

PRODUIRE, STOCKER ET UTILISER L'HYDROGÈNE

Avec les Centres de recherche du Carnot M.I.N.E.S | Projet HyTREND | 2 juillet 2024

Le Carnot M.I.N.E.S

Agnès Laboudigue, Carnot M.I.N.E.S

Le projet HyTREND

Christian Beauger, PERSEE

Les résultats marquants du projet

Stéphanie Petit, Dowel

Production d'hydrogène bas carbone: nouveaux matériaux d'électrode

Christian Beauger, PERSEE et Doan Pham Minh, RAPSODEE

Stockage sous-terrain: aspects thermodynamiques et géomécaniques

Murad Abuaisha, Géosciences

Perspectives et discussion

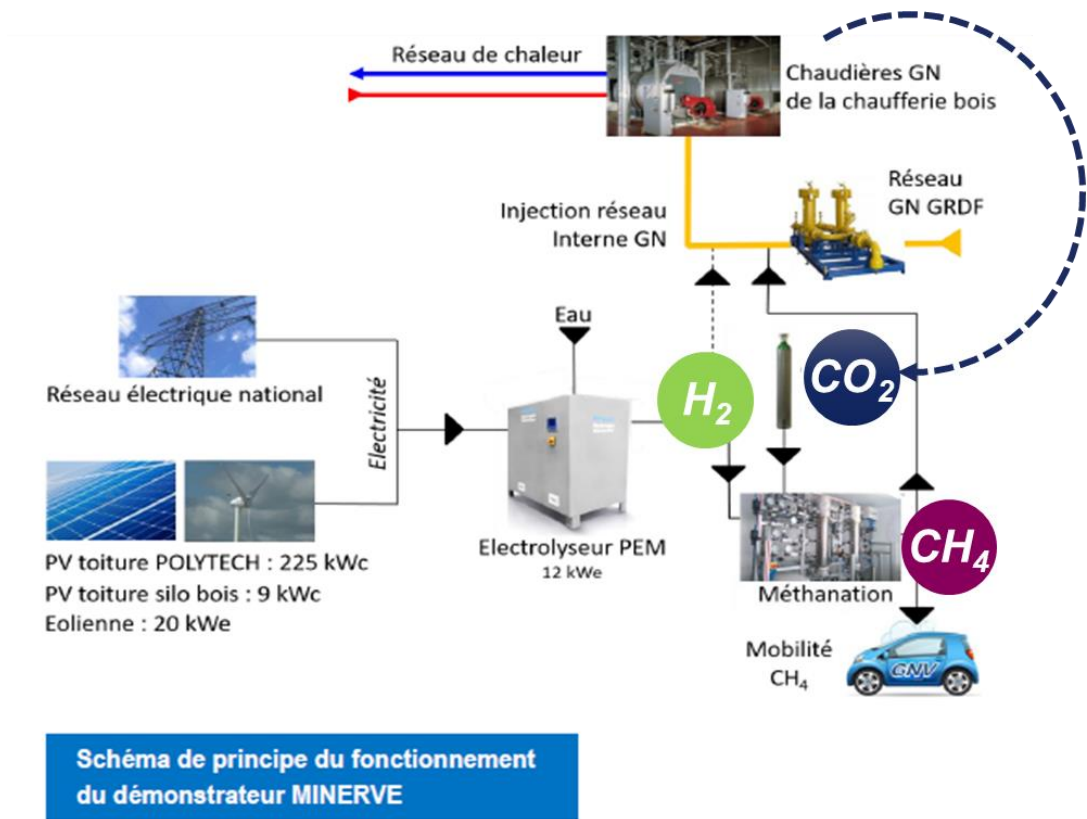
Stéphanie Petit, Dowel

Introduction du projet HyTREND

Christian Beauger, PERSEE

Mobilisation des expertises transdisciplinaires du groupe H₂MINES autour
de la plateforme Power to Gaz MINERVE (Nantes)

5 Ecoles, 12 Centres de Recherche

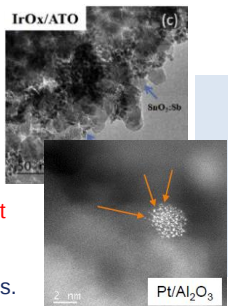


HyTREND, hydrogène pour une transition énergétique décarbonée

Les différentes tâches du projet

EBT :
NPs IrOx supportées
sur aérogel
oxyde métallique

Ref. biogaz :
Single Atom Catalyst
Ni, Pt
sur hydroxyapatites
+ actif/sélectifs/stables.



Production d'hydrogène :

- Electrolyse de l'eau BT, HT-rév. (PERSEE)
- TriReformage du biogaz (RAPSODEE)
- PyroGazéification de biomasse (RAPSODEE)

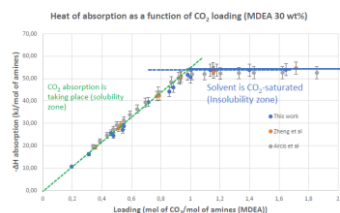
Captage CO₂ :

- Régénération de solvant (GEPEA, CTP)

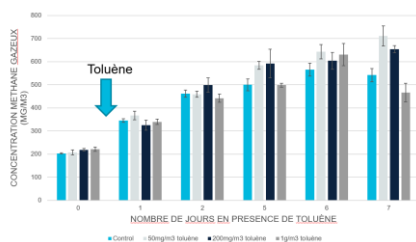
Production de méthane :

- Méthanation biologique (LSR)

Absorption CO₂



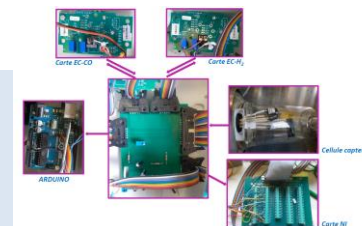
Méthanation biologique



Transverse :

- Evaluation environnementale de la chaîne (OIE, FAYOL)
- Etude et caractérisation des risques (LSR)
- Cartographie des enjeux / débats (CSI)

Cartes électroniques & cellule multicapteurs



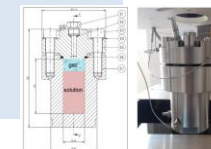
Détection gaz :

- Plateforme multicapteurs (SPIN)

Stockage de gaz :

- Cavités salines (GEOSCIENCES, CTP)
- Stockage par adsorption (GEPEA)

