

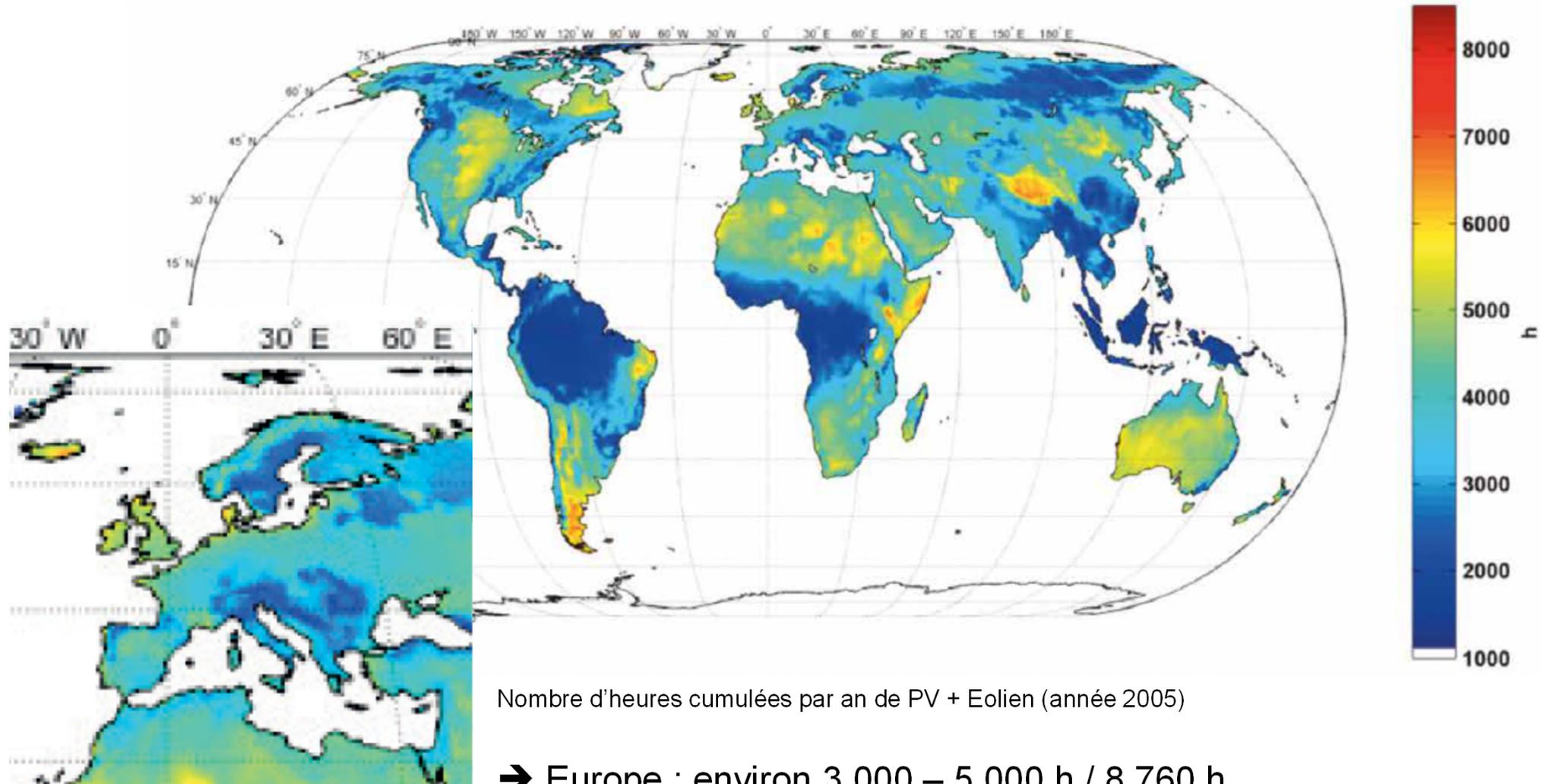
liten
cea tech



ÉTAT DES LIEUX À MI 2018 SUR LE P2G EN TERMES DE
TECHNOLOGIES, DE PROCÉDÉS ET D'USAGES
POTENTIELS ?

Laurent BEDEL
CEA-Liten-DTBH
laurent.bedel@cea.fr

DÉPLOIEMENT DES ENR INTERMITTENTES CHALLENGE DU STOCKAGE D'ÉNERGIE

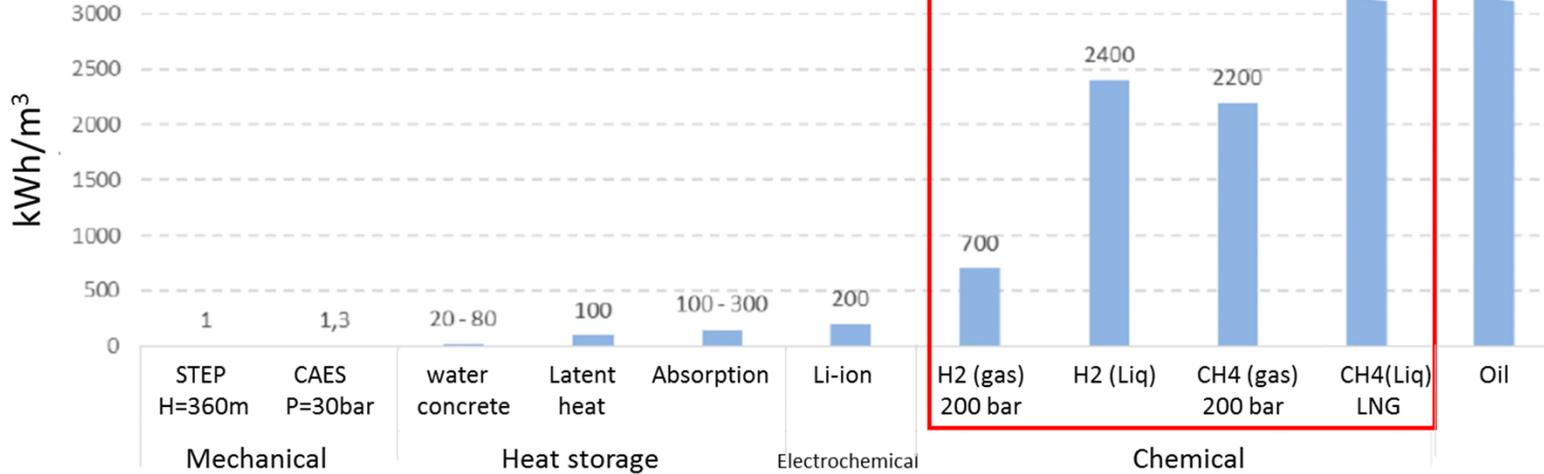


Nombre d'heures cumulées par an de PV + Eolien (année 2005)

