéification Hydrothermale: Une technologie innovante, au centre de l'économie circulaire, pour valoriser localement quasi complètement des déchets organiques humides ». 2022.
- [41] « HydroPilot, Final report, Pilot plant for the catalytic hydrothermal gasification of wet biomass ». 2023.