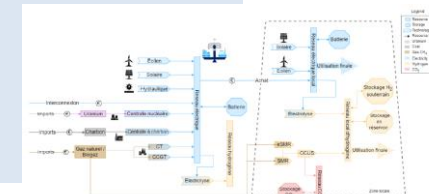
Cellule d'étude de la cinétique de dissolution des gaz dans une solution aqueuse



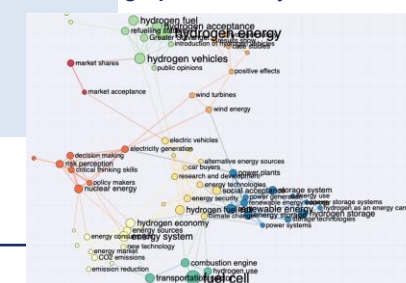
Intégration réseaux d'énergie :

- Aide à la décision pour le déploiement de technologie de production (PERSEE)
- Synergies Eco-Indus. (ERT)

Modélisation

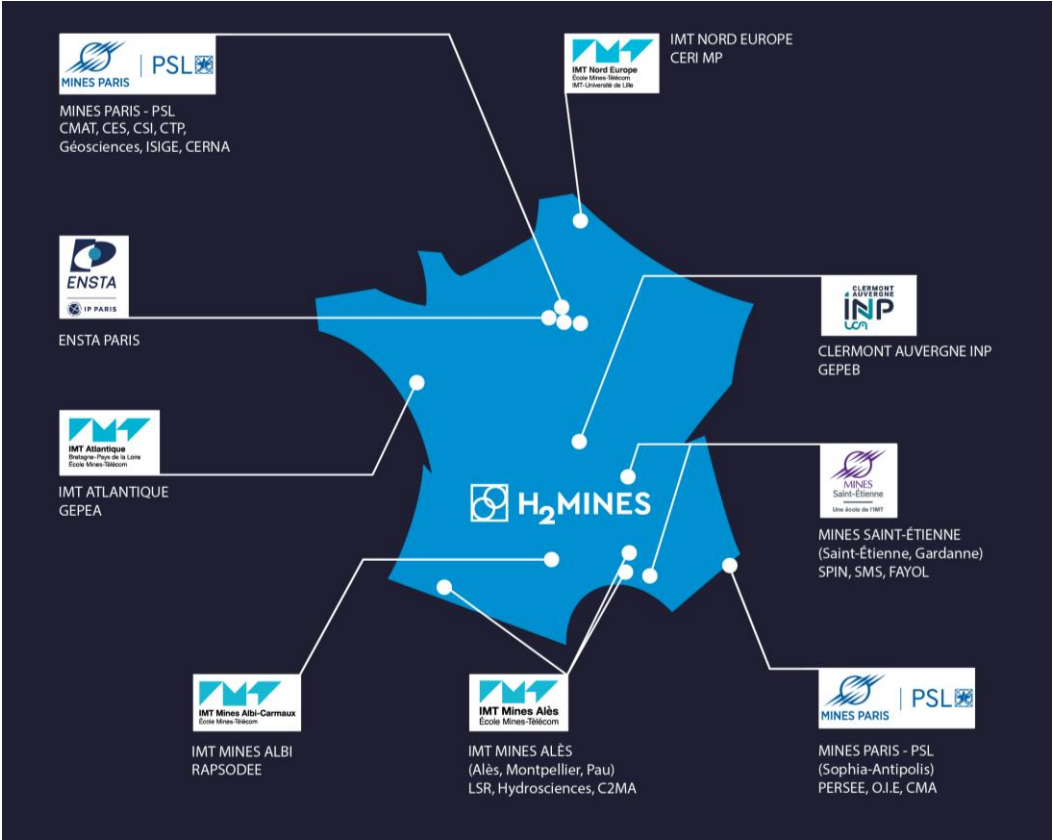
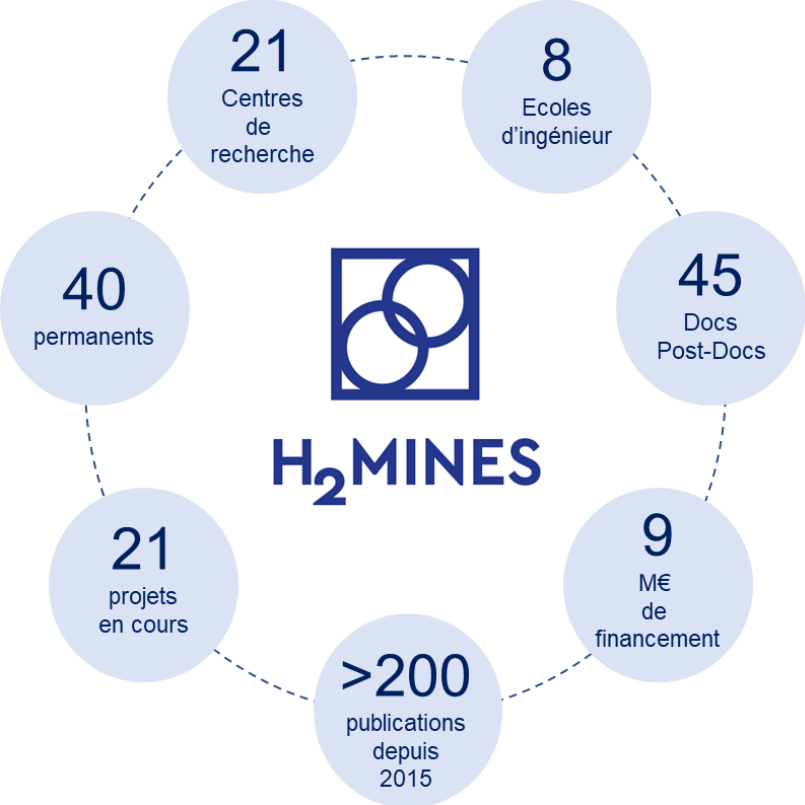