→ Europe : environ 3 000 – 5 000 h / 8 760 h

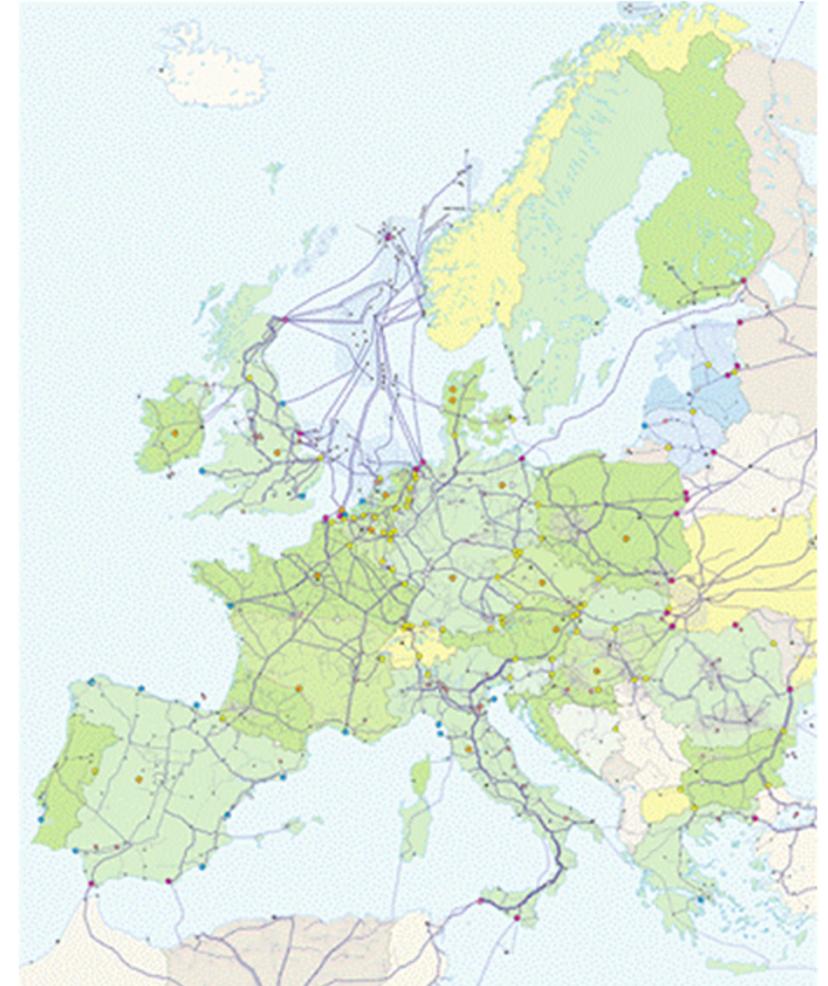
IEA (International Energy Agency)
World Energy Outlook. 2017.

Densité de stockage

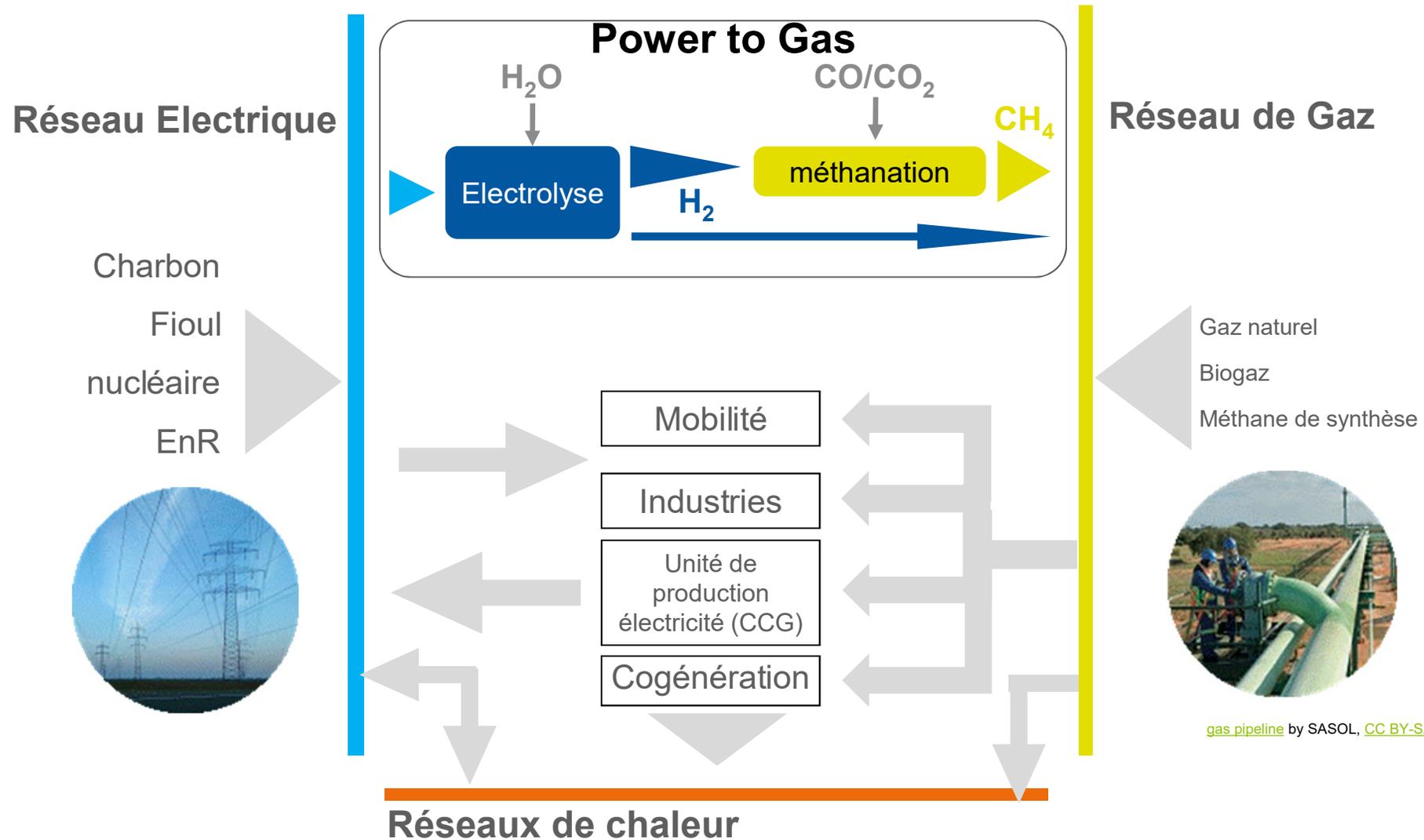


Complémentarité des solutions de stockage

Stockages souterrains en EU : ~ 800 TWh
 ~1,7 fois la consommation électrique annuelle française
 Capacité de stockage en France ~ 130TWh par an
 Infrastructure de stockage et de transport disponible dès aujourd'hui
 Permet un découplage spatial entre le lieu de stockage et déstockage

