

Recherche & Innovations

État des lieux des technologies de gaz verts



Publication en
collaboration avec



Mentions légales

GRDF – Société Anonyme au capital de 1 835 695 000 euros
Siège social: 6 rue Condorcet – 75009 Paris
RCS: PARIS 444 786 511

Graphisme: Radiographique – Léa ROLLAND et Redouan CHETUAN

Publié en avril 2024

Introduction

Une transition énergétique réussie nécessite un déploiement et un usage massif des énergies renouvelables (EnR) et faiblement émettrices de GES. Les gaz verts représentent un vecteur incontournable du système énergétique français pour une transition vers la neutralité carbone et le renforcement de l'indépendance énergétique. En effet, les gaz verts sont produits à partir de gisements disponibles dans les territoires. Différentes sources d'intrants et différents procédés –méthanisation, Power-to-methane, pyrogazéification, gazéification hydrothermale–, permettent de les produire.

Dès 2030, les gaz verts pourraient représenter 20% de la consommation française de gaz ; en 2050, la France a le potentiel pour couvrir 100% de sa demande grâce aux gaz verts. La filière estime à 320 TWh le potentiel réaliste de production de méthane renouvelable et bas-carbone à horizon 2050. Dans les scénarios de perspectives publiés récemment, la demande de gaz pourrait être comprise entre 200 TWh et 300 TWh en France d'ici 2050.

La méthanisation est aujourd'hui la première technologie de production de gaz renouvelable que l'on peut considérer comme mature. À moyen et long termes, de nouveaux procédés de production de gaz renouvelables, bas-carbone, et de récupération vont se développer.

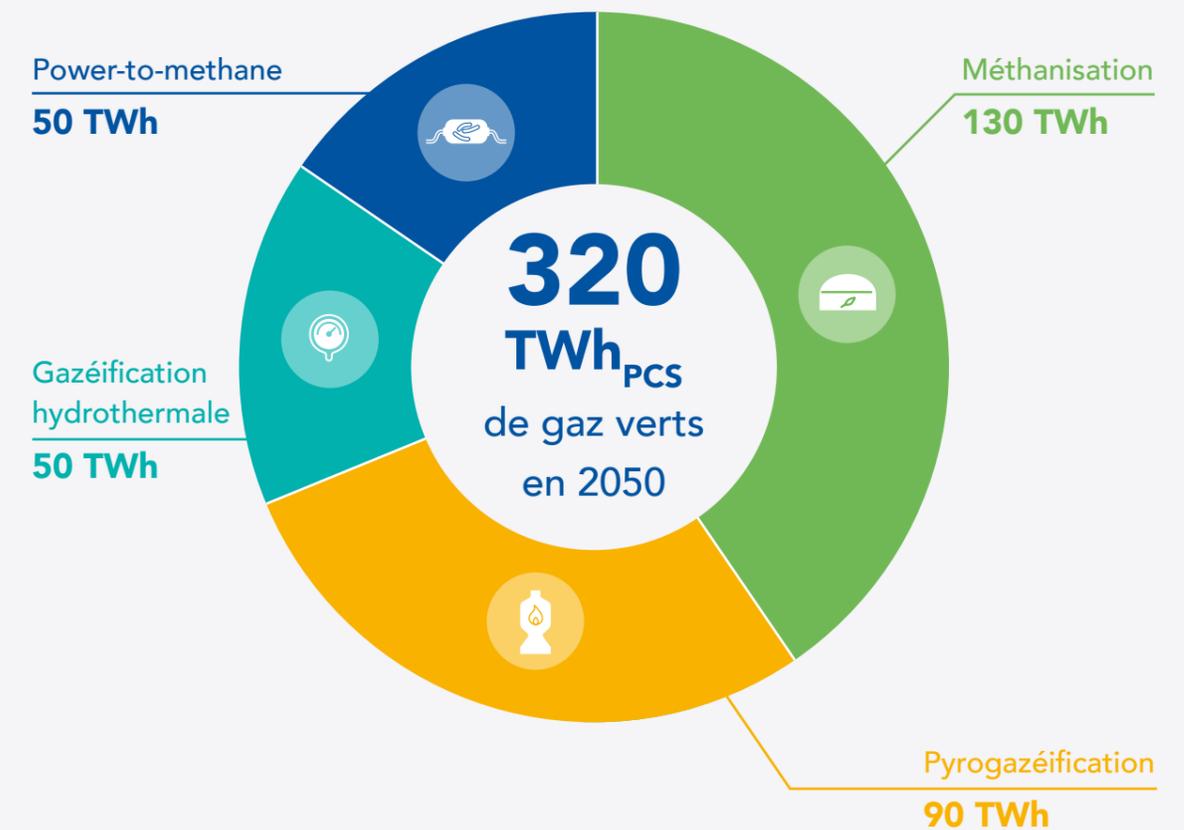
On assiste à un foisonnement d'innovation sur l'ensemble des filières de production de gaz verts qui vont permettre la mise en œuvre de nouvelles technologies, mais également pour optimiser les performances des filières les plus matures telles que la méthanisation.



Les analyses présentées dans ce rapport s'appuient d'une part sur les retours d'expérience d'acteurs qui ont accepté de partager leur expertise au cours d'entretiens ciblés et d'autre part sur les travaux de la veille technologique bimestrielle initiée par GRDF au début de l'année 2023. Cette veille est mise à disposition de tout l'écosystème sur le site de GRDF (exemple de bulletin [ICI](#)). Elle vise à apporter un éclairage régulier sur l'évolution de la maturité des différentes briques technologiques des filières de gaz verts. Chaque bulletin décrypte les publications scientifiques récentes sur le sujet, et recense les avancées majeures des projets associés.

POTENTIEL DE PRODUCTION DE GAZ VERTS PAR FILIÈRE EN 2050

Source : GRDF, GRTgaz



Depuis plus de 10 ans le déploiement des gaz verts a fédéré un écosystème d'acteurs français qui développent, industrialisent et exportent des technologies et un savoir-faire de développement de projet, participant ainsi à la dynamique de réindustrialisation du territoire et à son indépendance énergétique.

Catalyseur des innovations sur ces filières, GRDF propose à l'ensemble de l'écosystème un document de référence à travers cet état des lieux des technologies de gaz verts. L'objectif est de permettre à chacun de :

- Disposer d'une vision exhaustive sur les technologies de production de gaz verts
- Comprendre les leviers et les freins à leurs développements et évaluer leur maturité
- Suivre l'évolution des fronts d'innovation sur ces filières.



Hugues MALINAUD,
Directeur Recherche,
Innovation et Valorisation

« Dans le cadre de mon parcours chez GRDF, j'ai eu à cœur de contribuer au développement de l'autonomie et la résilience énergétique des territoires. On le sait peu, mais 85% de la population se trouve à proximité immédiate de nos infrastructures de distribution. Enrichir la connaissance des territoires sur leur possible résilience énergétique et leur décarbonation, c'est un des trois leviers de notre nouveau Projet d'Entreprise et c'est naturellement l'une des ambitions de nos 11 000 salariés qui servent au quotidien nos 11 000 000 de clients.

Nous avons un budget de Recherche, Innovation et Valorisation inférieur à 1% de notre chiffre d'affaires par comparaison à des ratios de l'ordre de 5 à 10% dans l'industrie. Cela nous impose d'être agiles et performants pour faire émerger les idées, les agréger, fédérer les acteurs et assurer leur développement. La recherche et l'innovation chez GRDF, c'est avant tout une histoire de catalyse.

Parmi nos activités de Recherche, Innovation et Valorisation, la veille est un élément critique à fois sur le fond des sujets qu'elle interroge, mais aussi sur la méthodologie que l'on déploie pour la réaliser. Il y a dans cet exercice un subtil mélange de curiosité, d'énergie et d'ouverture d'esprit. En proposant différents angles de vue, la veille permet de partager des visions contrastées d'un même objet qui rendront accessibles à certains, des éléments que d'autres ne percevront pas. Elle nous ramène ainsi à nos sens et à notre curiosité d'enfant tout en nous obligeant à garder l'objectivité et la rigueur d'un adulte. Aussi attachante que peut l'être une technologie ou une idée, on sait d'avance que la probabilité qu'elle se développe dépend directement de la façon dont nous l'avons pensée à l'origine.

« Être adulte c'est retrouver le sérieux que l'on mettait dans ses jeux, enfant. »

C'est ainsi que nous avons pensé cet « État des lieux des technologies de gaz verts » avec les équipes de GRDF, comme un carnet de voyage pour notre écosystème qui accélère à nos côtés l'industrialisation des technologies de production de gaz verts au service de nos clients et de leurs territoires.

Pédagogique et accessible, ce document de référence permettra à chacun de comprendre les différentes voies de production de gaz verts, d'identifier les technologies associées, de disposer d'éléments factuels sur les freins et les leviers nécessaires à la maturation de ces nouvelles filières...

Conscients que l'innovation offre une destination qui se dévoile pas à pas, nous avons souhaité que ce rapport soit renouvelé tous les ans pour permettre de suivre l'évolution du développement de ces technologies, et ainsi détecter les options qui se ferment et nous éclairer sur les chemins qui s'ouvrent. »

Glossaire

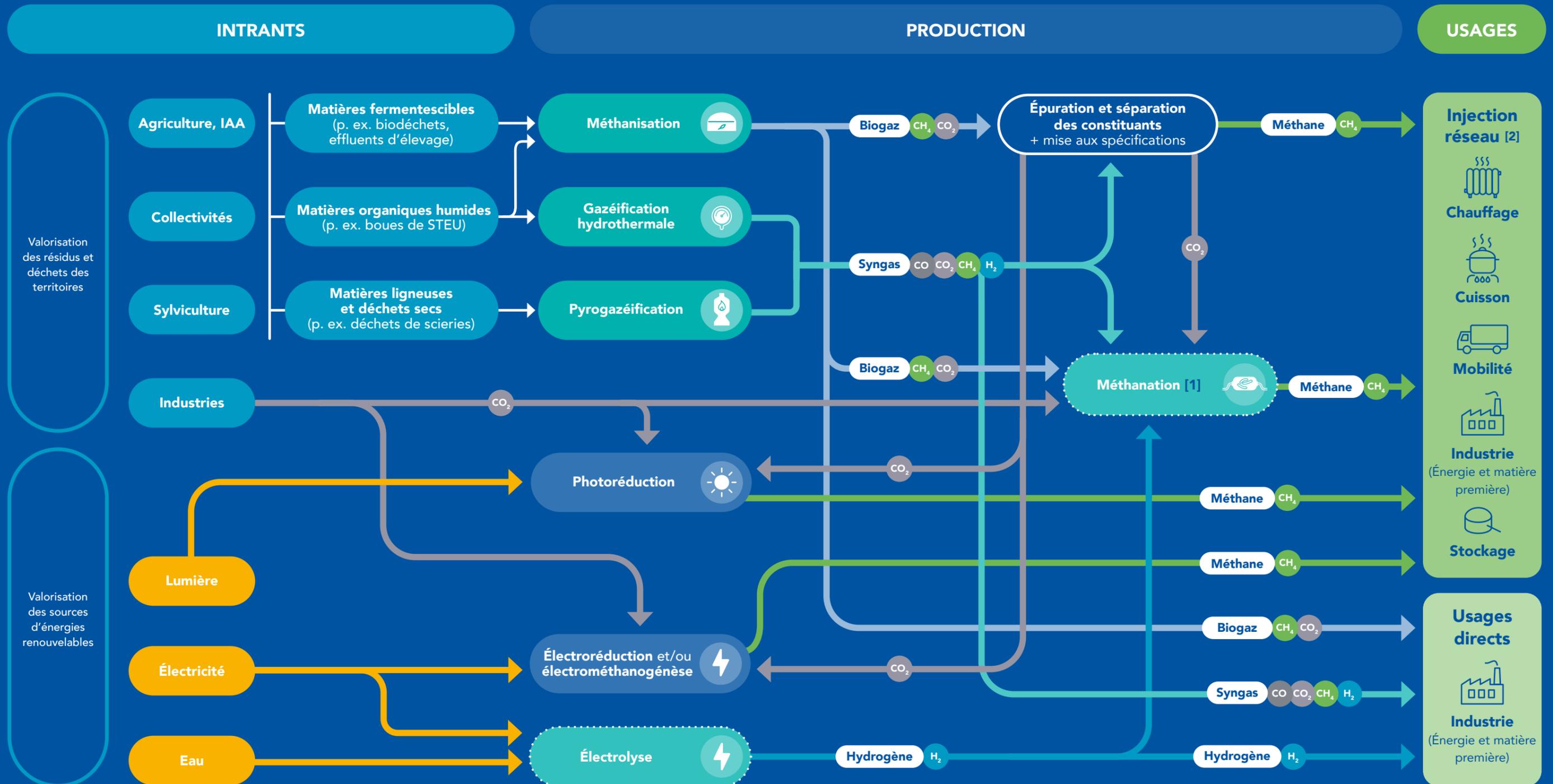
ADEME	Agence de la transition écologique	ha	Hectare
Ag	Argent	IAA	Industrie AgroAlimentaire
AGV	Acide Gras Volatil	ISDND	Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux
BMP	Potentiel méthanogène (<i>Biochemical Methane Potential</i>)	K	Potassium
BPA	Accord de vente de biométhane (<i>Biomethane Purchase Agreement</i>)	MB	Matière Brute
C	Carbone	MO	Matière Organique
Ca	Calcium	MS	Matière Sèche
CAPEX	Dépenses d'investissement (<i>Capital Expenditure</i>)	N	Azote
CCS	Captage et stockage du CO ₂ (<i>Carbon Capture & Storage</i>)	NH₃	Ammoniac
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives	Ni	Nickel
CH₄	Méthane	O₂	Dioxygène (communément désigné par le terme Oxygène)
CxHy	Hydrocarbures	OFB	Office Français de la Biodiversité
CIPAN	Culture Intermédiaire Piège À Nitrates	O&G	Oil & Gas
CIVE	Culture Intermédiaire à Vocation Énergétique	OPEX	Dépenses d'exploitation (<i>Operational Expenditure</i>)
CSF	Comité Stratégique de Filière	ORP	Photobioréacteur ouvert (<i>Open Raceway Pond</i>)
CSR	Combustible Solide de Récupération	P	Phosphore
CO	Monoxyde de carbone	PBR	PhotoBioRéacteur
CO₂	Dioxyde de carbone	PEHD	PolyÉthylène Haute Densité
COV	Composé Organique Volatil	pH	potentiel Hydrogène
CTBM	Centre Technique national du Biogaz et de la Méthanisation	PSA	Adsorption par inversion de pression (<i>Pressure Swing Adsorption</i>)
DGEC	Direction Générale de l'Énergie et du Climat	PV	Photovoltaïque
EC	ÉlectroChimique	R&D	Recherche & Développement
EPC	Ingénierie, approvisionnement et construction (<i>Engineering Procurement & Construction</i>)	RED II	<i>Renewable Energy Directive II</i>
Fe	Fer	SAF	Carburant d'aviation durable (<i>Sustainable Aviation Fuel</i>)
GHT	Gazéification Hydrothermale	SNG	Syngas
GNL	Gaz Naturel Liquéfié	STEP	STations d'ÉPuration des eaux usées
GNV	Gaz Naturel pour Véhicules	STEU	Stations de Traitement des Eaux Usées
H₂	Dihydrogène (communément désigné par le terme Hydrogène)	tMB	tonne de Matière Brute
H₂S	Hydrogène sulfuré	TRL	Niveau de maturité technologique (<i>Technology Readiness Level</i>)
		Zn	Zinc

Sommaire

Introduction	2		
Éditorial	4		
Glossaire	6		
Sommaire	8		
Les différents procédés de production de gaz verts	12		
Maturité industrielle des filières et enjeux de R&D	14		
Filière méthanisation	20		
La méthanisation, de quoi parle-t-on ?	22		
Description du procédé	24		
La méthanisation en quelques chiffres	26		
Dynamique de la filière	28		
Quelques projets pionniers pour la filière	30		
Cartographie de la chaîne de production de biogaz par méthanisation	32		
Focus sur la chaîne de prétraitement des intrants de méthanisation	34		
Focus sur la chaîne de traitement du biogaz	36		
Focus sur la chaîne de traitement du digestat	38		
Enjeux et solutions techniques de la filière	40		
Focus sur trois enjeux	50		
Synthèse	54		
Acteurs moteurs du développement de la filière	56		
Sources	60		
Filière Power-to-methane	62		
Présentation des briques de méthanation			
Le Power-to-methane, de quoi parle-t-on ?	64		
Description du procédé de méthanation catalytique	66		
Description du procédé de méthanation biologique	68		
Cartographie des technologies de la méthanation	70		
Cartographie des principaux projets phares	72		
Focus sur la filière Power-to-methane			
Quelques projets pionniers pour la filière	74		
Cartographie de la chaîne de production de méthane	78		
Enjeux et solutions techniques de la filière	80		
Acteurs moteurs du développement de la filière	84		
Sources	88		
Filière pyrogazéification		90	
La pyrogazéification, de quoi parle-t-on ?		92	
Description du procédé		94	
Dynamique de la filière		96	
Quelques projets pionniers pour la filière		98	
Cartographie des principaux projets phares		100	
Cartographie des technologies de la pyrogazéification		102	
Cartographie de la chaîne de production		104	
Enjeux et solutions techniques de la filière		106	
Acteurs moteurs du développement de la filière		112	
Sources		114	
Filière gazéification hydrothermale		116	
La gazéification hydrothermale, de quoi parle-t-on ?		118	
Description du procédé		120	
Quelques projets pionniers pour la filière		122	
Cartographie des principaux projets phares		124	
Cartographie de la chaîne de production		126	
Enjeux et solutions techniques de la filière		128	
Acteurs moteurs du développement de la filière		136	
Sources		140	
Filières émergentes		142	
Les différentes filières émergentes		144	
Description du procédé d'électrométhanogénèse		146	
Description du procédé d'électroréduction du CO ₂		148	
Description du procédé de photoréduction du CO ₂		150	
Description du procédé de photobioréaction		152	
Synthèse des 4 filières émergentes		154	
Quelques projets pionniers pour la filière		156	
Sources		158	
Contributeurs		160	

À chaque intrant, sa brique technologique de production de gaz verts

● Filières émergentes
 ○ Brique technologique constitutive de la filière Power-to-methane



[1] La filière Power-to-methane correspond à la production de méthane par méthanation de CO₂ et d'H₂ issu d'électrolyse. Elle sera analysée plus précisément par la suite.

[2] Le méthane injecté peut avoir plusieurs qualifications selon la source d'énergie utilisée pour le produire. Si la source énergétique est d'origine biogénique (biomasse), il s'agit du biométhane. Si la source énergétique est d'origine renouvelable (autre que la biomasse), il s'agit du méthane renouvelable d'origine non biologique. Enfin, si la source d'énergie est bas-carbone, il s'agit du méthane bas-carbone.

Les différents procédés de production de gaz verts

Chaque procédé se caractérise par des conditions opératoires qui lui sont spécifiques



Méthane



Méthane avec récupération de chaleur

Filières	Intrants principaux	Description du procédé de production	Paramètres			Autres produits valorisables
			Température (T)	Pression (P)	Rendement énergétique	
Méthanisation	Matières fermentescibles	Exploitation du processus biologique naturel de dégradation de la matière organique en absence d'oxygène, par l'action de micro-organismes méthanogènes, pour obtenir du biogaz et du digestat au sein de méthaniseurs.	35–60°C	< 10 bar	80–85%	– Digestat (fertilisant) – BioCO ₂
Power-to-methane	Électricité, eau et CO ₂	Chaîne de conversion électrochimique permettant la transformation d'énergie électrique en énergie chimique. L'électricité permet de produire de l'hydrogène (par électrolyse) qui est recombinaison avec du CO ₂ pour synthétiser du méthane dans un réacteur de méthanation (catalytique ou biologique).	Méthanation catalytique 200–600°C	1–15 bar	50–65% [1] 	– Eau – Chaleur (pour la méthanation catalytique)
			Méthanation biologique 35–65°C	< 10 bar		
Pyrogazéification	Matières ligneuses et déchets secs (< 20% d'humidité)	Traitement thermique en voie sèche de la biomasse ou des déchets organiques à haute température et en absence ou défaut d'oxygène pour obtenir du gaz de synthèse (syngas), des huiles et/ou du charbon.	800–1500°C	< 10 bar	55–65% > 75%	– Huiles – Charbon (surtout en cas de pyrolyse) – Chaleur – (Bio)CO ₂
Gazéification hydrothermale	Matières organiques humides (> 50% d'humidité)	Traitement thermique à haute température et haute pression des matières humides, pour obtenir du gaz de synthèse et des coproduits valorisables (sels minéraux et eau).	400–700°C	250–300 bar	> 75% 	– Sels minéraux – Eau – (Bio)CO ₂
Électrométhanogénèse	CO ₂ , H ₂ O, électricité	Procédé bioélectrochimique faisant intervenir des micro-organismes qui réduisent le CO ₂ en méthane sous l'application d'une faible tension électrique entre deux électrodes.	200–300°C	< 10 bar	peu de données disponibles	N/A
Électroréduction du CO ₂	CO ₂ , H ₂ O, électricité	Procédé électrochimique permettant de réduire le CO ₂ en une autre molécule carbonée telle que du méthane, du méthanol ou de l'acide formique sous l'application d'un courant électrique.	200–300°C	< 10 bar	peu de données disponibles	N/A
Photoréduction du CO ₂	CO ₂ , H ₂ O, lumière	Procédé électrochimique similaire à celui de l'électroréduction, l'apport d'énergie issu du courant électrique étant remplacé par celui de la lumière du soleil.	< 100°C	< 10 bar	peu de données disponibles	N/A

[1] Électrolyse et méthanation, avec récupération de chaleur

Maturité industrielle des filières et enjeux de R&D (1/3)

Les filières les plus matures peuvent encore gagner en compétitivité en utilisant des technologies plus optimisées

Volumes (dans le monde)

- +1000 installations en fonctionnement
- +10 projets en fonctionnement ou en développement
- Seulement des démonstrateurs ou pilotes en fonctionnement
- Quelques unités pilotes ou échelle laboratoire

Filières	Principaux enjeux techniques et axes d'optimisation	Travaux en cours et projets phares	Maturité [1]	Volumes
<p>Méthanisation</p>	<p>La méthanisation est une filière globalement mature et permet déjà la production de volumes conséquents à l'échelle industrielle, les enjeux de stabilité biologique, performance économique et environnementale globale sont maîtrisés mais subsistent encore quelques défis pour accompagner la montée en échelle, les gains incrémentaux de performance ou l'intégration de nouveaux types d'intrants.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intégration industrielle – Le biogaz de méthanisation peut présenter des teneurs en O₂ plus élevées que ce que les contraintes réseau imposent. Les dérogations aujourd'hui accordées aux unités de méthanisation sont amenées à évoluer dans les années à venir. • Mise en œuvre industrielle – Les technologies actuelles de déconditionnement peuvent encore être optimisées pour viser l'élimination totale des inertes qui peuvent être problématiques pour la valorisation des digestats de méthanisation. • Pratique opératoire – L'irrégularité des pratiques d'ensilage et de fermeture des silos (absence de couvert, bâchage, couverts végétaux, etc.) ne permet pas une conservation optimale du potentiel méthanogène des matières fermentescibles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Plusieurs technologies permettant de réduire la teneur en O₂ par désoxygénation ou lors de la désulfuration commencent à être déployées (charbon actif, absorption chimique, adsorption, bio-lavage, etc) et font l'objet d'études comparatives (cf. publications du Danish Gas Technology Centre). • Un premier guide des bonnes pratiques d'ensilage a été publié en 2022 par GRDF, l'INRAE et Arvalis. 	Projets industriels	<p>Plus de détails sur la plateforme ODRE et sur le site de l'EBA</p>
<p>Power-to-methane</p>	<p>Le Power-to-methane dispose de plusieurs dizaines de démonstrateurs et quelques projets commerciaux en Europe. Les efforts de R&D se concentrent sur la montée à l'échelle et l'optimisation de procédés de méthanation innovants (méthanation catalytique fonctionnant à plus basse température, méthanation biologique) et capables de fonctionner de manière flexible pour s'adapter à des variations de production d'hydrogène par des sources d'électricité renouvelables intermittentes.</p>			
avec méthanation catalytique	<ul style="list-style-type: none"> • OPEX et mise en œuvre industrielle – Les réacteurs principalement utilisés sont des réacteurs catalytiques à lit fixe ou fluidisé dont la consommation en catalyseur (p. ex. Ni, Co) doit être optimisée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Des méthodes de régénération des catalyseurs (p. ex. traitement thermique) et l'utilisation de matériaux dopants ou de supports (p. ex. alumine) sont testées pour allonger la durée de vie des catalyseurs. De nouveaux réacteurs qui consomment moins de catalyseurs (p. ex. à lit millistructurés) commencent à être déployés. 	Projets industriels	
avec méthanation biologique	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre opérationnelle – L'injection des gaz (H₂ et CO₂) dans le milieu de culture (eau) doit être contrôlée de façon fine. En cas de déséquilibre des proportions de réactifs ou d'accumulation d'acétate, la réaction de méthanation peut être inhibée. D'autre part, le design des réacteurs peut être optimisé pour réduire la consommation énergétique (enjeu des réacteurs agités) et permettre un meilleur contrôle de la température (enjeu des réacteurs à lit ruisselant). 	<ul style="list-style-type: none"> • Plusieurs organismes (p. ex. Insa Lyon, Arkolia, ENOSIS, IMT Atlantique) étudient les phénomènes de diffusion du gaz vers les cultures liquides ainsi que les modes d'injection du CO₂ (pulsé [2] ou en continu) afin d'améliorer les rendements. En parallèle, des travaux sur l'instrumentation des réacteurs existants (p. ex. pose de microcapteurs de H₂) sont menés. 	Projets industriels	

[1] 4 niveaux de maturité distingués : preuve de concept ; prototype ; démonstration ; projets industriels ;
 [2] Une injection pulsée correspond à une injection discontinue de CO₂ à intervalle régulier.

Maturité industrielle des filières et enjeux de R&D (2/3)

Les filières les plus matures peuvent encore gagner en compétitivité en utilisant des technologies plus optimisées

Volumes (dans le monde)

- +1000 installations en fonctionnement
- +10 projets en fonctionnement ou en développement
- Seulement des démonstrateurs ou pilotes en fonctionnement
- Quelques unités pilotes ou échelle laboratoire

Filières	Principaux enjeux techniques et axes d'optimisation	Travaux en cours et projets phares	Maturité [1]	Volumes
 <p>Pyrogazéification</p>	<p>La pyrogazéification peut s'appuyer sur des briques techniques matures et éprouvées depuis plusieurs décennies, historiquement tournées vers des usages chaleur et cogénération. La filière s'oriente depuis une dizaine d'années vers la production de molécules, dont le méthane de synthèse, ce qui nécessite d'intégrer avec attention les étapes de lavage et d'enrichissement du syngas à la chaîne de procédés pour atteindre la qualité désirée. Avec déjà une poignée de démonstrateurs et références en Europe, l'industrialisation de la production de méthane par pyrogazéification est en train de s'accélérer sur fond d'enjeux de décarbonation, de souveraineté énergétique, et de meilleure gestion des déchets, avec des projets de tailles cohérentes pour valoriser des intrants locaux, renouvelables ou de récupération.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre industrielle – Pour des usages molécules, il est préférable d'éviter la présence d'azote en amont des étapes de conversion du syngas, pour optimiser les coûts en évitant le surdimensionnement des briques aval ou une étape de séparation de l'azote. • Mise en œuvre industrielle – Les briques sont matures mais la valorisation réseau du gaz de synthèse issu de biomasse et déchets a peu été mise en oeuvre (manque de compétitivité par rapport au gaz fossile et absence de soutien public aux premiers démonstrateurs industriels). La maîtrise du nettoyage du syngas avant l'unité de méthanation est important pour éviter les problématiques d'encrassement et de désactivation des catalyseurs. • Mise en œuvre opérationnelle – En vue d'un déploiement de la filière à une échelle industrielle, développer une bonne maîtrise des approvisionnements en intrants et des prétraitements appliqués sera nécessaire pour limiter la variabilité dans leur qualité, optimiser la production d'un syngas propre et éviter la dégradation des équipements. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les technologies de gazéification sont en cours d'adaptation pour générer la chaleur nécessaire sans injection d'air directe dans le gazéifieur (procédé oxysteam, chauffage plasma ou électrique, séparation du combusteur du lit principal). • La mise en place d'appels à projets dans les années futures pourra permettre le développement d'unités de démonstration à une échelle industrielle (voir cartographie projets en montage en France). 	<p>Démonstration/ Projets industriels [2]</p>	
 <p>Gazéification hydrothermale</p>	<p>La gazéification hydrothermale est une filière relativement récente dans le panorama des technologies de production d'énergie, mais dont la dynamique de R&D en Europe est notable ces dernières années, de par la capacité du procédé –fonctionnant à haute température et haute pression– à adresser des déchets humides et pollués, difficiles à valoriser. Plusieurs acteurs européens disposent de pilotes et démonstrateurs, essentiellement aux Pays-Bas et en Suisse, pour adresser les principaux verrous techniques nécessaires à l'émergence industrielle de la filière : injection haute pression, séparation des sels, conception, intégration thermique et optimisation des réacteurs.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre industrielle – Le prétraitement doit être maîtrisé selon la nature des intrants (broyage, défilassage, ajustement du taux d'humidité) pour assurer la pompabilité et le fonctionnement optimal de l'installation. • Maîtrise des coûts CAPEX et OPEX – Le procédé nécessite des matériaux onéreux (forte pression combinée à haute température et enjeux de corrosion) et peut consommer des catalyseurs coûteux, dont la durée de vie doit être maximisée. Un travail sur l'équilibre économique des projets permet d'améliorer la compétitivité de la filière via une optimisation des CAPEX/OPEX et des revenus (énergie valorisée, sels minéraux). 	<ul style="list-style-type: none"> • De nouvelles technologies d'injection des intrants et de séparateurs de sels sont développées (p. ex. nouvelle pompe et séparateur breveté par le CEA dans le cadre du projet Gazhyvert amorcé en 2021). • Des laboratoires existants, notamment PSI (Paul Scherrer Institut), PNNL (Pacific Northwest National Laboratory), KIT (Karlsruhe Institute of Technology), étudient le recyclage du catalyseur et l'efficacité des pièges à soufre. La conception d'alliages adaptés et l'allongement de leur durée de vie sont également un axe important de recherche. • Une première unité industrielle de gazéification hydrothermale à haute température pour injection a déjà été mise en fonctionnement en 2018 à Alkmaar, aux Pays-Bas, par SCW Systems. 	<p>Démonstration</p>	

[1] 4 niveaux de maturité distingués : preuve de concept ; prototype ; démonstration ; projets industriels ;

[2] Les projets Gussing et Gobigas ont fonctionné par le passé à échelle industrielle pour production de biométhane.

Maturité industrielle des filières et enjeux de R&D (3/3)

Moins matures, certaines filières émergent grâce à des travaux de R&D

Volumes (dans le monde)

-  +1000 installations en fonctionnement
-  +10 projets en fonctionnement ou en développement
-  Seulement des démonstrateurs ou pilotes en fonctionnement
-  Quelques unités pilotes ou échelle laboratoire

Filières	Principaux enjeux techniques et axes d'optimisation	Travaux en cours et projets phares	Maturité [2]	Volumes
 <p>Électrométhanogénèse</p>	<ul style="list-style-type: none"> • CAPEX équipement – L'intégration des électrodes au sein du digesteur est encore très coûteuse pour les systèmes à une chambre. [1] • Mise en oeuvre opérationnelle – La résilience des biofilms (communautés bactériennes qui se forment à la surface des électrodes et qui réduisent le CO₂ sous l'effet de l'application d'une tension électrique) peut être améliorée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Deux pilotes, dont le développement est prévu pour les années à venir, devraient permettre à la technologie de passer à un TRL 6 ou 7 (cf. projet Biométhaverse). 	<p>Prototype</p>	
 <p>Électroréduction du CO₂</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle du procédé – De nombreuses réactions parasites diminuent la sélectivité du méthane, en particulier l'électrolyse de l'eau. • CAPEX équipement – Le coût des membranes est encore très important. • OPEX (durée de vie des catalyseurs) – Les catalyseurs et éléments photosensibles présentent une durée de vie très courte (parfois seulement quelques heures). 	<ul style="list-style-type: none"> • Les catalyseurs qui permettent de favoriser la production de méthane sont particulièrement étudiés depuis quelques années. 	<p>Preuve de concept</p>	
 <p>Photoréduction du CO₂</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Des travaux sont en cours pour le développement d'un système photocatalytique simple où il n'y a ni circuit électrique ni membrane ce qui permettrait de s'affranchir des verrous de l'électroréduction. Le système consiste en un réacteur contenant de l'eau et des catalyseurs qui sont activés grâce à la lumière et permettent la réaction de synthèse du méthane. 	<p>Preuve de concept</p>	

[1] Les systèmes à une chambre sont des systèmes où la cathode et l'anode ne sont pas séparés par une membrane (contrairement à la technologie à 2 chambres) – À noter que dans certaines configurations l'électrométhanogénèse peut être mise en place en aval du digesteur pour épurer le biogaz en biométhane ;

[2] 4 niveaux de maturité distingués : preuve de concept ; prototype ; démonstration ; projets industriels.

Filière

Méthanisation



La méthanisation, de quoi parle-t-on ?

Qu'est-ce que la méthanisation ?

La méthanisation est un processus biologique naturel de dégradation de la matière organique (animale et/ou végétale) en absence d'oxygène (processus anaérobie), par l'action de micro-organismes. Ce processus produit un digestat (produit humide pouvant être utilisé sous forme d'engrais liquide et/ou d'amendement organique solide), et du biogaz (mélange de CH₄ et CO₂ principalement, et de divers polluants présents en faible quantité). Ce biogaz peut être valorisé, après divers traitements, en injection dans le réseau de gaz naturel ou pour d'autres usages (production de chaleur ou cogénération par exemple).

La méthanisation peut être mise en oeuvre soit dans des installations dédiées, appelées digesteurs, soit directement dans les casiers des installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND), où les déchets sont stockés [1].

Ce rapport se concentre sur la méthanisation réalisée en digesteur, présentant des enjeux spécifiques, liés notamment à l'hétérogénéité des déchets mélangés et à l'injection dans le réseau.

Selon le taux d'humidité du mélange dans le digesteur, deux voies principales de méthanisation [2] (et donc plusieurs technologies) peuvent être envisagées :

■ Pour un taux de matière sèche dans le digesteur inférieur à 15%, on utilise la voie dite en « infinement mélangé »,

■ Pour un taux de matière sèche entre 25% et 40%, on utilise la voie « sèche » continue.