Cartographie des enjeux/débats



Créé en 2016, H₂MINES fédère

les enseignants-chercheurs du Carnot M.I.N.E.S. actifs sur la filière hydrogène



H₂MINES, groupe d'experts H₂ du Carnot M.I.N.E.S

R&D, innovation et formation pour la filière hydrogène



OUR NETWORK FOR THE H₂ ENERGY SECTOR

RESEARCH & DEVELOPMENT | EDUCATION

Carnot M.I.N.E.S. research centres involved in H₂MINES

www.carnot-mines.eu/tr

MATERIALS PROCESSES-SYSTEMS MODELING CHARACTERIZATION GLOBAL ANALYSIS EDUCATION			
PRODUCTION		STORAGE/DISTRIBUTION	END USES
- Biomass gasification - Biogas reforming RAPSODEE		Compression and distribution: simulation RAPSODEE	- Fisher-Tropsch synthesis - Methanation RAPSODEE
Purification (PSA, membrane, absorption) GEPEA		- PEMFC membrane materials: functionalization of clays - Biological methanation C2MA	- Risk analysis - Eco-industrial synergy LGEI/EUREQUA/ERT
Modeling & Optimization: Porous media, adsorption, storage, topology optimization CERI EE		Power to gas: methanation, CO₂ capture GEPEA	
- Electrolysis (LT PEMWE) - Plasma cracking, reforming - Electrochemical purification (LT) - Photocatalysis PERSEE		- Electrochemical compression - Porous materials PERSEE	Future energy systems and markets PERSEE
- Phase diagrams / measurement of thermophysical properties - Selection of solvents CTP		- PEMFC: MEA materials (catalysts and composite membranes), system studies (transport, stationary, H₂ recirculation, hybridization...) - CO₂ reduction - Renewable Energy coupling - Multi-energy systems PERSEE	Prospective & optimization of energy systems CMA
- Electrolysis (SOEC, PEMWE, MCEC) - System analysis CES		- Methanation (coelectrolysis) - Power to gas - CO₂ recycling - Biogas CES	Life cycle assessment OIE
- Electrolysis (HT) - Reforming - Electrochemical purification (HT) MAT		Salt caverns: integrity/reactivity GÉOSCIENCES	Socio-technical controversies CSI
Gas sensors: CO, H₂, safety/process control SPIN		SOFC single chamber SPIN	Process economics CES
Electrode material: modeling /simulation (image analysis) SPIN		- HP composite tanks: tests/calculations - Pipeline protection: cold spray coating MAT	The economics of H₂ (cost benefit analysis, public policy assessment, innovation and competition) CERNA
Biomass flash pyrolysis UCP		SOFC: MEA materials, new regenerative systems MAT	Territorial planning and public policies in energy transition ISIGE
- Doped MOFs (C, metal, metal+C) - Liquid carriers (LOHC) - Hydrides UCP		- Combustion - Reactivity/Risk UCP	Safety and reliability assessment, public perception of safety CRC
Solar photoreactive processes I. PASCAL			Underground storage environmental impact GÉOSCIENCES
Electrode material: modeling /simulation (image analysis) SPIN		Pipeline integrity and durability SMS	- Environmental analysis: qualitative assessment and absolute sustainability evaluation - Decision aid support for territorial planning FAYOL
Biomass flash pyrolysis UCP		- Combustion - Reactivity/Risk UCP	Tech-eco evaluation of the distribution chain UCP
Solar photoreactive processes I. PASCAL			

https://s3.production.france-hydrogene.org/uploads/sites/5/formidable/2/H2MINES-Flyer_2021.pdf

Promouvoir les résultats marquants du projet HyTREND

PETIT Stéphanie, Dowel Innovation

PRODUIRE,
STOCKER
ET
UTILISER
L'HYDROGÈNE

AVEC LES
CENTRES DE RECHERCHE
DU CARNOT M.I.N.E.S

Synthèse du projet phare HyTREND

Qui sommes-nous?

Dowel Innovation en quelques mots

Société de conseil en management de l'innovation riche de plus de 30 ans d'expérience

Expertise dans plusieurs secteurs:



**Systèmes énergétiques décarbonnés
(ENR, smart grids, ...)**



Bâtiments et villes durables



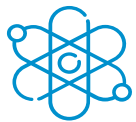
**Transverses (Bauhaus, Culture et
créativité, Solutions fondées sur la
nature...)**

Impulser le développement de nouvelles solutions pour la filière hydrogène-énergie

Le Livre Blanc

Le Livre Blanc vise à démontrer les opportunités et avancées technologiques pour la filière hydrogène – énergie.

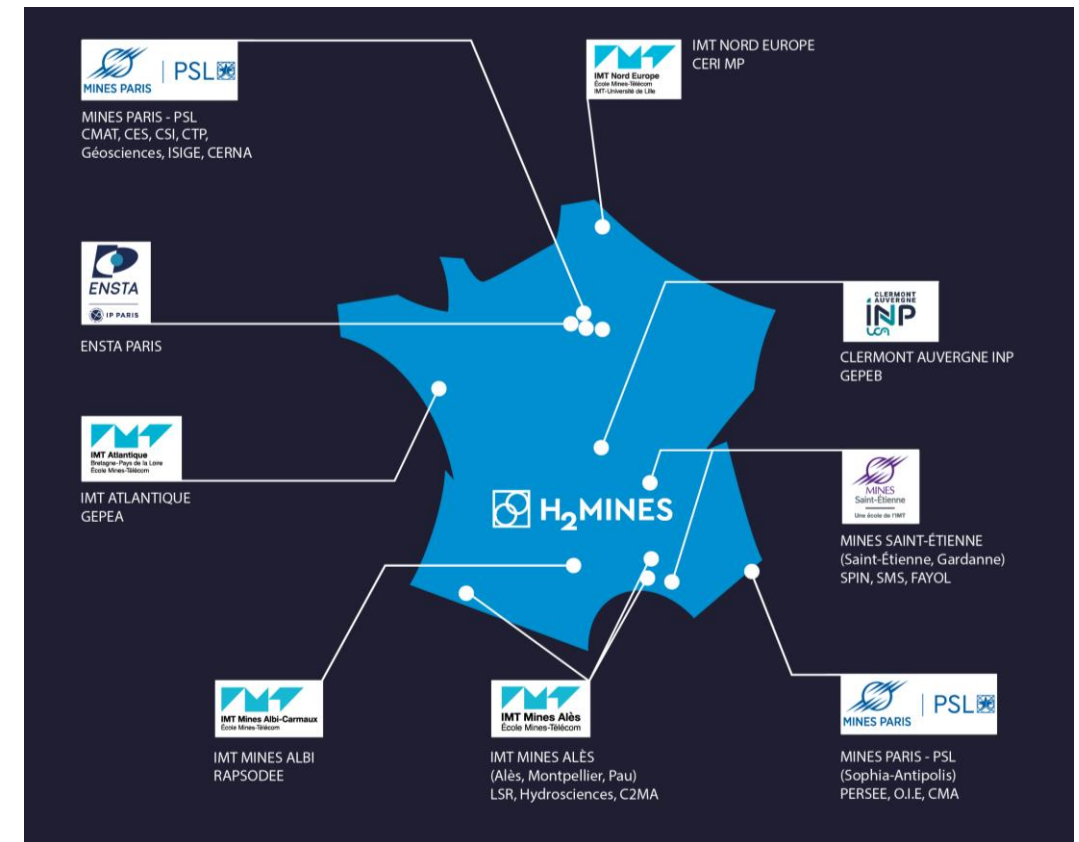
Elaboré à partir d'une série d'entretiens et d'ateliers avec les porteurs d'actions du projet et centres du groupe H₂MINES.