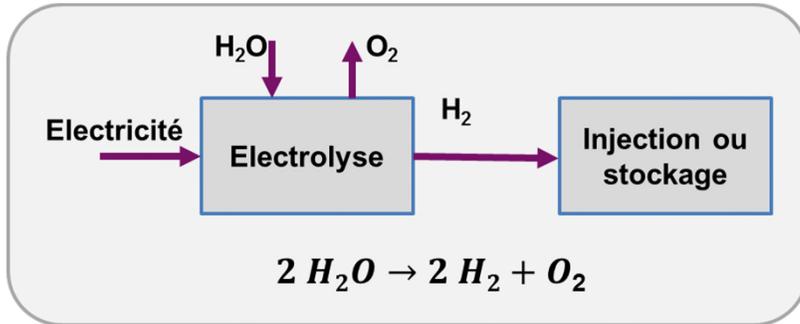


sources: map by ENTSOG; edited
 Numbers: gie.eu, eurostat

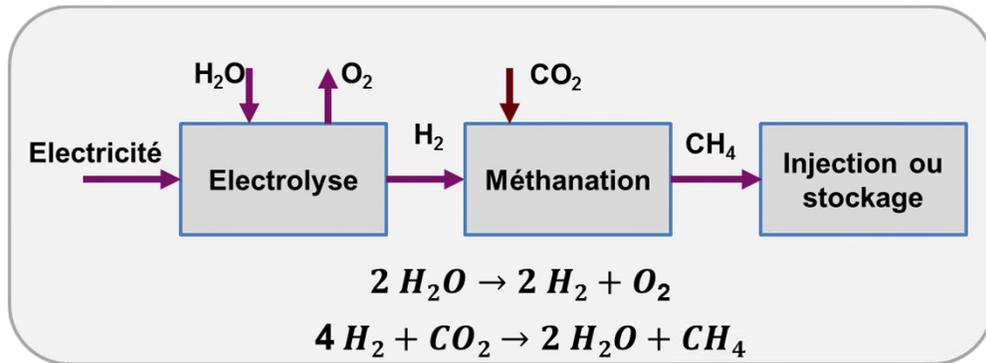


gas pipeline by SASOL, CC BY-SA 2.0

Déstockage adresse plusieurs marchés (multiusages)



Rendement de conversion 60-80%



Rendement de conversion 50-70%

Injection dans le réseau de gaz :

H₂ : Spécifications actuelles (< 6 % vol)

→ En réalité la teneur << 1 %

P2G de 10 MWe d'électrolyse ≈ 2 000 Nm³/h H₂

Teneur en H₂ à 2% → 100 000 Nm³/h minimum

Spécifications à 6% → Pipe de 33 000 Nm³/h minimum

→ Contrainte géographique

Fragilisation par hydrogène de certains aciers

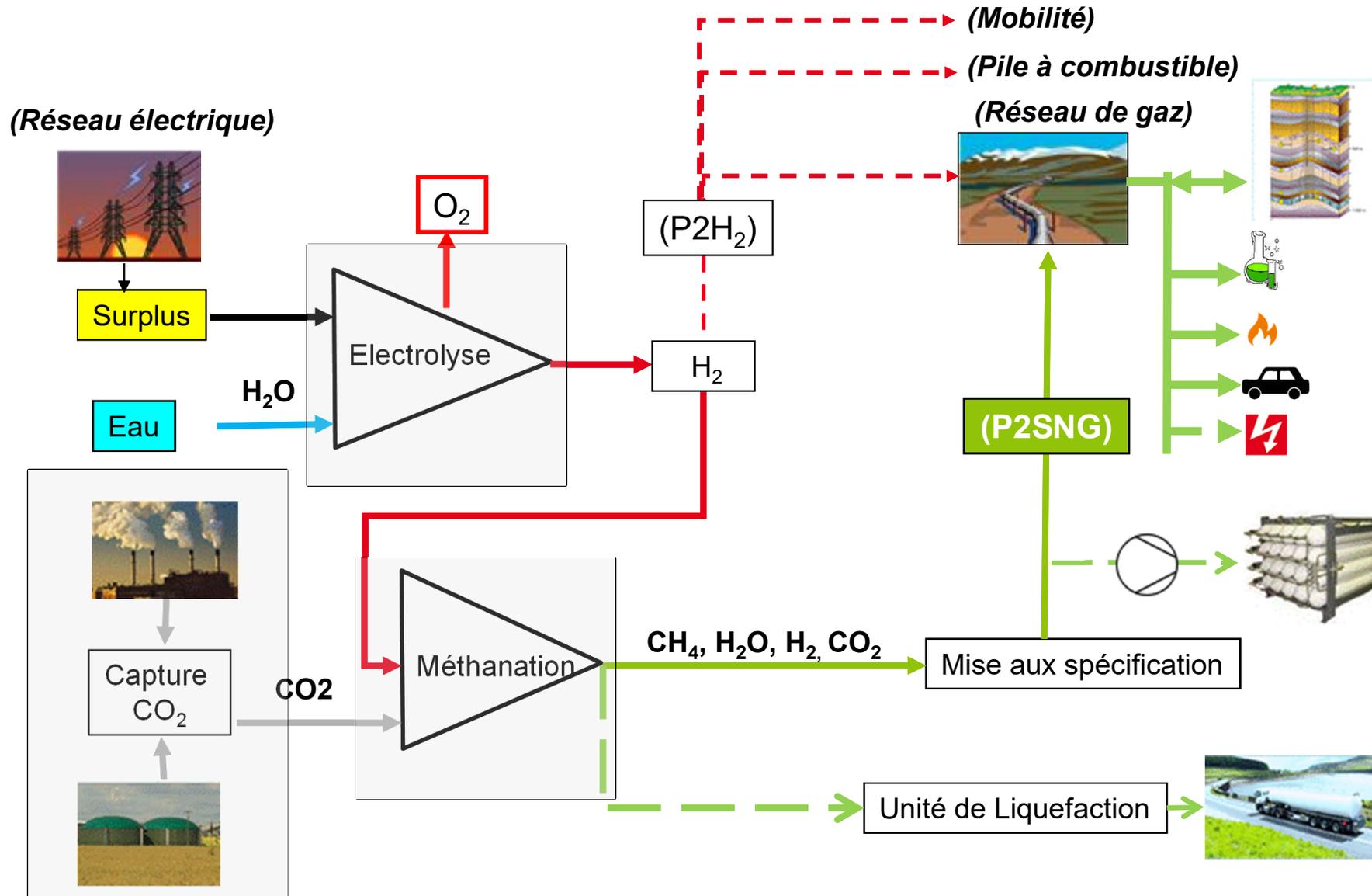
→ (réduction de 90% de la ténacité pour 1% H₂)