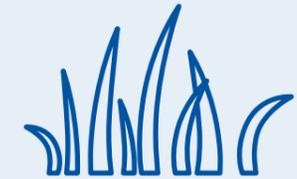
[1] En 2022, la valorisation du biogaz de décharge représente 47% de la capacité installée de production d'électricité par méthanisation et 2% de la capacité d'injection de biométhane dans le réseau. Ce rapport se concentrera sur la méthanisation en digesteur pour injection.

La filière méthanisation permet la valorisation d'intrants variés [3]



Effluents d'élevage

fumiers/lisiers porcins et bovins,
déjections avicoles



Déchets verts

tontes de pelouses,
fauches de bords de routes, etc.



Résidus de cultures

cannes de colza, cannes de maïs,
pailles de céréales, etc.



Biodéchets

biodéchets ménagers
ou de l'industrie agroalimentaire,
graisses et huiles alimentaires,
résidus fruits/légumes, etc.



Cultures intermédiaires

p. ex. CIVE



Boues de STEP urbaines et industrielles

[2] D'autres voies de méthanisation existent: la voie sèche discontinue, dont les conditions opératoires au quotidien (méthanisation par batchs) sont plus simples que la voie continue, est technologiquement mature mais n'est pas déployée en France; la voie liquide, mature, traite les effluents industriels dans des digesteurs dédiés (sans mélange, faibles volumes, court temps de séjour car la matière sèche dissoute est plus facilement dégradable, etc.);

[3] Hors déchets mis en décharge.

Description du procédé

La méthanisation produit un biogaz composé en volume à 50–60% de CH₄, à 35–40% de CO₂ et contenant de la vapeur d'eau et des traces de H₂, O₂, NH₃ et H₂S. Le résidu de la digestion, appelé digestat, peut être utilisé comme fertilisant en agriculture grâce en particulier à sa teneur élevée en azote, ammonium, phosphore et potassium. La digestion est un processus de fermentation anaérobie, sensible à la température, au pH et à la teneur en eau, qui se déroule en 4 phases.

Proportion en masse du mélange

Voie sèche



Voie infiniment mélangé [1]



L'HYDROLYSE consiste à décomposer les molécules complexes de la matière organique (glucides, lipides, protéines) en molécules plus petites comme les acides aminés, acides gras, et les sucres simples. Cette réaction biologique est favorisée par une agitation continue du milieu, et est optimale pour une température de 50 à 60°C [2].

L'ACIDOGÉNÈSE permet la dégradation des acides aminés, acides gras et sucres en acides (Acides Gras Volatils) et en alcools (ainsi qu'en une petite partie de CO₂ et H₂) par l'action de bactéries.

L'ACÉTOGÉNÈSE conduit à la production d'acétate à partir de H₂ et CO₂ par les bactéries homoacétogènes, ainsi qu'à la production d'acétate, de H₂ et de CO₂ à partir des Acides Gras Volatils produits par l'acidogénèse.

LA MÉTHANOGENÈSE est l'étape de synthèse du méthane qui se déroule en deux réactions chimiques simultanées:

1 – Réduction du CO₂ par H₂ (produit 30% du méthane).



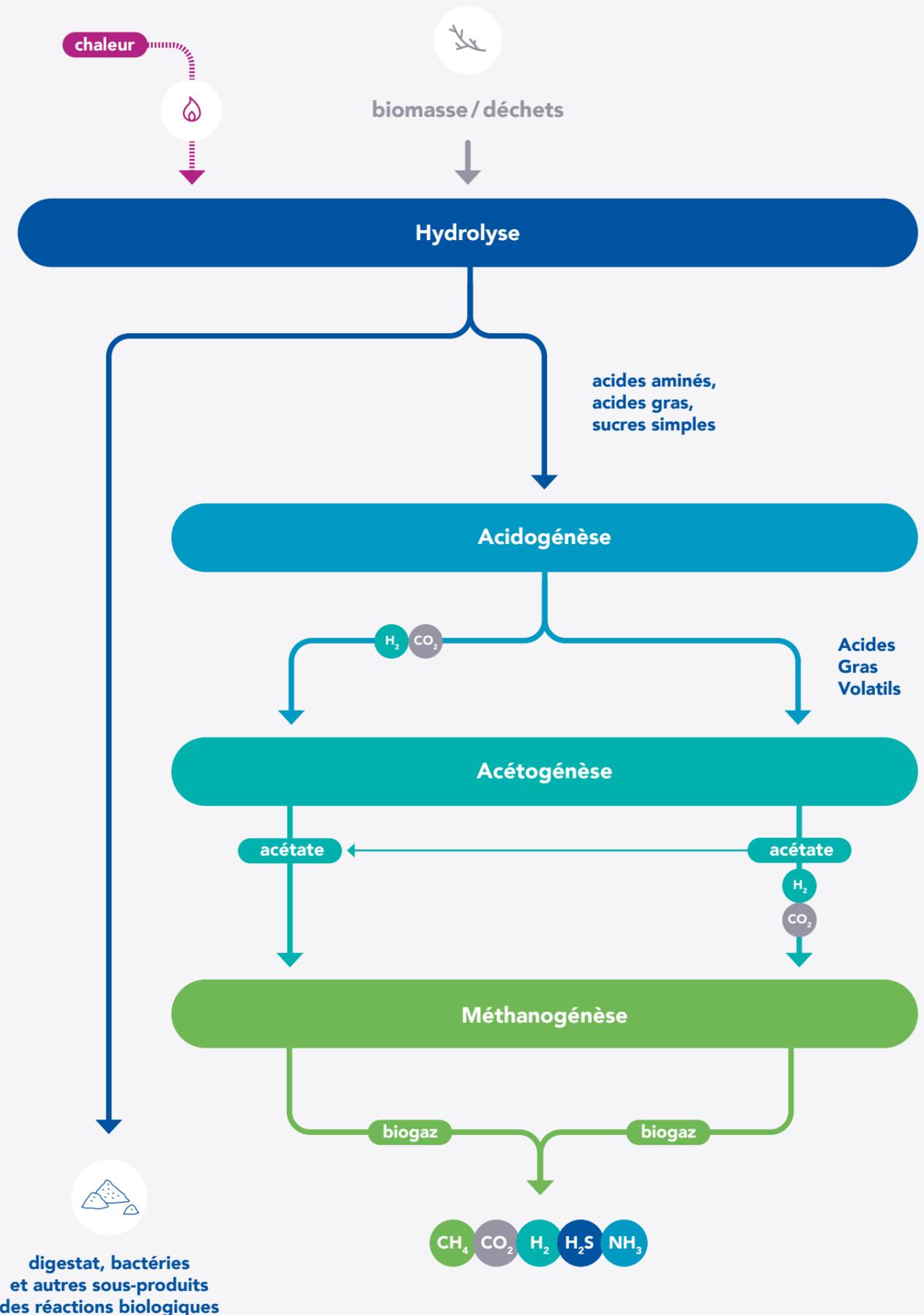
2 – Conversion de l'acétate (produit 70% du méthane).



Proportion en masse des produits et sous-produits



Proportion en volume des produits gazeux



[1] Un faible taux de siccité peut si besoin être maintenu par une recirculation de digestat;

[2] Cette température sera plus basse en opération pour maintenir le processus biologique des étapes suivantes.

La méthanisation

en quelques chiffres

80-85%

RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE [1]

La méthanisation permet d'atteindre un rendement énergétique compris entre 40 et 50% pour la cogénération, et qui peut atteindre 80 et 85% pour l'injection du biométhane dans les réseaux.



©Gregory Brandel - GRDF

10 à 450 Nm³/tMB

RENDEMENT BIOMASSE – BIOGAZ [2]

Le rendement biométhane de la méthanisation peut être évalué à l'aide du potentiel méthanogène, propre à chaque intrant, et qui désigne la quantité de méthane produite par une tonne d'intrant. Ce rendement est très variable: de quelques Nm³ par tonne de matière brute (respectivement c. 27 et 12 Nm³/tMB pour le fumier et le lisier bovin [3], c. 75 Nm³/tMB pour la pulpe de betterave sucrière) à quelques centaines de Nm³ (c. 100 Nm³/tMB pour les biodéchets ménagers, c. 405 Nm³/tMB pour la paille de maïs).

[1] (Énergie produite par le biogaz + chaleur produite + autre production d'énergie)/(énergie des intrants + consommation électrique + autres consommations énergétiques);

[2] Exprimé en potentiel méthanogène des intrants;

[3] DIGES 2: Application pour le calcul du bilan des émissions de gaz à effet de serre des installations de digestion anaérobie;

[4] Chiffres issus de retours d'expérience de la filière.

0,3-1 hectare par 100 Nm³/h [4]

EMPRISE FONCIÈRE

L'emprise foncière d'une installation de méthanisation (méthaniseurs et infrastructures environnantes) peut varier selon la voie de valorisation, les intrants, l'usage du gaz produit, etc. Elle est de quelques hectares pour des projets produisant quelques centaines de Nm³/h de biogaz. L'unité de méthanisation ne représente qu'une petite fraction de cette surface totale. Quand l'unité est agricole, elle profite généralement du foncier des agriculteurs associés au projet.

40 à 60 € par MWh [4]

OPEX ANNUELS

Les OPEX annuels d'une unité de méthanisation représentent 10 à 20% des CAPEX. Ces dépenses sont principalement liées aux intrants (entre 1/3 et la moitié des OPEX), à la consommation d'électricité, à la main d'œuvre et à la maintenance et au traitement du digestat.

50 à 60 k€ par Nm³/h [4]

CAPEX

Les CAPEX d'une unité de méthanisation peuvent fortement varier selon sa taille et sa typologie (méthanisation agricole à la ferme, industrielle, territoriale): chaque projet est unique. L'unité de digestion anaérobie représente de loin le poste avec les CAPEX les plus importants. Néanmoins, quand elles sont nécessaires, les infrastructures de prétraitement des intrants ou de stockage/traitement du digestat peuvent aussi représenter jusqu'à un tiers des CAPEX totaux.



©Franck Dunouan

Dynamique de la filière

La méthanisation pour injection s'est largement déployée au cours de la dernière décennie, en particulier en Europe

Les principes de la méthanisation se développent dès les années 1880 pour le traitement des eaux usées, puis à la ferme à partir des années 1930 avec le premier digesteur breveté en France. Aujourd'hui, les unités de méthanisation sont répandues dans le monde entier, sous des formes et des tailles différentes, du micro-méthaniseur artisanal à l'unité industrielle. L'Europe concentre, à elle seule, plus de la moitié de la production mondiale de biogaz (devant la Chine et les États-Unis) et compte plus de 20 000 unités de méthanisation, majoritairement utilisées pour produire de l'électricité et/ou de la chaleur. Dans les dernières années, la production de biométhane pour injection dans les réseaux s'est néanmoins accélérée et atteint aujourd'hui plus de 40 TWh sur plus de 1200 unités en Europe, dont près de 500 en France.



© Philippe Dureau

La méthanisation en France

> 1870

UNITÉS DE MÉTHANISATION
(SEPTEMBRE 2023)

dont

PRODUCTION [1]

ÉLECTRICITÉ

⚡ 2,2 TWh_{PCS}

CHALEUR
RENOUVELABLE

🔥 7,9 TWh_{PCS}

BIOMÉTHANE INJECTÉ
DANS LE RÉSEAU

⚙️ 8,3 TWh_{PCS}

> 1050
COGÉNÉRATION

> 200
CHALEUR
SEULE

> 620
INJECTANT
DU BIOMÉTHANE
DANS LE RÉSEAU



ÉVOLUTION DE LA CAPACITÉ INSTALLÉE D'INJECTION DE BIOMÉTHANE DANS LES RESEAUX (TWh_{PCS})



RÉPARTITION DES INTRANTS UTILISÉS [2] (tonnage, 2021)



40%
Effluents d'élevage



34%
CIVE et cultures
énergétiques dédiées



13%
Boues de STEU et
coproduits d'agroindustries

8%
Résidus de culture

3%
Biodéchets

1%
Déchets verts

1%
Divers

[1] Les données incluent la production énergétique des méthaniseurs et celle des installations ISDND. Elles correspondent majoritairement aux données fournies par le Ministère de la Transition Énergétique et par l'Observatoire de la filière biométhane, et ont été calculées pour la période couvrant le dernier trimestre 2022 et les trois premiers trimestres 2023. Les données de production de chaleur renouvelable les plus récentes ont quant à elles été publiées en 2022;

[2] Négawatt & Solagro, [La méthanisation dans le mix énergétique](#).

Quelques projets pionniers pour la filière

FRANCE

Plusieurs projets clés ont permis un déploiement progressif de la méthanisation en injection en France au cours des quinze dernières années. La filière tente désormais d'innover avec des voies de méthanisation alternatives ou en intégrant mieux la valorisation des coproduits.

CVO LILLE

Depuis 2011
Lille métropole

STATUT

En opération

PORTEUR DU PROJET

Suez/ENGIE

TAILLE

180 Nm³ CH₄/h

INTRANTS

Biodéchets et déchets verts

PRODUCTION

Biométhane pour injection dans le réseau

Première unité de méthanisation à injecter du biométhane dans le réseau en France, implantée sur le principal centre de traitement de déchets organiques de la métropole de Lille. La production de gaz était initialement prévue pour consommation directe par les bus de l'agglomération. Ceux-ci sont aujourd'hui approvisionnés via le réseau GRDF.



©Frédéric Douard

BIOÉNERGIE DE LA BRIE

Depuis 2013
Ferme d'Arcy (Seine-et-Marne)

STATUT

En opération

PORTEUR DU PROJET

Agriculteurs

TAILLE

125 Nm³ CH₄/h

INTRANTS

Effluents d'élevage, CIVE, coproduits alimentaires, résidus de cultures

PRODUCTION

Biométhane pour injection dans le réseau

Première unité de méthanisation agricole à injecter du biométhane dans le réseau en France. Cette unité s'illustre par ailleurs par ses efforts de valorisation des coproduits de méthanisation. Par exemple, GAZFIO y a installé cette année sa première unité de valorisation du bioCO₂ sur unité de méthanisation en France.



©Le Pays Briard

BIOVALSAN

Depuis 2015
Strasbourg

STATUT

En opération

PORTEUR DU PROJET

GDS/Suez

TAILLE

200 Nm³ CH₄/h

INTRANTS

Boues d'épuration

PRODUCTION

Biométhane pour injection dans le réseau

Première unité de méthanisation de boues de STEU à injecter du biométhane dans le réseau en France. Le projet a largement contribué à l'établissement d'un cadre réglementaire permettant la valorisation du biogaz de station d'épuration.



©Euremétropole de Strasbourg et Aurisaso| Rehan

MÉTHAMOLY

Depuis 2019
Monts-du-Lyonnais

STATUT

En opération

PORTEUR DU PROJET

Agriculteurs

TAILLE

120 Nm³ CH₄/h

INTRANTS

Effluents d'élevage, biodéchets

PRODUCTION

Biométhane pour injection dans le réseau

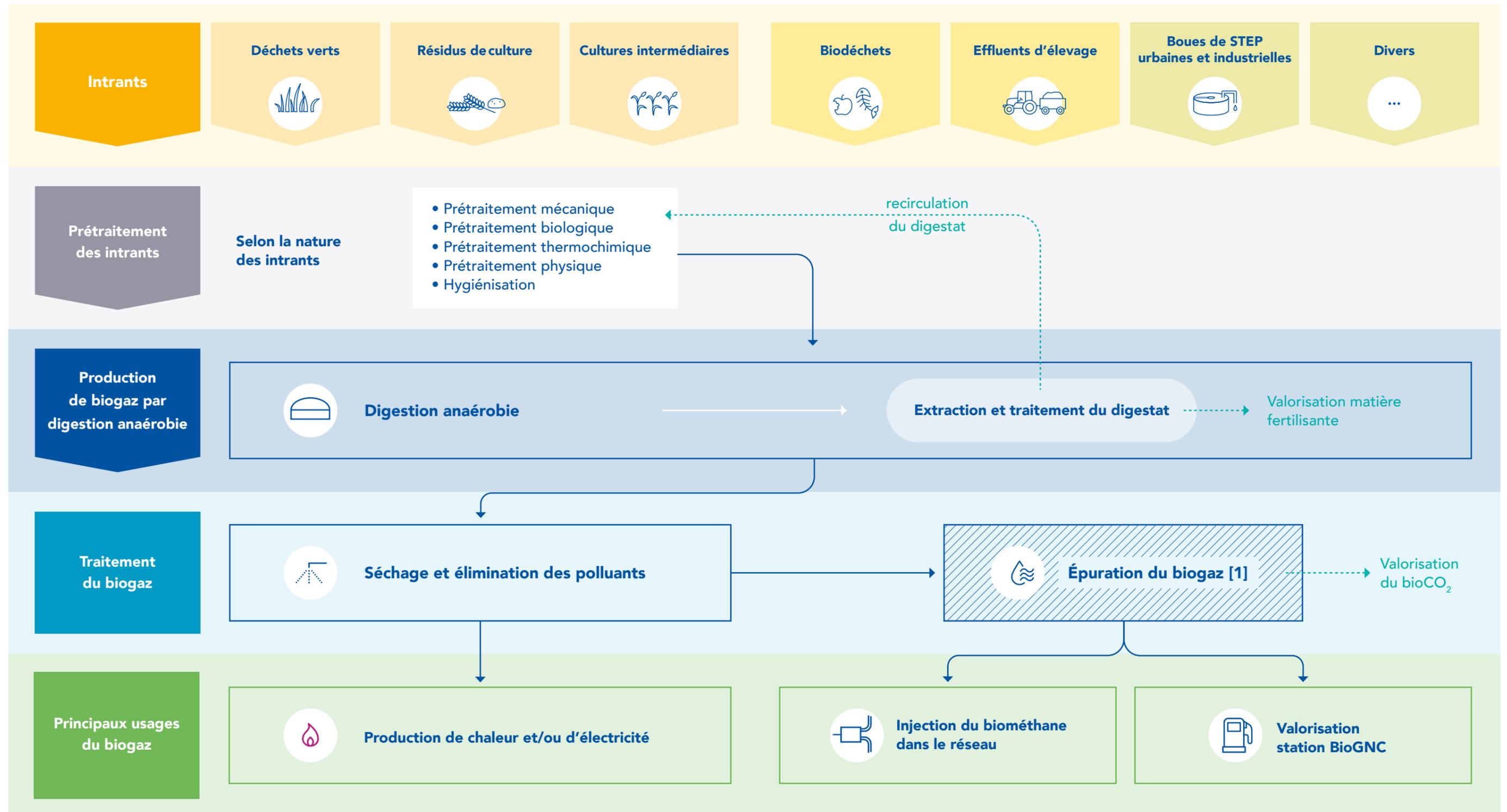
Unité de méthanisation ayant installé sur site une unité de bioGNV, avec le développeur Prodeval, qui permet le ravitaillement de huit camions par jour.



©Frédéric Berthet - GRDF

Cartographie de la chaîne de production de biogaz par méthanisation

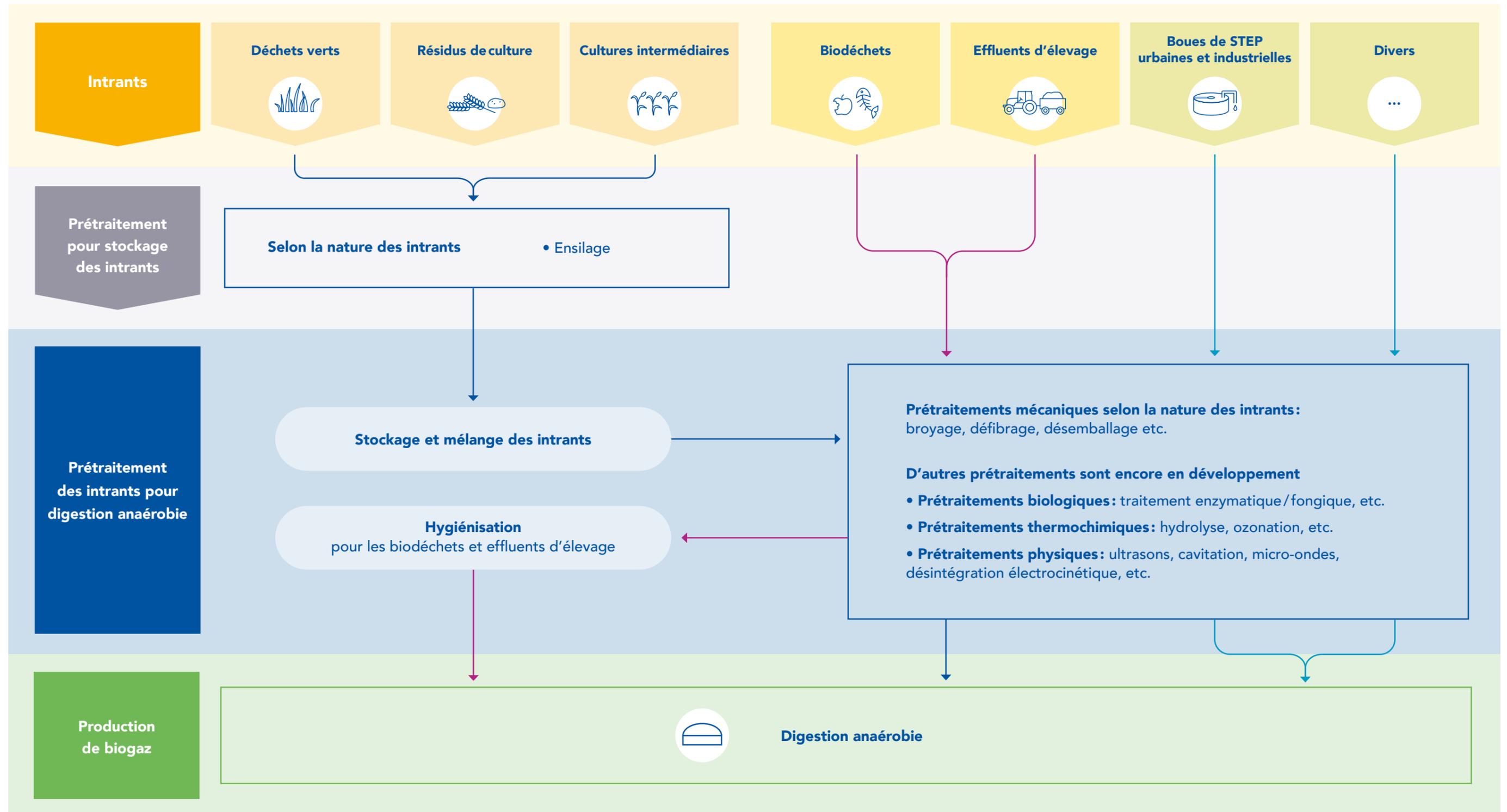
© Frédéric Berthet



[1] Augmentation de la teneur en CH₄ par retrait du CO₂ et autres composés gazeux.

Focus sur la chaîne de prétraitement des intrants de méthanisation

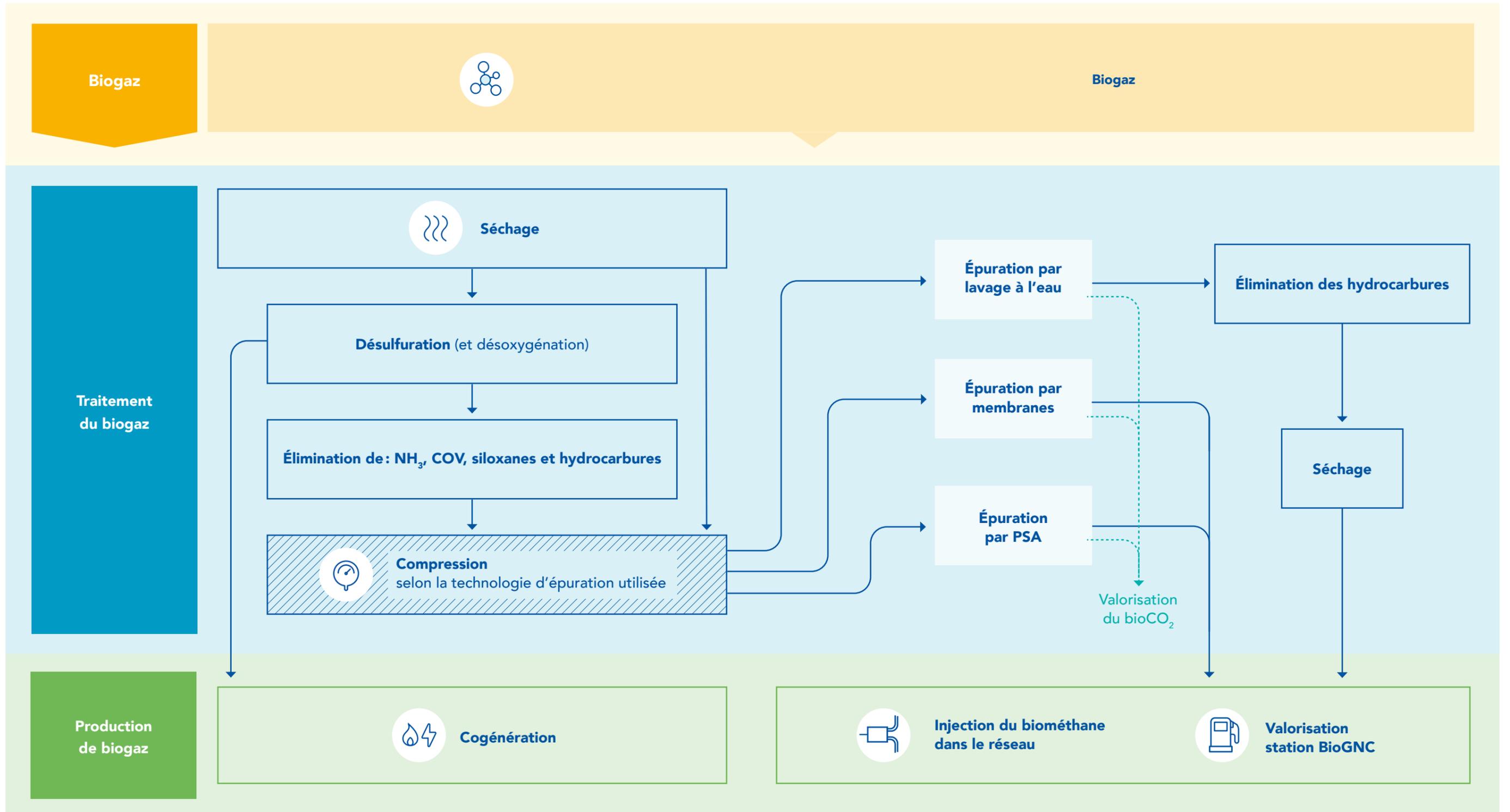
© Frédéric Berthet



Focus sur la chaîne de traitement du biogaz



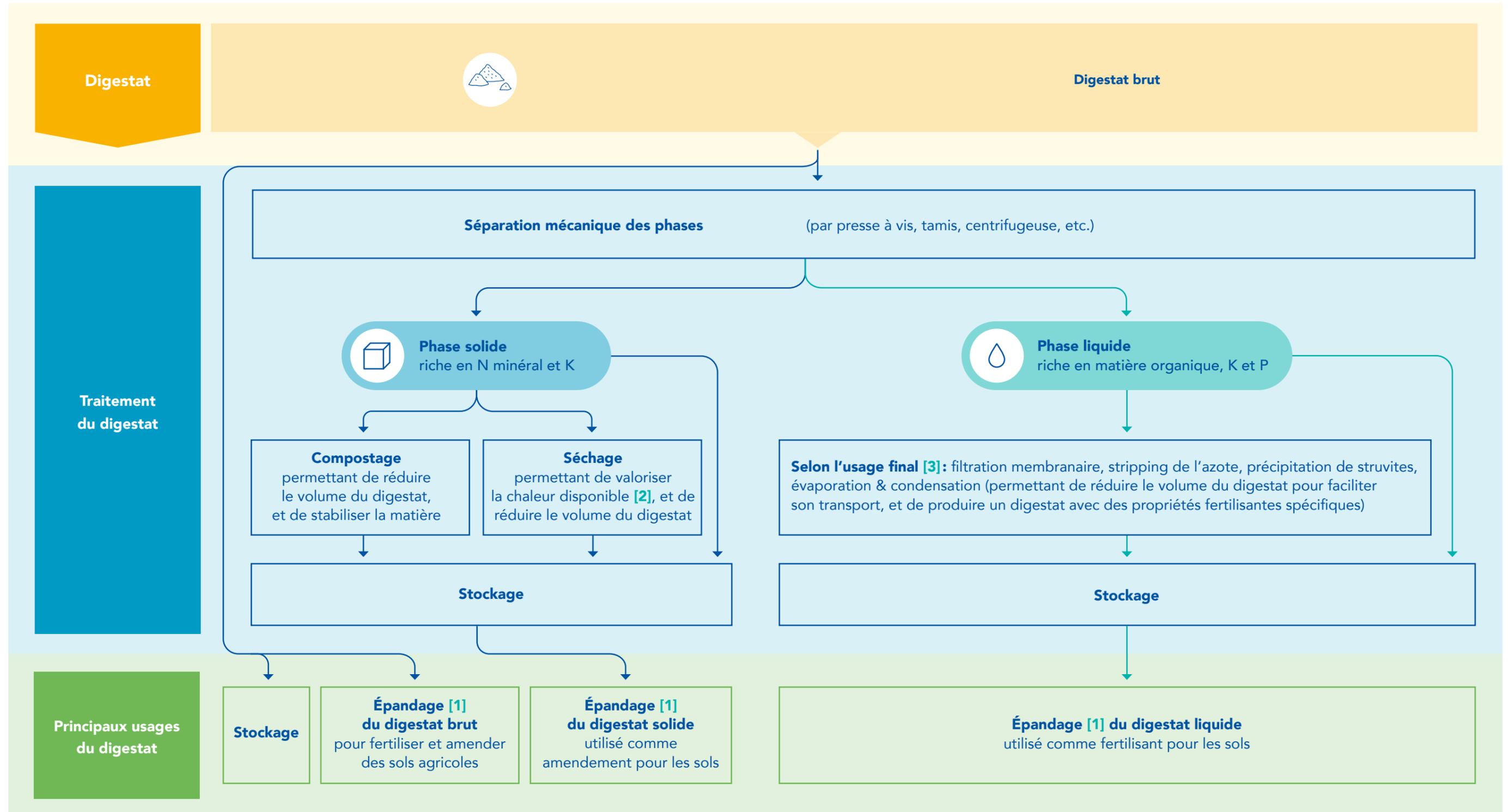
© Studiovdm - GRDF



Focus sur la chaîne de traitement du digestat



© Studiovdm - GRDF



[1] On appelle épandage l'action de répandre le digestat dans les champs pour profiter de ses propriétés amendantes et fertilisantes. La rédaction d'un plan d'épandage, à disposition de l'inspection de l'environnement, est obligatoire pour toutes les exploitations relevant du régime des installations classées pour la protection de l'environnement;

[2] Dans le cas d'une unité de cogénération, le séchage peut être effectué en récupérant la chaleur du groupe de cogénération;
 [3] Ces traitements de la phase liquide sont rarement mis en oeuvre; celle-ci est généralement directement épandue comme fertilisant.

Enjeux et solutions techniques de la filière

-  **Enjeu important** pour la filière détaillé plus précisément dans la suite du rapport
-  **Focus sur un acteur innovant** disponible dans la suite du rapport

-  **Des solutions matures** pour répondre à cet enjeu existent mais leur déploiement reste limité
-  **Des solutions sont en développement** mais doivent démontrer leur faisabilité et leur viabilité économique à l'échelle
-  **Pas encore de solution en développement** pour répondre à cet enjeu ou solutions à très faible maturité

Enjeux techniques de la filière

Prétraitement pour / avant stockage des intrants

-  **Réduire et maîtriser les odeurs**
Le stockage des intrants (notamment biodéchets) entraîne un début de processus de dégradation de la matière organique qui peut engendrer une pollution odorante. Déjà utilisées sur de nombreuses unités, les technologies de maîtrise des odeurs (e.g., biofiltres) peuvent permettre d'améliorer l'acceptabilité des projets.
-  **Caractériser les intrants en continu et piloter la biologie au service de la performance**
La caractérisation des intrants par analyse BMP [1] classique dure entre 30 et 40 jours. Caractériser plus rapidement et facilement les intrants en amont répond à un triple besoin : mieux sélectionner les intrants adéquats (notamment si l'unité se voit ponctuellement proposer un nouveau gisement), optimiser la composition du mélange (notamment le rapport C/N) et optimiser le débit d'entrée dans le digesteur.
-  **Adapter les technologies de déconditionnement**
Pour valoriser les biodéchets issus de grandes et moyennes surfaces, il est nécessaire de séparer la matière organique des emballages. Une réflexion sur l'adaptation des technologies de déconditionnement est nécessaire pour mieux valoriser ces déchets et notamment gérer les pollutions des emballages (plastique, métaux, verre) qui se retrouvent ensuite dans le procédé et peuvent être problématiques pour le retour au sol des digestats.
-  **Optimiser les ensilages de CIVE pour préserver les potentiels méthanogènes**
Les pratiques d'ensilage et de fermeture des silos sont très hétérogènes (absence de couvert, bâchage, couverts végétaux, etc.) et ne permettent pas toujours une conservation optimale de la matière. Mieux documenter l'impact de ces pratiques pour mieux les choisir en regard des contraintes de chaque terrain permettra d'optimiser le pouvoir méthanogène des intrants.

Solutions R&D et innovations

- Pas de nouveaux développements à date. 
- Plusieurs technologies permettant une caractérisation rapide des intrants sont développées et proposées par des laboratoires de recherche : spectrométrie IR (APESA, Büchi, INRA-Transfert Environnement, VEOLIA, etc.), fractionnement et fluorescence 3D (SCANAE), test de toxicité (SCANAE), etc.
Néanmoins, l'analyse des intrants reste un processus complexe, coûteux et chronophage. À titre d'exemple, la durée d'une analyse Flash BMP par spectrométrie IR (plus rapide mais moins précise qu'une analyse BMP classique) reste de quelques jours. Le développement de technologies plus rapides, utilisables sur site, est nécessaire. 
- Certaines entreprises (p. ex. Green Creative) développent des nouveaux équipements permettant de séparer la matière organique des emballages ou autres indésirables. 
- Un [guide](#) des bonnes pratiques d'ensilage de CIVE a été publié en 2022 par GRDF, l'INRAE et Arvalis. Les recommandations qu'il fait s'inscrivent dans la continuité de travaux menés par d'autres centres de recherches ces dernières années comme l'INSA Lyon ou Solagro (qui a également publié un état des connaissances sur le sujet pour RECORD en 2022). Pour autant, de nouvelles études académiques sur les différentes techniques d'ensilage et de préfanage ainsi que sur la géométrie des silos seraient nécessaires pour mieux documenter leurs avantages et inconvénients respectifs, de même qu'une communication accrue auprès des opérateurs d'unités. 