15 centres impliqués



23 chercheurs engagés

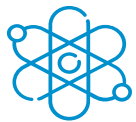


Impulser le développement de nouvelles solutions pour la filière hydrogène-énergie

Le Livre Blanc

Le Livre Blanc vise à démontrer les opportunités et avancées technologiques pour la filière hydrogène – énergie.

Elaboré à partir d'une série d'entretiens et d'ateliers avec les porteurs d'actions du projet et centres du groupe H₂MINES.



15 centres impliqués



23 chercheurs engagés

Identification des résultats marquants



Positionnement vis-à-vis des challenges de la filière



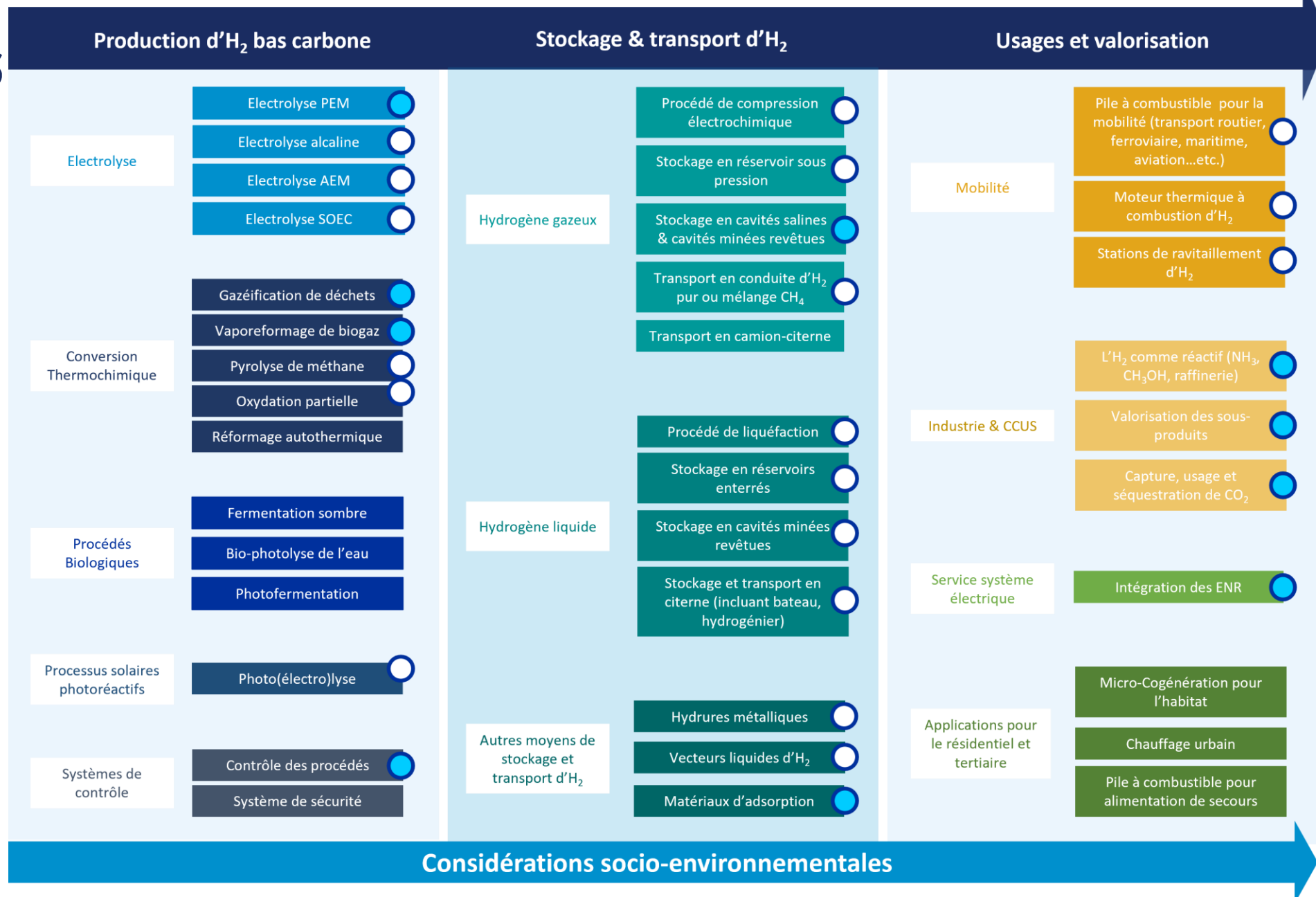
Ouverture à plus de collaborations



Définition des perspectives



Les résultats phares



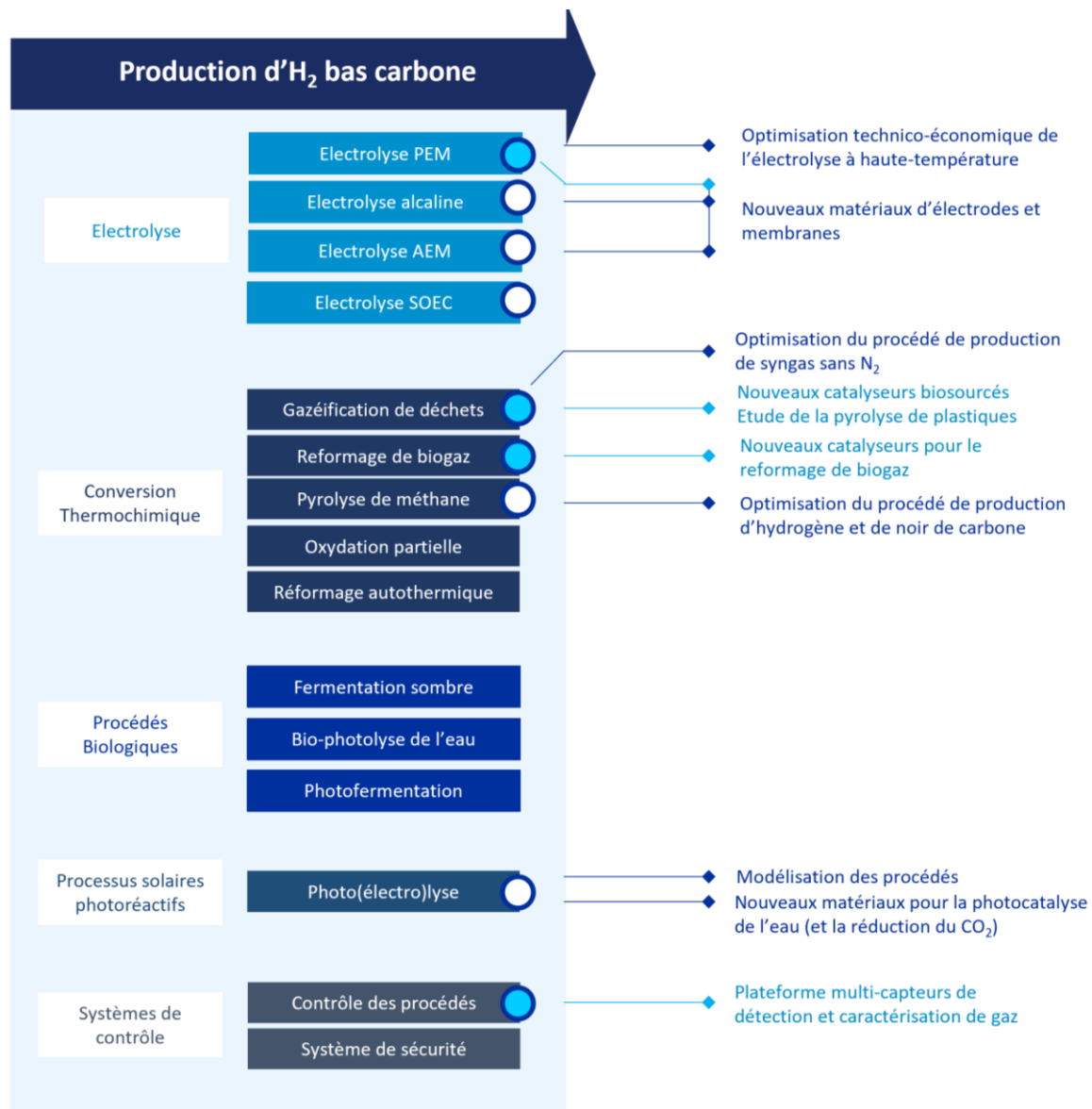
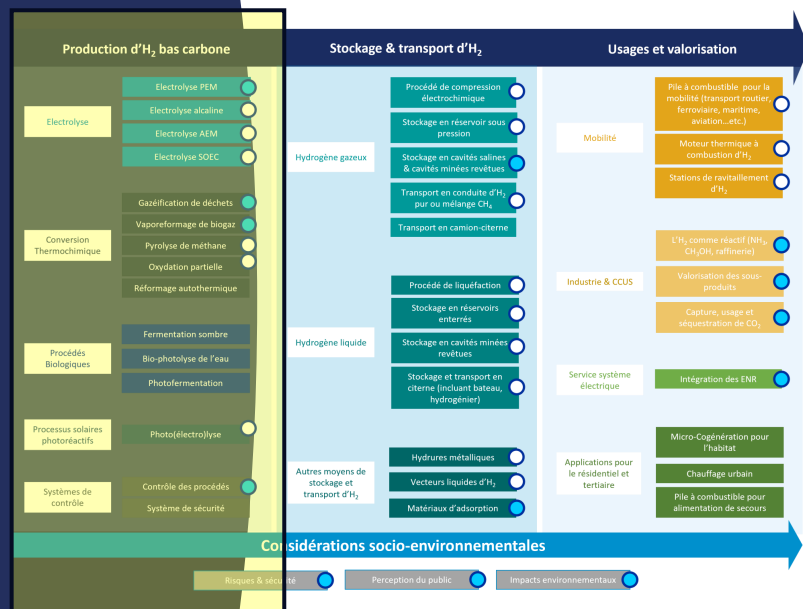
Considérations socio-environnementales

Risques & sécurité

Perception du public