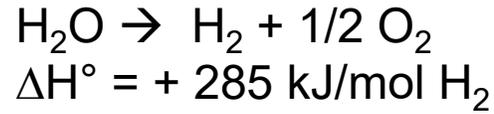
→ Garantir l'intégrité du réseau: pipes et soudures

C du methane permet le stockage d'H₂ et son transport

Complémentarité H₂ et CH₄ en terme d'application

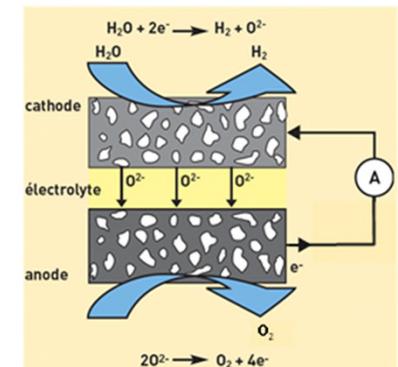
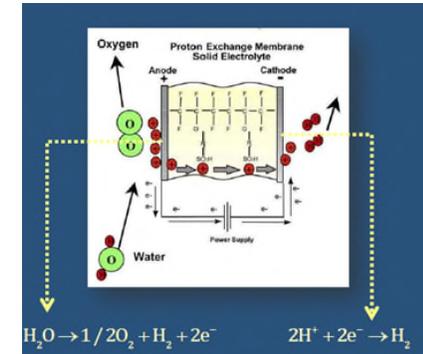
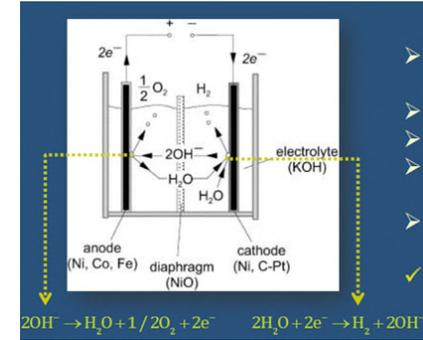
UNE UNITE DE POWER TO GAS EST UN SYSTEME AVEC PLUSIEURS BRIQUES TECHNOLOGIQUES (1 ou 3 PRINCIPALES)





Electrolyseurs

- | | |
|--------------------------------|---|
| Technologies basse température | Electrolyse alcaline |
| | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Utilisation d'un électrolyte liquide (KOH) ✓ Température de fonctionnement $\approx 70^\circ\text{C}$ ✓ Pression de fonctionnement : <ul style="list-style-type: none"> ○ 1 à 30 bars. ✓ Rapidité d'arrêt et de démarrage : de quelques secondes à $\sim 10\text{min}$ pour un démarrage à froid ✓ 4.2-5.9 kWh/Nm³ d'H₂ (stack), ✓ 4,5-7 kWh / Nm³H₂ (Système) |
| Technologies haute température | Electrolyse PEM |
| | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Utilisation d'une membrane polymère échangeuse de protons (PEM) prises en sandwich entre deux électrodes ✓ Température de fonctionnement $\approx 70^\circ\text{C}$ ✓ Pression de fonctionnement : <ul style="list-style-type: none"> ○ Typiquement ~ 15 bars. Possibilité de pression + élevée et de pression différenciée entre les circuits H₂ et O₂ ✓ Rapidité d'arrêt et de démarrage : de quelques secondes à $\sim 10\text{min}$ pour un démarrage à froid ✓ 4.2-5.6 kWh/Nm³ d'H₂ (stack) ✓ 4,5-7,5 kWh / Nm³H₂ (Système) |
| Technologie haute température | Electrolyse EVHT |
| | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Utilisation d'une membrane céramique conductrice O²⁻ prises en sandwich entre deux électrodes ✓ Electrolyse de la vapeur d'eau (besoin d'une source de chaleur) ✓ Température de fonctionnement 700 – 800°C ✓ Taux de conversion vapeur $\approx 60-75\%$ ✓ Pression de fonctionnement : basse pression aujourd'hui ✓ Préchauffage de quelques heures pour un démarrage à froid ✓ 3.2-3.6 kWh/Nm³ d'H₂ (stack) |



Production
H₂
Technos de
rupture

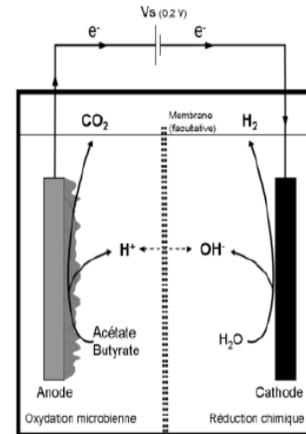
Bio-hydrogène

- ✓ 1) La production anaérobie d'hydrogène par fermentation sombre par la dégradation de matière organique brute (déchets organiques, boues...) par des bactéries ou des micro-organismes. Il s'agit d'une étape intermédiaire du processus de méthanisation (ou digestion anaérobie)
- ✓ 2) La source principale d'énergie est donc l'énergie lumineuse. Deux grandes catégories de photo-bioprocédés existent :
 - ✓ les procédés photosynthétiques basés sur la photolyse de l'eau (ou biophotolyse). Il s'agit d'une réaction réalisée par des algues et des bactéries
 - ✓ les procédés photosynthétiques basés sur la photofermentation de molécules organiques. Il s'agit des réactions réalisées par des bactéries photosynthétiques anoxygènes



Bio-hydrogène par électrolyse microbienne

- ✓ L'électrolyse microbienne est une adaptation du procédé d'électrolyse de l'eau dans lequel l'oxydation de l'eau à l'anode est remplacée par un processus d'oxydation de la matière organique à l'aide de micro-organismes électro-actifs ou exo-électrogènes. Ces micro-organismes ont la capacité d'échanger des électrons avec une électrode de manière à réaliser la réaction suivante :
- ✓ $CH_3COO^- + 4 H_2O \rightarrow 2 HCO_3^- + 9 H^+ + 8 e^-$
- ✓ La réaction à la cathode (Pt ou catalyseurs non précieux) correspond à une réduction des protons en H₂ : $2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2$
- ✓ Cette technologie permet de convertir la matière organique en hydrogène à partir de substrats organiques divers comme la cellulose, le glucose, le butyrate, le lactate, le propionate, l'éthanol ou l'acétate.