[1] Biochemical Methane Potential.

Enjeux et solutions techniques de la filière



Enjeu important pour la filière détaillé plus précisément dans la suite du rapport



Focus sur un acteur innovant disponible dans la suite du rapport



Des solutions matures pour répondre à cet enjeu existent mais leur déploiement reste limité



Des solutions sont en développement mais doivent démontrer leur faisabilité et leur viabilité économique à l'échelle



Pas encore de solution en développement pour répondre à cet enjeu ou solutions à très faible maturité

Enjeux techniques de la filière

Prétraitement des intrants pour digestion

☐ Intégrer de nouveaux intrants pour la digestion

Élargir le champ des intrants méthanisables est un des enjeux principaux de la filière. Les résidus de culture comme la paille et les déchets secs font en particulier l'objet de recherches importantes. À ce jour, leur incorporation à la ration des méthaniseurs reste à développer, et la preuve de leur bonne digestion sur des installations hors laboratoire doit être faite. L'un des principaux obstacles réside dans leur pré-conditionnement et prétraitement.

☐ Méthaniser des intrants secs par voie sèche discontinue

La voie « infiniment mélangé » est moins propice que la voie sèche à la méthanisation des intrants secs, fibreux ou visqueux. La voie sèche discontinue s'est développée ces dernières années en Europe parce qu'elle permet un traitement de ces intrants plus aisé que la voie sèche continue : elle fonctionne selon des batchs qui nécessitent un prétraitement et un mélange limités. Néanmoins, la difficile gestion des batchs, le manque de retour d'expérience et de développeurs de technologies ont pour le moment limité son déploiement en France.

☐ Mieux traiter les microplastiques

La proportion des biodéchets urbains valorisés par la méthanisation doit augmenter avec le tri obligatoire [2]. Une amélioration des technologies de déconditionnement doit permettre de limiter la formation et la fuite de microplastiques vers les intrants de la méthanisation. Dans le cas contraire, ces microplastiques se retrouvent en effet dans les digestats de méthanisation et limitent leur valorisation en amendement agricole.

Solutions R&D et innovations

La recherche sur l'intégration de nouveaux intrants s'intéresse aussi bien à l'identification du potentiel méthanogène des différentes typologies de biomasse (p. ex. étudiée à l'INSA Lyon) qu'aux techniques de prétraitement, un des enjeux principaux de la recherche en France (l'INRAE a mené de nombreuses études sur le sujet) et à l'étranger.



En parallèle des prétraitements mécaniques [1], matures et répandus, se développent d'autres prétraitements biologiques, thermochimiques, physiques, etc. encore peu matures : leur passage à l'échelle doit encore être démontré et leurs performances technico-économiques améliorées pour permettre une intégration sur site. Par exemple, certains prétraitements thermochimiques conduisent à la formation de coproduits chimiques qui pourraient être inhibiteurs pour les organismes méthanogènes présents dans les digesteurs ; certains traitements biologiques nécessitent quant à eux des temps très importants (jusqu'à plusieurs jours) et induisent des réactions qui peuvent entrer en compétition avec la production de biogaz. Les bénéfices potentiels sont pourtant nombreux : optimiser la production de gaz, réduire l'énergie nécessaire dans le digesteur, etc. → [Voir focus sur MethaPlanet](#).



Pas de nouveaux développements à date.



La limitation des volumes de microplastiques dans les intrants nécessite une sensibilisation de la population au geste de tri des déchets et la mise en place de systèmes de collecte de déchets efficaces par les collectivités. Au-delà de ces efforts de sensibilisation nécessaires, de nouveaux développements technologiques sont nécessaires. Ainsi, l'élimination des microplastiques est un sujet de recherche croissant pour la filière méthanisation. Le pôle Valorisation APESA a mené ces dernières années de nombreux tests sur la biodégradabilité des plastiques. Plus récemment, le projet METHAPLAST, financé par l'ADEME et porté par RITTMO, a permis d'accompagner la filière dans l'intégration des matériaux en plastique biodégradable dans le traitement des biodéchets. Par ailleurs, plusieurs projets ont été lancés en 2023 par l'ADEME et l'OFB pour mieux comprendre l'impact des microplastiques sur les écosystèmes naturels. Une des clés pour maîtriser le taux d'éléments inertes résiduels dans les « soupes » en sortie de déconditionnement sera notamment d'en améliorer le suivi.



[1] Hachoirs, grilles, broyeurs en recirculation, etc. ;

[2] Les collectivités doivent mettre en place des solutions de tri à la source des biodéchets.

Enjeux et solutions techniques de la filière



Enjeu important pour la filière détaillé plus précisément dans la suite du rapport



Focus sur un acteur innovant disponible dans la suite du rapport



Des solutions matures pour répondre à cet enjeu existent mais leur déploiement reste limité



Des solutions sont en développement mais doivent démontrer leur faisabilité et leur viabilité économique à l'échelle



Pas encore de solution en développement pour répondre à cet enjeu ou solutions à très faible maturité

Enjeux techniques de la filière

Solutions R&D et innovations

Traitement du biogaz

Ⓟ Réduire le taux d'oxygène dans le biométhane avant injection

Le biométhane produit par méthanisation peut bénéficier pour sa teneur en O₂ d'une dérogation aux spécifications des caractéristiques physico-chimiques du gaz naturel. Compte-tenu de l'augmentation attendue du volume de biométhane injecté dans les prochaines années, identifier et caractériser les technologies qui permettront de réduire la teneur en O₂ du biométhane injecté devient une priorité pour le développement de la filière.



Ⓟ Valoriser le CO₂ biogénique de la méthanisation

Le biogaz est constitué (en volume) à environ 35% de CO₂, séparé du CH₄ pour injection, et souvent directement relâché dans l'atmosphère. Valoriser le CO₂ permettrait non seulement de limiter les émissions des unités mais aussi de répondre à la demande de secteurs consommateurs : agroalimentaire, chimie, carburants, etc. Les coûts de liquéfaction et de transport sont aujourd'hui un obstacle majeur à cette valorisation. Une réflexion accrue de la filière sur le sujet, et le développement de technologies et de nouveaux modèles économiques sont nécessaires dans les prochaines années.

Traitement du digestat

Ⓟ Améliorer la valorisation du digestat en le concentrant

La gestion du digestat, produit en grandes quantités, pose une double question :

- La capacité de stockage de digestat des unités est limitée.
- Les digestats sont des matières fertilisantes peu concentrées, plus chères à transporter et à épandre que les fertilisants de synthèse.

La concentration du digestat doit permettre d'en réduire les volumes, d'en faciliter le transport, et d'en accroître les propriétés fertilisantes, notamment pour atteindre des caractéristiques normées.

Plusieurs technologies de désoxygénation ou désulfuration permettent de limiter le taux d'O₂ dans le biogaz et ont déjà atteint une grande maturité technologique (charbon actif, absorption chimique, adsorption, bio-lavage, etc.). Elles commencent aujourd'hui à être déployées dans d'autres pays européens et à faire l'objet d'études comparatives approfondies (voir à ce sujet les publications du Danish Gas Technology Centre). Pour autant, l'atteinte de faibles taux d'O₂ reste souvent difficile dans des conditions économiques acceptables pour le développement des projets. Les opérateurs de réseaux soutiennent différents projets innovants en ce sens qui pourront permettre d'accompagner les producteurs dans le choix des solutions les plus pertinentes.



Plusieurs voies de valorisation du CO₂ sont aujourd'hui technologiquement matures (usage alimentaire, injection dans les serres, etc.) ou en passe de l'être (méthanation, e-carburants). Les technologies de purification, liquéfaction, transport, etc. sont connues et matures ; l'enjeu réside désormais surtout dans la capacité de la filière à se structurer et à développer des modèles économiques viables pour transporter le CO₂ et l'amener aux spécifications techniques des usages ciblés. Un [guide](#) rédigé par le CTBM et le CSF Nouveaux Systèmes Énergétique à destination des porteurs de projets a été publié cette année. En 2023, GRDF a par ailleurs lancé plusieurs appels à projets régionaux « Valoriser le CO₂ biogénique issu de la méthanisation » qui ont permis de faire émerger une vingtaine de solutions innovantes : technologies de purification (ARISTOT), production de méthane (éMA, ENOSIS), création de boucles locales de valorisation (Agroénergie Conseil, CH₄ process, Voltigital, Ferest Energies), production de béton, récupération sur les événements PSA (Rytec GmbH), etc.



Diverses technologies de concentration existent et sont déjà ponctuellement utilisées : membranes, stripping, floculation, etc. Ces technologies se sont néanmoins montrées très énergivores et peu adaptées aux digestats hétérogènes. De nombreux travaux de R&D sur ces solutions sont déjà en cours pour faciliter leur mise à l'échelle et améliorer leurs performances technico-économiques. Par ailleurs, plusieurs projets de recherche ont aussi été lancés pour mieux comprendre l'impact agronomique du digestat et mieux définir les spécifications attendues : ainsi, le projet Concept-Dig, coordonné par l'INRA, vise à évaluer la valeur agronomique et fertilisante des digestats selon leurs caractéristiques ; le projet Omix, coordonné par Nereus, vise quant à lui à développer une filière de transformation totale des digestats de biodéchets pour obtenir des fertilisants et de l'eau réutilisable en agriculture.



Enjeux et solutions techniques de la filière



Enjeu important pour la filière détaillé plus précisément dans la suite du rapport



Focus sur un acteur innovant disponible dans la suite du rapport



Des solutions matures pour répondre à cet enjeu existent mais leur déploiement reste limité



Des solutions sont en développement mais doivent démontrer leur faisabilité et leur viabilité économique à l'échelle



Pas encore de solution en développement pour répondre à cet enjeu ou solutions à très faible maturité

Enjeux techniques de la filière

Intégration des différentes briques

P Faciliter le développement de la méthanisation pour les petites unités

L'injection de biométhane dans les réseaux nécessite une épuration du biogaz qui peut s'avérer très coûteuse pour les petites unités (quelques dizaines de Nm³/h).

Le coût de l'épuration peut en effet représenter entre 15 et 25 % des CAPEX d'une unité de méthanisation.

Le déploiement de solutions techniques alternatives à l'intégration sur site d'épurateurs permettrait d'augmenter les volumes de biométhane injectés et de débloquer l'utilisation de petits gisements d'intrants locaux.

P Optimiser la consommation énergétique

Optimiser la consommation énergétique des unités est un enjeu majeur pour la filière. L'exposition aux fluctuations des prix de l'électricité, dont la consommation d'une unité représente environ 10% de sa production de gaz (environ 1 kWh par Nm³/h), est une problématique importante pour la rentabilité des unités. Par ailleurs, les évolutions réglementaires récentes (notamment RED II) fixent des seuils à respecter sur l'efficacité énergétique des sites.

Solutions R&D et innovations

Des microépurateurs, de petite taille et donc moins coûteux, sont en cours de développement afin de rendre économiquement viables le traitement du biogaz et son injection pour les petites unités (quelques dizaines de Nm³/h). Ce sont par exemple les cas de la technologie par lavage aux amines Bio-Up de Greenmac, du micro-épurateur à membranes PurePac Mini développé par Bright Biomethane ou du système Epuragaz en cours de développement à Toulouse Tech Transfer.

→ [Voir focus sur Greenmac.](#)

Le déploiement de l'injection sur les petites unités de méthanisation pourrait également être facilité par le développement de modèles épuration/injection alternatifs. Parmi les modèles à l'étude :

- **Le biométhane porté**, qui consiste à mutualiser le point d'injection pour plusieurs unités, en transportant le biométhane épuré via camion principalement, sous forme comprimée ou liquéfiée. La pertinence économique de ce modèle reste à démontrer dans la mesure où l'acheminement du biométhane jusqu'au point d'injection induit pour le moment des surcoûts supérieurs à l'injection sur site. Des projets sont toutefois envisagés.

- **Le biogaz porté**, qui consiste à mutualiser à la fois l'épuration et l'injection. La partie transport du biogaz est un enjeu tant technique (compression ou liquéfaction sans précipitation des indésirables) qu'économique (une part du volume de biogaz n'a pas de valeur énergétique). L'acheminement de ce biogaz par des réseaux polyéthylène à haute densité (PEHD, comme pour les réseaux de distribution de gaz classiques) sur des distances courtes pourrait répondre à cet enjeu. Ce modèle est aujourd'hui moins mature que le précédent, mais son intérêt pour favoriser la captation de gisements à un coût compétitif est tout aussi avéré.

Une réflexion sur l'ensemble de la chaîne de méthanisation est nécessaire, de nombreuses solutions matures pouvant déjà être déployées : isolation des gazomètres avec membranes supplémentaires, récupération de la chaleur des compresseurs, production d'énergie sur les sites en autoconsommation pour viser l'autonomie (solaire photovoltaïque, cogénération, biomasse solide pour les besoins chaleur sur les unités avec hygiénisation, etc.).

Enjeux et solutions techniques de la filière

-  **Enjeu important** pour la filière détaillé plus précisément dans la suite du rapport
-  **Focus sur un acteur innovant** disponible dans la suite du rapport

-  **Des solutions matures** pour répondre à cet enjeu existent mais leur déploiement reste limité
-  **Des solutions sont en développement** mais doivent démontrer leur faisabilité et leur viabilité économique à l'échelle
-  **Pas encore de solution en développement** pour répondre à cet enjeu ou solutions à très faible maturité

Enjeux techniques de la filière

Solutions R&D et innovations

Digestion

Optimiser la taille des unités en réduisant le temps de séjour
Le temps de séjour moyen au sein d'un digesteur varie entre 60 et 120 jours selon les intrants, mais est rarement optimisé. Réduire ce temps de séjour est un enjeu d'amélioration continue pour traiter plus rapidement les intrants, renouveler plus fréquemment le contenu du digesteur et en réduire la taille : à la clé, des économies de foncier, de béton et de CAPEX. Une réduction du temps de séjour pourrait néanmoins se faire au détriment de l'expression du potentiel méthanogène et avec le risque d'augmenter les émissions du digestat.

Répondre à la divergence des paramètres
La digestion anaérobie est un procédé biologique complexe dont les paramètres biologiques et physico-chimiques peuvent diverger, entraînant une inhibition de la réaction et une perte de rendement. Mieux prévoir l'évolution des paramètres (pH, ratio C/N, concentration des Acides Gras, etc.) et prévenir les déséquilibres de la biologie sont des enjeux clés.

Intégration des différentes briques

Détecter et réduire les émissions fugitives
En plus des émissions de gaz à effet de serre (notamment CO₂ et CH₄) inhérentes au processus de méthanisation (p. ex. évent d'épuration), des émissions fugitives non-prévues peuvent avoir lieu. Un contrôle fréquent et une optimisation de l'exploitation des installations doit permettre de garantir l'efficacité environnementale des unités.

Mieux anticiper la maintenance
Une meilleure compréhension et prédiction du fonctionnement des équipements d'une unité de méthanisation pourrait permettre d'en limiter les pannes pour optimiser la production de biogaz sur le long terme.

La filière pourrait s'inspirer des procédés de fermentation mis en œuvre dans d'autres industries (pharmaceutique, alimentation animale, etc.) comme l'utilisation d'inoculants (p. ex. champignons ou bactéries). Des études de plus grande ampleur sont nécessaires pour quantifier le rapport coûts/bénéfices de ces solutions d'un point de vue environnemental, économique et énergétique.

Des chercheurs français ont réalisé un état de l'art des effets de l'ajout de divers additifs (microbes, enzymes, etc.) dans les réacteurs de co-digestion anaérobie. [> Lien vers la veille](#)

De nombreux travaux de R&D étudient la modélisation du processus de digestion en identifiant les paramètres clés, en tentant d'interpréter leur divergence et en cherchant des solutions pour y répondre. Plusieurs sociétés de services proposent des technologies de suivi des paramètres : solutions digitales d'aide à l'exploitation, analyses en laboratoires, etc.

Des chercheurs américains ont développé un bioréacteur anaérobie intégrant un processus d'électrolyse permettant de maintenir la stabilité du pH du bioréacteur et d'augmenter la production de biogaz. [> Lien vers la veille](#)

La détection des émissions fugitives est déjà mature, basée sur des technologies adaptées du secteur O&G : utilisées directement à la source (caméras refroidies, analyseurs, lasers, etc.) ou à distance (capteurs sur des drones ou des satellites). En revanche, la quantification des émissions est un enjeu scientifique majeur : à l'heure actuelle, elle reste peu fiable du fait de l'incertitude des mesures et de leur répétabilité limitée. Des développements méthodologiques (traitement des images et méthodologies de calculs) et technologiques sont nécessaires.

De nombreux outils de maintenance prédictive qui permettent d'analyser en temps réel le fonctionnement des équipements d'une unité se sont développés au cours des dernières années pour anticiper les besoins d'intervention et commencent à être déployés sur des unités tests : Yuman.io, Ovalie Tech, Eco-Adapt.

Focus sur trois enjeux (1/2)

Adapter les technologies de déconditionnement

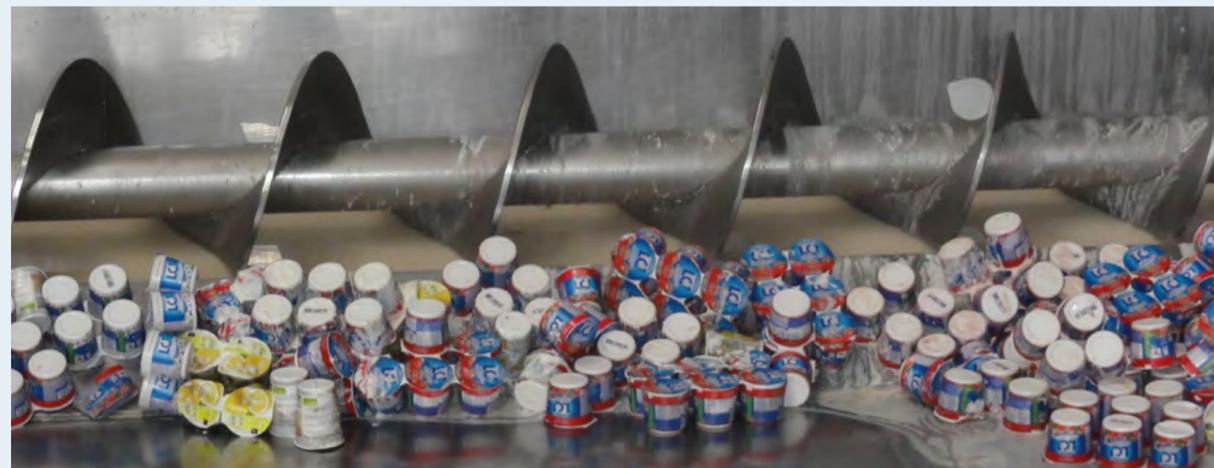
Les flux de biodéchets utilisés en méthanisation sont hétérogènes. Pour séparer le contenu organique des contenants non-fermentescibles, les unités doivent mettre en place des lignes de déconditionnement : ouvre sacs, tamis, broyeur séparateur, presse, déconditionnement hydromécanique, etc. Néanmoins, certains éléments restent difficiles à détecter et extraire : plastique, métaux, verre. Ceux-ci peuvent alors entraîner une pollution des sols lors de l'épandage des digestats mais aussi une usure plus rapide des équipements de méthanisation.

Avec la réglementation sur la mise en place obligatoire du tri des biodéchets à la source pour les collectivités qui est entrée en vigueur au 1^{er} janvier 2024, le volume et l'hétérogénéité des flux entrants sont amenés à croître : mieux déconditionner devient donc une priorité.

Alors que plusieurs unités font remonter des erreurs de tri dans les flux de déchets issus des Grandes et Moyennes Surfaces (GMS) qui les contraignent à refuser

ces intrants, mieux sensibiliser la filière en amont est une première étape importante vers un déconditionnement plus efficace. Développer de nouveaux outils utilisables sur site reste cependant nécessaire pour pallier ces erreurs de tri.

Par exemple, de nombreuses lignes hydromécaniques intègrent déjà des systèmes de décantation leur permettant de séparer les éléments lourds comme le verre. Quant aux métaux, différentes solutions sont également envisageables comme les détecteurs et séparateurs de métaux placés en amont du broyeur. Ces technologies doivent désormais être perfectionnées, complétées par de nouveaux systèmes et déployées sur les unités ou au sein des installations des filières spécialisées dans la collecte et le traitement (déconditionnement, broyage, hygiénisation) mettant des « soupes » de biodéchets à disposition des méthaniseurs.



©Olivier Theobald - Ingénieur ADEME

Optimiser les ensilages de CIVE pour préserver les potentiels méthanogènes



©Marsac Sylvain - Arvalis (Institut du végétal)

L'ensilage est une méthode de conservation des intrants végétaux, inspirée des pratiques de l'élevage.

Pour le moment, les pratiques d'ensilage en France restent très hétérogènes d'une unité à l'autre et elles ne permettent pas toujours une conservation optimale de la matière. D'une part, comme l'a montré un [guide](#) publié en 2022 par GRDF, l'INRAE et Arvalis, la production naturelle d'effluents liquides de l'ensilage de plantes peut causer des pertes de potentiel méthanogène qui dépassent 10% du potentiel total de la récolte. D'autre part, le contact de l'ensilage avec l'air entraîne des pertes de masse et d'énergie qui peuvent réduire le potentiel méthanogène jusqu'à 30% sur l'ensemble du silo.

L'implémentation des bonnes pratiques pourrait donc limiter ces pertes et accroître les rendements de la filière. La production de jus d'ensilage peut par exemple être réduite en récoltant les intrants lorsque leur taux de matière sèche est optimal (à partir de 25 ou 30%) ou en préfanant (séchant au soleil) la biomasse pendant un à deux jours.

Pour limiter la dégradation aérobie de l'ensilage, le dimensionnement adéquat des silos et leur fermeture sont nécessaires. Diverses techniques de couverture existent (bâchage, couverture par semis de céréales ou par des sous-produits alimentaires) mais sont diversement déployées. Leur mise en place doit être pensée au cas par cas selon les équipements utilisés, le climat, la cyclicité de l'activité... Au-delà des efforts de communication, mieux documenter leur coût, leur impact sur la préservation du potentiel méthanogène mais aussi sur l'environnement devient une priorité.

Focus sur trois enjeux (2/2)

©Franck Duroau

Réduire le taux d'oxygène dans le biométhane avant injection

Le biométhane produit par méthanisation peut bénéficier pour sa teneur en O_2 d'une dérogation aux spécifications des caractéristiques physico-chimiques du gaz naturel. Compte-tenu de l'augmentation attendue du volume de biométhane injecté dans les prochaines années, identifier et caractériser les technologies qui permettront de réduire la teneur en O_2 du biométhane injecté devient une priorité pour le développement de la filière.

Quelques procédés de désoxygénation directe du biogaz se sont développés cette dernière décennie et font l'objet d'une attention croissante de la part des acteurs de la filière mais ils ne sont pas encore pleinement technologiquement matures et sont souvent associés à des coûts élevés (p. ex. oxydation catalytique).

Néanmoins, réduire la teneur en O_2 dans le gaz est dès aujourd'hui possible en choisissant des procédés de désulfuration sans injection d'oxygène. Plusieurs technologies matures sont commercialisées dans plusieurs pays quoiqu'elles ne soient pas encore déployées en France : absorption chimique (proposée entre autres par AirDep), adsorption (HeGo, Axens, etc.), bio-lavage (Paques, EcoTec, DMT, etc), charbon actif (Danish Gas Technology Centre, etc.). Les coûts associés au regard de la taille des unités de méthanisation en France sont importants.

La pertinence technico-économique et la viabilité du déploiement de certaines de ces solutions devront être évaluées et comparées aux autres innovations étudiées par les opérateurs de réseaux et leurs partenaires.



Synthèse

La méthanisation est une filière mature dont le déploiement pourrait être encore accéléré en relevant les quelques défis technologiques restants

	Technologies	Enjeux techniques	Solutions en développement
Prétraitement des intrants	Après un éventuel ensilage et stockage préalable des intrants, divers prétraitements mécaniques (hachoirs, grilles, broyeurs à marteaux, broyeurs à couteaux, défibreurs, etc.) sont souvent utilisés.	Les technologies actuelles de déconditionnement peuvent encore être optimisées pour viser l'élimination totale des inerts. Par ailleurs, les pratiques d'ensilage hétérogènes ne permettent pas une conservation optimale de la matière.	Un premier guide des bonnes pratiques d'ensilage a été publié en 2022 par GRDF, l'INRAE et Arvalis.
Production de biogaz par digestion anaérobie	En France, la digestion anaérobie en digesteur se fait le plus souvent selon la voie en «infiniment mélangé» (mélange avec un taux de matière sèche inférieur à 15%).		
Traitement du biogaz	Le biogaz produit doit être séché, désulfuré, désoxygéné, nettoyé des coproduits indésirables (p. ex. NH ₃ et COV) puis épuré (épuration par membranes, par lavage à l'eau, par PSA, etc.).	Réduire la teneur en O ₂ du biométhane injecté devient une priorité pour le développement de la filière.	Plusieurs technologies et méthodes permettant de réduire la teneur en O ₂ par désoxygénation ou lors de la désulfuration sont en cours de diffusion en France.
Traitement du digestat	Le digestat peut être séparé en une phase liquide et une phase solide (presse à vis, tamis, centrifugeuse) avant d'être épandu.	Les digestats de méthanisation sont des matières fertilisantes peu concentrées et chères à transporter. La variabilité de leurs caractéristiques peut complexifier leur valorisation agronomique et freiner l'obtention du statut de «produit».	Les technologies de concentration (membranes, stripping, floculation), permettent de concentrer et homogénéiser les propriétés fertilisantes du digestat. Leurs performances peuvent encore être améliorées.
Intégration des différentes briques		L'intégration des briques de méthanisation est maîtrisée mais le coût élevé de traitement du biogaz et d'injection du biométhane ne permet pas le déploiement de la méthanisation pour les petites unités.	De nouvelles technologies de micro-épurateurs et des nouveaux modèles économiques (p. ex. biogaz porté) sont actuellement à l'étude pour augmenter la viabilité économique de l'injection pour les petites unités.

Acteurs moteurs du développement de la filière

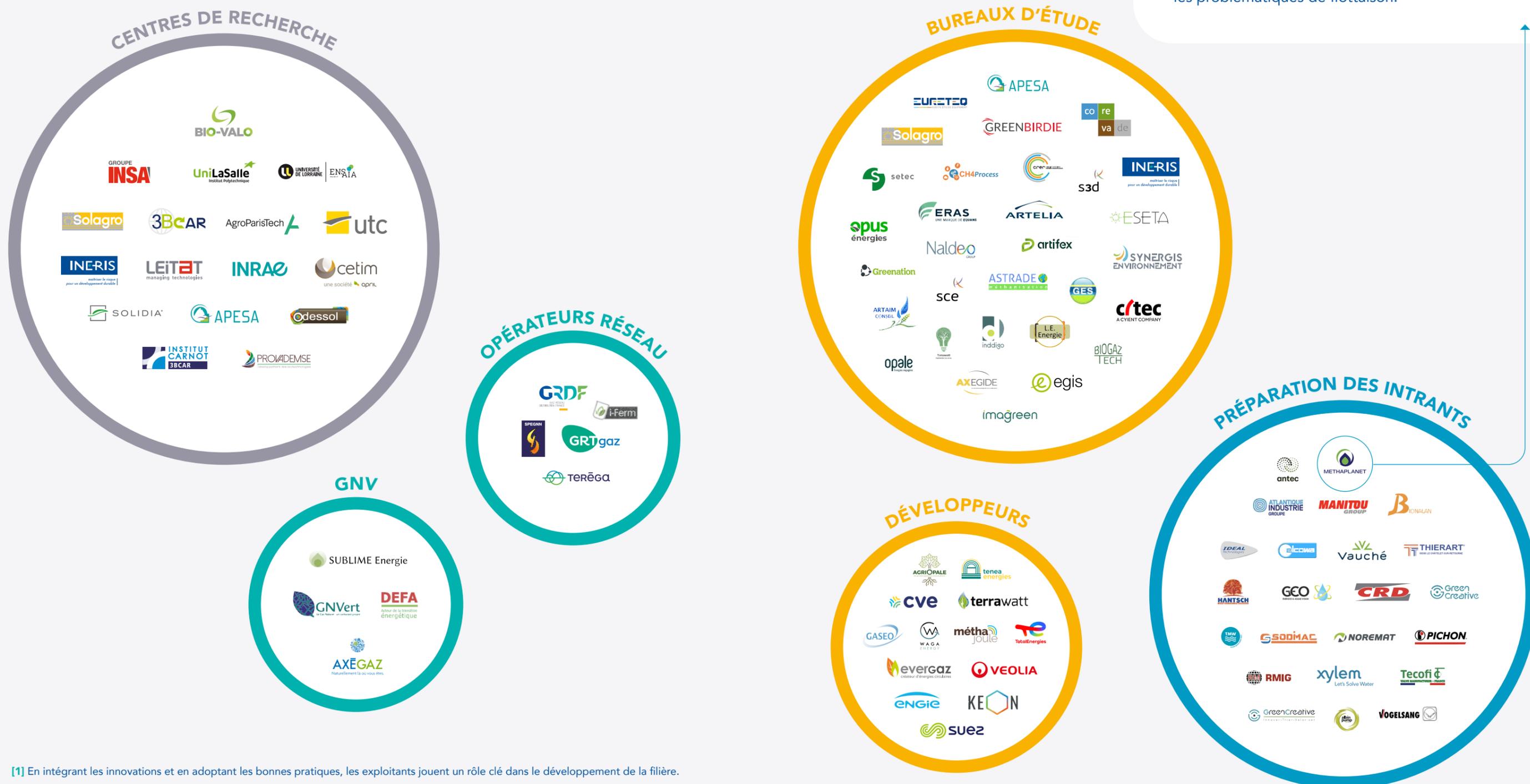
(1/2)

Liste non exhaustive (qui n'intègre pas les exploitants d'unités [1]). L'ensemble des acteurs sont référencés par l'ATEE dans un annuaire disponible à ce [LIEN](#).



Enjeu: intégrer de nouveaux intrants et débloquer leur potentiel grâce à de nouveaux prétraitements

Methaplanet a mis au point un procédé de prétraitement des pailles de fumiers équins pour mieux exploiter leur potentiel méthanogène. Ce procédé transforme ces intrants en granulés par une combinaison de processus thermiques et mécaniques. Ces granulés sont alors plus faciles à transporter et peuvent être directement introduits dans le digesteur pour obtenir des rendements 5 à 10 fois supérieurs à ceux obtenus avec les matières brutes tout en adressant les problématiques de flottaison.



[1] En intégrant les innovations et en adoptant les bonnes pratiques, les exploitants jouent un rôle clé dans le développement de la filière.

Acteurs moteurs du développement de la filière

(2/2)

CONSTRUCTEURS



FOURNISSEURS D'INTRANTS



DIGESTION



TRAITEMENT ET VALORISATION DU BIOGAZ



Enjeu: faciliter le développement de la méthanisation pour les petites unités

Le coût de l'épuration du biogaz (représentant entre 15 et 25 % des CAPEX selon les retours d'expérience des acteurs de la filière) est souvent rédhibitoire pour les petites unités de méthanisation.

L'entreprise Greenmac, spécialisée dans la purification du biogaz, a conçu Bio-Up, un système d'épuration à petite échelle (unités avec un débit de quelques dizaines de Nm³/h): le CO₂ est séparé du CH₄ par mise en contact du biogaz avec une solution d'amines au sein d'une colonne d'absorption.

Ce système présente plusieurs avantages (régénération possible du liquide d'amines, faible consommation d'énergie par rapport aux épurateurs de grande taille, emprise foncière limitée) permettant de réduire les CAPEX de l'épuration pour les petites unités.

D'autres technologies de micro-épurateurs sont également disponibles: c'est par exemple le cas des micro-épurateurs à membranes développés par Bright Biomethane, qui a récemment acquis Greenmac.

Sources

Les principaux acteurs français de la filière sont fédérés par le [Club Biogaz de l'ATEE](#).