Impacts environnementaux

Les résultats phares



Mines Paris - PSL – CEEP (CES)

Mines Paris - PSL – PERSEE

IMT Mines Albi – RAPSODEE

Mines Paris – PSL – PERSEE

Clermont Auvergne INP – GEPEB

Mines Paris – PSL – PERSEE

MINES Saint-Etienne – SPIN

Le Carnot M.I.N.E.S

Agnès Laboudigue, Carnot M.I.N.E.S

Le projet HyTREND

Christian Beauger, PERSEE

Les résultats marquants du projet

Stéphanie Petit, Dowel

Production d'hydrogène bas carbone: nouveaux matériaux d'électrode

Christian Beauger, PERSEE et Doan Pham Minh, RAPSODEE

Stockage sous-terrain: aspects thermodynamiques et géomécaniques

Murad Abuaisha, Géosciences

Perspectives et discussion

Stéphanie Petit, Dowel

Production d'hydrogène bas carbone: nouveaux matériaux d'électrode

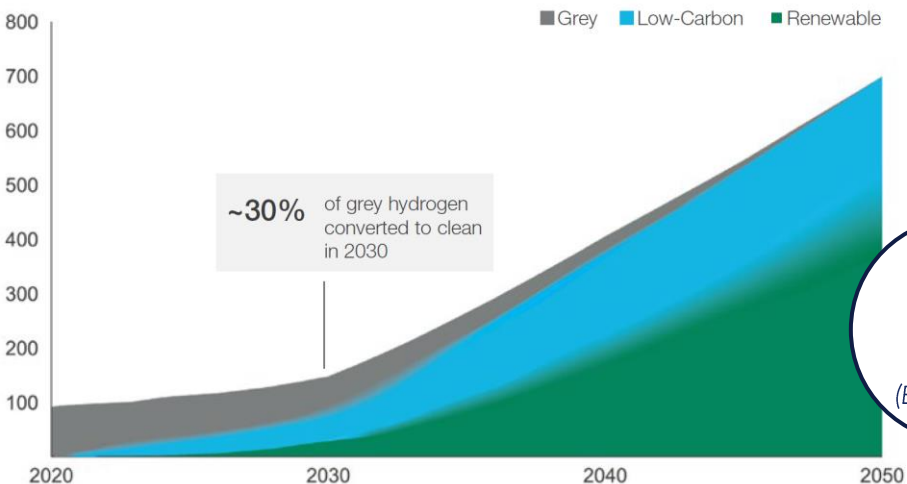
Christian Beauger, Mines Paris – PSL, PERSEE
Doan Pham Minh, IMT Mines Albi, RAPSODEE