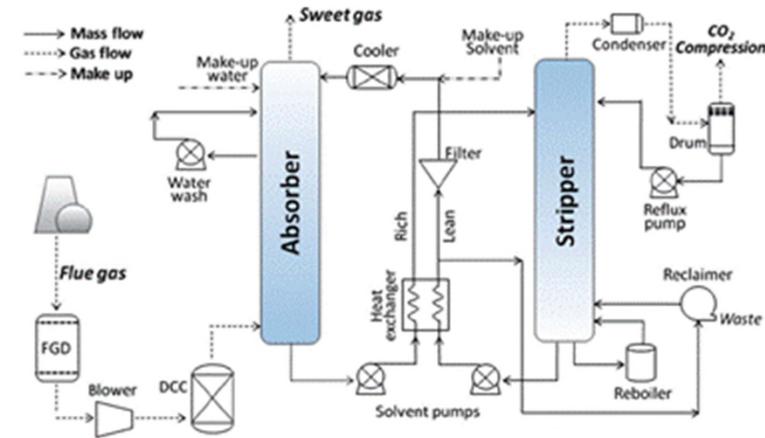


Toutes ces technologies sont en développement avec de nombreux challenges

Captage CO₂

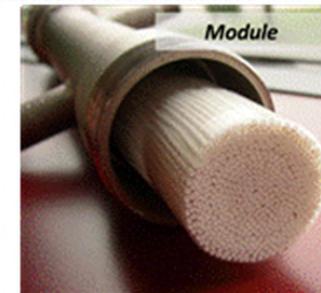
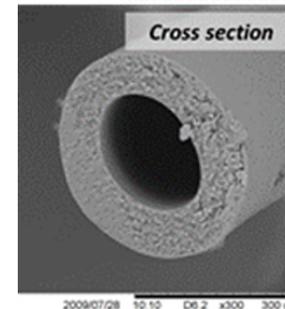
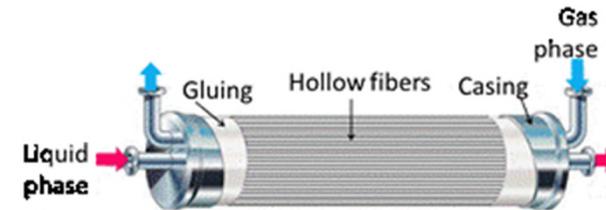
Captage fumées par un solvant (Amines)

- ✓ Absorption par des amines dans une colonne liquide-gaz à contre-courant.
- ✓ Captage à T°C < 70°C (réaction exothermique)
- ✓ Taux de captage ≥ 90% (fumées à 10-15% CO₂)
- ✓ Désorption CO₂ par chauffage de l'amine au-delà de 120°C. Cette régénération (endothermique) est réalisée à l'aide de vapeur d'eau surchauffée dans une colonne de strippage. (≈ 120-160KJ/mol CO₂)



Captage fumées avec contacteur membranaire

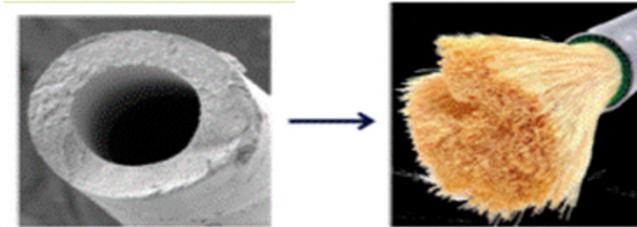
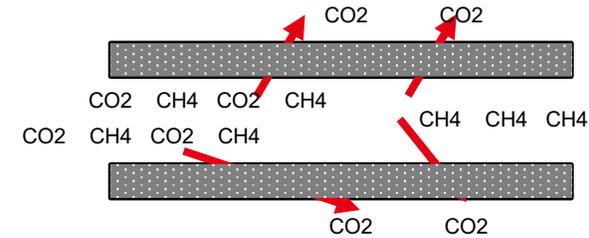
- ✓ Utilisation de contacteurs membranaires au lieu d'une colonne à garnissage
- ✓ Le principe est une séparation de la phase gazeuse de la phase liquide par une membrane perméable aux gaz.
- ✓ Captage à T°C ≥ 70°C (réaction exothermique)
- ✓ Taux de captage ≤ 90% (fumées à 10-15% CO₂)
- ✓ Membrane permet des coefficients de transfert de matière jusqu'à 10 fois plus importants
- ✓ Compacité et donc une réduction de la taille de l'unité de captage.



Captage CO₂

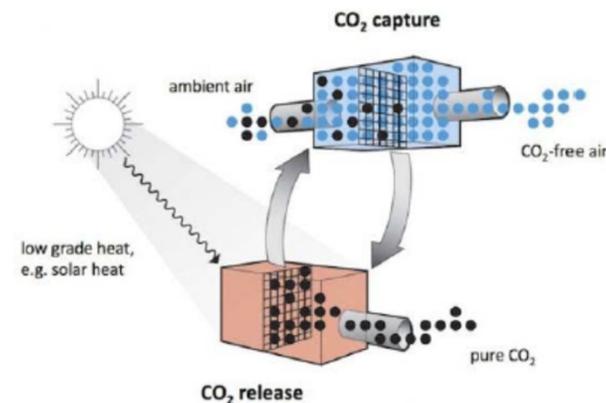
Captage CO₂ par séparation membranaire (Biogaz)

- ✓ Utilisation de membrane perméable au CO₂ pour la mise aux spécifications du biogaz (séparation CO₂-CH₄)
- ✓ Le principe est une séparation du CO₂ (3,3 Å) du CH₄ (3,8 Å) favorisée par une ΔP
- ✓ Pour atteindre les spécifications (plusieurs étages)
- ✓ Compression entre chaque étage



Captage CO₂ atmosphérique

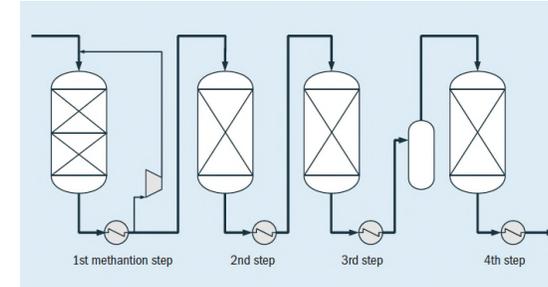
- ✓ Captage du CO₂ atmosphérique (≈ 400 ppm)
- ✓ Basé sur un cyclage adsorption/désorption sur un support solide amine
- ✓ Captage à température ambiante
- ✓ Désorption à T>95°C (chaleur fatale ou méthanation)
- ✓ Consommation énergétique pour ventilation



Méthanation

Réacteurs adiabatiques en série

- ✓ Utilisation de réacteurs non refroidis en série (3 à 5)
- ✓ Recyclage de gaz dans le premier réacteur pour limiter l'échauffement
- ✓ Condensation entre chaque étage pour déplacer l'équilibre
- ✓ Développement pour gazéification charbon + méthanation (méthanation CO)
- ✓ Unité de forte puissance
- ✓ Flexibilité limitée