[L'observatoire de la filière biométhane](#)
ODRE, 2023

[Tableau de bord : biogaz pour la production d'électricité](#)
Ministère de la transition énergétique, 2023

[Comment optimiser les ensilages de CIVE ?](#)
GRDF & INRAE & Arvalis, 2023

[The impact of anaerobic digestate on soil life: a review](#)
van Midden et al., 2023

[A critical review on the techno-economic feasibility of nutrients recovery from AD](#)
Rizzioli et al., 2023

[Focus sur les intrants en méthanisation : stockage, prétraitements & optimisation](#)
Métha'Normandie, 2023

[Les matières organiques](#)
MéthaFrance, 2023

[Panorama des gaz renouvelables en 2022](#)
GRDF, GRTgaz, SER, SPEGNN, Téréga, 2023

[Carte des unités de méthanisation et de biogaz](#)
SINOE, 2023

[La méthanisation dans le mix énergétique](#)
Solagro & négaWatt, 2021

[Les solutions de déconditionnement des biodéchets emballés et leurs performances](#)
ADEME, 2021

[Desulphurisation of biogas: a systematic qualitative and economic-based quantitative review](#)
Okoro et al., 2019

[Pretreatment of agricultural biomass for AD: current state and challenges](#)
Paudel et al., 2017

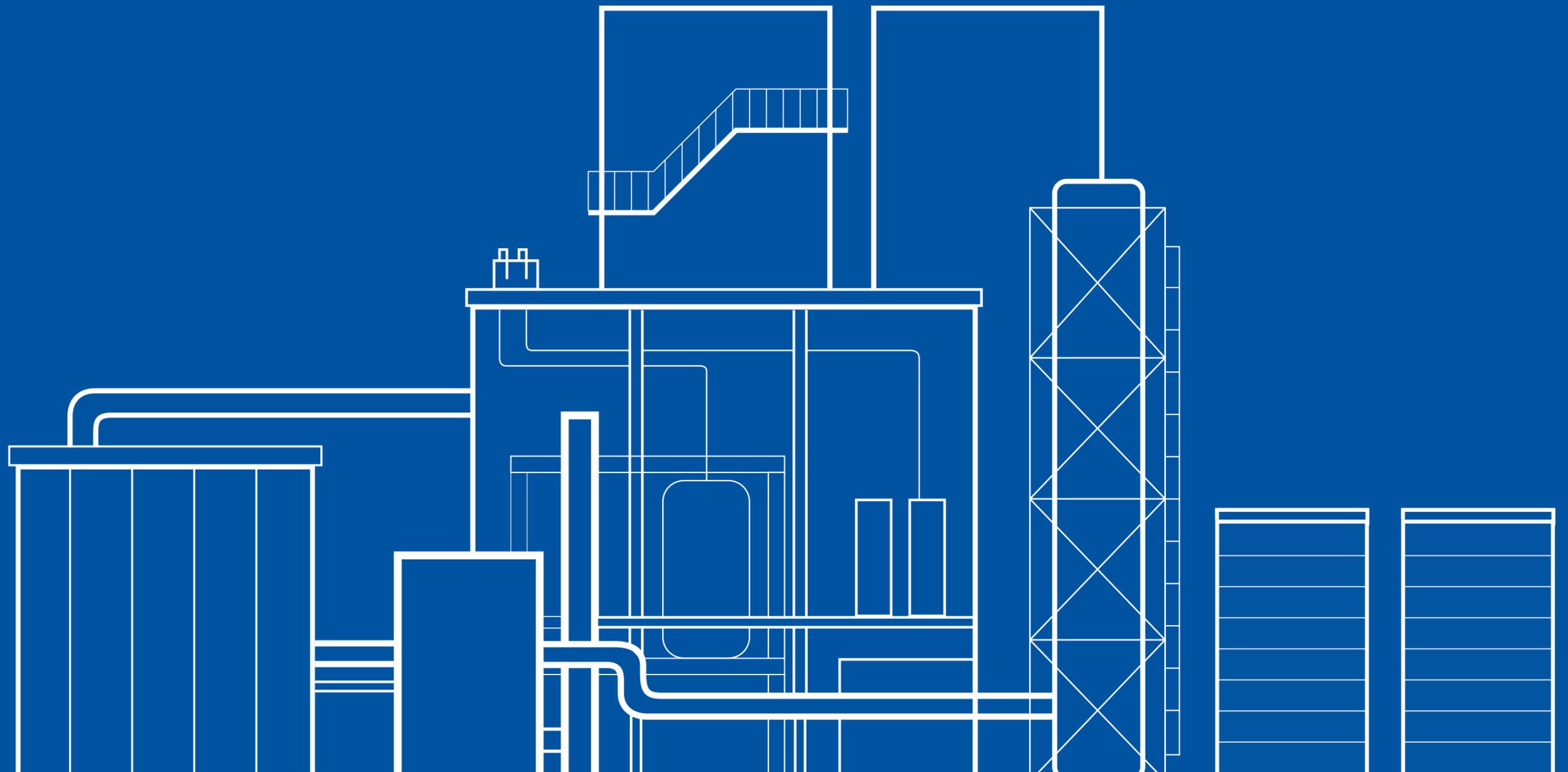
[Gestion et traitement des digestats issus de méthanisation](#)
IFIP, Agricultures & territoires, IDELE, Trame, 2017

[Inventaire et performances des technologies de déconditionnement des biodéchets](#)
ADEME & AEFEL, 2016

[DIGES 2](#)
Bioteau et al., 2009

Filière

Power-to-methane



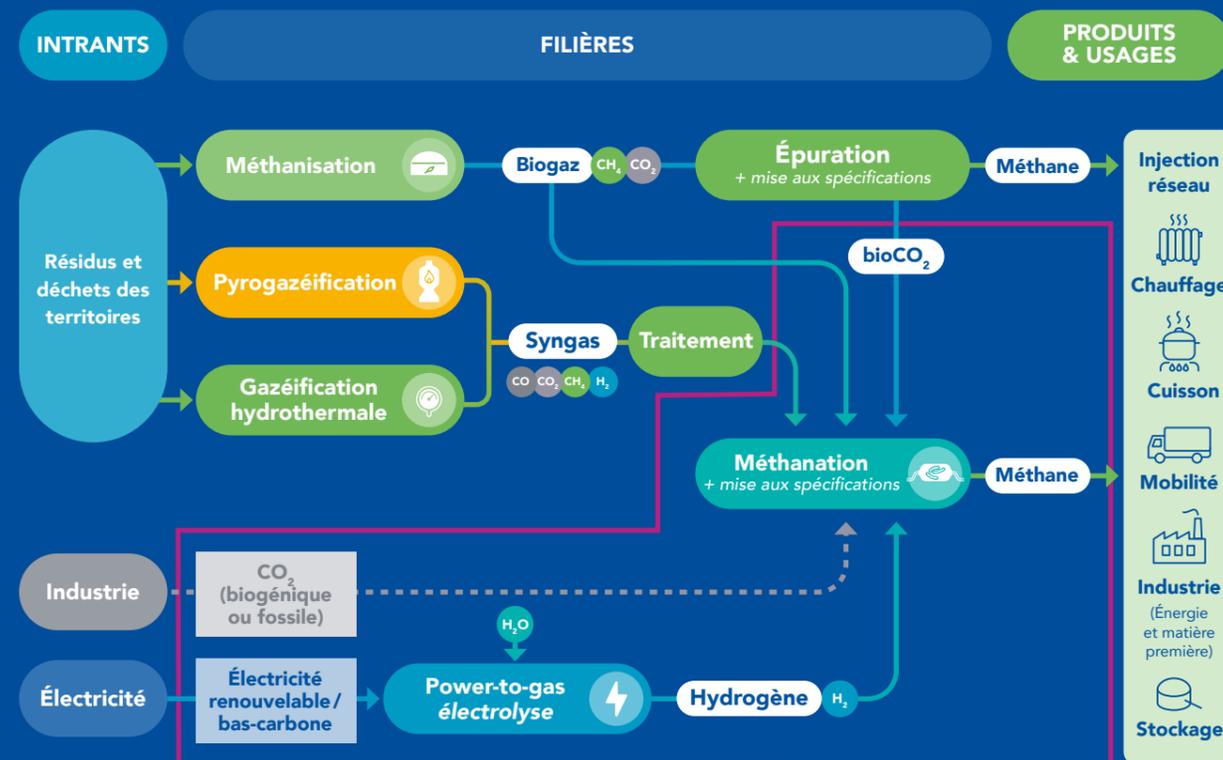
Le Power-to-methane, de quoi parle-t-on ?

Qu'est-ce que le Power-to-methane ?

Le Power-to-methane comprend 2 étapes :

- une étape d'**électrolyse de l'eau** au cours de laquelle de l'électricité est consommée pour produire de l'hydrogène H₂ [1] (et de l'oxygène O₂ en coproduit),
- puis une étape de **méthanation** pendant laquelle l'hydrogène issu de l'électrolyse et le CO₂ issu de captage ou d'épuration (source industrielle ou méthanisation) sont convertis en méthane à travers une réaction biologique ou chimique.

Le méthane peut alors être injecté dans les réseaux de gaz pour tous les usages habituels du gaz naturel (chauffage, cuisson, mobilité, industrie ou stockage).



Filière Power-to-methane

©Benoit Rouchon



Le méthane injecté peut avoir plusieurs qualifications selon la source d'énergie utilisée pour le produire. S'il est d'origine biogénique (biomasse), on parle de biométhane. Si la source d'énergie est d'origine renouvelable (autre que la biomasse), on parle plutôt de méthane renouvelable d'origine non biologique. Enfin, si la source est bas-carbone, on préfère simplement le terme de méthane bas-carbone.

Il existe deux technologies de méthanation distinctes : la méthanation biologique et la méthanation catalytique. Ces briques technologiques peuvent être incluses dans un système Power-to-methane ou être couplées avec un système de production de syngas (contenant du CO) après un post-traitement (p. ex. couplage avec une unité de pyrogazéification ou, dans certains cas, de gazéification hydrothermale).

Dans cette section, les technologies de méthanation dans leur ensemble seront tout d'abord étudiées. L'analyse se focalisera ensuite sur la dynamique et les enjeux propres à la filière Power-to-methane [1].

Méthanation catalytique

La méthanation catalytique est une réaction continue permettant la formation de CH₄ à partir de H₂, de CO₂ et/ou de CO grâce à la présence d'un catalyseur physico-chimique. Elle a généralement lieu à des températures comprises entre 200 et 600°C et à des pressions comprises entre 1 et 15 bar.

Méthanation biologique

La méthanation biologique intervient en milieu anaérobie en présence de H₂ et de CO₂ et/ou de CO dissous dans une phase aqueuse, et de micro-organismes (en majorité des archées méthanogènes) dans des plages de températures comprises entre 35 et 65°C et des pressions inférieures à 10 bar. La réaction continue de méthanation biologique peut s'effectuer par apport de CO₂ fatal pur (*standalone*) ou par apport d'un biogaz/syngas contenant du CO et/ou du CO₂ (*upgrade*).

[1] La production d'hydrogène n'est pas traitée au sein de ce rapport. Cette étape reste néanmoins clé et il s'agit de la brique la plus coûteuse (en termes de CAPEX et OPEX) de la filière Power-to-methane.

Description du procédé de méthanation catalytique

La méthanation catalytique permet de valoriser le CO et le CO₂ en CH₄ grâce à l'utilisation de catalyseurs

La méthanation catalytique est une réaction d'hydrogénation du monoxyde de carbone (CO) ou du dioxyde de carbone (CO₂) en CH₄ en présence d'un catalyseur physico-chimique. La méthanation par hydrogénation du CO s'est développée dans les années 1970-80 et est un procédé déjà éprouvé. La méthanation du CO₂ (réaction de Sabatier découverte en 1897) est l'objet d'un intérêt croissant depuis quelques années grâce au développement des énergies renouvelables, du Power-to-gas et des problématiques de valorisation du CO₂.

Les catalyseurs (majoritairement hétérogènes [1]) sont un élément clé de la méthanation catalytique puisqu'ils permettent d'augmenter la vitesse de réaction et de réduire l'énergie d'activation. Le nickel (Ni) reste le catalyseur métallique le plus utilisé grâce à son bon rapport efficacité/coût.

LES INTRANTS sont injectés à des pressions de 1–15 bar [2] et dans des plages de température de 200°C à 600°C. Si le syngas est utilisé comme intrant, une étape de prétraitement préalable est nécessaire.

VOIE CO

La méthanation du CO met en jeu la réaction suivante (réaction exothermique)
 $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O + \text{chaleur}$

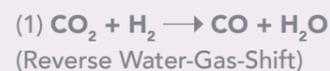
VOIE CO₂

La méthanation du CO₂ directe ou indirecte met en jeu les réactions suivantes (réactions exothermiques)

Méthanation directe :



Méthanation indirecte :

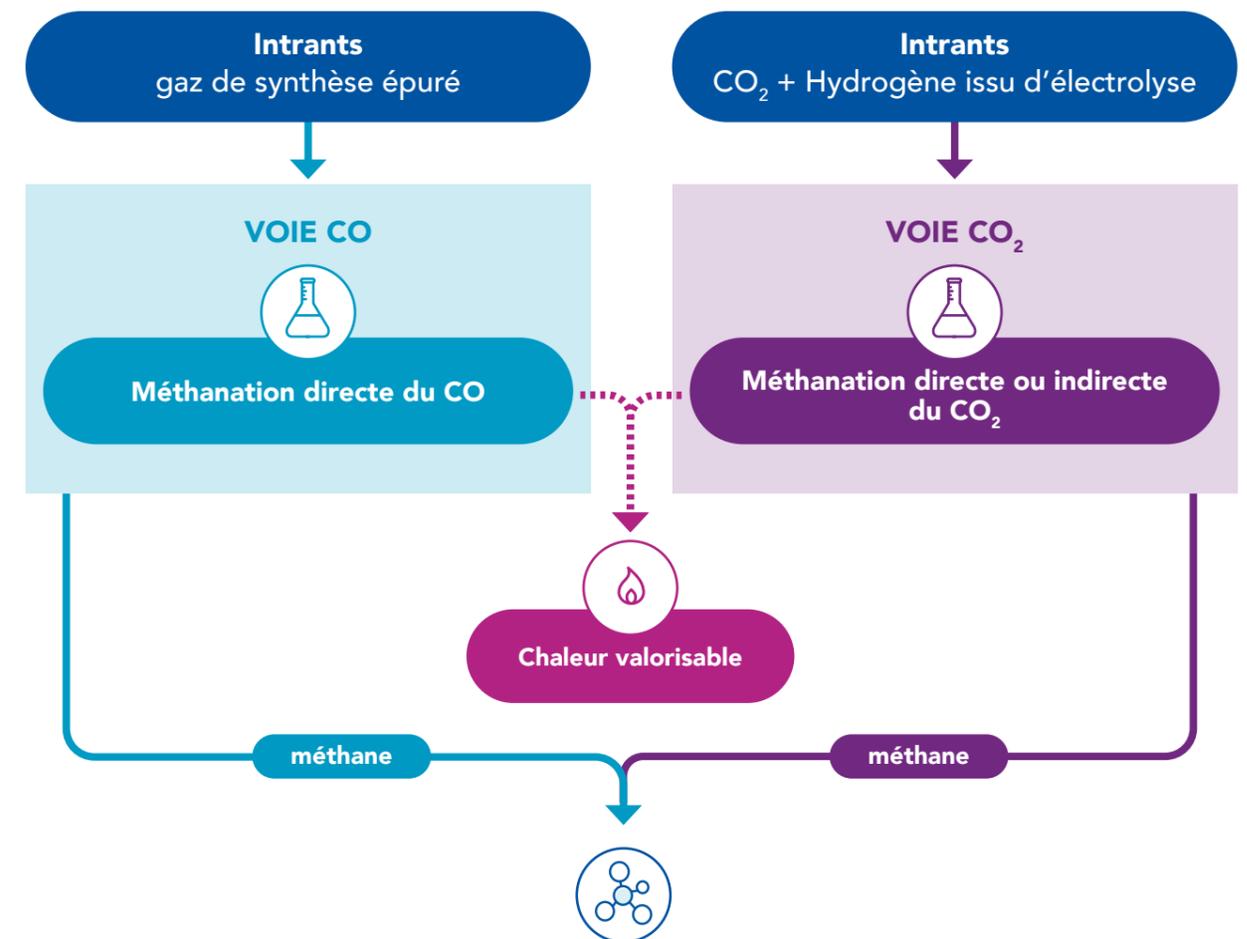


[1] Le catalyseur et les réactifs sont dans plusieurs phases (le catalyseur est sous forme solide et les réactifs sous forme gazeuse) : p. ex. métaux, oxydes ionocovalents, oxydes ioniques ;

[2] La méthanation à plasma froid fonctionne à une pression proche de celle de l'atmosphère. D'autres procédés encore au stade de R&D pourraient atteindre des pressions autour de 100 bar ;

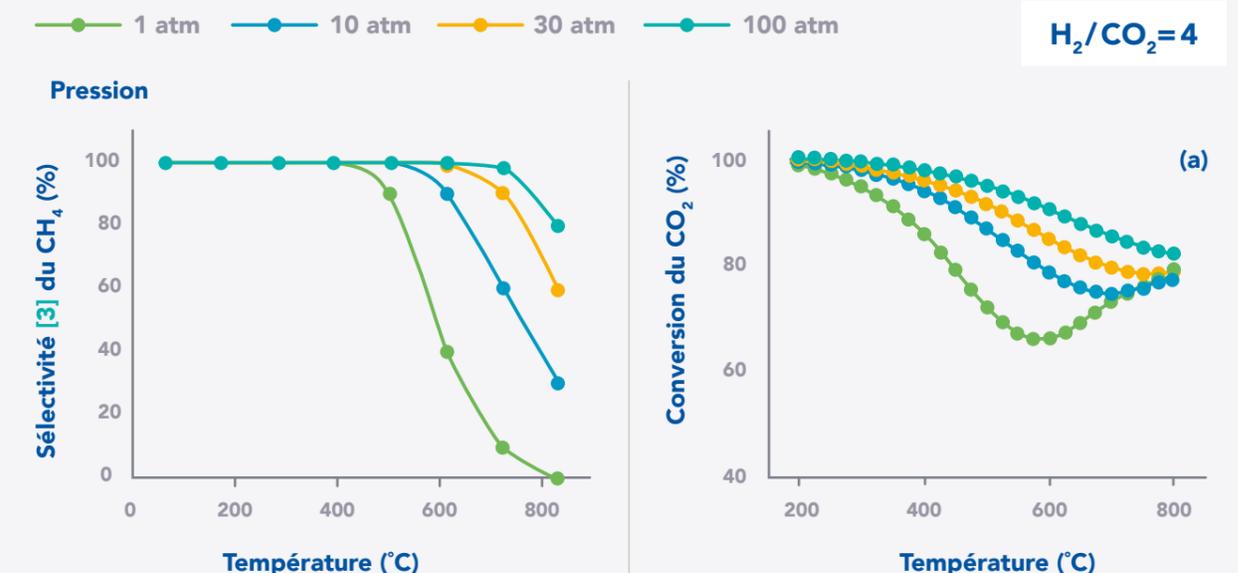
[3] La sélectivité d'une réaction chimique spécifie la quantité de produit désiré formé (ici CH₄) par rapport au nombre de moles consommées du réactif limitant (ici CO₂). Elle indique si plusieurs réactions se produisent en parallèle, conduisant à des coproduits non désirés ;

[4] Dans le cadre de la réaction de méthanation catalytique, la réaction la plus favorable est celle du CO car elle est directe.



LA RÉACTION DE MÉTHANATION CATALYTIQUE DU CO₂ EST FAVORISÉE À BASSE TEMPÉRATURE (< 300°C) OU À HAUTE TEMPÉRATURE ET HAUTE PRESSION

Des efforts de R&D pour opérer à basse pression et basse température (conditions moins contraignantes et coûteuses) sont en cours (p. ex. développement de réacteurs millistructurés ou à plasma froid) [4].



Description du procédé de méthanation biologique

La méthanation biologique permet de produire du méthane en présence de micro-organismes

La méthanation biologique produit du méthane, via des micro-organismes méthanogènes, qui sera en mesure d'être mis aux spécifications pour injection dans le réseau de gaz ou utilisation dans les stations GNV.

Les micro-organismes sont présents dans une phase aqueuse et une association de deux ou trois types de micro-organismes (co-culture ou triculture) peut être utilisée pour améliorer le rendement des réactions.

La méthanation biologique peut se faire *ex situ* (dans un réacteur dédié, elle conduit alors à la formation de CH₄ à partir d'intrants gazeux : CO₂ pur, biogaz ou syngas) ou *in situ* (directement au sein d'un digesteur de méthanisation par exemple, par ajout de H₂ aux substrats qui apportent la matière carbonée et les micro-organismes).

LES INTRANTS sont injectés à des pressions inférieures à 10 bar sous forme gazeuse dans le réacteur en condition anaérobie (sans O₂). Si le syngas est utilisé comme intrant, il y a élimination préalable des polluants tels que nitrates, sulfates et goudrons. Au sein du réacteur, les micro-organismes sont contenus dans une phase liquide.

LA MÉTHANATION PAR VOIE INDIRECTE a lieu dans des conditions mésophiles (entre 20 et 45°C).

Acétogénèse carboxydrotrophe :
 $4CO + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2CO_2$

Homoacétogénèse :
 $2CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$

Méthanogénèse acétotrophe :
 $CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$

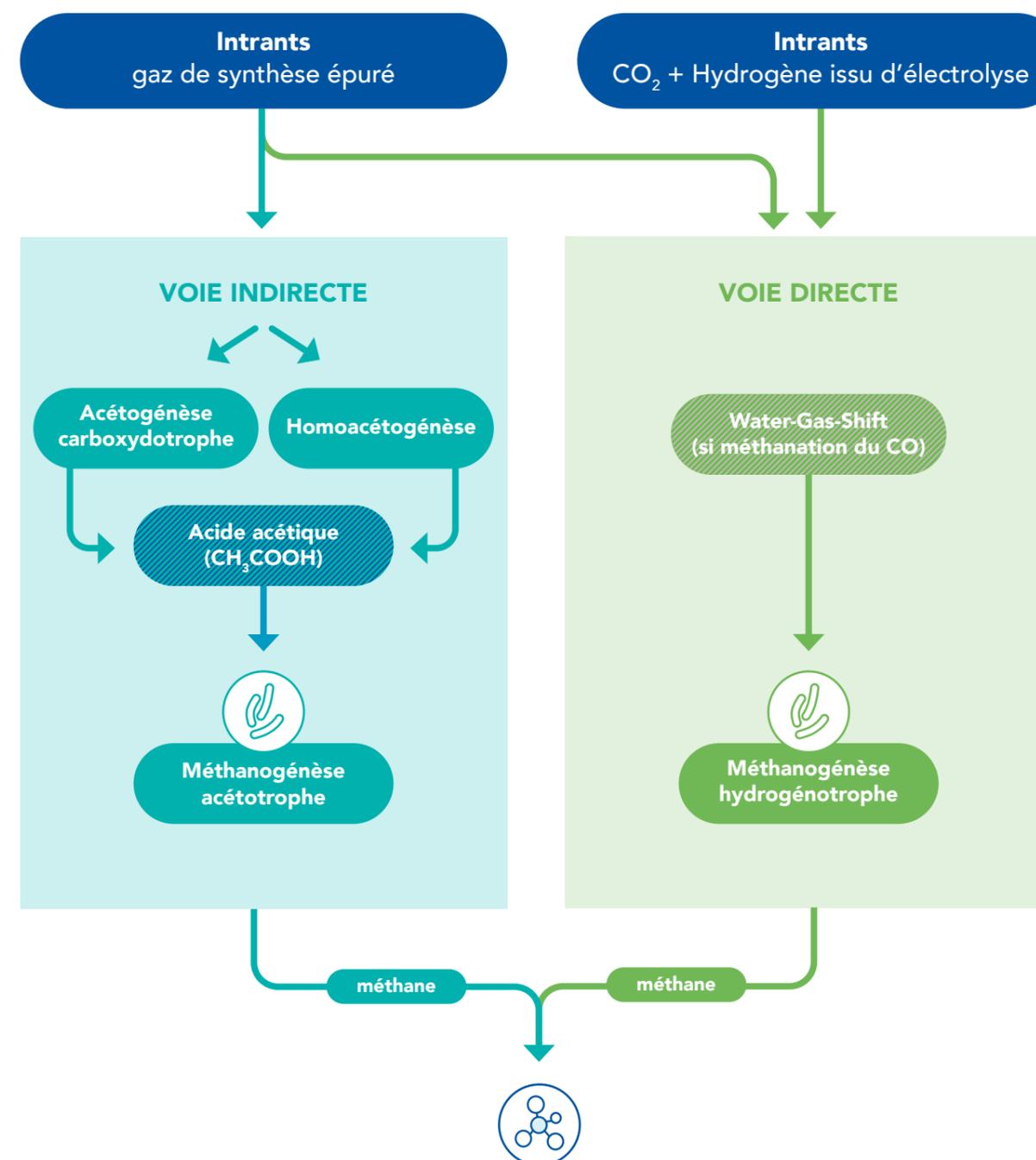
LA MÉTHANATION PAR VOIE DIRECTE a lieu dans des conditions thermophiles (> 45°C)

Water-Gas-Shift :
 $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$

Méthanogénèse hydrogénotrophe :
 $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$

Le CO (surtout à des fortes teneurs, > 50%) inhibe l'action des micro-organismes, c'est pourquoi la voie indirecte est moins efficace que la voie directe.

La méthanation directe du CO₂ est plus simple et mieux maîtrisée.



PLUSIEURS CRITÈRES SONT À CONSIDÉRER POUR LE CHOIX DE MICRO-ORGANISMES

- Résistance aux impuretés
- Productivité
- Capacité à favoriser une réaction plutôt qu'une autre
- Flexibilité selon l'intrant
- Capacité à prétraiter l'intrant
- Robustesse

Exemples: Eubacteria, Archaea

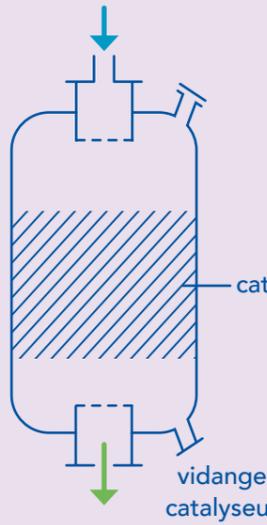
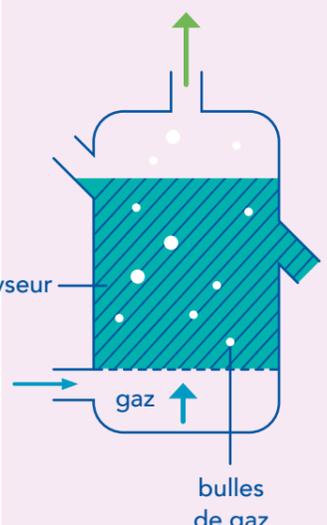
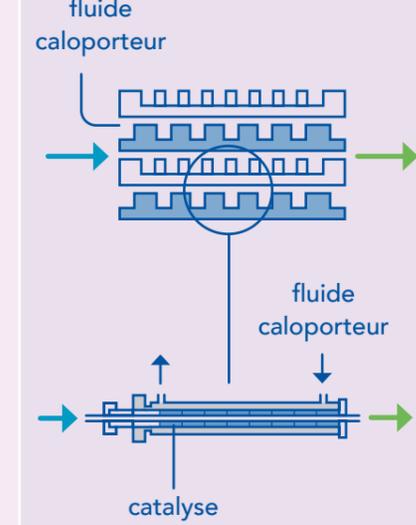
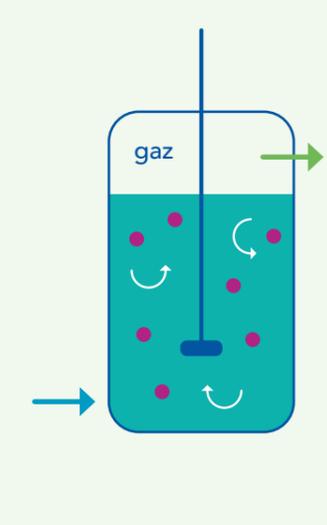
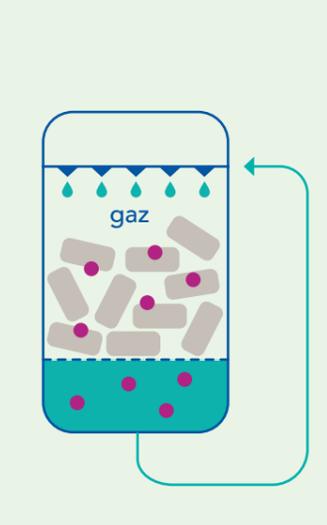


Cartographie des technologies de la méthanation

Le lit fixe est la technologie de méthanation la plus mature et permet de traiter d'importants débits de gaz. D'autres solutions plus compactes (p. ex. réacteurs millistructurés) ou fonctionnant à des conditions opératoires (température ou pression) moins contraignantes (p. ex. systèmes biologiques) sont en cours de déploiement

Flux

-  H₂O, CO₂, syngas
-  CH₄
-  Phase liquide
-  Micro-organismes
-  Support métallique

Technologie	Catalytique			Biologique	
	Lit fixe	Lit fluidisé	Millistructuré	Parfaitement Agité (RPA ou CSTR)	Lit ruisselant (TBR)
Capacité de méthane	jusqu'à 200 000 Nm ³ /h	jusqu'à 10 000 Nm ³ /h	1 à 500 Nm ³ /h	10 à 200 Nm ³ /h	1 à 10 Nm ³ /h
Température	200–700°C	300–400°C	200–400°C	thermophile (50–65°C)	mésophile (35–45°C) ou thermophile (40–70°C)
Pression	10–40 bar	20–60 bar	1–20 bar	< 10 bar	< 10 bar
Rendement énergétique	70–90% (avec récupération de chaleur)	70–90% (avec récupération de chaleur)	70–90% (avec récupération de chaleur)	60–75%	65–75%
Fournisseurs [1]	Air Liquide (procédé Lurgi) (FR) Topsoe (procédé TREMP) (DK) Wood PLC (procédé Vesta) (UK) Hitachi Zosen Inova (CH) Torgas (NL) Energo (plasma froid) (FR) Top Industrie (FR)	Thyssengas (DE) Engie (FR) Institut Paul Scherrer (CH)	Khimod (FR)	Hitachi Zosen Inova (CH) Electrochaea (DE) Enosis (FR) Arkolia (FR)	GICON (DE) Electrochaea (DE) Micropyros (DE)
Maturité	TRL 8–9	TRL 7–8	TRL 6–8	TRL 7–8	TRL 4–5
					

Note : Représentation non exhaustive – listant les technologies le plus utilisées
[1] Exemples de fournisseurs – liste non exhaustive.

Cartographie des principaux projets phares

Les briques de méthanation sont utilisées dans de nombreux projets de Power-to-methane ou de valorisation de syngas avec une tendance à la hausse de leur capacité d'injection [1]

État du projet

- Existant
- ▨ À venir

Débit CH₄

- 1–5 Nm³/h
- 10–50 Nm³/h
- 100–500 Nm³/h
- > 1000 Nm³/h

Syngas (CO, H₂) [2]

CO₂

Biogaz (CO₂, CH₄)



Méthanation catalytique



Méthanation biologique



- GAYA – FR
- ▨ Salamandre – FR



- ▨ Eemsgas – NL



- ▨ ABSL Swindon – UK

TOPSOE

- GoBiGas – SE



- AsH2Gas – DE



- Plainénergie – FR



- Titan V – FR



Columbus – BE



- ▨ Nagaoka – JP



- Bioénergie de Parvillers – FR
- ▨ Vinci – FR



- Store&Go-Troia – IT
- ▨ Jupiter 1000 – FR
- ▨ MéthyCentre – FR



- Audi E-Gas – DE
- ▨ Pau'wer-Two-Gas – FR



- Store&Go-Falkenhagen – DE

- ▨ Bologne – IT

- BIMOTEP – FR



- Limeco – CH
- BioPower2gas – DE



- SocalGas – US
- Store&Go-Solothurn – CH
- ▨ Vértes – HR



- ▨ MarHySol – FR



- ▨ Occi-biome – FR

- El upgraded biogas – DK

- Bio FARM – DE

- ▨ Denobio – FR
- ▨ Demetha – FR

- BioCat – DK



- Glansager – DK



- Energiepark – DE

[1] Représentation non exhaustive – listant les projets majeurs et principaux équipementiers de la méthanation. Note : certains projets mentionnés sont aussi mis en avant dans le focus sur la pyrogazéification;
 [2] Utilisant la brique technologique de méthanation pour la filière de pyrogazéification.

Quelques projets pionniers pour la filière

Des nombreux projets de Power-to-methane sont en train de voir le jour récemment, tant en méthanation catalytique que biologique

Avec les objectifs croissants sur le biométhane, la filière se développe surtout en Europe, mais avec un intérêt croissant à l'international aussi.

Catalytique

Spécifique à la technologie de méthanation catalytique

Biologique

Spécifique à la technologie de méthanation biologique

ALLEMAGNE

L'Allemagne a des hauts objectifs de production de biométhane (8,4 GW d'ici 2030). C'est le pays le plus avancé sur l'industrialisation du Power-to-methane avec déjà plusieurs équipementiers matures et de nombreux projets pilotes en fonctionnement.

SUISSE

La politique climatique portée par certaines villes est ambitieuse avec par exemple des objectifs de neutralité carbone à 2040 (p. ex. à Winterthur).

FRANCE

En France, les perspectives de développement du Power-to-methane sont importantes avec un potentiel évalué par la filière gaz de 50 TWh d'ici à 2050. Plusieurs équipementiers sont positionnés sur la méthanation biologique et catalytique et quelques projets pilotes sont déjà en fonctionnement.

DANEMARK

Le Danemark a des objectifs ambitieux: 100% de biométhane dans le réseau gazier d'ici 2030. De plus, des appels à projets annuels pour la production de biométhane et des tarifs d'achat pour l'injection sont en place. Des universités nationales sont en pointe dans la recherche (p. ex. Aarhus ou DTU).

PROJET AUDI E-GAS

2013 | Werlte
Man Energy Solutions | 325 Nm³/h

Catalytique

Unité de méthanation industrielle composée d'un réacteur isotherme à lit fixe refroidi. Le CO₂ utilisé lors de la méthanation provient d'une usine de biogaz fonctionnant avec des matières résiduelles et des déchets. Le réacteur de méthanation permet de produire 325 Nm³/h de méthane (i.e., 1000 tonnes) par an.



PROJET LIMECO

2022 | Dietikon
Hitachi Zosen Inova | 250 Nm³/h

Biologique

Première installation industrielle de Power-to-methane en Suisse (2,5 MW) par Hitachi Zosen Inova. Depuis 2022, l'injection de 18 GWh/an de méthane renouvelable est possible. L'électricité est produite par une usine d'incinération d'ordures ménagères et le CO₂ provient des gaz d'épuration d'une station des eaux usées.



PROJET JUPITER1000

2020 | Fos-sur-mer
Khimod | 25 Nm³/h

Catalytique

Projet de démonstration industriel de Power-to-gas avec une production de méthane attendue de 25 Nm³/h à partir du CO₂ des usines de la zone industrialo-portuaire de Fos-sur-Mer et de l'hydrogène (1MWe) pour injection dans le réseau.



PROJET GLANSAGER

2023 | Glansager
Nature Energy | 380 Nm³/h

Biologique

Plus grande installation de Power-to-methane au monde mise en service à Glansager, au Danemark. Cette installation utilise de l'électricité renouvelable pour l'électrolyse et le CO₂ issu d'une unité de méthanisation (biogaz) pour produire du méthane.



 **JAPON**

Le Japon a des objectifs ambitieux: ~90% de méthane de synthèse dans le mix gazier résidentiel futur à horizon 2050.

PROJET INPEX

2025 | Nagaoka
INPEX | 400 Nm³/h

Catalytique

Unité de démonstration utilisant du CO₂ comme intrant qui injectera le biométhane dans le réseau gazier résidentiel en 2025. Le projet a l'objectif de développer une unité de 400 Nm³/h.



©Keidanren

 **ÉTATS-UNIS**

Aux États-Unis il s'agit d'un important sujet de recherche pour de nombreux laboratoires, mais on ne dénombre qu'un seul projet pilote récent en déploiement.

PROJET SOCALGAS

2019 | Colorado, US | Electrochaea
600 MWh de méthane par MWh_e

Biologique

Projet de démonstration de la biométhanation (à partir du CO₂ capté de la production de biogaz) à une échelle industrielle pour injection en développement dans le Colorado (collaboration entre NREL et Electrochaea) depuis 2019.