Production d'hydrogène bas carbone : nouveaux matériaux d'électrode

1. Electrolyse de l'eau basse température (PEMWE) / Centre PERSEE, MINES Paris - PSL

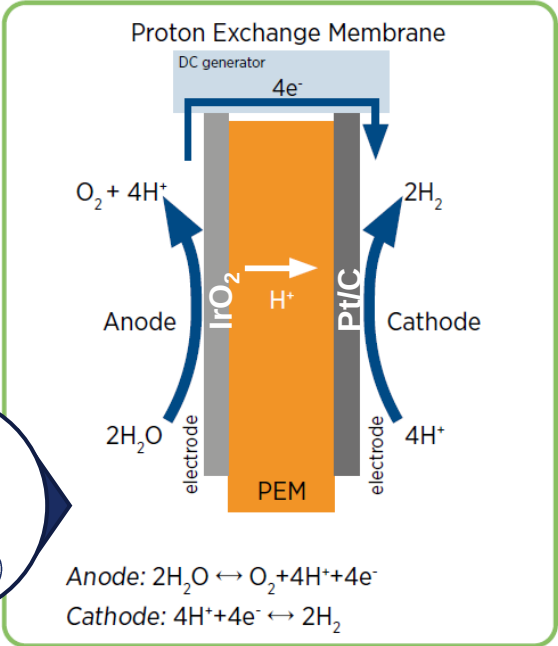
IEA & Hydrogen council perspectives (Nov. '21)
Target : limit GW to 1.5-1.8°C

Hydrogen supply by production method (indicative)
MT hydrogen p.a.



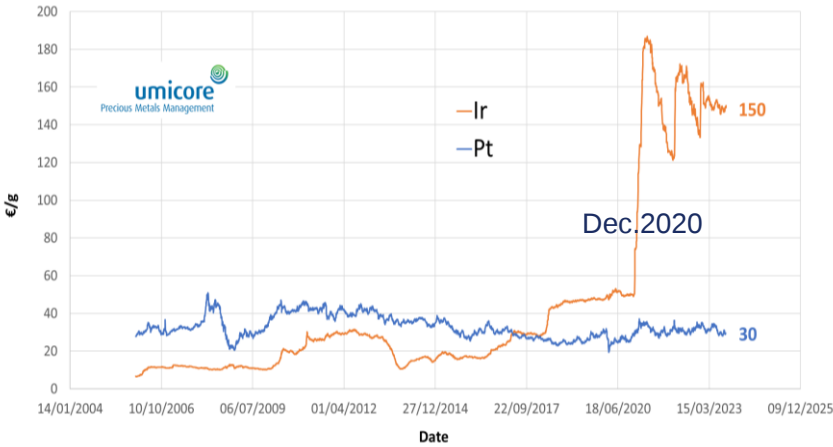
1 Mt/y
= 5,7 GW
(El. 66%, 8760 h)