Réacteurs tube-calandre

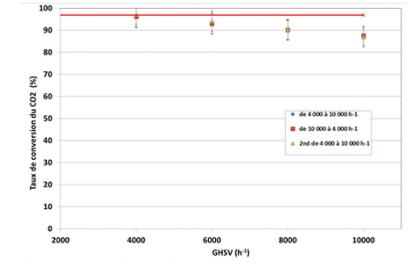
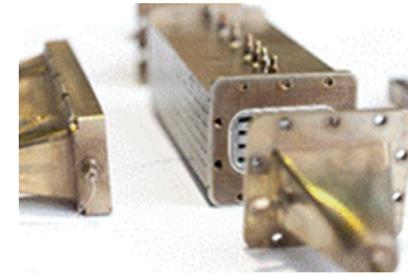
- ✓ Utilisation de tubes de 15-30mm de diamètre remplis de catalyseur
- ✓ Utilisation de sels fondus pour le refroidissement du réacteur
- ✓ Point de solidification du sel fondu vers 250°C
- ✓ Maintien en température en permanence au-delà de 250°C
- ✓ Vidange du sel fondu avant arrêt
- ✓ VVH \approx 500 - 1000 h⁻¹



Méthanation

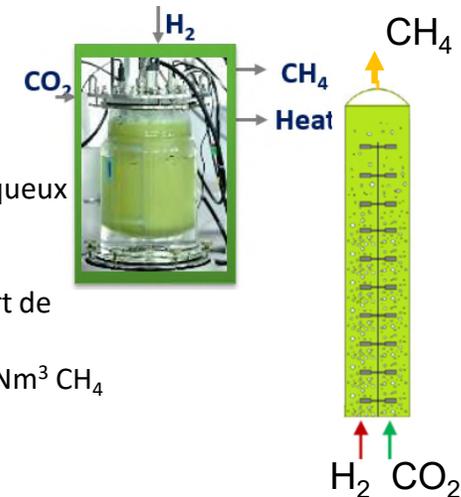
Réacteurs structurés

- ✓ Intensification des transferts de matière et thermique par des canaux <math> < 1\text{cm}^2 </math>
- ✓ Contrôle de la température le long des canaux réactifs
- ✓ Refroidissement à courant croisés
- ✓ Refroidissement avec une huile minéral (arrêt en qqes sec et démarrage en qqes min à froid)
- ✓ Flexibilité et concept modulaire
- ✓ Scale-up par multiplication de modules à design constant
- ✓ $\text{VVH} \approx 5\,000\text{ h}^{-1}$, compacité élevée



Réacteurs biologiques (bactéries)

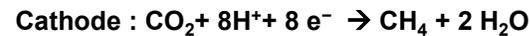
- ✓ Production de méthane à basse température
- ✓ CAPEX potentiellement plus faible
- ✓ Tolère mieux les impuretés
- ✓ Conversion de H₂ et CO₂ par des bactéries en milieu aqueux vers 60°C (refroidissement car réaction exothermique)
- ✓ Solubilité du CO₂ et l'H₂ limitée en phase aqueuse
- ✓ Energie d'agitation nécessaire pour assurer un transfert de masse suffisant
- ✓ Pas d'information validée sur l'énergie d'agitation par Nm³ CH₄ produit
- ✓ $\text{VVH} \approx 10\text{-}50\text{ h}^{-1}$: faible compacité



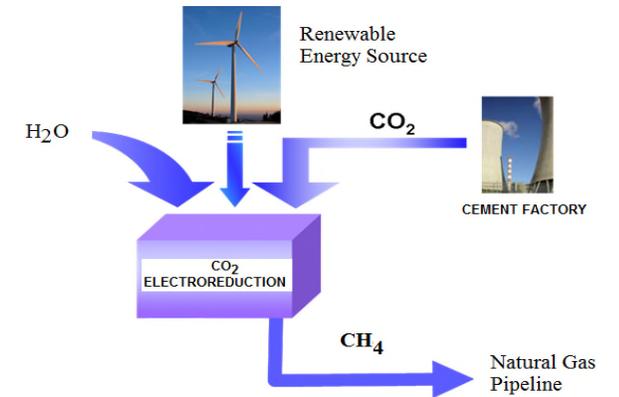
Méthanation Technos de rupture

Electroréduction du CO2 en méthane

- ✓ Le concept repose sur un captage CO2 avec un liquide ionique à la place d'une amine. Le liquide ionique avec le CO2 dissous plus de l'eau est injecté dans l'électrolyseur.
- ✓ Dans l'électrolyseur le CO2 est réduit à 30-60 bars puis convertis en méthane au niveau de la cathode. A l'anode l'oxygène est produit.

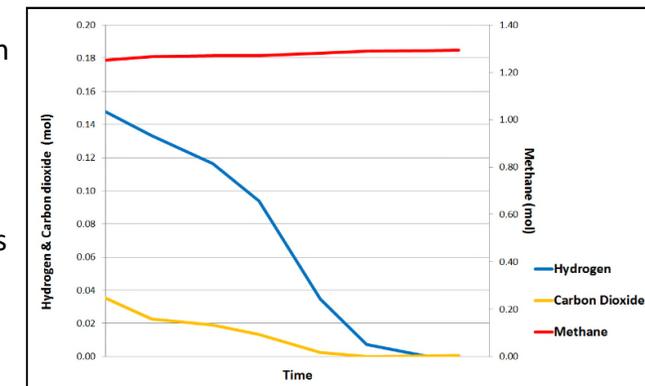


- ✓ Concept validé en laboratoire (TRL 3)
- ✓ Développé par uni-Lisbonne et une PME Portugaise

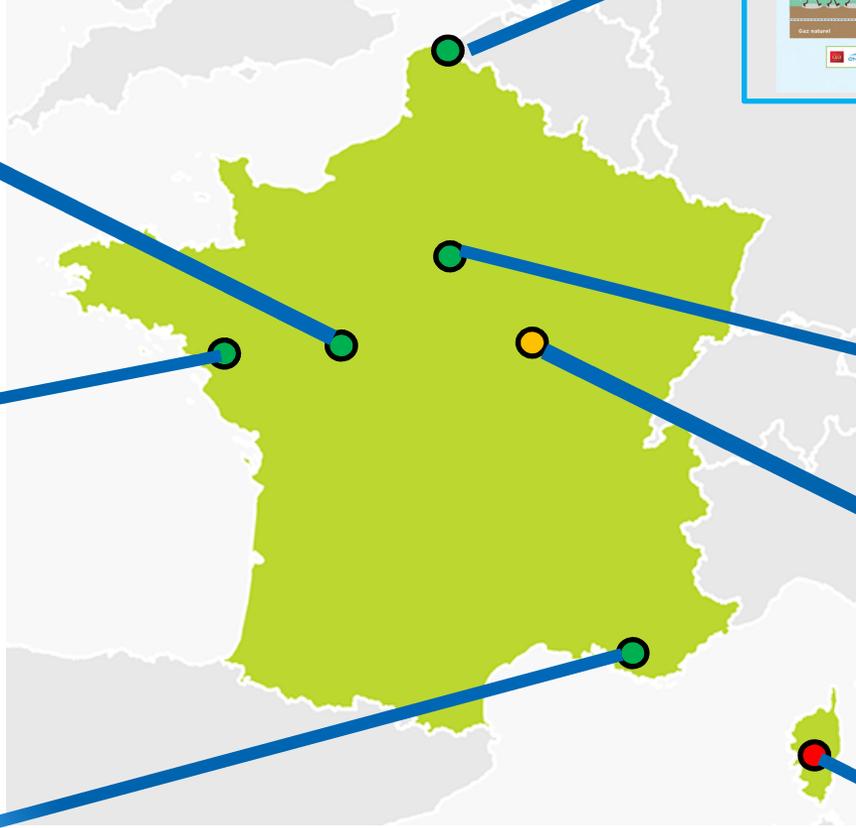


Méthanation en cavité (bactéries)