©Electrochaea

PROJET GREEN PLAINS

À partir de 2024 | Midwest, US
Green Plains | 55 Nm³/h

Catalytique

Étude de faisabilité en cours pour produire du méthane avec de l'hydrogène bleu (avec CCS) et du CO₂ capté d'une raffinerie de bioéthanol. L'unité produira 200 kT/an d'ici 2030 et l'utilisation de l'hydrogène vert est en cours d'étude.

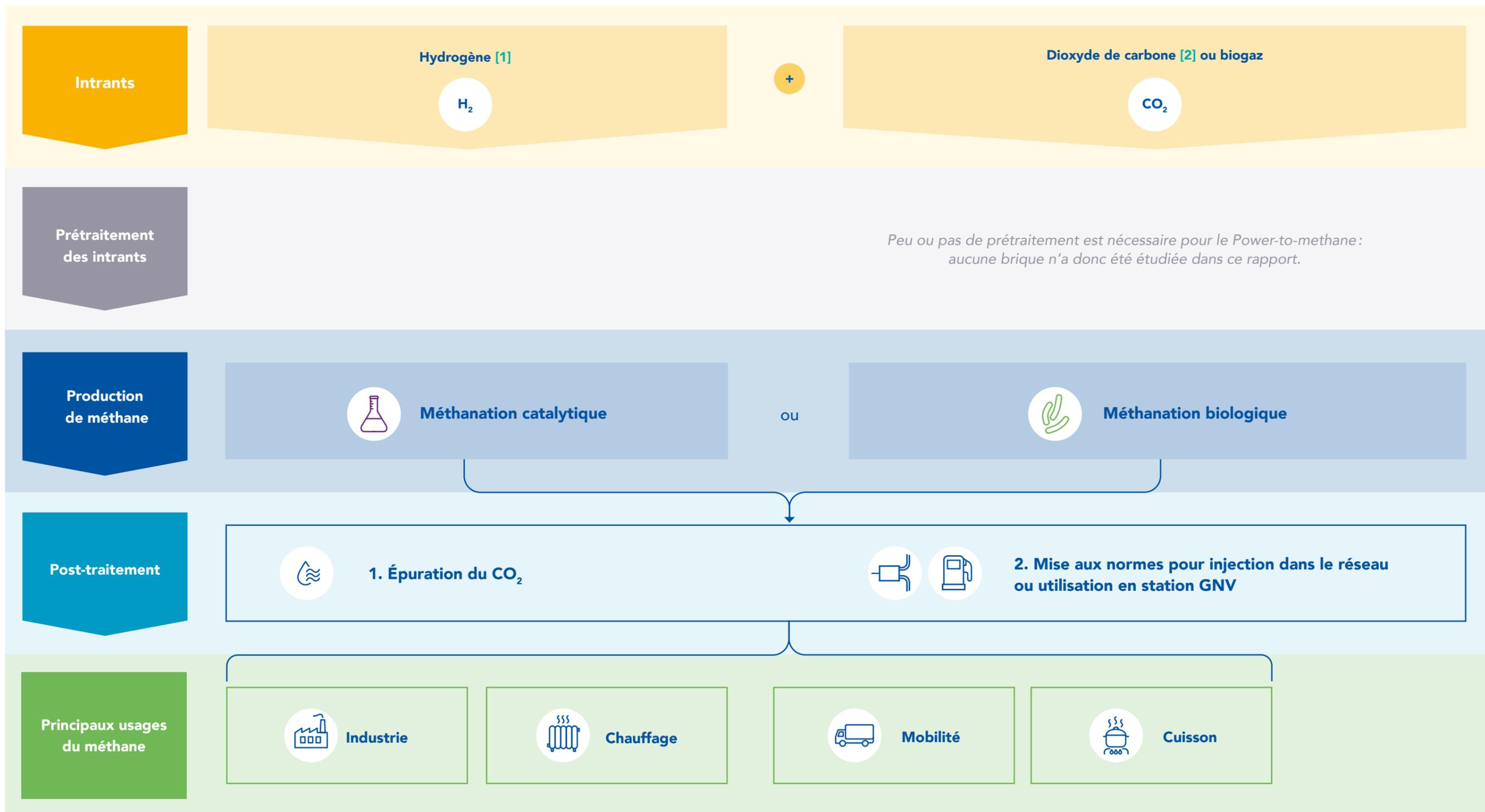


©Green Plains



©Jean-Baptiste Chaix

Cartographie de la chaîne de production de méthane



[1] Produit par électrolyse;

[2] Peut être issu de plusieurs sources: biogaz, industrie, etc. Le biogaz peut être traité aussi directement par méthanation.

Enjeux et solutions techniques de la filière

Catalytique

Catalytique

Spécifique à la technologie de méthanation catalytique

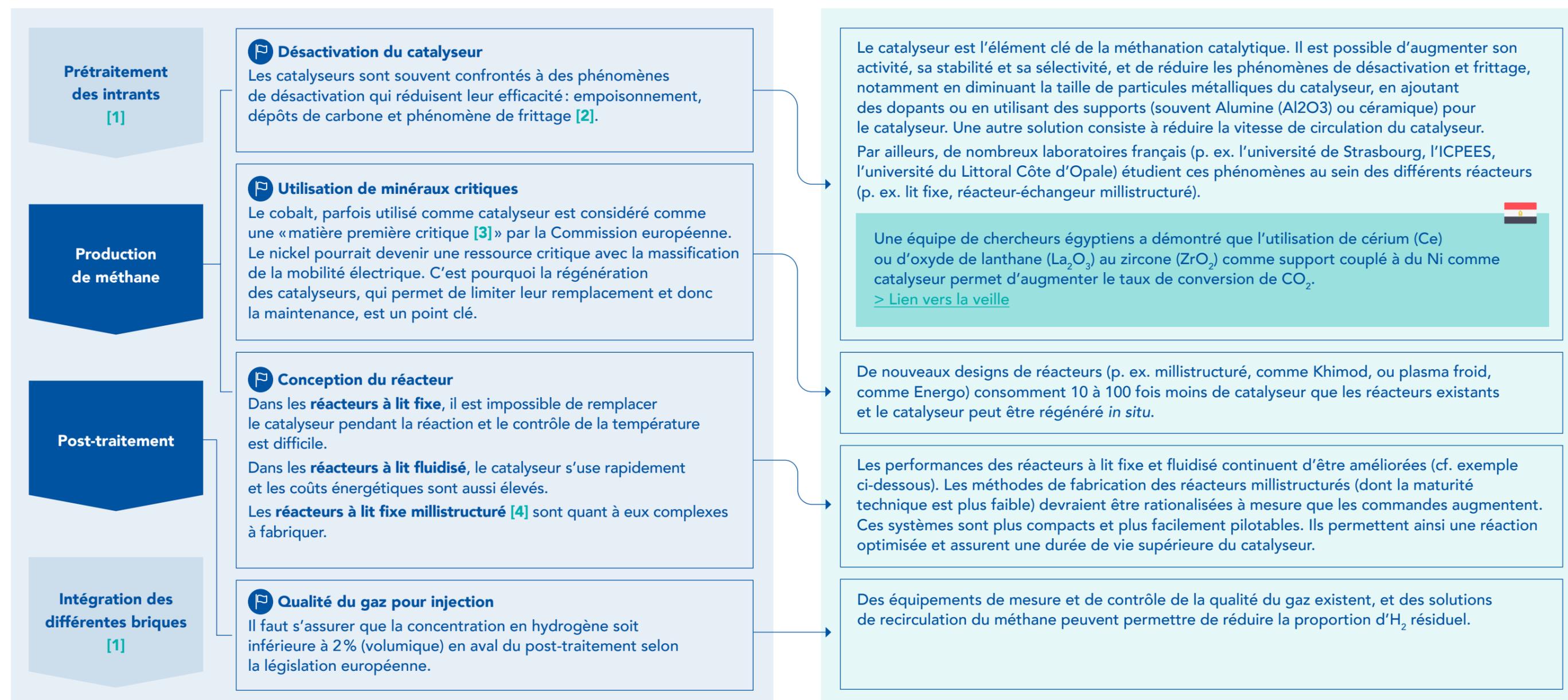
Biologique

Spécifique à la technologie de méthanation biologique

Des technologies matures sont déjà en fonctionnement sur des projets. La R&D se focalise sur l'optimisation de la consommation de catalyseurs et la montée à l'échelle de procédés innovants

Enjeux techniques de la filière

Solutions R&D et innovations



[1] Pas d'enjeu particulier étudié dans ce rapport pour le Power-to-methane. Les enjeux de prétraitement du syngas se trouvent dans la partie post-traitement de la filière pyrogazéification et gazéification hydrothermale. Les enjeux d'intégration n'ont pas été adressés, car la brique « électrolyse » n'a pas été étudiée dans ce rapport;

[2] Migration, accroissement, et accumulation de particules métalliques réduisant la surface active du catalyseur;

[3] Les matières premières critiques sont des matières premières revêtant une grande importance économique pour l'UE et présentant un risque élevé de rupture d'approvisionnement en raison de la concentration de leurs sources et de l'absence de substituts de qualité et abordables;

[4] Ces réacteurs permettent une intensification des échanges en réduisant les dimensions du réacteur et en multipliant le nombre de canaux.

Enjeux et solutions techniques de la filière

Biologique

Catalytique

Spécifique à la technologie de méthanation catalytique

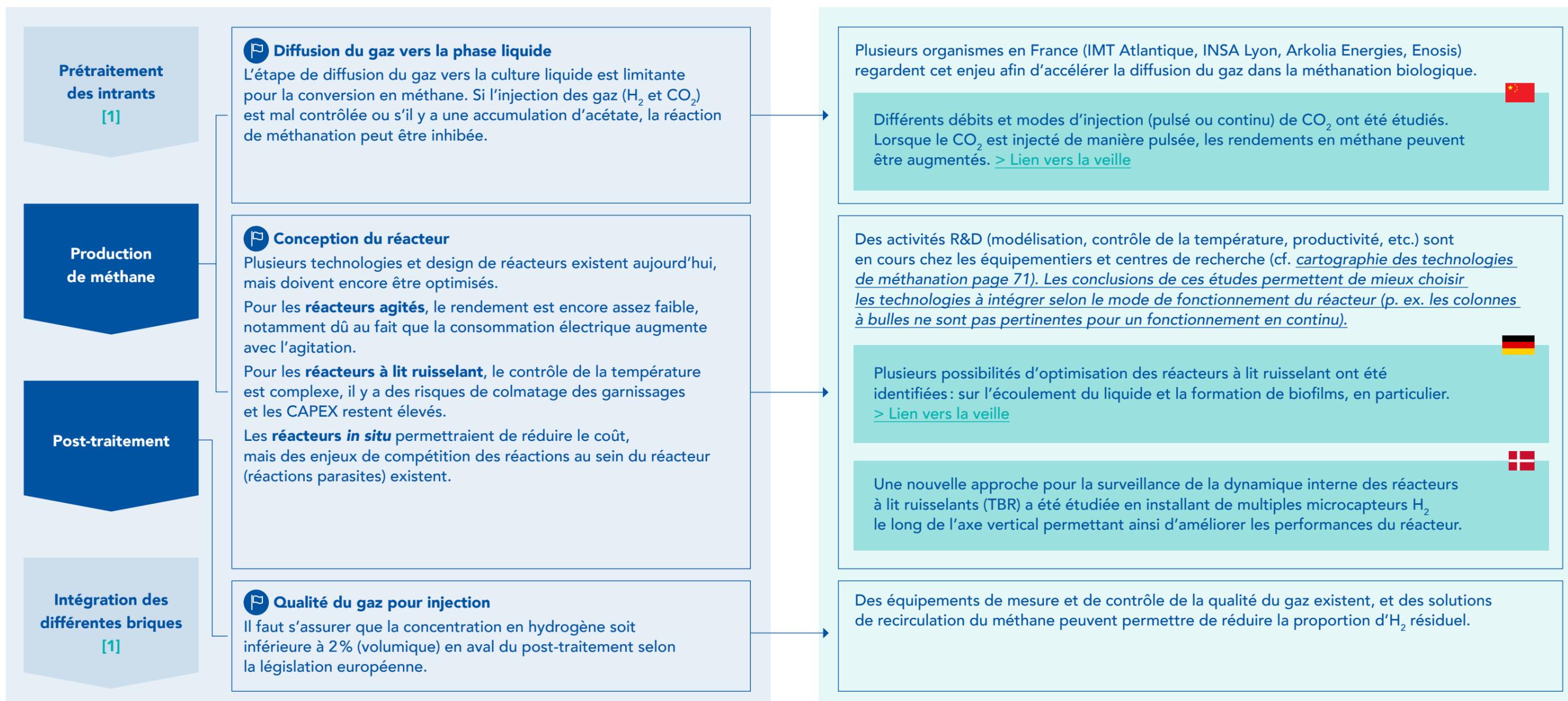
Biologique

Spécifique à la technologie de méthanation biologique

La production de méthane peut également être assurée par des systèmes biologiques. Plusieurs modèles sont aujourd'hui disponibles et peuvent être optimisés pour faire baisser les coûts et augmenter les rendements

Enjeux techniques de la filière

Solutions R&D et innovations



[1] Pas d'enjeu particulier étudié dans ce rapport pour le Power-to-methane. Les enjeux de prétraitement du syngas se trouvent dans la partie post-traitement de la filière pyrogazéification et gazéification hydrothermale. Les enjeux d'intégration n'ont pas été adressés, car la brique « électrolyse » n'a pas été étudiée dans ce rapport.

Acteurs moteurs du développement de la filière

Catalytique

Méthanation catalytique de haute performance

Khimod est un développeur de technologies français pour la production de méthane de synthèse (mais aussi de kérosène, méthanol, oléfines, etc.) à partir du CO₂, basée sur des échangeurs-réacteurs de chaleur millistructurés innovants, fruits d'un partenariat de recherche avec le CEA.

L'échangeur-réacteur de chaleur millistructuré a une haute performance pour des réactions catalytiques : taux de conversion de CO₂ en CH₄ élevé, grande efficacité énergétique, utilise de faibles quantités de catalyseurs, et avec une durée de vie supérieure à 20 ans.

Grâce à sa technologie, KHIMOD peut œuvrer à des projets de tailles différentes (débits de CO₂ allant de 1,2 à 768 Nm³). De plus, Khimod a participé à plusieurs projets portés par l'UE, entre autres : MÉTHAMOD (production de 8000 Nm³/an de méthane de synthèse par an), STORE&GO (production de GNL de 33 000 kWh) et Jupiter 1000 (production de méthane attendue de 25 Nm³/h).

TRL de la technologie  7-8



©KHIMOD

Catalytique

Unité industrielle en fonctionnement et plusieurs en cours de construction



©Hitachi Zosen Inova

Hitachi Zosen Inova (HZI) EtoGas est une entreprise pionnière dans le Power-to-gas et déjà expérimentée dans la planification et la livraison d'installations complètes clés en main, ainsi qu'en matière de maintenance et d'exploitation de ces installations.

EtoGas propose 3 principales solutions : Power-to-Hydrogen (électrolyse), Hydrogen-to-SNG (méthanation) et l'association des deux solutions précédemment citées au sein d'une chaîne Power-to-SNG complète.

Le système de méthanation (Hydrogen-to-SNG) est un concept innovant de réacteurs à plaques à lit fixe (breveté) et de membranes pour convertir des gaz contenant de l'hydrogène, en SNG

(gaz de synthèse avec jusqu'à 99% de CH₄ en sortie).

EtoGas a déjà plusieurs projets en fonctionnement : Audi e-gas plant (Power-to-SNG, 325 Nm³/h de méthane de synthèse), conception du premier système Power-to-SNG en Suisse pour Hochschule Rapperswil (25 kWe), et un projet pilote Power-to-SNG à Stuttgart (250 kWe).

TRL de la technologie  9

Hitachi Zosen Inova est aussi présent dans la méthanation biologique avec un projet industriel (Limeco) en opération depuis 2022.

Catalytique

Spécifique à la technologie de méthanation catalytique

Biologique

Spécifique à la technologie de méthanation biologique

Acteurs moteurs du développement de la filière

Biologique

Méthanation biologique pour injection testée avec succès



Electrochaea, développeur de technologies Power-to-gas allemand, a développé un micro-organisme archée et un procédé de production de méthane de synthèse pour injection. Le procédé inclut la production d'H₂ par électrolyse (avec de l'électricité renouvelable) et la méthanation biologique de CO₂ à partir du micro-organisme.

Le procédé peut être utilisé comme solution de CCUS pour des installations industrielles émettrices de CO₂. Electrochaea propose d'accompagner ces installations dans la conception de la solution, la gestion de projet, et la mise en service.

En 2019, ses deux projets pilotes BioCat et STORE&GO ont injecté du méthane dans les réseaux commerciaux de gaz du Danemark et Suisse, respectivement.

La solution prête à être commercialisée, a bénéficié d'un soutien du European Innovation Council pour une accélération du développement commercial des larges unités (10 à 75 MWe). Une première installation de 10 MWe pour convertir 5 700 Mt_{CO₂}/an et produire 2,8 Nm³/an de méthane synthétique est en cours de construction.

TRL de la technologie  8-9

Sources

Les principaux acteurs français de la filière sont fédérés par le [Club Power to Gas de l'ATEE](#).



[Techno-Economic Evaluation of Biological and Fluidised-Bed Based Methanation Process Chains for Grid-Ready Biomethane Production](#)

Gantenbein et al., 2022

[Biological Aspects, Advancements and Techno-Economical Evaluation of Biological Methanation for the Recycling and Valorization of CO₂](#)

Bellini et al., 2022

[Techno-economic analysis of Power-to-gas plants in a gas and electricity distribution network system with high renewable energy penetration](#)

Fambri et al., 2022

[European Biomethane Benchmark](#)

Sia Partners, May 2022

[BIOMÉTHANATION DU SYNGAS : Étude cinétique et mise en œuvre à l'échelle pilote](#)

Figueras et al., 2021

[Production d'un syngaz par pyrogazéification de biomasse en vue d'une biométhanation](#)

Tchini Séverin Tanoh, 2021

[La méthanation biologique](#)

ATEE, Décembre 2020

[Biométhanation par injection de dihydrogène état de l'art et potentiel d'émergence](#)

Voltigal/Enerka/IMT Atlantique, Octobre 2020

[Biological CO₂-Methanation: An Approach to Standardization](#)

Thema et al., 2019

[Compréhension et modélisation des mécanismes de désactivation d'un catalyseur de méthanation de CO₂ au sein d'un réacteur-échangeur milli-structuré à lit fixe](#)

Isabelle Champon, 2019

[Valorisation énergétique de CO via la méthanation par voie catalytique](#)

Nathalie Elia, 2019

[Statu quo sur la méthanation du dioxyde de carbone: une revue de la littérature](#)

Ducamp et al., 2018

[Report on the costs involved with PtG technologies and their potentials across the EU](#)

Van Leeuwen, 2018

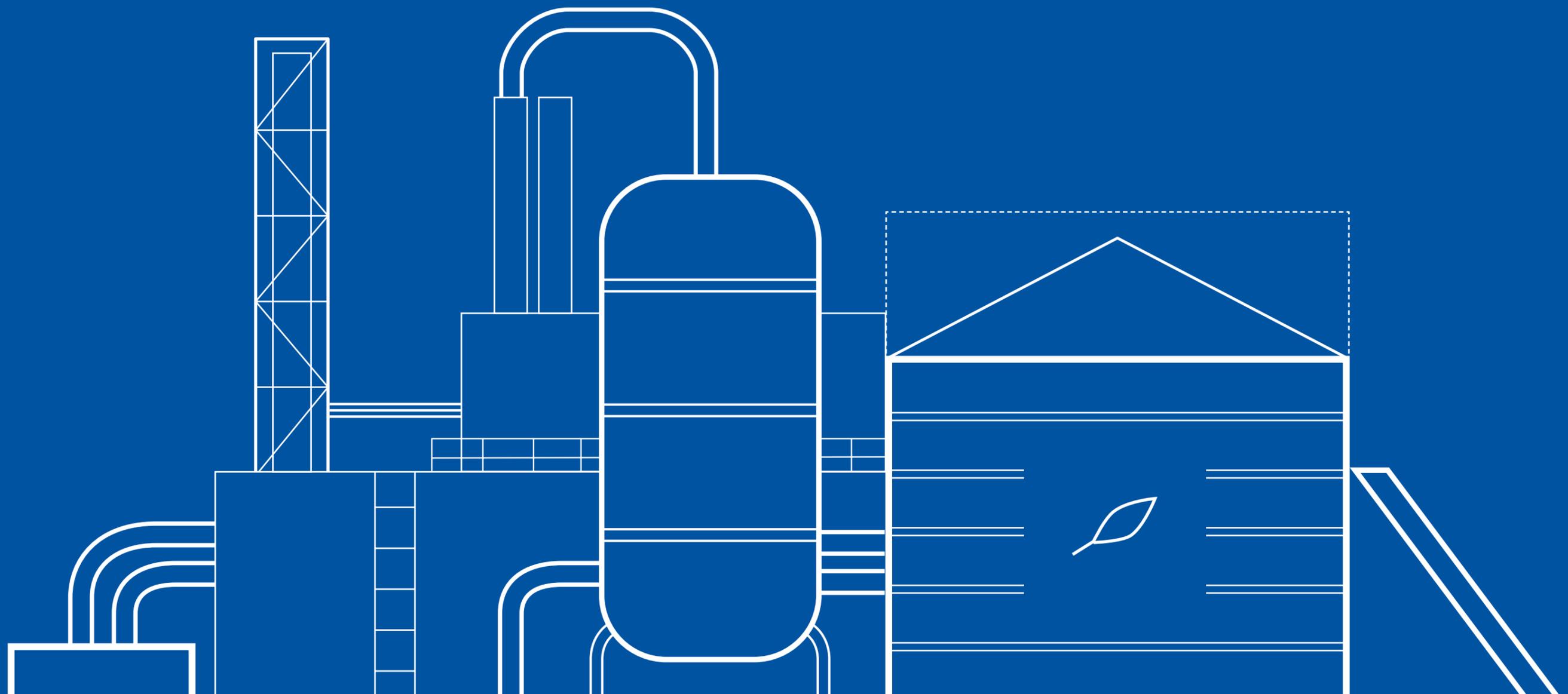
[Plasma catalytic process for CO₂ methanation](#)

Magdalena Nizio, 2016



Filière

Pyrogazéification



La pyrogazéification, de quoi parle-t-on ?

Qu'est-ce que la pyrogazéification ?

La filière pyrogazéification réunit deux procédés, la pyrolyse et la gazéification. Ces procédés permettent le traitement thermochimique de matières carbonées sèches (biomasse ou déchets), à haute température (entre 800 et 1500 °C), en absence ou défaut d'oxygène. Ces deux procédés transforment la matière organique en gaz de synthèse (ou « syngas »), en huile et/ou en charbon.

Néanmoins, les proportions de chacun de ces composés et leur utilisation potentielle sont dépendantes de la voie choisie :

■ La pyrolyse conduit principalement à la formation de (bio)char, ainsi que d'huile et de gaz valorisables pour la production de chaleur et la cogénération, ou pour la production de carburants.

■ La gazéification fait généralement suite à une étape de pyrolyse. Elle vise à convertir au maximum le carbone solide et l'huile de pyrolyse en syngas, notamment pour la production de carburants et l'injection dans le réseau.

La filière pyrogazéification permet la valorisation d'intrants secs variés



Bois non-déchet

bois forestier, connexes des industries du bois, résidus de liège, déchets bois en SSD [1], etc.



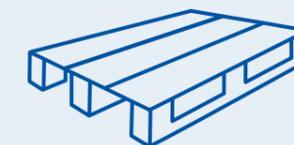
Déchets verts

branches, tailles, fraction ligneuse



Résidus de cultures lignocellulosiques

pailles, cannes, sarments de vigne, etc.



Déchets de bois non-dangereux

bois / emballage en fin de vie, palettes, déchets d'ameublement, etc.



Déchets non-recyclables

plastiques non-recyclables, pneus usagés, etc.



Combustibles Solides de Récupération (CSR)

refus de tri : bois, cartons, plastiques, etc.

[1] Les déchets ont un statut juridique spécifique encadré par la réglementation environnementale et sanitaire. Toutefois, un détenteur de déchets peut mettre en œuvre une procédure de sortie du statut de déchet dite SSD (spécifié au cas par cas et validé par les autorités compétentes) en vue de sa réutilisation.

Description du procédé

Pyrolyse et gazéification permettent l'obtention de produits différents selon les conditions de réaction

La pyrolyse produit des gaz, des goudrons/huiles et du charbon solide, essentiellement valorisables pour la production de chaleur. Pour accroître la proportion de gaz, la pyrolyse initiale peut être suivie d'une étape de gazéification. Une étape de méthanation ultérieure est également ajoutée quand le produit gazeux recherché est le CH₄, en vue par exemple d'une injection dans le réseau.

env. 55-75%

RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE

La pyrogazéification permet d'atteindre un rendement énergétique d'environ 80% pour la production de syngas.

En cas de lavage et de méthanation ultérieurs (cf. filière méthanation), le rendement énergétique est plutôt de 55-65% en considérant le méthane seul et supérieur à 75% en tenant compte de la chaleur fatale valorisable.

> 90%

TAUX DE CONVERSION DES INTRANTS

La conversion de la biomasse en gaz est quasi-complète lors de la pyrogazéification.

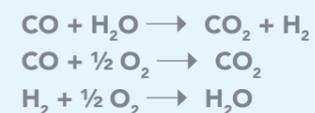
LA PYROLYSE consiste à décomposer les molécules de la matière organique en molécules plus petites et thermiquement plus stables (CO, CO₂, H₂) sous l'effet de la chaleur (haute température) en absence de O₂.

Intrants secs → CO₂ + H₂O + CH₄ + CO + charbon^{solide} + goudron^{gaz} + minéraux et métaux

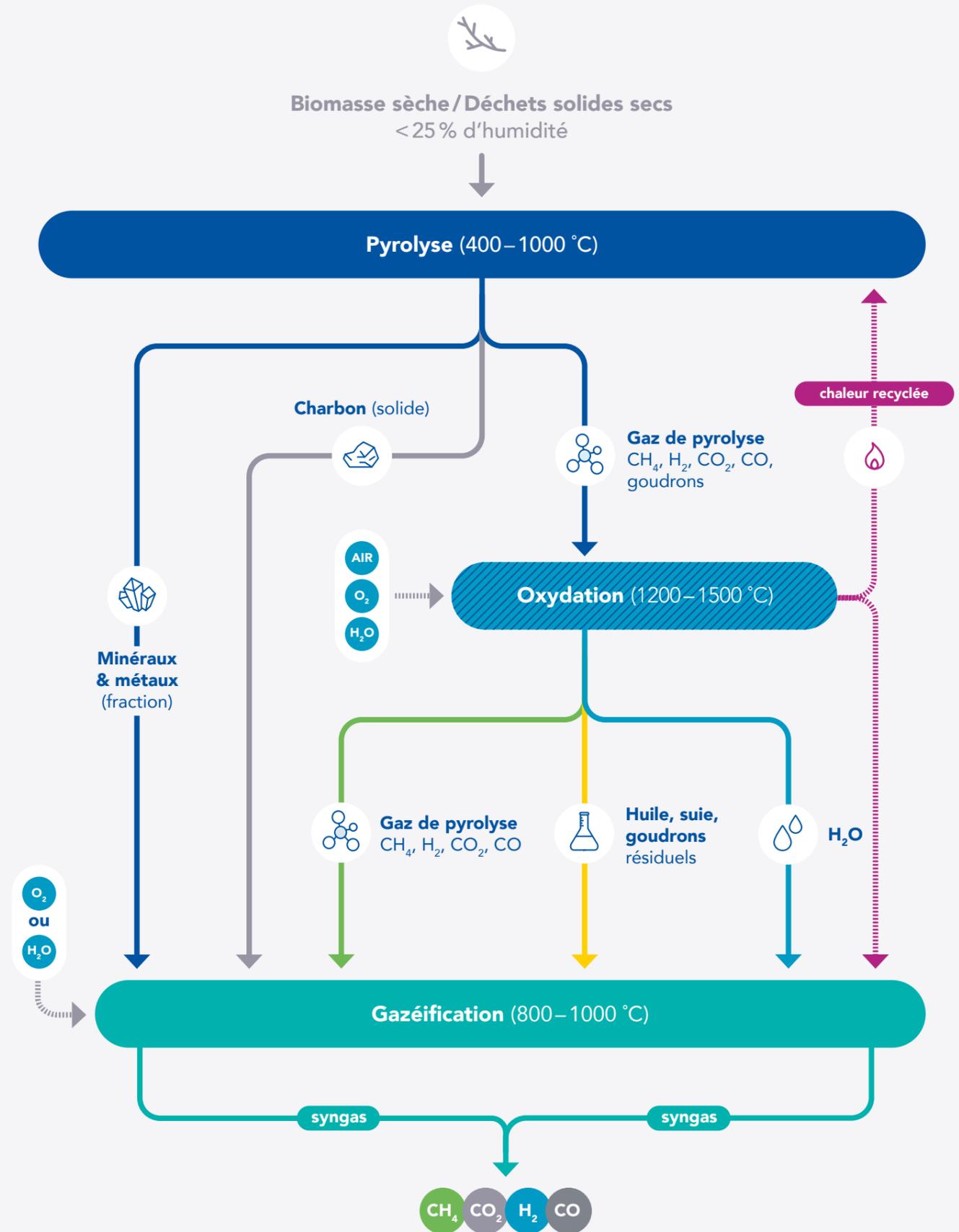
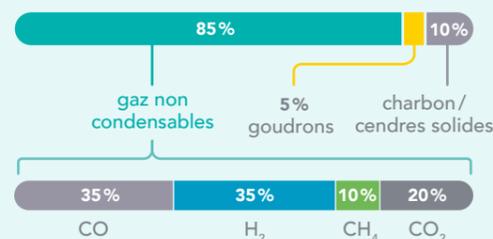
Proportion indicative des produits:



L'OXYDATION des matières volatiles qui ont été produites lors de la pyrolyse, par ajout d'un agent oxydant (air, H₂O vapeur ou O₂), fournit la chaleur nécessaire aux autres étapes de pyrolyse et de gazéification.



LA GAZÉIFICATION conduit à la formation d'un syngas riche en CO et en H₂ par la réduction chimique du charbon solide [1]. Cette phase nécessite un apport d'énergie externe, fournie par la réaction exothermique d'oxydation.



[1] Dans le syngas produit, le ratio H₂/CO est proche de 1. Pour favoriser la production de méthane par une étape de méthanation ultérieure (cf. présentation des briques de méthanation dans la filière Power-to-methane), la proportion de H₂ peut être accrue jusqu'à un ratio 3/1 grâce à une réaction intermédiaire de Water-Gas-Shift: CO + H₂O → CO₂+H₂.

Dynamique de la filière

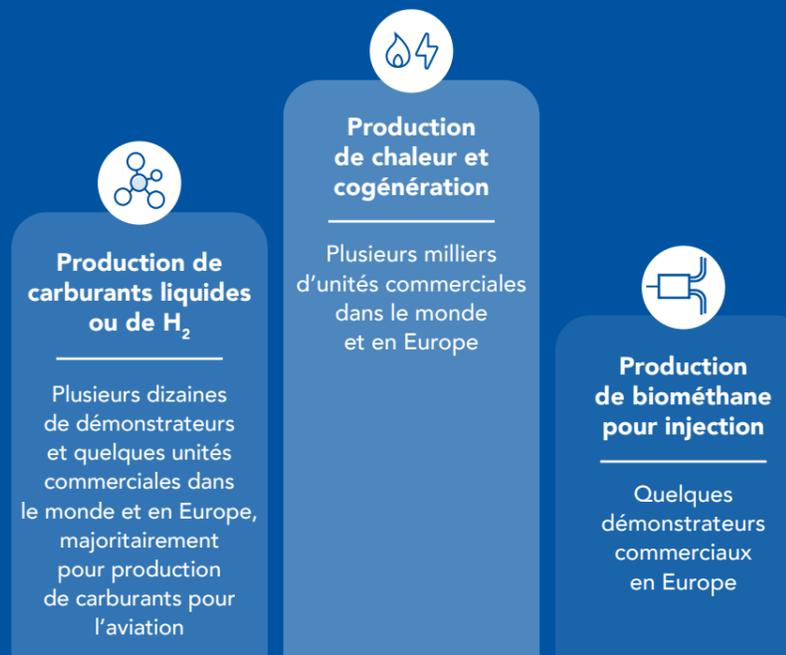
Les unités de pyrogazéification opérationnelles dans le monde sont principalement utilisées pour de la cogénération

Les principes de la pyrolyse et de la gazéification sont mis en œuvre depuis plusieurs siècles : dès l'Antiquité, pyrolyse du bois pour produire du charbon ; depuis le XIX^e siècle, gazéification de la houille pour produire du gaz d'éclairage et du gaz de ville. Plus récemment, ces procédés ont été largement utilisés pour la production de chaleur et la cogénération à partir de biomasse : on compte plusieurs centaines d'unités industrielles en Allemagne, en Italie ou encore aux États-Unis.

Les besoins croissants en énergie décarbonée ont conduit ces dernières années à envisager de plus en plus la pyrogazéification pour produire du biométhane injectable dans les réseaux en remplacement du gaz naturel.

La modification progressive des cas d'usage (éclairage, cogénération, production de molécules) et la complexité croissante des intrants (résidus forestiers, bois déchets, CSR) imposent continuellement de nouveaux challenges technico-économiques à la filière. L'injection exige ainsi des conditions de qualité que ne remplit pas un syngas brut issu d'une simple gazéification : une réduction des contaminants et un enrichissement en CH₄ (méthanation) sont nécessaires, qui doivent encore être déployés à une échelle industrielle.