PEM Water Electrolysis



Source: IRENA

Ir & Pt price evolution



PEMWE = 0,5 g_{Ir}/kW

500 Mt_{H2} 2050 = 1500 t_{Ir}



Nouvelle anode faiblement chargée en Ir

Production d'hydrogène bas carbone : nouveaux matériaux d'électrode

1. Electrolyse de l'eau basse température (PEMWE) / Centre PERSEE, MINES Paris - PSL

Aérogels, support de NPs d'IrO₂

M-doped TiO₂ or SnO₂

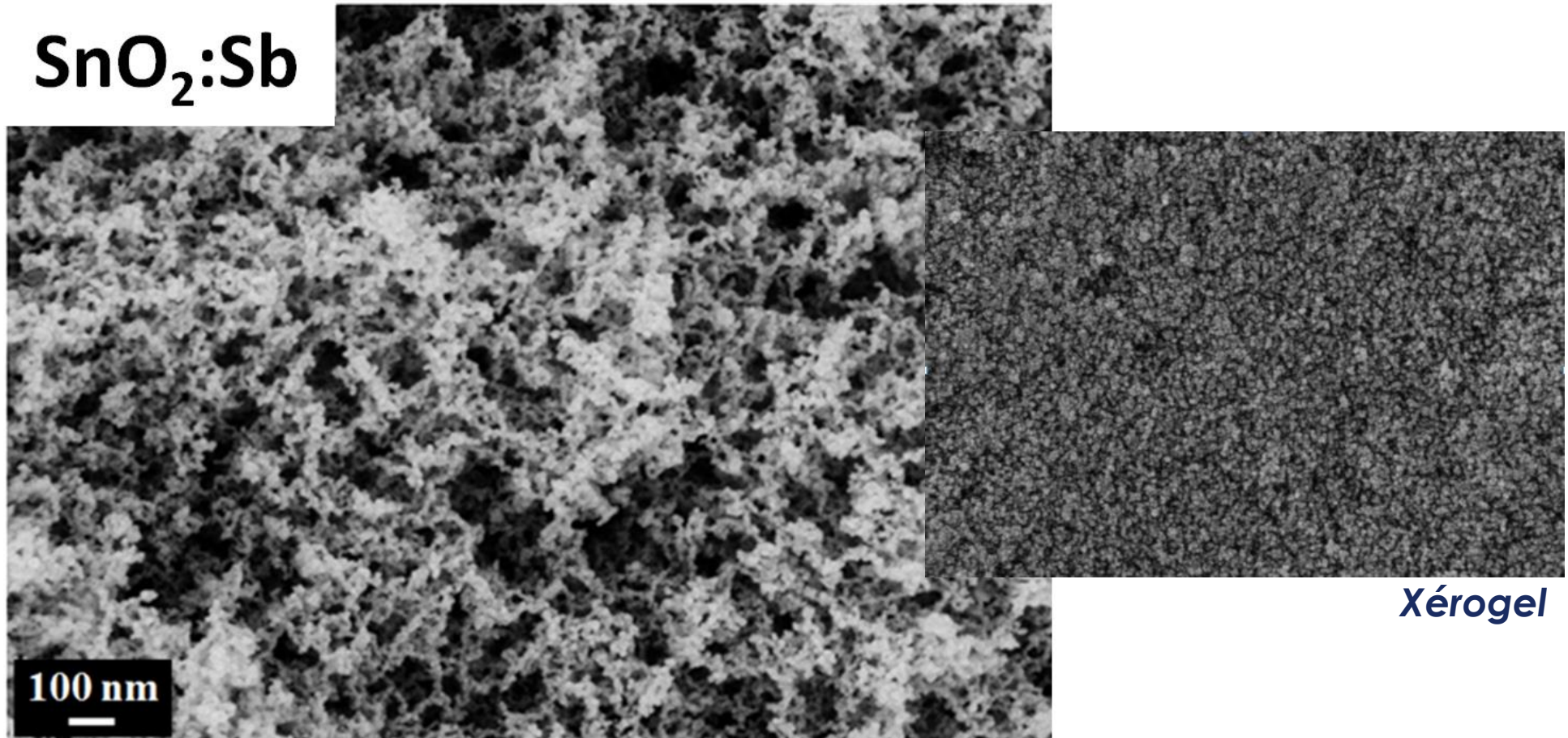


Production d'hydrogène bas carbone : nouveaux matériaux d'électrode

1. Electrolyse de l'eau basse température (PEMWE) / Centre PERSEE, MINES Paris - PSL

Aérogels, support de NPs d'IrO₂

SnO₂:Sb



Aérogel

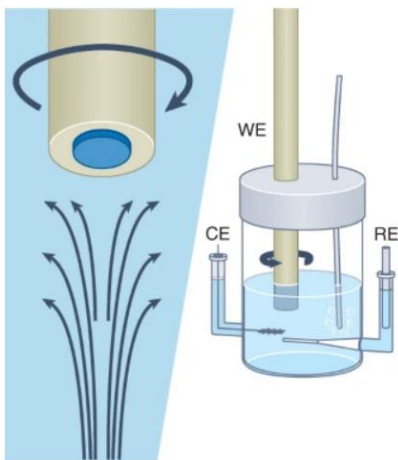
Xérogel

Production d'hydrogène bas carbone : nouveaux matériaux d'électrode

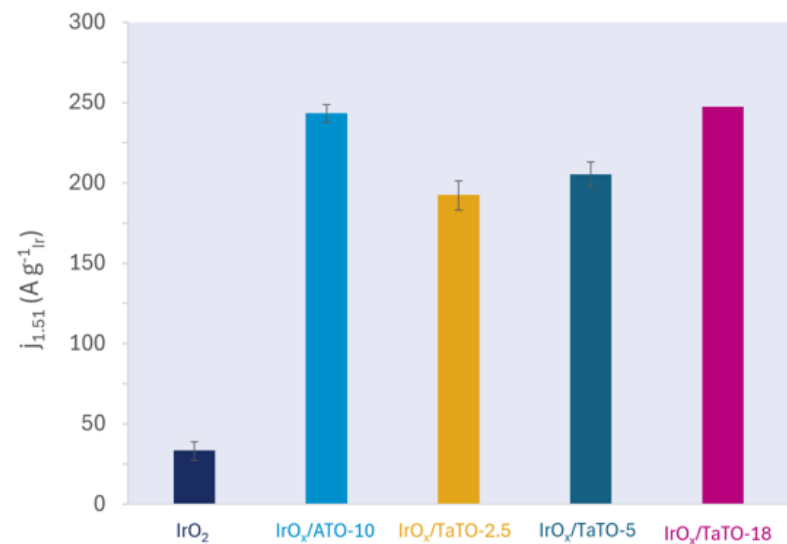
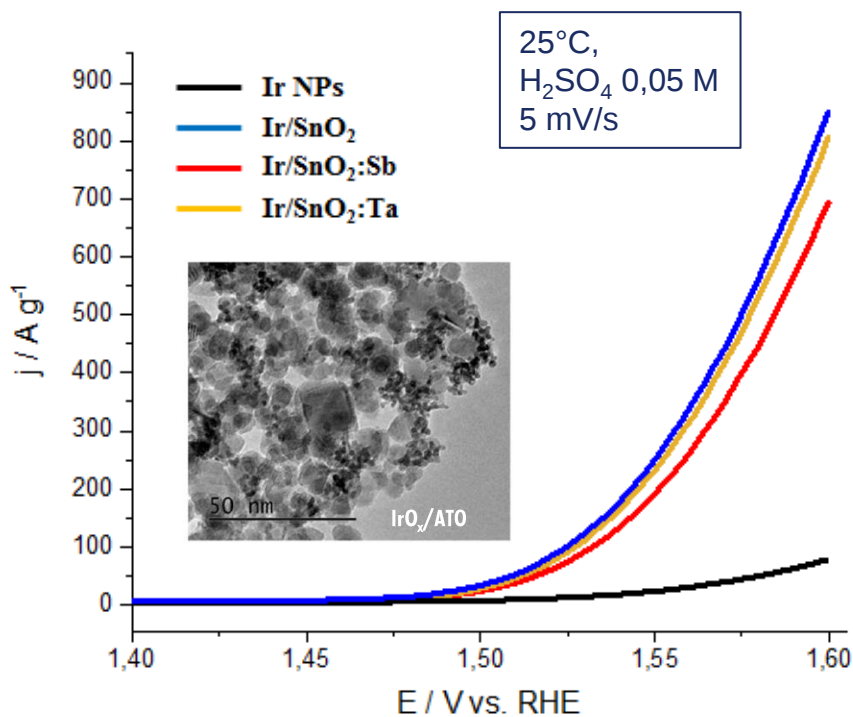
1. Electrolyse de l'eau basse température (PEMWE) / Centre PERSEE, MINES Paris - PSL

IrO₂/Aérogels, activité catalytique pour l'oxydation de l'eau

Caractérisation
sur électrode tournante



Lazaridis et al., *Nat Catal* 5, 363–373 (2022).