- ✓ Le concept repose sur une méthanation in-situ par conversion d'hydrogène et de CO2 dans une cavité de stockage de gaz naturel.
- ✓ Conversion de H2 et CO2 par des bactéries présentes dans les roches des cavités
- ✓ Cinétique lente – ordre de grandeur de la semaine à quelques semaines
- ✓ Concept validé à l'échelle du laboratoire
- ✓ Challenges :
 - ✓ Extrapolation à l'échelle d'une cavité
 - ✓ Cinétique
 - ✓ ...
 - ✓ Étudié en Autriche – Projet RAG



Projets de démonstration de Power to Gas en France



METHYCENTRE 250kW

Partenaires Industriels: PRODEVAL, ATMOSTAT, AREVA H₂Gen

Expertise ENGIE: TRACTEBEL, ENGIE Key Program Strategy, ENGIE Biogaz, ENGIE Lab-CRIGEN

Soutien et Synergies Locales: SEIL, JCFB, S2N2

Un projet porté par **storengy**

GRHYD 50kW

Renouvelons nos énergies

Énergies renouvelables intermittentes → Électricité non consommée → Électrolyse de l'eau → Habitat et tertiaire → Mobilité verte

MINERVE 10kW

Un démonstrateur power-to-gas pour expérimenter l'avenir

Methamod 20kW

unité de méthanation METHAMOD

ATMOSTAT ALCCN

Hycaunais

Jupiter 1 000kW

McPhy, ATMOSTAT, cea, GRTgaz, TIGF

Power → Alkaline Electrolyser (0.5 MW) / PEM Electrolyser (0.3 MW) → hydrogen → Methanation (CO₂ Capture) → injection into the gas grid → Méthane Or mix hydrogen + méthane

Partenaires: CEA, Morselle Fos, L'Oréal & L'Oréal

P2H2

Comprend une unité de méthanation

200kW MYRTE

cea, cap'energies, HELION HYDROGEN POWER, Ville d'Ajaccio, Collectivité Corse, Collectivité Corse

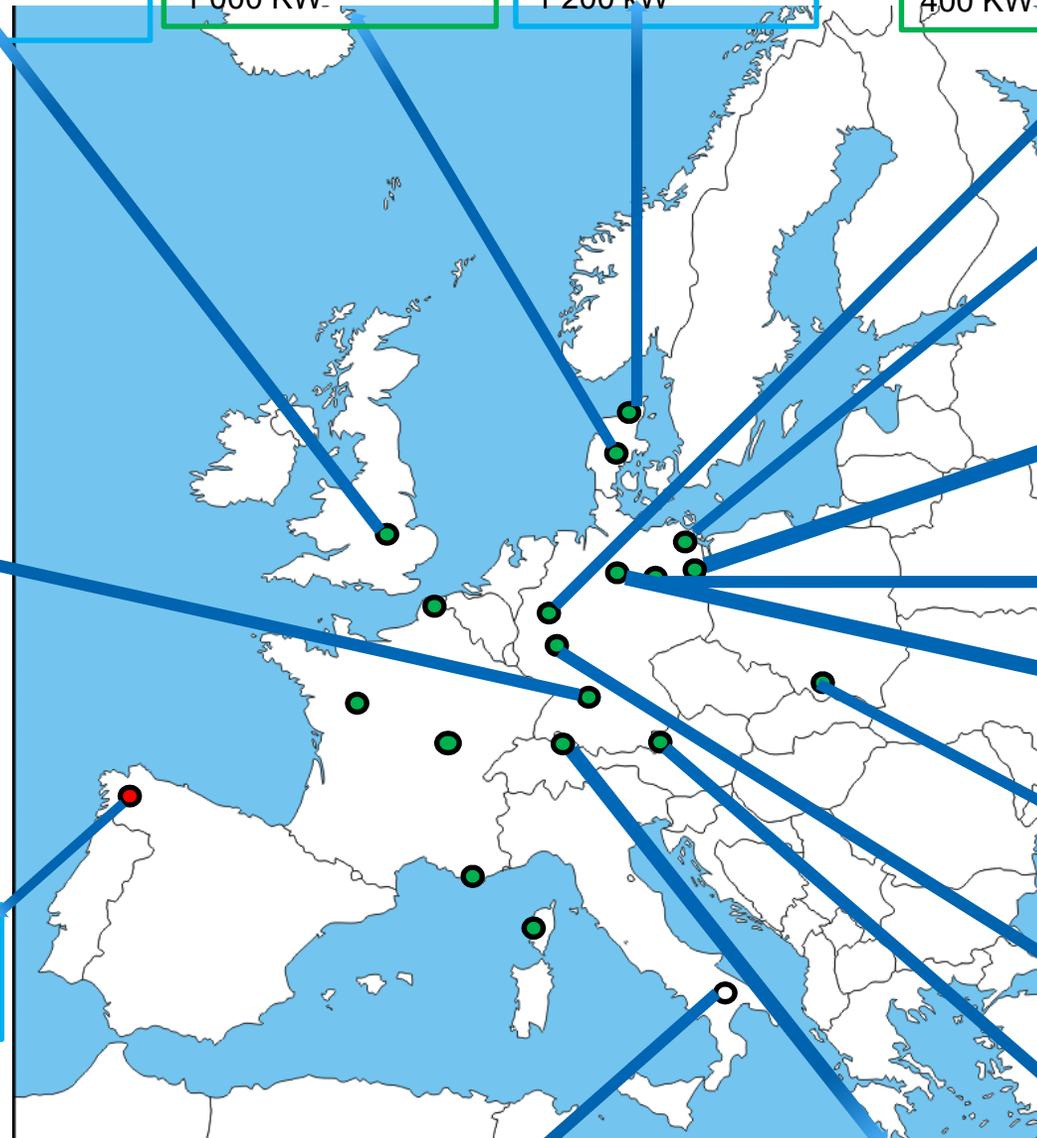
• Principaux projets de démonstration de Power to Gas > 100kWe en Europe (hors France)