LES PROJETS DE PYROGAZÉIFICATION



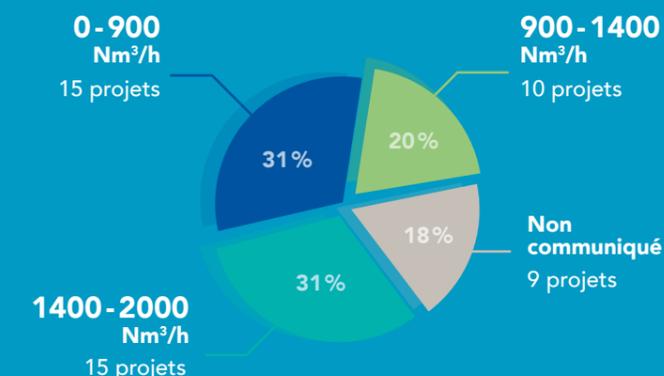
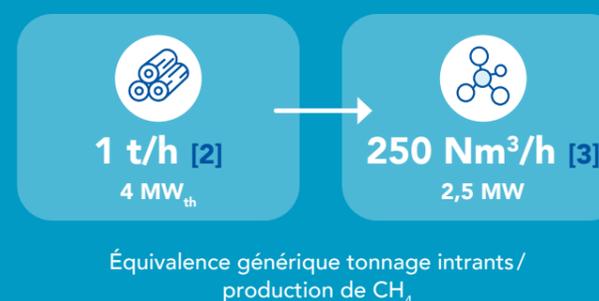
Historiquement, la gazéification de biomasse et déchets a surtout été utilisée pour la production de chaleur et la cogénération. Depuis plusieurs années, on assiste cependant à une accélération du développement de la pyrogazéification pour injection de biométhane dans le réseau.

En 2022, en France, GRTgaz a piloté un AMI qui a permis de recenser 49 projets, pour une capacité potentielle d'injection de 4,1 TWh_{PCS}/an ou 51 000 Nm³/h [1].



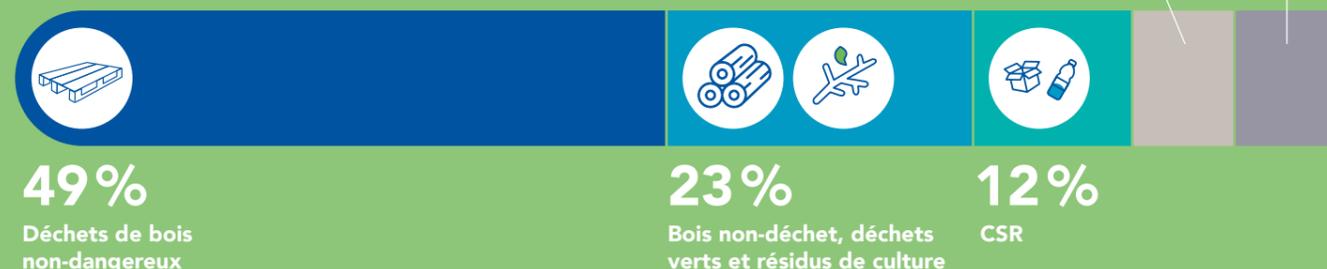
CAPACITÉ DES PROJETS DE L'AMI [1]

Les unités s'orientent vers des tailles permettant de traiter des déchets à une échelle territoriale.



INTRANTS PRINCIPAUX DES PROJETS DE L'AMI [1]

1,3 millions tonnes / an



Une cartographie non-exhaustive de projets de pyrolyse et de gazéification dans le monde est disponible sur : <https://www.ieabioenergy.com/installations/>

La cartographie des projets en montage en France est disponible sur : https://odre.opendatasoft.com/explore/dataset/projet-commerciaux-et-demonstrateurs-en-france-de-pyrogazéification/information/?disjunctive.statut&disjunctive.nom_region

[1] AMI pyrogazéification pour injection - Webinaire de restitution, NSE/GRTgaz, 2022;

[2] Données pour des intrants bois non-déchet ou déchets verts;

[3] Le ratio production de CH₄ par rapport au tonnage entrant reste globalement le même quelle que soit la taille de l'unité.

Quelques projets pionniers pour la filière

Au cours des dernières années, quelques pays et quelques projets de démonstrateurs ont permis des progrès sur la voie de la pyrogazéification pour injection dans le réseau

FIFCB Güssing

2001–2015 | Güssing

STATUT

Clôturé

INTRANTS

Bois de foresterie

PORTEUR DU PROJET

Güssing Renewable Energy

PRODUCTION

Cogénération

TAILLE

8 MW_{th} et 2 MW_e

Un des premiers démonstrateurs commerciaux de gazéification de biomasse, permettant d'alimenter la ville de Güssing en électricité et en chaleur. En 2009, l'unité a été upgradée pendant près d'un an pour permettre la production de biométhane. D'autres démonstrateurs de gazéification ont depuis été installés dans la région.



©Güssing Renewable Energy

GoBiGas

2014–2018 | Göteborg

STATUT

À l'arrêt

INTRANTS

Bois non-déchet

PORTEUR DU PROJET

Göteborg Energi AB

PRODUCTION

Production de biométhane

TAILLE

20 MW_{th} (1800 Nm³_{CH₄}/h)

Premier démonstrateur de gazéification pour injection dans le réseau à partir de biomasse. Faute de rentabilité, le développement d'une unité commerciale qui était initialement prévu n'a finalement pas eu lieu.



©Göteborg Energi

Plainergie

2019 | Plaine de l'Ain



©GRTgaz



STATUT

En opération

INTRANTS

Déchets de bois et déchets non renouvelables

PORTEUR DU PROJET

Séché, Enosis, GRTgaz, EQTec et consortium

PRODUCTION

Production de biométhane

TAILLE

0,1 MW_{th} (10 Nm³_{CH₄}/h)

Développement d'un démonstrateur européen de transformation de déchets non valorisés en méthane injectable, par couplage de la pyrogazéification et de la méthanation biologique.

GAYA

Depuis 2017 | Saint-Fons

STATUT

En opération

INTRANTS

Bois non-déchets, déchets verts, CSR

PORTEUR DU PROJET

Engie et consortium

PRODUCTION

Production de biométhane non-injecté

TAILLE

0,6 MW_{th} (50 Nm³_{CH₄}/h)

Démonstrateur R&D semi-industriel, ayant pour objectif de démontrer la faisabilité technico-économique de la production de méthane par gazéification / méthanation. Les premiers m³ de gaz de qualité réseau obtenus par gazéification de CSR au monde ont été produits en 2020.



©Projet GAYA - Engie

Swindon Advanced Biofuels

2023 | Swindon

STATUT

En développement

INTRANTS

Bois-déchet et déchets non-dangereux locaux (8000 tonnes/an)

PORTEUR DU PROJET

Advanced Biofuels Solutions Ltd

PRODUCTION

Production de biométhane et CO₂

TAILLE

3,4 MW_{th} (300 Nm³_{CH₄}/h)

Développement en cours du premier démonstrateur commercial de gazéification pour injection, à partir de déchets bois, grâce à l'intégration d'une brique méthanation. Les premiers Nm³ de syngas propre ont été produits début 2024.



©ABSL

Cartographie des principaux projets phares

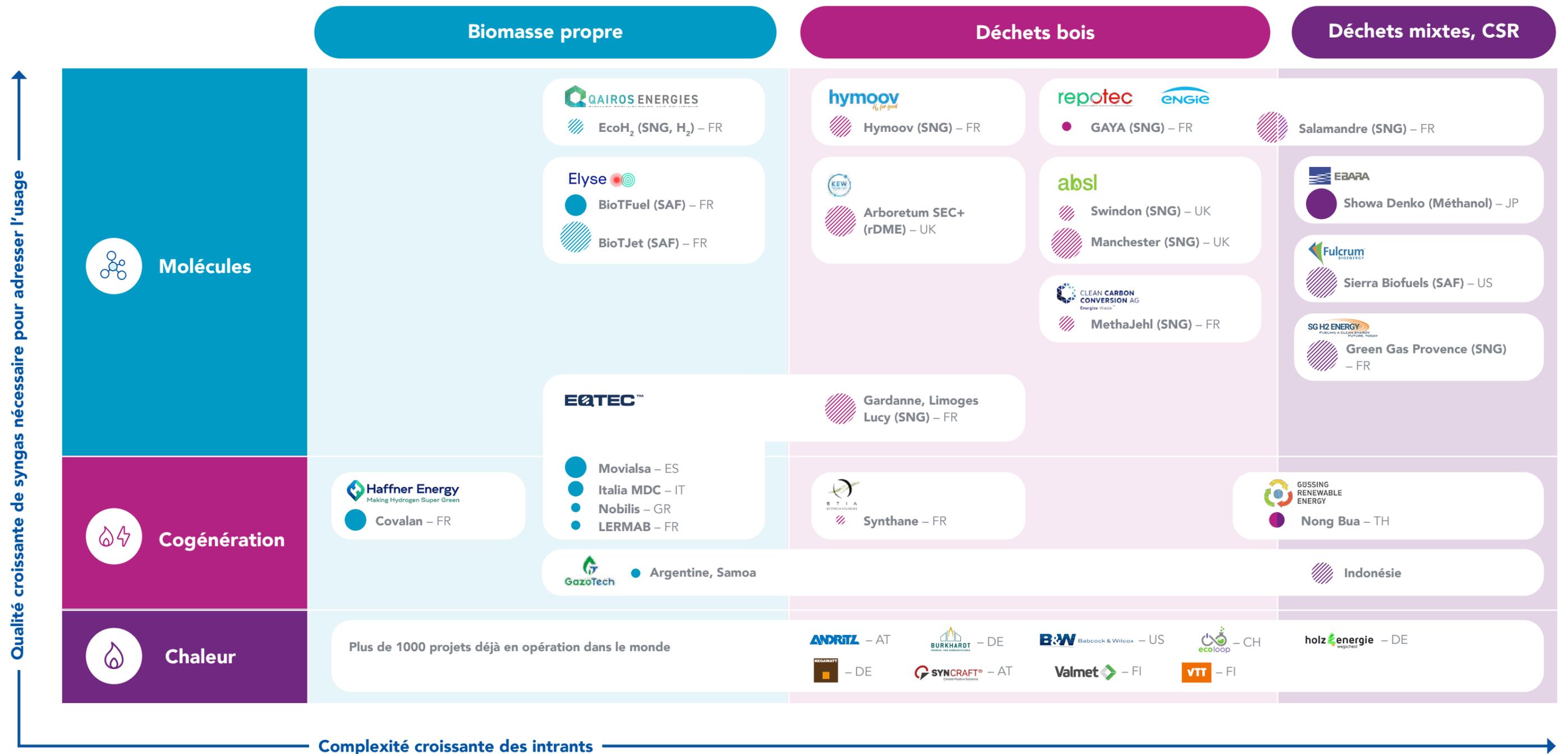
Hormis le projet d'Enerkem, la plupart des projets de pyrogazéification pour la production de molécules sont toujours en cours de développement

État du projet

- Existant
- À venir

Puissance entrante

- $\leq 1 \text{ MW}_{th} \sim 0,25\text{t/h}$
- $5 \text{ MW}_{th} \sim 1,25\text{t/h}$
- $10 \text{ MW}_{th} \sim 2,5\text{t/h}$
- $\geq 20 \text{ MW}_{th} \sim 5\text{t/h}$



Cartographie des technologies de la pyrogazéification

L'échelle de production et la nature des intrants déterminent le choix du réacteur de gazéification

Les réacteurs à « lit fixe » ont jusqu'à présent été largement utilisés pour les applications à petite échelle. L'évolution de la filière vers des unités de plus grande taille et pour une valorisation plus complexe des gaz pour injection devrait conduire à une utilisation plus fréquente des lits fluidisés et entraînés.

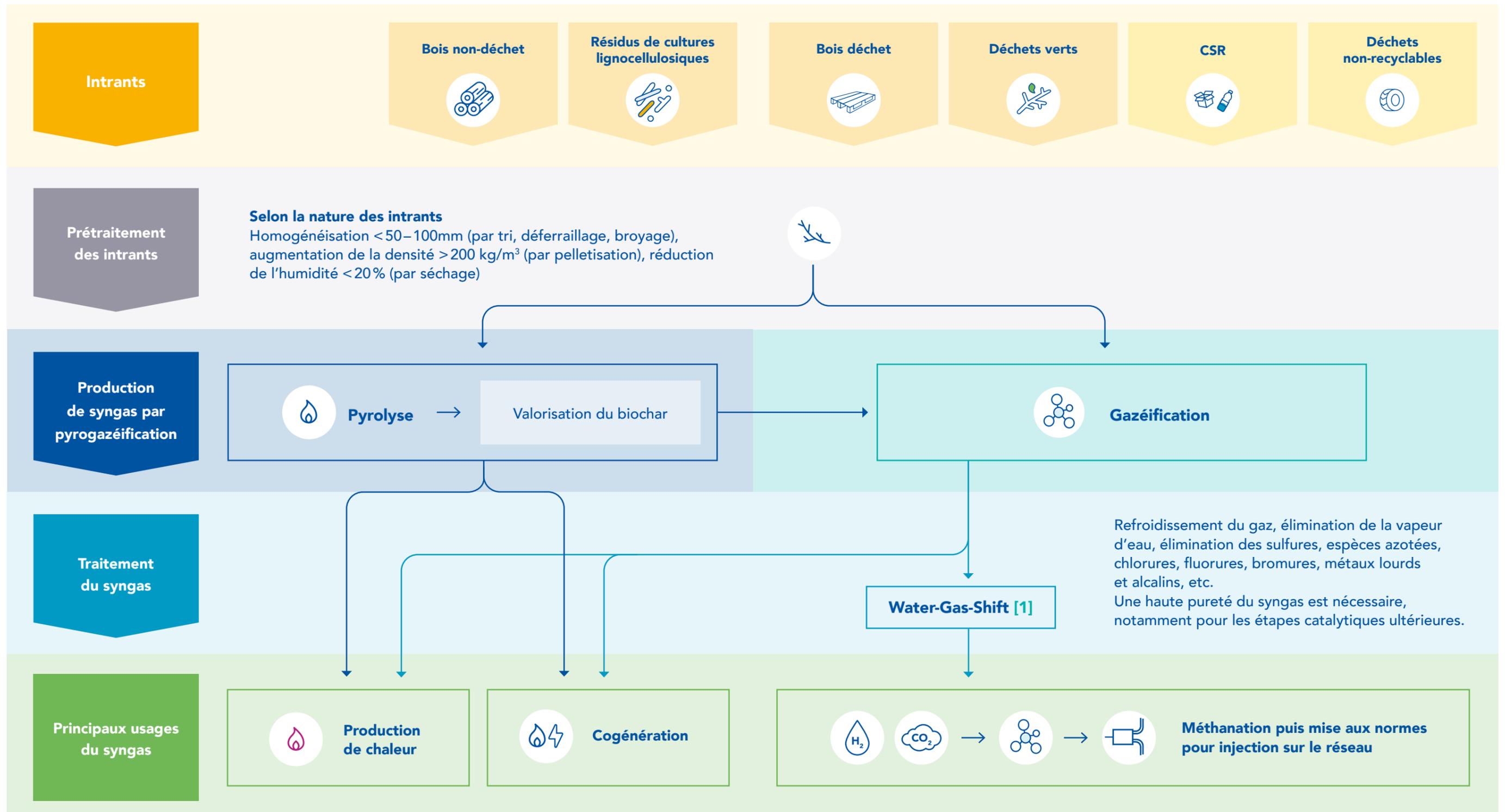


Technologie	Réacteur à lit fixe		Réacteur à lit fluidisé		Réacteur mixte	Réacteur à flux entraîné	Réacteur horizontal [1]
Type	Co-courant « downdraft »	Contre-courant « updraft »	Bouillonnant « bubbling »	Circulant « circulating »	Lit fluidisé + Combusteur		
Capacité	< 3 MW _{th}	< 20 MW _{th}	5–25 MW _{th}	10–100 MW _{th}	10–50 MW _{th}	50–1000 MW _{th}	1–5 MW _{th}
Température	800°C	800–1000°C	700–1000°C	700–1000°C	700–900°C	1400–1500°C	1100–1500°C
Pression	Atmosphérique	Atmosphérique	< 20 bar	< 10 bar	< 20 bar	10–30 bar	1–5 bar
Fournisseurs	GazoTech (FR)	Lurgi (DE) CHO Power (FR) AMEC Foster Wheeler (CH)	EQTEC (UK) Enerkem (CA) ABSL (UK) ANDRITZ Carbona (AU) Mitsubishi (JP)	AMEC Foster Wheeler (CH) Valmet (FIN)	REPOTEC (AT) TBE (US)	tkIS (DE) Choren (DE) Lurgi (DE)	SUNY Cobleskill (US) Clean Carbon Conversion (CH) ETIA (FR)

[1] Réacteur à tambour rotatif, vis, etc. La chaleur peut être apportée par une résistance thermique électrique.

Cartographie de la chaîne de production

© Stéphane Compoint



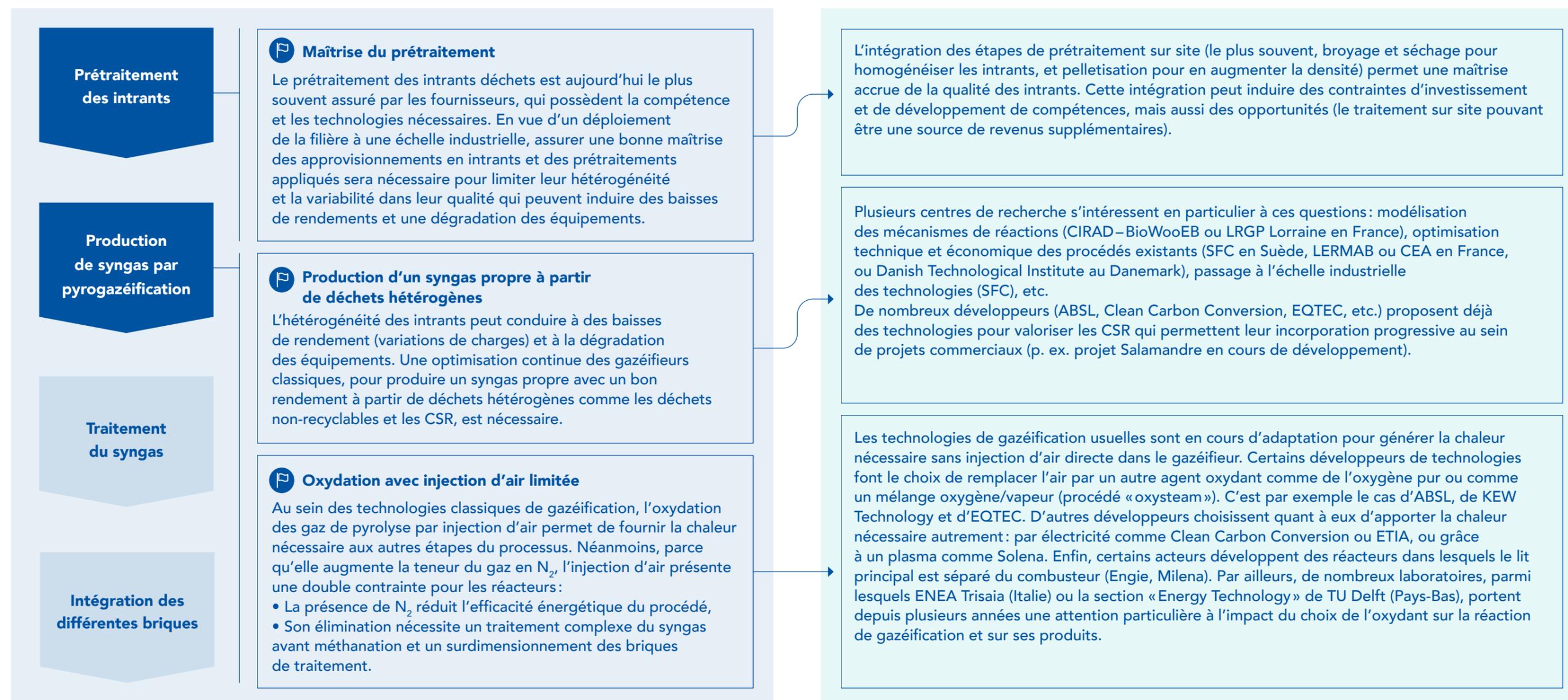
[1] L'étape de WGS permet d'accroître la proportion de H₂ pour favoriser la production de méthane lors de l'étape de méthanation ultérieure.

Enjeux et solutions techniques de la filière

Le développement de nouveaux gazéfieurs (ou l'adaptation des gazéfieurs existants) utilisant d'autres agents oxydants que l'air est un des enjeux technologiques majeurs de la filière

Enjeux techniques de la filière

Solutions R&D et innovations



Enjeux et solutions techniques de la filière

Focus sur le couplage gazéification et méthanation catalytique

L'intégration de systèmes de production de syngas et de méthanation a déjà été réalisée avec succès au sein de démonstrateurs. Leur couplage peut être encore optimisé en améliorant les procédés de traitement du syngas (1/2)

Enjeux techniques de la filière

Solutions R&D et innovations

Prétraitement des intrants

Production de syngas par pyrogazéification

Traitement du syngas

Intégration des différentes briques [1]

Optimisation du craquage du goudron

La formation de goudrons au cours de la gazéification représente un des enjeux majeurs de la filière. D'une part, réduire la présence des goudrons (qui contiennent 5 à 15% de l'énergie produite lors du processus) permet d'accroître l'efficacité énergétique du procédé. D'autre part, éliminer les goudrons formés est nécessaire pour éviter l'obstruction et la dégradation des équipements en aval, notamment les réacteurs de méthanation.

Élimination du sulfure et chlorure

On peut distinguer deux principaux types d'unités d'élimination du soufre :

- Les systèmes d'absorption (souvent par lavage à l'eau), matures, pour lesquels une optimisation de la consommation énergétique reste nécessaire,
- Les systèmes d'adsorption (souvent sur lit de charbon actif), moins matures, et pour lesquels le traitement des résidus solides en aval doit encore être amélioré.

Plusieurs stratégies R&D ont été adoptées ces dernières années pour améliorer l'élimination des goudrons :

- celle-ci peut avoir directement lieu à **l'intérieur du gazéifieur** : par un choix de conditions de réaction optimales (p. ex. réacteurs jouant sur les variations de température comme ceux développés par Clean Carbon Conversion), par de nouvelles conceptions de réacteurs (p. ex. réacteurs à plasma, gazéifieurs multi-étagés, etc.), ou par l'introduction de catalyseurs (p. ex. réacteurs à filtre catalytique à bougies développés par le projet européen UNIFHY);
- les goudrons peuvent aussi être éliminés **en sortie du gazéifieur** (filtres, épurateurs, craquage chimique, craquage thermique par oxydation partielle dans un second réacteur comme développé par KEW Technology et EQTEC, etc.)

Les stratégies d'élimination *in-situ* sont aujourd'hui de plus en plus matures et efficaces mais elles ne permettent néanmoins pas une élimination totale des goudrons. Leur combinaison avec des stratégies *ex-situ* peut alors être nécessaire pour atteindre des taux d'élimination supérieurs à 90 – 95% mais le passage à l'échelle de celles-ci doit encore être démontré.

Par ailleurs, la conversion des goudrons pour la production d'hydrocarbures renouvelables est un des sujets de recherche les plus étudiés sur la gazéification : par SFC (Suède), RAPSODEE (France), CIRAD-BioWooEB (France), LRGP (France), Danish Technological Institute (Danemark) et beaucoup d'autres laboratoires en France ou à l'étranger.

Plusieurs centres de recherche s'intéressent à ces enjeux, notamment à la modélisation (université de Liège en Belgique, université du Québec au Canada, université de Lorraine en France) et à l'optimisation des performances énergétiques et environnementales des colonnes d'absorption (Mines ParisTech en France).

[1] La méthanation et la production de syngas sont les deux principales briques de la filière pyrogazéification. D'autres systèmes peuvent compléter cette chaîne technologique comme les dispositifs de valorisation de CO₂.

Enjeux et solutions techniques de la filière

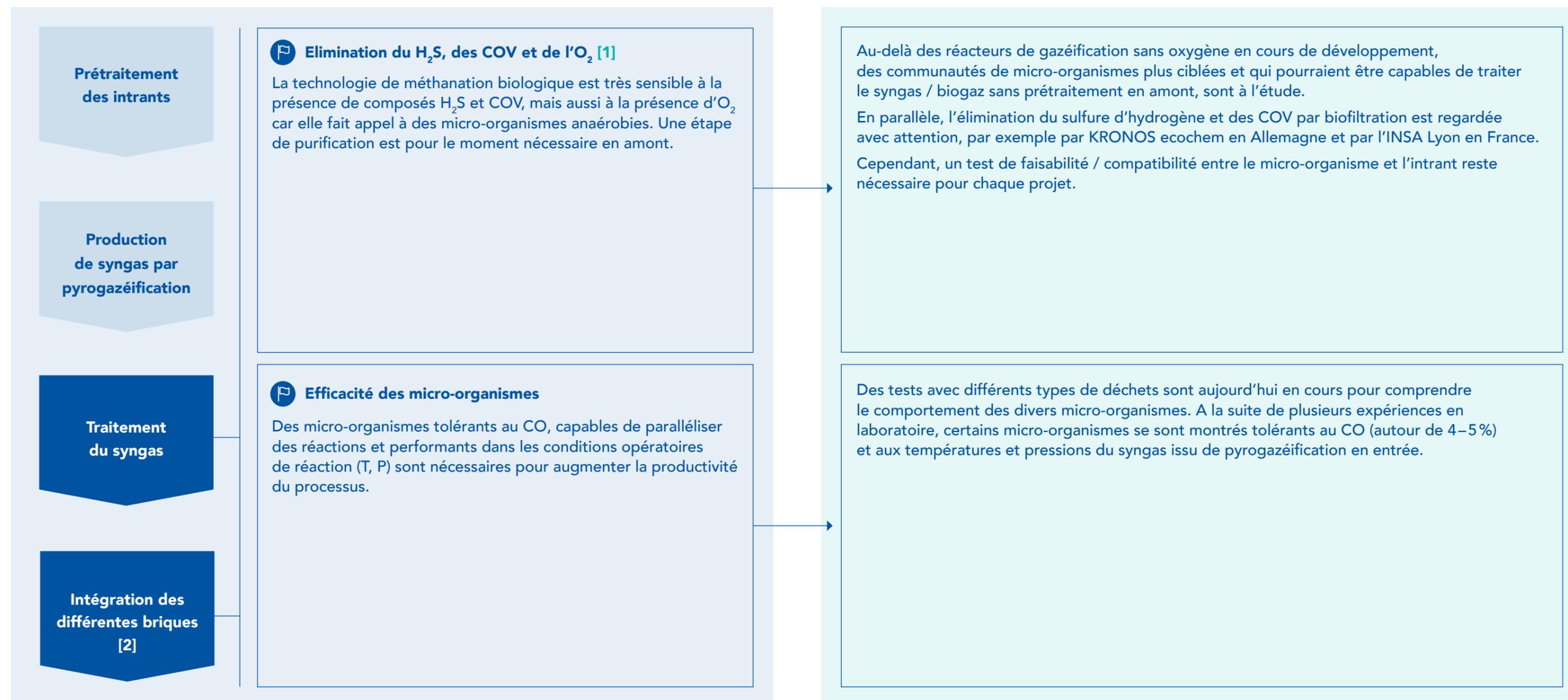


Focus sur le couplage gazéification et méthanation biologique

L'intégration de systèmes de production de syngas et de méthanation a déjà été réalisée avec succès au sein de démonstrateurs. Leur couplage peut être encore optimisé en améliorant les procédés de traitement du syngas (2/2)

Enjeux techniques de la filière

Solutions R&D et innovations



[1] H₂S – Sulfure d'hydrogène; COV – Composés Organiques Volatils (p. ex.: benzène, toluène);

[2] La méthanation et la production de syngas sont les deux principales briques de la filière pyrogazéification. D'autres systèmes peuvent compléter cette chaîne technologique comme les dispositifs de valorisation de CO₂.

Acteurs moteurs du développement de la filière

Première unité commerciale pour injection à partir de déchets de bois en Europe

Advanced Biofuel Solutions Ltd. (ABSL), développeur de technologies et de projets britannique, développe depuis plusieurs années un réacteur de gazéification « à lit fluidisé » (RadGas), basé sur une oxydation à l'oxygène et à la vapeur d'eau plutôt qu'à l'air, et avec craquage plasma des goudrons au sein d'un second réacteur.

Cette technologie est conçue pour fonctionner avec une large variété d'intrants : déchets ménagers, résidus de biomasse séchés, bois, résidus de broyage, huile de cuisson usagée, etc.

Jusqu'à présent, le fonctionnement de RadGas avait été démontré au sein d'unités pilotes, cumulant ainsi plus de 3 500 heures de fonctionnement. La technologie est

intégrée depuis plusieurs mois dans l'unité industrielle de production de Swindon, la première unité au monde à convertir des déchets ménagers en biométhane injectable dans le réseau. Swindon devrait commencer à injecter dans le réseau britannique dans les prochains mois (fin 2023–2024).

Approvisionnée en déchets organiques locaux, Swindon permettra théoriquement de produire jusqu'à 1 500 tonnes de SNG (c. 22 GWh) et 500 tonnes de H₂/an. De plus, la valorisation du CO₂ coproduit pour usage alimentaire évitera les rejets de gaz sur site.

TRL de la technologie  8-9



Développement d'une unité de gazéification pour injection en France



EQTEC est un développeur de technologies de gazéification irlandais, impliqué dans le développement de la filière grâce à ses différents projets en Europe (Grèce, Italie, Espagne etc.) et aux États-Unis.

Fort de plusieurs décennies d'expérience de R&D sur la gazéification, EQTEC propose

aujourd'hui une technologie de gazéifieur à lit fluidisé bouillonnant fonctionnant avec des intrants divers, notamment bois forestier ou déchets industriels et municipaux.

En France, EQTEC a récemment été sélectionné, aux côtés du groupe IDEX, pour le développement d'une unité de gazéification portée par la collectivité de Limoges. Cette unité aura vocation à traiter 40 000 tonnes de résidus et déchets de bois par an pour produire jusqu'à 100 GWh de méthane de synthèse qui approvisionneront les habitations et les industriels locaux.

TRL de la technologie  7-8

Méthanation biologique couplée à la pyrogazéification

Enosis, développeur français de technologies et de projets, développe des systèmes de méthanation biologique à partir de CO₂, de syngas de pyrogazéification ou de biogaz de méthanisation, pour produire du méthane ou de l'hydrogène.

Depuis 2014, Enosis a développé plusieurs prototypes de méthanation biologique (l'unité mobile Bimotep et l'unité préindustrielle couplée à la méthanisation Demetha) et participé à plusieurs projets de couplage de la pyrogazéification et de la méthanation biologique (p. ex. démonstrateur européen Plainergie).

La technologie développée par Enosis est basée sur une coculture de micro-organismes pour permettre une grande flexibilité vis-à-vis des intrants.

TRL de la technologie  7



Sources

Les principaux acteurs français de la filière sont fédérés par le [Club Pyrogazéification de l'ATEE](#).



[Global biomass conversion facilities](#)

IEA Bioenergy, 2023

[gazéification.info](#)

S3D, 2023

[A comprehensive review of primary strategies for tar removal in biomass gasification](#)

Cortazar et al., 2023

[Gasification of municipal solid waste: progress, challenges, and prospects](#)

Sajid et al., 2022

[AMI pyrogazéification pour injection - Webinaire de restitution](#)

NSE/GRTgaz, 2022

[Projets de production de gaz renouvelable et bas carbone par pyrogazéification pour injection dans les réseaux gaziers](#)

ODRÉ, Septembre 2022

[Filières gazéification: analyses des états de l'art et recommandation](#)

ADEME, 2022

[Biométhanation du syngas: Etude cinétique et mise en oeuvre à l'échelle pilote](#)

Figueras et al., 2021

[Benchmarking et sélection des technologies de pyrolyse et de gazéification adaptées à la valorisation des CSR et du Bois-B sous forme du gaz](#)

Iwunze, 2021

[Production d'un syngas par pyrogazéification de biomasse en vue d'une biométhanation](#)

Tchini Séverin Tanoh, 2021

[Craquage thermique des vapeurs de pyrolyse-gazéification de la biomasse en réacteur parfaitement auto-agité par jets gazeux](#)

Baumlin, 2018

[Pyrolyse, liquéfaction et gazéification de la biomasse](#)

Dufour et al., 2018

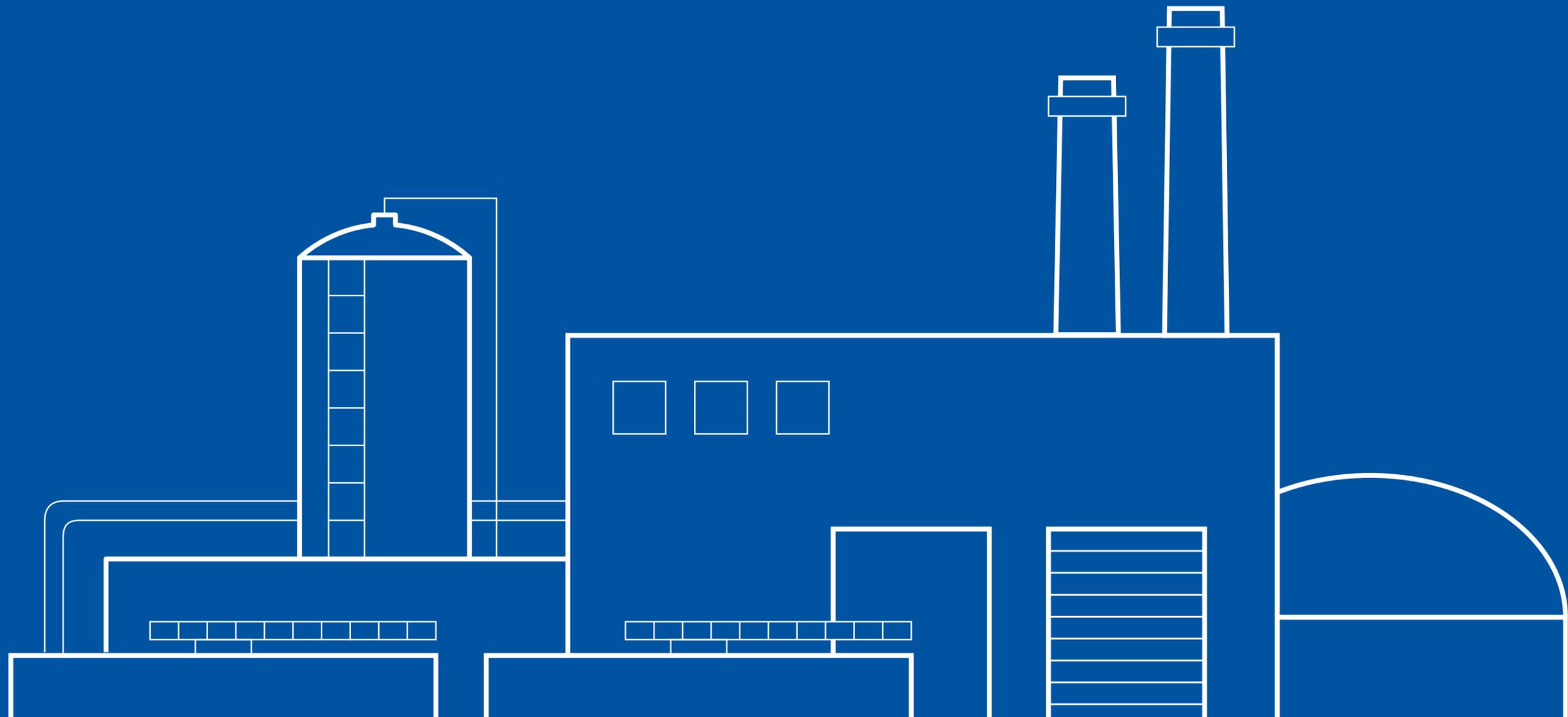
[Pyrolyse et gazéification, une filière complémentaire pour la transition énergétique et le développement de l'économie circulaire](#)

Conseil National de l'Industrie, 2015



Filière

Gazéification hydrothermale



La gazéification hydrothermale, de quoi parle-t-on ?

Qu'est-ce que la gazéification hydrothermale ?

La gazéification hydrothermale (GHT) est un procédé thermo-chimique impliquant le traitement de matières organiques (biomasse ou déchets) humides (d'environ 80%) ou miscibles à l'eau, à haute température (400 – 700°C) et à haute pression (250 – 300 bar). Le milieu réactionnel est constitué de l'eau contenue dans l'intrant dans son état supercritique [1].

Ce procédé transforme la matière carbonée en gaz de synthèse (ou « syngas ») et permet de récupérer des sels minéraux et de l'eau présents dans l'intrant. Le gaz en sortie se trouvant sous haute pression, il est intéressant de l'injecter dans le réseau.

Parce qu'elle permet le traitement des déchets non valorisables autrement et réduit la pollution atmosphérique, la gazéification hydrothermale est une alternative avantageuse à l'incinération, au retour au sol et à l'enfouissement.

Il existe aujourd'hui deux conditions opératoires : la gazéification hydrothermale avec catalyseur, permettant d'abaisser la température de conversion, et la gazéification hydrothermale à plus haute température, sans catalyseur.

[1] Fluide supercritique : fluide chauffé au-delà de sa température critique et comprimé au-dessus de sa pression critique sans devenir un solide (pour l'eau >374°C et >221 bar).

La filière gazéification hydrothermale permet la valorisation d'intrants humides

Les intrants doivent répondre à certaines caractéristiques techniques pour assurer une bonne performance de l'installation :

- Être pompables, ce qui se traduit souvent par une siccité, ou un taux de matière sèche (MS) sur matière brute (MB), de l'ordre de 20%.
- Posséder une part de matière organique (MO) la plus élevée possible dans la matière sèche (MS). Un ratio MO/MS d'au moins 50% est généralement recherché.



Boues de stations d'épuration urbaines et industrielles



Résidus industriels

résidus agroalimentaires (coproduits laitiers, fabrication du sucre, fruits et légumes, etc.) et pharmaceutiques



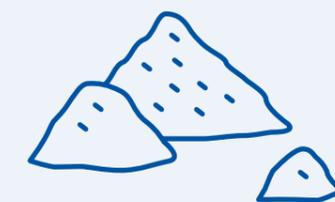
Boues de dragage



Déchets organiques urbains



Déchets et effluents agricoles
molasses, vinasses, etc.



Digestats de méthanisation non épandables

Description du procédé

Selon les conditions opératoires (temps de séjour, température, pression, taux de MS, etc.) de la gazéification hydrothermale, la quantité de CH₄ dans le gaz de synthèse peut varier entre 20 et 70%

La gazéification hydrothermale (GHT) produit des gaz à haute pression, valorisables pour l'injection dans le réseau gazier ou pour l'utilisation directe en station GNV ou dans l'industrie, et des coproduits tels que des sels minéraux et de l'eau, essentiellement valorisables pour la production de fertilisants et d'eau claire [1] (potable ou pour irrigation).

> 75% (avec récupération de chaleur)

RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE

La chaleur fatale à basse température (< 150°C) peut aussi être valorisée.

> 85%

TAUX DE CONVERSION DES INTRANTS

Le taux de conversion peut être proche de 100% quand des solvants inorganiques sont utilisés.

Équation chimique de la gazéification hydrothermale:

Matière humide (C_xH_yO_z + H₂O) → gaz de synthèse (CH₄, H₂, CO₂, C_xH_y) + sels minéraux + phase liquide (H₂O, NH₄⁺)

Proportion indicative des intrants:

Matière sèche de l'ordre de ~20%, l'essentiel étant que l'intrant soit pompable



L'INTRANT passe par une étape d'élimination de certains indésirables majeurs (p. ex. sable, fils) et une étape de préparation (broyage éventuel, concentration ou dilution et préchauffage) et d'homogénéisation. Il est ensuite comprimé.

UN SÉPARATEUR DE SELS est utilisé pour récupérer les sels minéraux qui pourront être valorisés et éviter de colmater le gazéifieur.

GHT À HAUTE TEMPÉRATURE

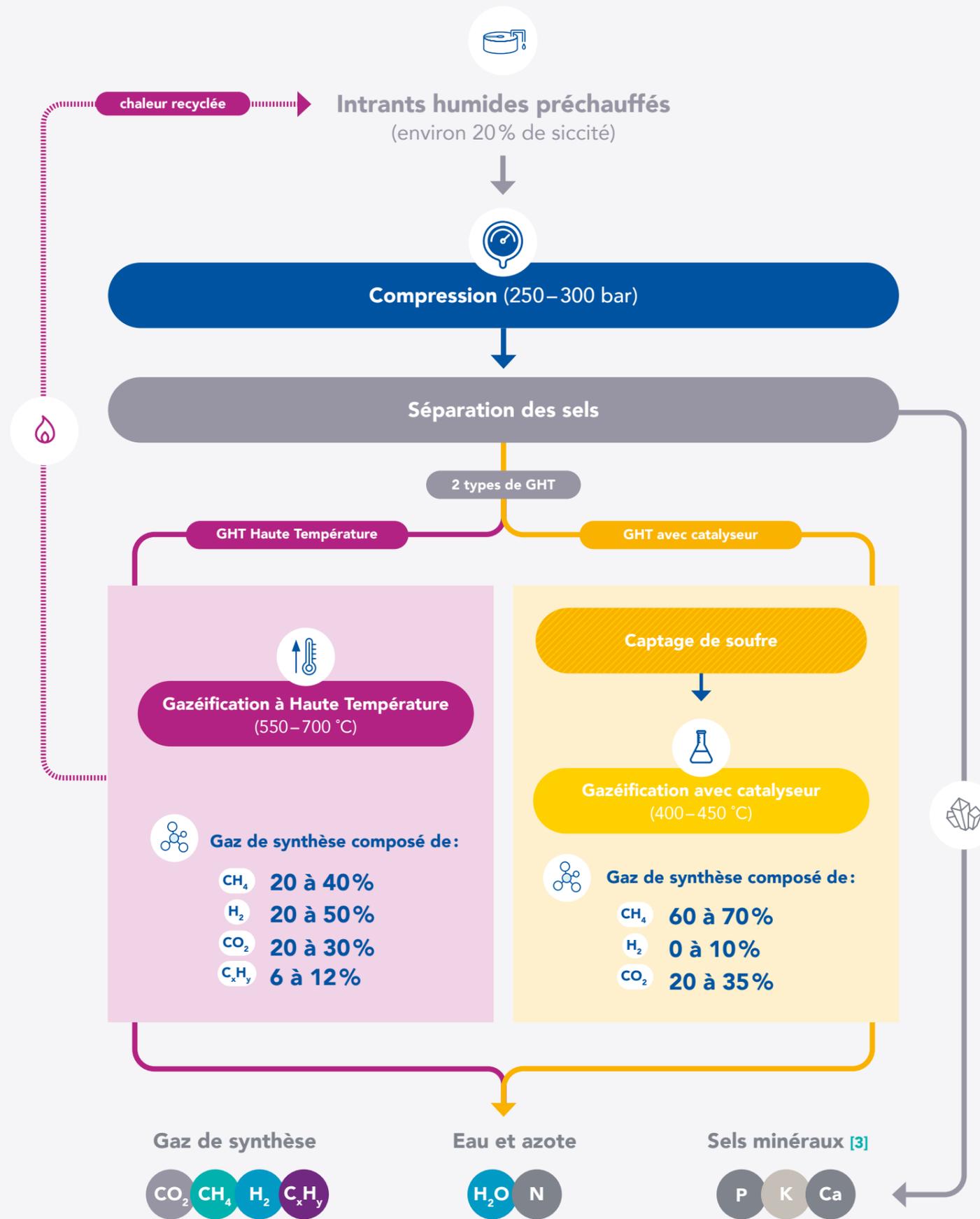
Dans le cas d'un procédé sans catalyseur à plus haute température, la partie organique des intrants peut être directement gazéifiée. Le syngas obtenu possède une partie plus importante d'hydrogène et d'hydrocarbures.

GHT AVEC CATALYSEUR

Dans le cas d'un procédé avec catalyseur [2] intégré dans le gazéifieur, un captage de soufre est nécessaire en amont pour protéger le catalyseur et maximiser leur durée de vie. L'étape de gazéification conduit ensuite à la formation d'un syngas plus riche en méthane avec moins de H₂.

Le procédé génère trois coproduits. Les sels minéraux sont obtenus en amont de la gazéification, lors de la séparation des sels, tandis que l'eau azotée et le gaz de synthèse sont obtenus en sortie du gazéifieur.

Proportion indicative des produits:



[1] Après post-traitement;

[2] Les catalyseurs peuvent être homogènes (p. ex. métaux, oxydes ionocovalents, oxydes ioniques) ou hétérogènes (p. ex. hydroxydes et carbonates). [Lien vers la veille](#);

[3] Il peut y avoir aussi des métaux ou d'autres composants solides précipités à haute pression.

Quelques projets pionniers pour la filière

Plusieurs projets décisifs pour le développement de la filière ont vu le jour au cours des dernières années

Avec une seule unité industrielle au monde, située aux Pays-Bas, et un nombre encore faible d'acteurs R&D et équipementiers, cette filière prometteuse doit encore se développer pour arriver à maturité. On constate cependant au cours des dernières années plusieurs projets dans le monde permettant de bénéficier de nouveaux retours d'expérience sur cette technologie et illustrant l'intérêt croissant des acteurs industriels pour cette filière à fort potentiel.

ALLEMAGNE

L'Allemagne a été pionnière de la gazéification hydrothermale en Europe avec le projet VERENA du Karlsruhe Institut of Technology (KIT) qui a été une réussite et a inspiré d'autres développeurs européens.

PROJET VERENA

Depuis 2004 | Karlsruhe
Karlsruhe Institute of Technology | 100 kg/h

GHT à haute température

Le projet VERENA a été la première unité pilote préindustrielle de gazéification hydrothermale au monde (100 kg/h).



©KIT/Markus Breig

ÉTATS-UNIS

Les États-Unis ont été un des premiers pays à s'intéresser aux procédés hydrothermaux : c'est au MIT (Massachusetts Institute of Technology) que la première expérience a été rapportée. C'est aussi aux États-Unis, au PNNL (Pacific Northwest National Laboratory), que la gazéification hydrothermale avec catalyse a été pour la première fois introduite.

PROJET GENIFUEL

Depuis 2017 | Amérique du Nord
Genifuel | 500 kg/h

GHT avec catalyseur

Le projet Genifuel a plusieurs installations de démonstration quasi-industrielles en cours (0,5 t/h). Grâce à une unité mobile, différents intrants sont testés : des algues et des boues de STEU [1].



©Genifuel Corporation

FRANCE

En France, peu de projets sont pour le moment actifs mais un groupe de travail sur la filière soutient son développement depuis 2021. Il existe à date une seule installation d'essais au CEA LITEN (10 kg/h) ; d'autres projets devraient voir le jour d'ici 2024.

PROJET GHAMA

Prévu en 2026 | Montoir-de-Bretagne
Leroux & Lotz Technologies | 2 t/h

GHT à haute température

Le projet GHAMA est le premier projet de démonstration annoncé en France de 2 t/h (2 MW_{th}). Sa mise en œuvre dépend toutefois du cadre de soutien public qui lui sera accessible d'ici là.



©Leroux&Lotz

PAYS-BAS

Les Pays-Bas sont leaders mondiaux sur la technologie de gazéification hydrothermale avec un fort soutien public. La filière, inscrite dans la feuille de route énergétique du pays, est considérée comme le mode de production de gaz renouvelable privilégié (avec 11,2 TWh, équivalent à 57 % de la production de gaz renouvelable en 2030).

PROJET ALKMAAR

Depuis 2018 | Alkmaar
SCW Systems | 2 à 4 t/h par module

GHT à haute température

Le projet Alkmaar, porté par SCW Systems, est la première unité industrielle mondiale de gazéification hydrothermale pour injection dans le réseau (~20 MW_{SNG} avec 4 modules de 4 t/h). Une extension de 2 autres unités de 40 MW_{SNG} chacune est prévue.



©SCW Systems

SUISSE

La Suisse a soutenu très fortement les travaux de développement de la gazéification hydrothermale depuis les années 2000. Sa principale motivation est de trouver une solution alternative à l'incinération des boues et digestats de STEU [1] (épandage interdit depuis 2006 ; obligation de récupérer le phosphore dans les boues et digestats à partir de 2026).

PROJET HYDROPILOT

Depuis 2020 | Villigen
TreaTech/PSI | 110 kg/h

GHT avec catalyseur

Après deux prototypes de gazéifieur avec catalyseurs, un pilote de 110 kg/h a été mis en opération. Il traite les boues et digestats de STEU. Des unités industrielles sont attendues dès 2025.



©Institut Paul Scherrer/Markus Fischer

[1] STEU : Stations de Traitement des Eaux Usées

Cartographie des principaux projets phares

La GHT se développe prioritairement pour la valorisation de boues de STEU qui sont des intrants disponibles en importante quantité et difficiles à valoriser par d'autres filières énergétiques. Avec la plus grande unité en opération, la GHT haute température est la plus avancée

État du projet

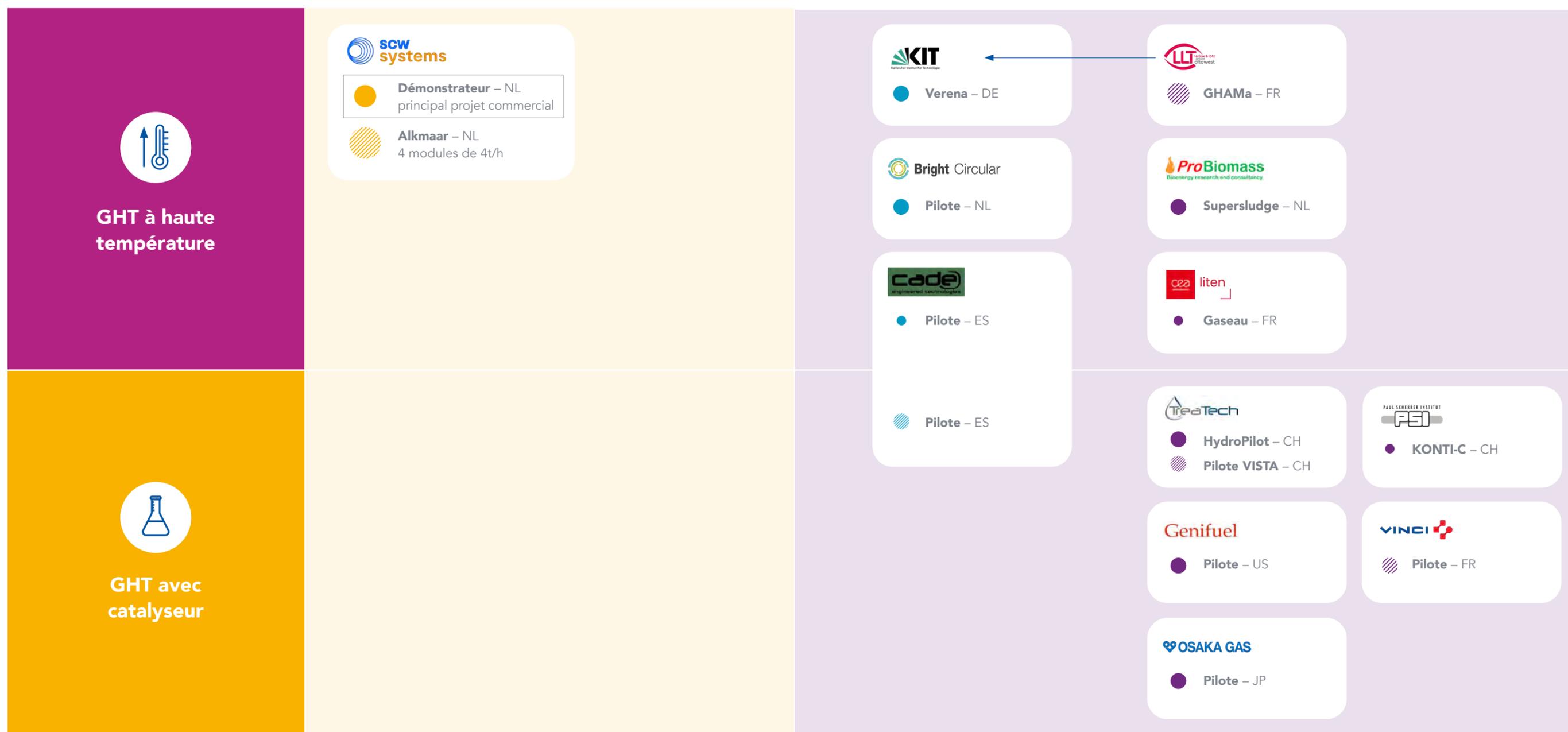
- Existant
- ▨ À venir
- s'appuie sur la technologie de

Débit d'intrants

- 1–100 kgMB/h
- 100–1000 kgMB/h
- 1000–4000 kgMB/h
- >4000 kgMB/h

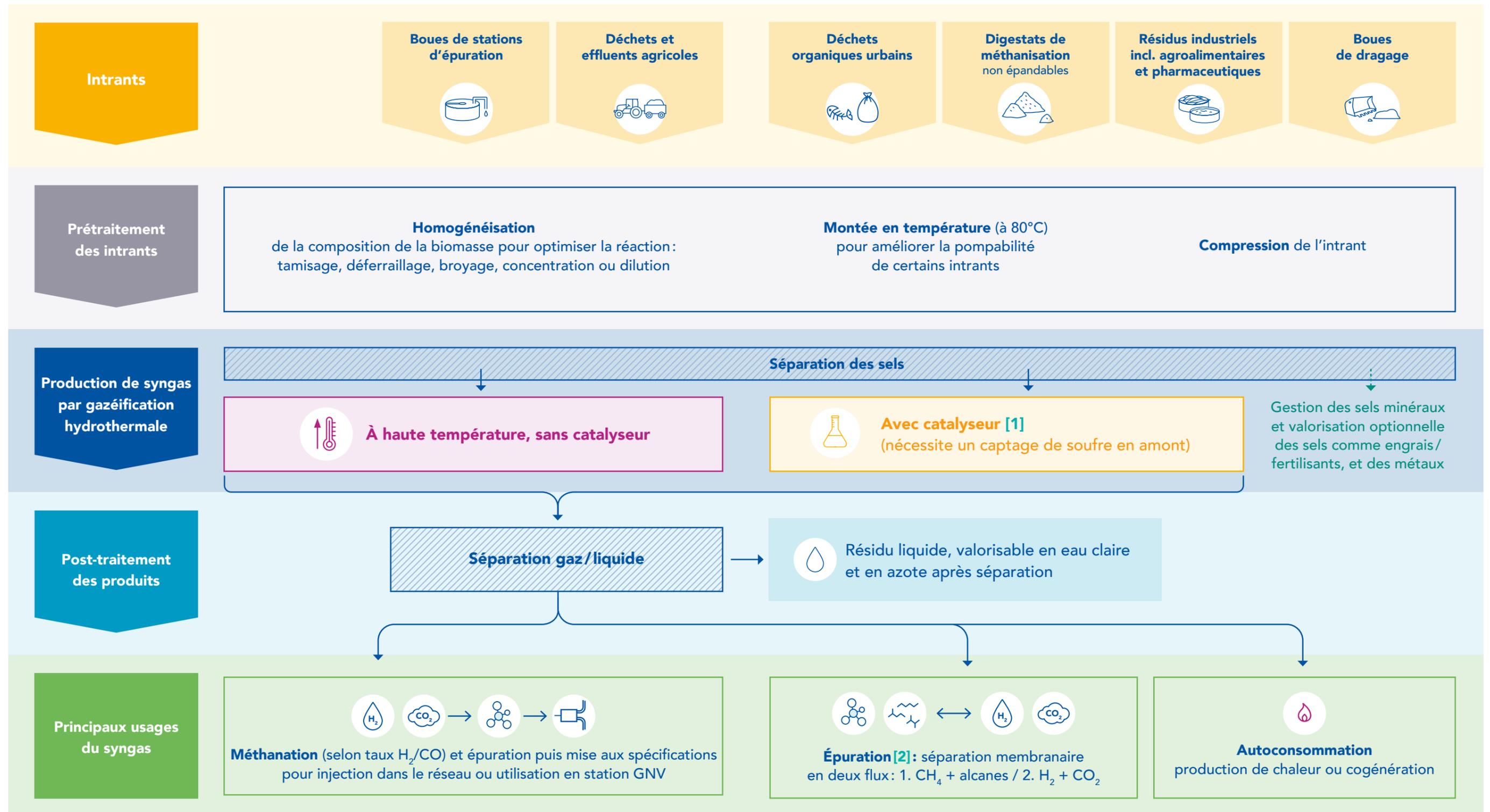
Intrants purs [1] (p. ex. glycérine)

Intrants complexes (p. ex. boues de STEU)



Note: Représentation non exhaustive –listant les projets majeurs
[1] Absence de sels et éléments inorganiques.

Cartographie de la chaîne de production



[1] Aujourd'hui composé par défaut de ruthénium, un métal rare;

[2] On peut maximiser la production de méthane par co-injection d'hydrogène dans le gazéifieur.

Enjeux et solutions techniques de la filière

L'injection des intrants, leur caractérisation et la séparation des sels sont trois verrous majeurs liés à la phase de prétraitement des matières premières

Enjeux techniques de la filière

Solutions R&D et innovations

Prétraitement des intrants

Production de syngas par gazéification hydrothermale

Post-traitement des produits

Intégration des différentes briques

Caractérisation des intrants pertinents

Selon la nature des intrants, différentes étapes de prétraitement sont nécessaires : enlever le sable et les composés inorganiques des boues de dragage, défilassage et homogénéisation des boues de STEU, etc.

Des retours d'expérience sont nécessaires pour optimiser les paramètres de fonctionnement selon les propriétés des intrants (pouvoir calorifique élevé, viscosité adaptée).

Injection continue des intrants à haute pression

Certains intrants (p. ex. boues de STEU) peuvent être abrasifs ou corrosifs et contenir des particules et éléments inorganiques, ce qui complexifie leur manipulation.

Par ailleurs, un taux de MS élevé limite l'efficacité du pompage et peut endommager la pompe.

Le ratio débit / pression n'est pas toujours possible à maîtriser avec les solutions commerciales existantes.

Le déploiement d'unités mobiles (Genifuel, TreaTech) pour tester différents types de flux en conditions réelles permettrait de confirmer les nombreux résultats de laboratoire déjà disponibles (p. ex. thèses réalisées au MIT). A priori, la GHT se concentrera sur des flux peu valorisés pour le moment comme les boues de STEU.

Le fonctionnement en discontinu a permis d'acquérir une compréhension fondamentale sur les conditions du processus. Le passage en continu est l'étape nécessaire pour passer ensuite à l'échelle industrielle. Des efforts de R&D, notamment dans plusieurs centres de recherche dans le monde (Aalborg, Cornell, Paul Scherrer Institut) sont en cours pour développer des systèmes d'injection permettant de traiter des flux complexes en continu (p. ex. le pilote mobile VISTA de TreaTech).

À la une en 2023

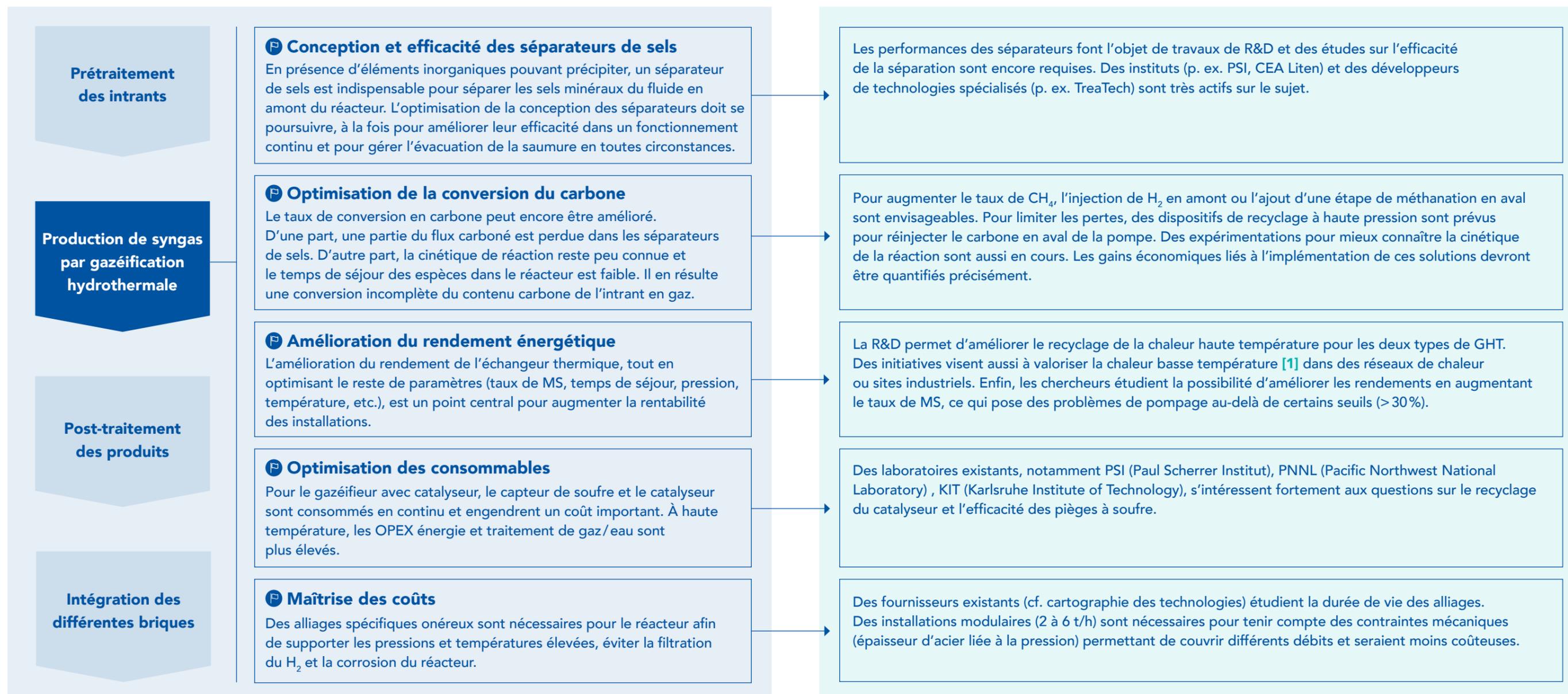
Depuis 2021, des travaux du CEA (projet GAZHYVERT) ont permis d'identifier et sont en train d'adresser des verrous tels que l'injection des intrants en développant une pompe performante et un séparateur de sels brevetés.

Enjeux et solutions techniques de la filière

La production de syngas est mature; les efforts portent sur la réduction des coûts ainsi que l'amélioration des rendements énergétiques et du taux de conversion du carbone

Enjeux techniques de la filière

Solutions R&D et innovations



[1] Température < 150°C.

Enjeux et solutions techniques de la filière

Plusieurs pistes d'optimisation de la récupération des coproduits sont aujourd'hui à l'étude

Enjeux techniques de la filière

Solutions R&D et innovations

Prétraitement des intrants

Production de syngas par gazéification hydrothermale

Post-traitement des produits

Intégration des différentes briques

🚩 Récupération et valorisation des produits et coproduits

Syngas : Le gaz de synthèse en sortie est le produit principal mais des étapes supplémentaires sont nécessaires pour pouvoir valoriser le méthane notamment par injection. Deux méthodes sont généralement employées. La première consiste à épurer le syngas (en général par séparation membranaire). La deuxième réside dans l'utilisation d'une brique de méthanation. Étant donné le peu de retours d'expérience sur la filière et les conditions opératoires élevées, l'intégration de cette brique reste encore à démontrer.

Sels minéraux : Les technologies de traitement de la saumure en sortie du séparateur de sels doivent être optimisées pour récupérer les éléments valorisables (p. ex. le phosphore, représentant 10 à 15% des sels pour les boues de STEU).

Eau : L'eau restante après post-traitement pourrait aussi être utilisée pour l'irrigation par exemple. L'azote récupérée pourrait aussi être valorisée.

CO₂ : La part significative de CO₂ qui reste dans le syngas (20 à 35%) pourrait faire l'objet d'une valorisation pour utilisation par des secteurs consommateurs : agroalimentaire, chimie, carburants, etc.

H₂ : Des études technico-économiques pourraient être menées afin de déterminer s'il est attractif de valoriser l'hydrogène présent dans le gaz (0-50%). Compte-tenu de la part marginale d'H₂, les briques de récupération/valorisation doivent être adaptées et optimisées.

Des technologies prometteuses sont en cours de développement.

Syngas : Les projets de plus en plus nombreux de pyrogazéification pour injection (cf. cartographie dédiée) devraient fournir des retours d'expérience utiles sur les méthodes de couplage entre une unité de production de syngas et une unité de méthanation.

Sels minéraux : Pour la récupération des sels, un traitement chimique, un séparateur de sels en plusieurs étapes ou une séparation par cyclone en amont sont à l'étude. La valorisation du phosphore requiert des efforts de R&D car le procédé n'est pas encore connu.

Eau : La qualité de l'eau en sortie de procédé nécessite des études plus approfondies, pour chaque technologie (haute température et catalytique), afin d'identifier les éventuels besoins de post-traitement.

CO₂ : Pour valoriser le CO₂, plusieurs voies sont matures (cf. description dans la partie méthanisation). L'enjeu réside désormais surtout dans la capacité de la filière à se structurer et à développer des modèles économiques viables pour les unités.

H₂ : Pas de solution majeure à l'étude répertoriée.

Enjeux et solutions techniques de la filière

Les tests sur des unités industrielles seront clés pour valider la bonne intégration de toutes les briques technologiques constituant le système

Enjeux techniques de la filière

Solutions R&D et innovations

Prétraitement
des intrants

Production de syngas
par gazéification
hydrothermale

Post-traitement
des produits

Intégration des
différentes briques

Intégration des différentes briques

Peu de retours d'expérience sont existants de nos jours : les procédés ont été testés sur plusieurs typologies d'intrants, mais généralement à l'échelle pilote (faibles débits) et par lots (batch). Le fonctionnement en continu doit encore être validé.

Plusieurs démonstrateurs de taille intermédiaire (0,2–0,5 t/h) sont en cours de construction ou en développement et permettront des retours d'expérience sur le fonctionnement en continu, pour accélérer l'industrialisation de la technologie (p.ex. le pilote VISTA de TreaTech en Suisse, le projet Salamanque de Cade en Espagne, le pilote de Genifuel au Canada).

Acteurs moteurs du développement de la filière

La gazéification hydrothermale à haute température et sans catalyseur est plus mature et les capacités développées sont plus importantes



GHT à haute température

Gazéification hydrothermale à haute température à échelle industrielle



SCW Systems, développeur de technologies et de projets hollandais, est la société la plus avancée sur la GHT au monde avec une installation industrielle de 2 MW mise en service en 2021, et un passage à l'échelle à environ 20 MW finalisé en 2023. SCW Systems a un souhait de massification de ses installations: en 2030, 10 TWh/an aux Pays-Bas et 40 TWh/an en Europe.

Son premier prototype en 2014 a rencontré un obstacle majeur concernant l'évacuation des composés inorganiques de l'installation.

SCW Systems a déposé plusieurs brevets privés ayant levé cet obstacle. Avec son démonstrateur, en 2018, plusieurs types d'intrants ont été testés ainsi que des matériaux pour la robustesse de l'usine.

SCW Systems mise également sur la minéralisation du CO₂ en excès. La société a développé et breveté un procédé capable de transformer le CO₂ en poudre de carbone, qui est de plus éligible à l'obtention des crédits carbone.

TRL de la technologie  8-9

Pionnier français de la gazéification hydrothermale à haute température



Leroux & Lotz Technologies, fournisseur d'équipement français depuis 1946 et faisant partie du groupe Altawest, développe le projet de gazéification hydrothermale le plus avancé en France. Il s'agit de gazéification hydrothermale à haute température, sans catalyseur, qui s'appuie sur le procédé initialement développé par Karlsruhe Institut of Technology (KIT).

Grâce au projet de démonstration GHAMa, Leroux & Lotz sera en mesure de commercialiser sa propre technologie de gazéification hydrothermale à haute température à partir de 2025/2026. La taille des installations sera de 4 à 8 t/h, capables de traiter des déchets industriels, de collectivités et de l'agriculture.

TRL de la technologie  5-6

Le projet GHAMa vise à traiter 2 t/h (2 MW_{th}) de déchets, notamment des boues de STEU. Sa mise en œuvre, prévue fin 2026, dépend toutefois du cadre de soutien public qui lui sera accessible d'ici là.

Acteurs moteurs du développement de la filière

La gazéification hydrothermale avec catalyseur est au stade de démonstration mais vise une commercialisation dans les prochaines années

 GHT avec catalyseur

Gazéification hydrothermale avec catalyse pour valoriser le syngas, l'eau et les sels minéraux



©M. Fischer, Paul Scherrer Institute, 2020

TreaTech, développeur suisse de technologies de projets depuis 2015, se concentre sur la gazéification hydrothermale avec catalyse. Cette technologie permet d'obtenir un syngas très riche en méthane (70%) avec une température plus basse, de 400°C.

Avec le Paul Scherrer Institut (PSI), l'entreprise a développé une unité quasi industrielle qui traite 110 kg/h de déchets. TreaTech dispose par ailleurs d'une technologie de séparateurs de sels optimisée pour le traitement de boues STEU.