P2H2

Comprend une unité de méthanation

- Projets en cours
- Projets finis ou en stand-by



Projet HyDeploy (UK)
UK : Près de Newcastle
500kW

Projet BioCat
Danemark : Avedøre
1 000 KW

Projet HYbalance
Danemark : Hobro
1 200 kW

BioPower2Gas
Allemagne : Allendorf
400 kW

Prenzlau,
Allemagne
600kW

Projet EON et Store&Go
Allemagne : Falkenhagen
1 000 KW

Projet P2G250
Allemagne : Stuttgart
250kW

Projet Berlin
Allemagne
500kW

Projet GrInHy
Allemagne
150kW

Projet CO2-SNG
Pologne: Łaziska Górne
100 kW

Projet Sotavento
Espagne : Xermade
300kW

Projet AUDI
Allemagne : Wertle
6,3 MW

Projets INGRID & Store&go
Italie : Troia – 200kW

Projet Store & Go
Suisse : Solothurn – 700 KW

Projet RAG
Autriche : Pilsbach
600 kW



- Press release : 16 Octobre 2018
- Gasunie, TenneT and Thyssengas reveal detailed, green ‘sector coupling’ plans using power-to-gas technology
 - The electricity and gas grid operators are planning to build a 100-MW power-to-gas plant in Lower Saxony
 - These new facilities are intended to couple the energy, transport and industrial sectors
 - Power-to-gas can help stabilise the electricity grid, limit the curtailment of wind energy and reduce the future need for grid expansion

https://www.tennet.eu/fileadmin/user_upload/Company/News/German/Hoerchens/2018/20181016_PM-Gasunie-TenneT-Thyssengas-Power-to-Gas-Pilot-Element1_EN.pdf

- Trois gestionnaires allemands de réseau d’électricité et de gaz (Gasunie, TenneT et Thyssengas) ont lancé un projet de *power-to-gas* d’une capacité de 100 MW. Situées en Basse-Saxe (nord du pays), **les installations produiront de l’hydrogène et du méthane** à partir d’électricité issue d’énergies renouvelables. **Ces gaz serviront de stockage d’énergie, mais seront aussi dédiés à des usages industriels et de mobilité.**

<https://www.greenunivers.com/2018/10/power-to-gas-lallemagne-passe-a-lechelle-industrielle-189949/>

CONCLUSION

Power to gas

- Système de conversion en un vecteur gazeux

- Découplage spatial entre lieu de stockage et usages

- Adresse plusieurs marchés de déstockage (électrique, chaleur, mobilité, ...)

Deux chaînes de conversion

- Power to hydrogène

- Power to méthane

- Complémentarité entre les deux chaînes

Projets de démonstration en Europe

- Développement des technologies (maturation des technologies)

- Détermination des CAPEX et OPEX précis

- Construction de business plan - scénarios

- Plusieurs acteurs européens sur chaque brique

- pas uniquement un marché français



• Projets de démonstration de Power to Gas en France

Ordre chronologique

Projet	Date de démarrage	Localisation du projet	Technologie d'électrolyseur et puissance	Puissance unité P2G	Source de CO ₂	Technologie de méthanation	Commentaires
MYRTE	2011	Ajaccio (Corse)	PEM	200 kW (40 Nm ³ /h)	-	-	Opérationnel : Stockage H ₂ et O ₂
GRHYD	2014	Cappelle-la-Grande (59)	PEM	50 kW (10 Nm ³ /h)	-	-	Opérationnel : Injection H ₂ dans réseau de distribution
METHAMOD	2015	Villejuif (94)	Alcaline	20 kW (4Nm ³ /h)	Bouteille B50	Réacteur millistructuré (1Nm ³ /h)	Opérationnel
JUPITER 1000	2016	Fos sur mer (13)	Alcaline/PEM	500kW/500kW (200Nm ³ /h)	Usine Ascométal	Réacteur millistructuré (25 Nm ³ /h de CH ₄)	Site en cours de construction, injection dans le réseau de transport
MINERVE	2016	Nantes (44)	PEM	10 kW (2Nm ³ /h)	Bouteille B50	Réacteur catalytique (0,5 Nm ³ /h de CH ₄)	Opérationnel, mobilité et recyclage dans chaudière
METHYCENTRE	2018	Céré la Ronde (37)	PEM	250 kW (50Nm ³ /h)	Unité de méthanisation	Réacteur millistructuré (12,5 Nm ³ /h)	Projet démarré en juin 2016, injection dans site de stockage + mobilité (GNV et H ₂)
HYCAUNAIS	2018-2019	St Florentin (89)			Enfouissement de déchets	Méthanation biologique	Contractualisation en cours, injection réseau GRDF



• Principaux projets de démonstration de Power to Gas > 100kWe en Europe (hors France)

Projets Power to Hydrogène

Projet	Date de démarrage	Location du projet	Technologie d'électrolyse et puissance	Commentaires
Sotavento	2008	Xermade (E)	Alcalin – 300kW	Stockage dans des bouteilles à 200 bars + pile à combustible
GrInHy	2018		EHT-SOEC – 150kW	Démonstration SOEC-SOFC (réversibilité de l'électrolyseur haute température)
HyBalance	2017	Hobro (DK)	PEM – 1 200 kW	Mobilité H2 et pour industriels
Hydeploy	2017	Keele (UK)	PEM – 500kW	Injection dans réseau de distribution
Prenzlau		Prenzlau (D)	Alcalin – 600kW	Stockage dans réservoir
Berlin	2014	Berlin (D)	Alcalin – 500 kW	Parc éolien, mobilité et stockage
RH2-PTG	2011	Gratzow (D)	Alcalin – 1000 kW	Usages de l'hydrogène pas clairs

Projets Power to Méthane

Project	Date de démarrage	Localisation du projet	Technologie d'électrolyseur et puissance	Source de CO2	Technologie de méthanation
Power-to-Gas 250	2010	Stuttgart (D)	Alcaline – 250kW	Cylinder	Réacteur catalytique tube-calandre
Audi e-gas	2011	Wertle (D)	Alcaline – 6 Mwe	Biogas	Réacteur catalytique tube-calandre
BioPower2Gas	2013	Allendorf (D)	PEM – 400 kWe	Biogas	Méthanation biologique
CO2-SNG	2014	Łaziska Górne (PL)	Alcaline – 100kWe	Industrial emission from a coal power plant	Réacteurs catalytiques millistructurés
Biocat	2014	Avedøre (DK)	Alcaline – 1 Mwe	Waste water treatment	Méthanation biologique
STORE&GO (D)	2016	Falkenhagen (D)	Alcaline – 1MWe	Biogas	Réacteurs catalytiques en nids d'abeille
STORE&GO (CH)	2016	Solothurn (CH)	Alcaline – 700kWe	Waste water treatment	Méthanation biologique
STORE&GO [I]	2016	Troia (I)	Alcaline – 200kWe	Atmospheric capture	Réacteurs catalytiques millistructurés
RAG	2018	Pilsbach (AT)	Alcaline – 600k We first and ultimately 13 MWe	Unité Bioéthanol	Méthanation in-situ en site de stockage en cavité