Poussés par les interdictions nationales d'épandage de boues et obligation de récupération maximale du phosphore dans les boues, TreaTech et le PSI travaillent sur un procédé industrialisable pour revaloriser le phosphore.

TreaTech vise des unités opérationnelles dès 2025 pour traiter des boues de STEU et des déchets organiques industriels (capacité de 2 à 4 t/h). Fin 2023, elle aura une installation pilote mobilisable chez le client.

TRL de la technologie  7-8

Liquéfaction et gazéification hydrothermale avec catalyseur en série



©Genifuel Corporation

Genifuel, développeur américain de technologies depuis 2006, possède la seule unité mobile commerciale au monde avec une technologie de gazéification hydrothermale avec catalyseur brevetée en collaboration avec le PNNL (Pacific Northwest National Laboratory). Le procédé fonctionne à 350°C et 200 bar.

Les systèmes développés par Genifuel peuvent fonctionner en mode liquéfaction hydrothermale, gazéification hydrothermale catalytique ou les deux à la fois (en série). Avec le mode en série, le système peut convertir plus de 85% du carbone des intrants en syngas.

TRL de la technologie  7-8

Plus de 100 types d'intrants ont pu être testés et depuis 2017, Genifuel est en train de mettre en service plusieurs démonstrateurs qui permettront de tester différents intrants à l'échelle quasi-industrielle : des algues et des boues de STEU à Vancouver et en Floride.

Sources

[Gazéification hydrothermale](#)

Livre Blanc, Groupe de Travail National Gazéification Hydrothermale, Janvier 2023

[La Gazéification Hydrothermale: solution d'avenir pour la valorisation des effluents liquides](#)

GRDF, Juin 2022

[La Gazéification Hydrothermale](#)

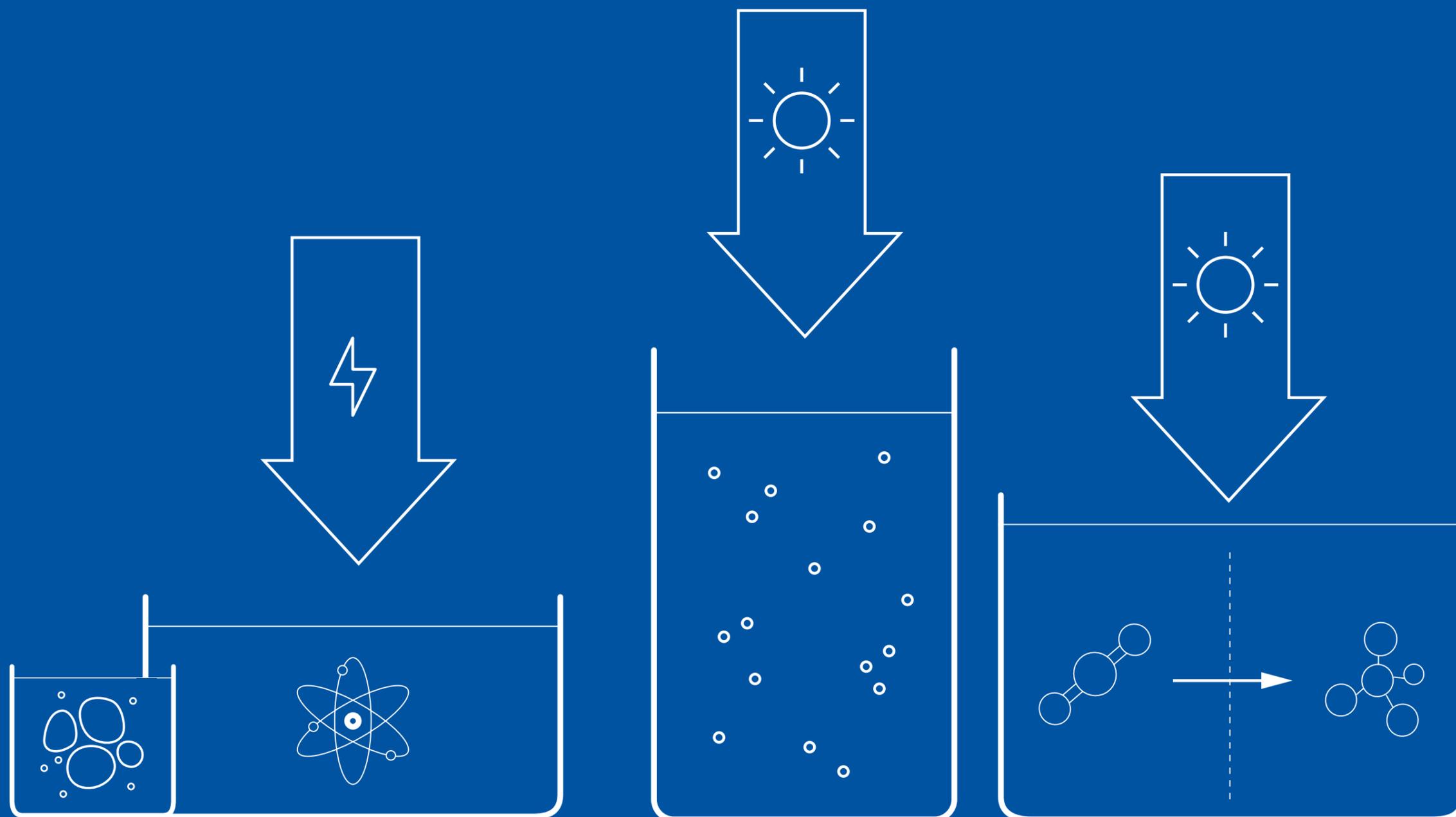
GRT gaz, Mai 2022

[Potentiel de la Gazéification Hydrothermale en France](#)

GRT gaz, Octobre 2019



Filières
Émergentes

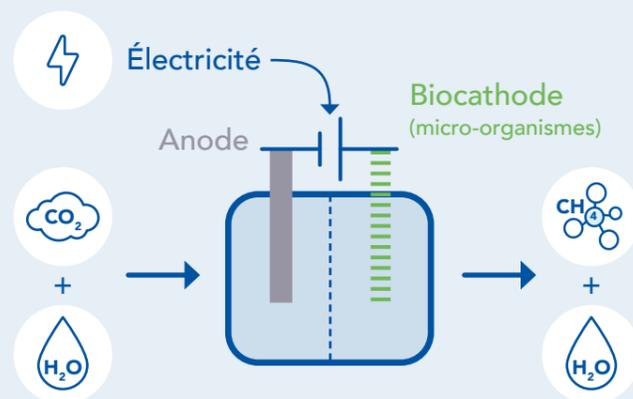


Les différentes filières émergentes

4 filières émergentes de production de gaz verts ont été identifiées, quelles sont-elles ?

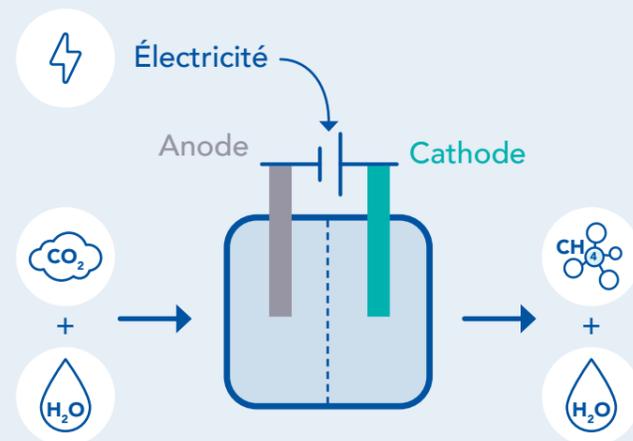
Électrométhanogénèse

Le processus d'électrométhanogénèse fait intervenir des micro-organismes qui transforment le CO_2 en méthane quand est appliqué un courant électrique entre deux électrodes.



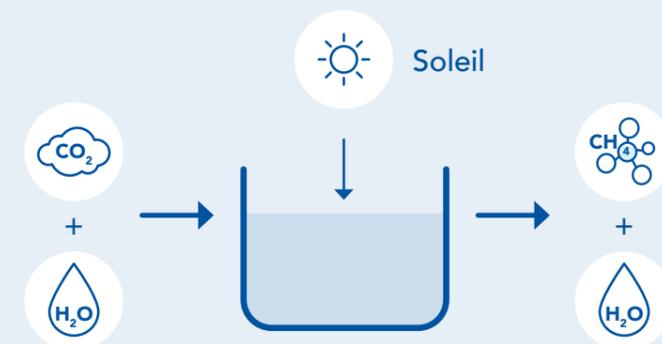
Électroréduction du CO_2

L'électroréduction du CO_2 est une technique électrochimique qui permet de transformer du CO_2 en molécules carbonées telles que le méthane. Le procédé nécessite un apport d'électricité afin d'engendrer l'oxydation de l'eau. Cette réaction libère de l'oxygène, des électrons et des protons qui serviront à briser la liaison $\text{C}=\text{O}$ et former des composés hydrogénés.



Photoréduction du CO_2

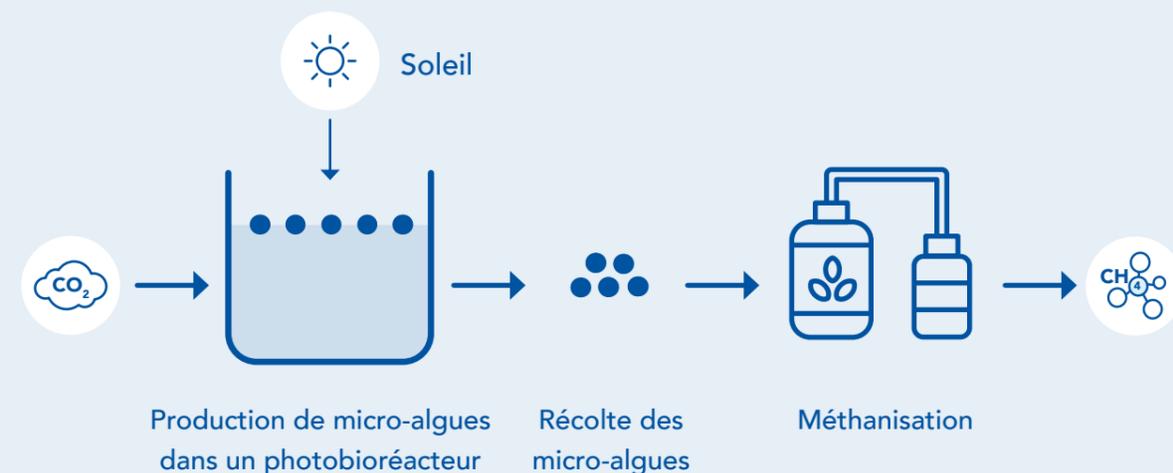
La photoréduction met en jeu les mêmes réactions que l'électroréduction, mais se différencie par sa durabilité. En effet, l'énergie nécessaire pour donner lieu à la réduction du CO_2 provient uniquement de la lumière du soleil.



Solution aqueuse avec sensibilisateur (semi-conducteur ou molécule organique)

Photobioréaction

La photobioréaction désigne un procédé de culture d'algues dans des photobioréacteurs. Les micro-algues sont des organismes aquatiques de très petite taille, qui croissent en absorbant le CO_2 et en le transformant en oxygène, grâce à la photosynthèse. Elles peuvent ensuite être utilisées pour produire du biogaz, car elles sont une source de biomasse particulièrement adaptée à la méthanisation.

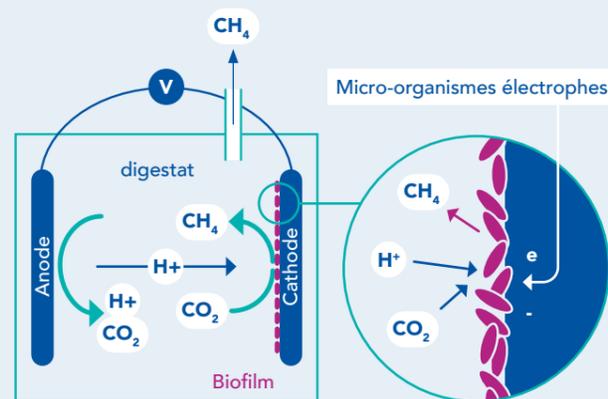


Description du procédé d'électrométhanogénèse

L'électrométhanogénèse, une filière émergente permettant de favoriser la production de méthane grâce aux micro-organismes

L'électrométhanogénèse permet d'augmenter significativement la quantité de biogaz et sa concentration en méthane [1]

Le processus d'électrométhanogénèse fait intervenir des micro-organismes qui transforment le CO₂ en méthane quand est appliqué un courant électrique entre deux électrodes (une anode et une biocathode). Sous tension, l'activité des micro-organismes du biofilm fixé sur les électrodes est stimulée et permet d'augmenter la production et/ou la qualité du biogaz.



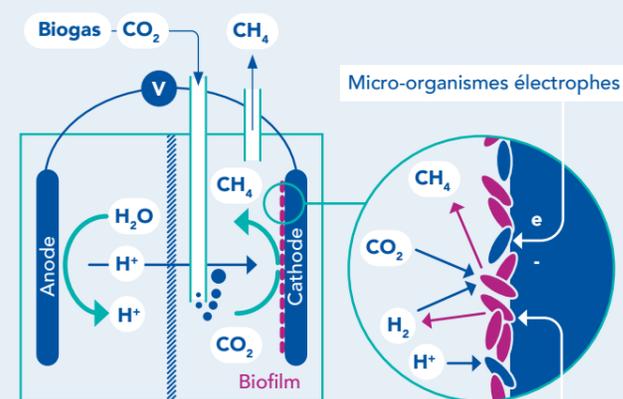
Réacteur à 1 chambre :

Augmentation de la production de biogaz



L'électrométhanogénèse se situe à la frontière entre l'électrolyse (production de H₂ in situ) et la méthanation biologique (conversion de H₂ et CO₂ en CH₄).

Pour les unités de méthanisation, l'électrométhanogénèse représenterait une opportunité d'augmenter la production de biogaz de 50 % à 70 % et la concentration en méthane de 20 % à 30 % [1].



Réacteur à 2 chambres :

Valorisation du biogaz vers un pourcentage élevé de CH₄



De nombreux chercheurs s'intéressent à cette filière émergente

Le premier papier scientifique s'intéressant à l'électrométhanogénèse est publié en 2009 par le MIT. Depuis, l'intérêt pour cette filière n'a cessé de croître.

Le nombre de papiers scientifiques relatifs aux systèmes bioélectrochimiques a connu une croissance exponentielle ces dernières années.

Nombre de papiers scientifiques publiés par an sur les systèmes bioélectrochimiques



Cette filière pourrait émerger rapidement dans les prochaines années au regard des avantages et défis restants à relever

Deux défis existent aujourd'hui concernant le déploiement de la technologie à une chambre à plus grande échelle : les coûts d'intégration des électrodes dans le digestat sont élevés et la résilience des biofilms dans la durée peut être améliorée.

Les avantages liés à cette filière sont d'une part la production accrue de biogaz et biométhane et d'autre part la stabilité de cette production y compris dans le cas où le digestat changerait de composition.

Actuellement, la maturité de cette technologie a un TRL 4, mais l'ambition est de la faire passer à un TRL 5 dans les 2 prochaines années en augmentant la taille des cellules d'électrométhanogénèse. Le développement des différents pilotes détaillés dans la page précédente permettrait à cette technologie d'atteindre un TRL 6 ou 7 dans les années à venir.

TRL de la technologie 4

[1] Par rapport à une unité de méthanisation standard.

Description du procédé d'électroréduction du CO₂

L'électroréduction du CO₂ est une réaction chimique complexe permettant de produire du méthane

La production sélective de méthane par électroréduction est possible, mais complexe

L'électroréduction nécessite l'application d'un courant entre deux électrodes. Lorsque la différence de potentiel électrique est suffisamment grande, l'oxydation de l'eau est observée à l'anode, libérant de l'oxygène, des électrons et des protons. Les électrons libérés à la cathode serviront à réduire le CO₂ et les protons serviront à la formation de composés hydrogénés.

Produire sélectivement le méthane à partir du CO₂ est ainsi possible, mais la réaction qui permet d'obtenir directement cet hydrocarbure est complexe à mettre en œuvre. En effet, de nombreuses réactions parasites viennent diminuer la sélectivité [1] du méthane.



L'électroréduction du CO₂ est une filière peu mature qui nécessite encore de lever certains verrous technologiques

Le processus de réduction du CO₂ en méthane donne lieu à de nombreuses réactions parasites dues à l'application d'un potentiel élevé. L'électrolyse de l'eau formant de l'hydrogène est la réaction parasitant le plus la formation de méthane. Par le choix de catalyseurs et potentiels bien spécifiques au méthane, on cherche à éviter l'électrolyse de l'eau afin

d'obtenir une sélectivité du méthane plus importante. Cependant, celle-ci ne dépasse pas 40% expérimentalement. De plus, l'application d'un potentiel élevé nécessite beaucoup d'énergie.

Le coût très important des membranes pourrait constituer un frein au développement de cette filière.

TRL de la technologie  3

Les matériaux utilisés dans la cellule électrochimique permettent d'augmenter la sélectivité du méthane

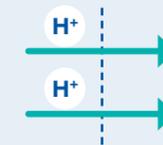
Dans une cellule électrochimique, on retrouve deux composants d'intérêt : les électrodes et la membrane.

1

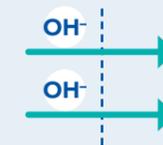
Les électrodes sont les matériaux conducteurs dans lesquels le courant électrique circule. En choisissant le cuivre comme matériau et un catalyseur adapté, l'application d'un potentiel suffisamment important permet d'atteindre des rendements faradiques [2] de l'ordre de 50%.

2

La membrane permet de séparer le compartiment anodique du compartiment cathodique. Il existe aujourd'hui deux types de membranes ayant chacune des caractéristiques bien distinctes.



La membrane protonique :
Elle ne laisse passer que les protons (H⁺). Dans le compartiment anodique, l'oxydation de l'eau permet de former des protons qui passent à travers la membrane pour venir réduire le CO₂. Cette membrane a l'avantage d'être durable dans le temps. Cependant, l'eau se formant dans le compartiment cathodique, l'application d'un courant donne lieu à une réaction parasite formant de l'hydrogène. Cette dernière vient diminuer drastiquement la sélectivité du méthane.



La membrane anionique :
Elle ne laisse passer que les anions (OH⁻). L'avantage de cette membrane est la consommation de l'eau dans le compartiment cathodique. L'électrolyse de l'eau est donc bien moins présente et la production d'hydrogène parasite reste faible. Cependant, ces membranes ne sont que très peu disponibles sur le marché et font face à des problèmes d'obstruction liés à la formation de cristaux dans la membrane.

[1] La sélectivité d'une réaction est le rapport de la quantité de réactif consommé ayant conduit au produit désiré, sur la quantité totale de réactif consommé;

[2] Le rendement faradique d'une électrolyse est le rapport du nombre de moles du produit désiré réellement obtenu par le nombre de moles du produit désiré qui serait idéalement obtenu. Ce rendement peut être inférieur à 1 lorsqu'un produit indésirable s'est formé.

Description du procédé de photoréduction du CO₂

La photoréduction, une réaction convertissant le CO₂ en méthane grâce à la lumière solaire

La photoréduction permet de produire du méthane à partir de CO₂ avec pour unique apport l'énergie solaire

La photoréduction met en jeu les mêmes équations que l'électroréduction, mais se différencie par sa durabilité. En effet, dans le cadre d'une électroréduction, un courant circule entre une anode et une cathode permettant à la réduction d'avoir lieu. Dans le cas de la photoréduction, l'énergie nécessaire pour donner lieu à la réduction provient uniquement de la lumière du soleil.

Afin de convertir du CO₂ en un autre composé carboné, un catalyseur est nécessaire. Certains sont plus sélectifs que d'autres, il faut donc choisir un catalyseur adéquat afin de favoriser la réduction à huit électrons du CO₂ en méthane. La sélectivité d'un procédé réduisant le CO₂ puis le CO, afin de produire du méthane, peut atteindre 82% en théorie.



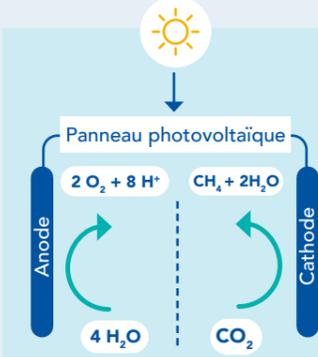
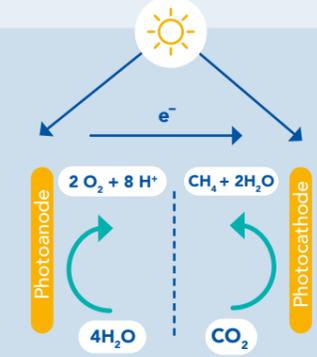
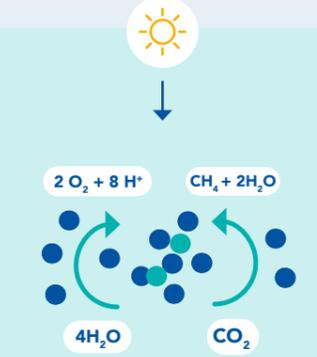
Les enjeux autour de la photoréduction sont encore trop nombreux pour envisager un développement rapide de cette filière dans les prochaines années

La technologie de photoréduction la plus développée est le système couplé photovoltaïque-électrochimique. L'énergie nécessaire pour la réaction est alors apportée via la cellule photovoltaïque. Cependant, la cellule électrochimique

présente les mêmes enjeux que pour la filière de l'électroréduction et n'atteint qu'un TRL 2. D'autres systèmes sans panneaux solaires sont également à l'étude mais leur maturité est encore plus faible.

TRL de la technologie  2

Il existe 3 principaux processus de photoréduction du CO₂

	 Système photovoltaïque-électrochimique (PV-EC)	 Système photoélectrochimique (PEC)	 Système particulaire photocatalytique (PC)
Maturité	En développement avancé	En développement	Innovation
Fonctionnement	L'appareil PV absorbe les photons et génère de l'énergie, qui est transmise à la cellule EC [1], où les électrodes effectuent une réaction redox. [2]	Le système contient un ou deux photoélectrodes. L'absorption de la lumière et les réactions redox ont donc lieu au même endroit.	Un photocatalyseur est directement présent dans la solution et permet la réaction d'oxydoréduction.
Avantages	Le PV est une technologie relativement mature L'absorbeur de lumière peut se trouver en dehors de la solution aqueuse : aucun problème de photo-corrosion Les systèmes PV et EC peuvent être modulés librement	Le processus de captation solaire et de réaction chimique se faisant en une étape, le besoin en matières premières est moindre La cellule à 2 compartiments permet une séparation chimique aisée Les systèmes PV et EC peuvent être modulés librement	Le système est simple, il n'y a ni circuit électrique, ni électrolyte Les deux réactions de réduction et d'oxydation ont lieu à la surface des particules, la distance entre les deux sites est donc très limitée, ce qui favorise l'efficacité et permet de travailler sans électrolyte supplémentaire

[1] EC = électrochimique;

[2] Réaction redox est un autre terme employé pour désigner une réaction d'oxydoréduction.

Description du procédé de photobioréaction

La photobioréaction peut être mise en œuvre dans différents types de réacteurs dont la productivité et le coût peuvent varier significativement

La culture de micro-algues permet une valorisation importante du CO₂

Les micro-algues se développent grâce à la photosynthèse. L'énergie solaire étant la base de celle-ci, les micro-algues permettent de valoriser le CO₂ de manière durable.

Grâce à ce bilan, la consommation d'1 kg de CO₂ permet la production de 0,6 kg de biomasse.

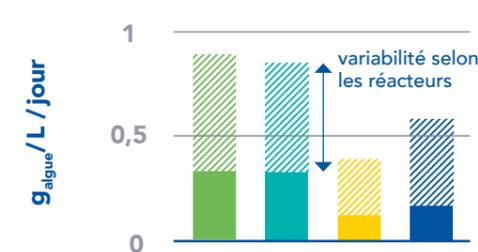
Une grande variété de systèmes technologiques peut être utilisée pour la culture d'algues, dont les caractéristiques et les performances répondent à des cas d'usages différents.



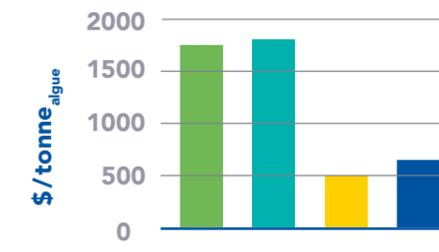
	Avantages	Inconvénients
 PBR [1] tubulaire (fermés)	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicité à implémenter • Grande surface d'éclairage et productivité élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • Empreinte foncière assez élevée • Forts gradients de pH, CO₂ et O₂ • CAPEX et OPEX élevés • Consommation énergétique
 PBR à panneaux plats (fermés)	<ul style="list-style-type: none"> • Grande surface d'éclairage et productivité élevée • Maintenance aisée • Contrôle aisé de la température 	<ul style="list-style-type: none"> • CAPEX et OPEX élevés • Complexité de mise à l'échelle • Consommation énergétique
 PBR sous sac plastique (fermés)	<ul style="list-style-type: none"> • CAPEX faibles • Empreinte foncière limitée 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragilité, courte durée de vie • Homogénéité faible • Apport de lumière inhomogène • Consommation énergétique
 PBR ouverts	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance aisée • Faible consommation d'énergie • CAPEX et OPEX faibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Empreinte foncière très élevée • Productivité faible • Homogénéité faible • Risque de contamination

TRL de la technologie  5

Quelques données technico-économiques liées à ces cultures



Productivité volumétrique des principaux types de PBR [2]



Coût de production de micro-algues des principaux types de PBR

■ PBR tubulaire ■ Panneaux plats ■ ORP ■ PBR sac plastique

	Production de biomasse (tonnes/ha/an)	Consommation de CO ₂ (tonnes/ha/an)
PBR ouverts	10–30	20–60
Panneaux plats	36–66	72–132
Photobioréacteur tubulaire	50–100	100–200

Rendements

Le taux de conversion de la lumière solaire en énergie chimique par la photosynthèse peut atteindre

9%

Afin de produire du biogaz, les micro-algues sont placées dans un digesteur, où elles fermentent sans oxygène. Ceci permet de produire un biogaz, qui se compose de

70% à 80% de méthane

[1] PhotoBioRéacteur; [2] Grammes d'algues produites par unité de volume (en L) du réacteur.

Synthèse des 4 filières émergentes

Technologies

Enjeux techniques

Solutions en développement

Électro-méthanogénèse



Le processus d'électrométhanogénèse fait intervenir des micro-organismes qui transforment le CO₂ en méthane sous l'application d'un courant électrique entre deux électrodes.

L'intégration des électrodes dans le digestat est coûteuse et la résilience des biofilms pourrait être améliorée.

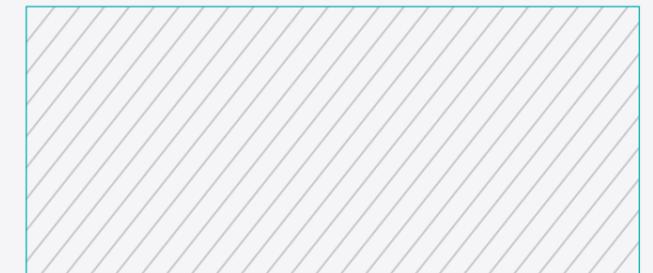
Un axe de recherche important porte sur l'augmentation de la taille des cellules d'électrométhanogénèse. Le développement prévu de 2 pilotes dans les prochaines années devrait permettre de faire passer la technologie à un TRL 6-7 (cf. projet Biométhaverse).

Électroréduction du CO₂



Sous l'application d'un potentiel important, la réduction du CO₂ permet de former du méthane.

De nombreuses réactions parasites (p. ex. électrolyse de l'eau) diminuent la sélectivité du procédé. Par ailleurs, le coût des membranes reste élevé.



Photoréduction du CO₂



La photoréduction met en jeu les mêmes équations que l'électroréduction, mais se différencie par sa durabilité en utilisant l'énergie solaire pour donner lieu à la réaction.

De nombreuses réactions parasites (p. ex. électrolyse de l'eau) diminuent la sélectivité du procédé. Par ailleurs, le coût des membranes reste élevé [1] et la durée de vie des éléments photosensibles est très courte (quelques heures parfois).

Développer un système photocatalytique simple où il n'y a ni circuit électrique ni membrane pour s'affranchir des verrous de l'électroréduction.

Photobioréaction



Les micro-algues se développent dans des photobioréacteurs grâce à la photosynthèse et peuvent ensuite être utilisées pour divers usages comme la production de méthane.

Les photobioréacteurs ouverts étant les plus intéressants énergétiquement, parce qu'ils utilisent l'énergie solaire, nécessitent une grande surface au sol et ont une production par unité de surface moins intéressante que les photobioréacteurs fermés.

Améliorer la diffusion de la lumière dans les réacteurs fermés.

[1] Dans le cadre d'un couplage photovoltaïque-électrochimique.

Quelques projets pionniers pour la filière

Électrométhanogénèse

LEITAT
managing technologies



Projet Robinson – La mission principale du projet est de développer un système énergétique intégré pour aider à décarboner les îles. Dans le cadre de ce projet, Leitat développe un démonstrateur de 1 m³.

ENGIE



Projet Biométhaverse – Financé par l'UE, le projet réunit 22 partenaires et 9 pays européens dont la France. L'objectif à terme est d'augmenter la production de biométhane en Europe de 66%. En France, Engie vise le développement de 2 pilotes de 1 m³.

Électroréduction du CO₂

twelve



Twelve – Électrolyseur de CO₂ à membrane polymère-électrolyte (PEM).

Dioxycle



Dioxycle – Électrolyseur à basse température.

e-Ma



e-Ma – Électrodes à diffusion – matrice Zn/Ag.

carboneo



Carboneo – Électrodes fonctionnant avec des catalyseurs abondants à la surface de la Terre.

cea



CEA – Catalyseurs Ni/Fe bio-inspirés d'enzymes hydrogénases.



Photoréduction du CO₂

instituto
idea
energía



Projet HyMAP – Financé par l'UE, le projet développe de nouveaux matériaux et des photocatalyseurs hybrides transformant le CO₂ en carburants.

Imperial College
London



Projet THEIA – Financé par l'UE, il travaille à l'élaboration de nouvelles classes de photocatalyseurs. La fin du projet est prévue pour 2025.



Photobioréaction

U.S. DEPARTMENT OF
ENERGY



Programme «Advanced Algal Systems» – Élaboration d'une stratégie de R&D long terme pour réduire les coûts de production des biocarburants issus des macro-algues.

engicoïn



Engicoïn – Développement, de TRL 3 à TRL 5, de trois nouvelles usines microbiennes, intégrées dans une plate-forme de digestion anaérobie de déchets organiques.

CarbonWorks



CarbonWorks – Démonstrateur industriel de capture et de bioconversion du CO₂ par biomasse algale.

AlgoSource
Bâtir
le vivre
ensemble



Projet CimentAlgue – Valorisation du CO₂ et de la chaleur fatale d'origine industrielle pour produire des micro-algues.

La liste de projets et acteurs est non exhaustive.

Sources

[Emerging sustainable technologies](#)

Gaspard Bouteau ENGIE, 2023

[Techno-Economic Analysis for the Production of Algal Biomass via Closed Photobioreactors: Future Cost Potential Evaluated Across a Range of Cultivation System Designs](#)

NREL, 2019

[Visible-light-driven methane formation from CO₂ with a molecular iron catalyst](#)

Rao H., Schmidt L., Bonin J., Juin 2017

[Comparison of commonly used technologies for the cultivation of algae](#)

Schott, 2016

[Étude de catalyseurs à base de cuivre dérivés d'oxyde pour la conversion électrochimique du CO et du CO₂](#)

Claudie Roy, Mai 2015

[Du CO₂ aux hydrocarbures, un renversement salutaire](#)

Marc Fontecave Collège de France, 2014

[Microalgal bioreactors: Challenges and opportunities](#)

Ling Xu, Pamela J. Weathers, Xue-Rong Xiong, Chun-Zhao Liu, Juillet 2009

[Direct biological conversion of electrical current into methane by electromethanogenesis](#)

Bruce Logan, 2009

Contributeurs

Méthanisation

Sylvaine Berger – Solagro – Responsable de l'activité bioéconomie

Ivan Desneulin – Solagro – Chef de projet méthanisation

Cristina Ferreira – TotalEnergies – Responsable du département biogaz

Alice L'Hostis – ATEE – Directrice du CTBM

Yves Le Roux – ENSAIA – Professeur Université de Lorraine-ENSAIA, Porteur de la Chaire Industrielle Agrométha

Thierry Ribeiro – Institut Polytechnique UniLaSalle – Enseignant-chercheur Bioprocédés-Méthanisation, Titulaire de la Chaire Méthanisation agricole et transitions

Jean-Philippe Steyer – INRAE – Directeur de recherche

Power-to-methane

Gianfranco De Feo – MicroPyros – CEO

Vincent Guerré – Enosis – Président

Marion Guillevic – Energo – Directrice du développement commercial

Tahar Melliti – Khimod – Membre du Directoire

Vincent Piepiora – Energo – CEO

Pyrogazéification

Ammar Bensakhria – UTC – Enseignant-chercheur

Anthony Kerihuel – S3D Ingénierie – Directeur Général

Chourouk Nait Saidi – ATEE – Déléguée Générale du club pyrogazéification

Gazéification hydrothermale

Sebastien Quenard – CEA – Ingénieur R&D – Direction de la Recherche Technologique

Joël Tanguy – Nevezus – Président Fondateur

Photobioréaction, électrométhanogénèse et autres filières émergentes

Gaspard Bouteau – Engie – Lab Crigen – Ingénieur de recherche gaz verts

Isabelle Rougeaux – CEA – Ingénieur-Chercheur au CEA LITEN/LVME

Rédaction

Garazi Alcalde, Laurent Blaisonneau, Thomas Deronzier, Aurélie Dhavernas, Albain Ferchal, Bertille Guénégo, Timothé Husser, Baptiste Kas, Hélène Stéphan, Salma Zouari

Expertise transverse

Laetitia Aubeut Chojnacki, Leo Benichou, Luc Budin, Gaëtan Courtecuisse, Eric Feuillet, Toinou Frezouls, Sami Ghardaddou, Étienne Goudal, Alice L'Hostis, Vincent Jean-Baptiste, Cédric Jolivet, Malika Madoui-Barmasse, Chourouk Nait Saidi, Étienne Philippe, Bastien Praz, Tristan Rigou, Amélie Sanz