Abou et al., *ACS Catalysis* 10, 13, 7283-7294 (2020)

Sola-Hernandez et al., *Int. Journal of Hydrogen Energy* 44, 24331 (2019)

Production d'hydrogène bas carbone : nouveaux matériaux d'électrode

1. Electrolyse de l'eau basse température (PEMWE) / Centre PERSEE, MINES Paris - PSL

Nouveau projet



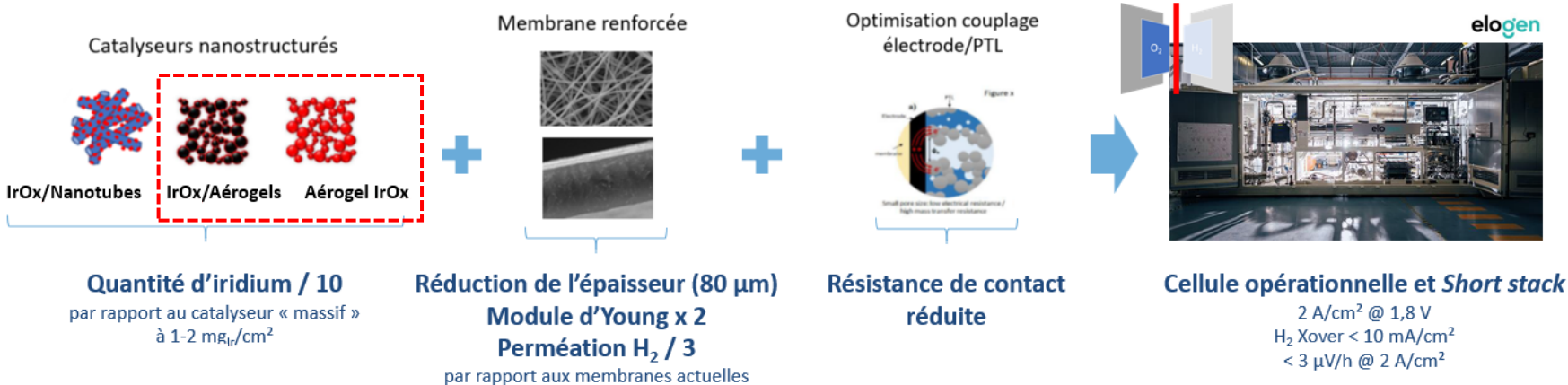
PEPR-H₂ décarboné: MATHYLDE



MATerials for HYdrogen production to Lower our Dependency on Existing ones
ANR-22-PEHY-0011 – '22-'26

Objectif : faciliter le déploiement de l'électrolyse de l'eau basse température (PEMWE) pour la production d'hydrogène décarboné en réduisant CAPEX et OPEX.

Développement de **nouveaux matériaux (catalyseurs, membrane)** et qualification de **cellule d'intérêt industriel**.



- Caractérisations avancées : IL-TEM, WAXS, XAS, Tomography, AFM-SECM...
- Upscaling



Production d'hydrogène bas carbone : nouveaux matériaux d'électrode

Electrolyse/Aerogels

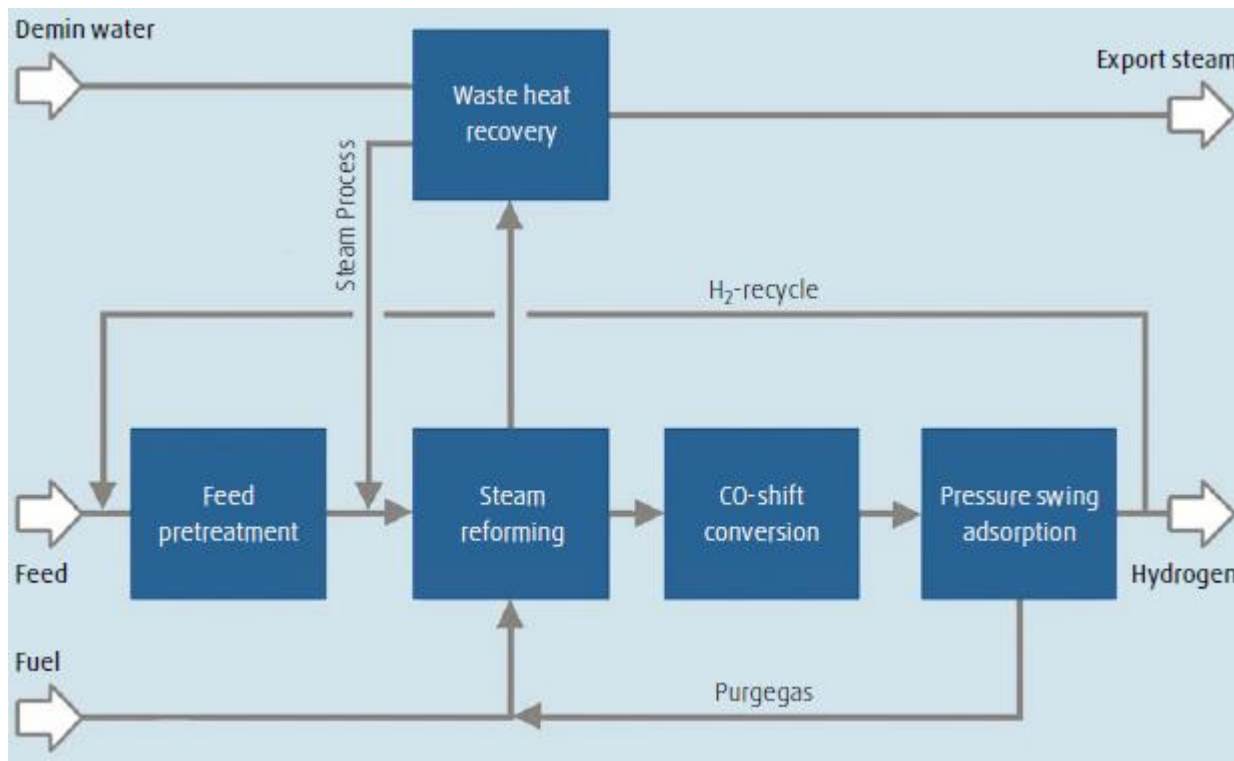
Contact

christian.beauger@minesparis.psl.eu

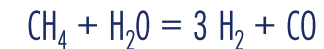
Production d'hydrogène bas carbone : nouveaux matériaux d'électrode

2. Tri-reformage du méthane / Centre RAPSODEE – IMT Mines Albi

Vaporeformage du méthane

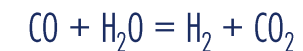


Production de gaz de synthèse



PGM-Ni, 900°C, P=15-20 bar, S/C = 3-4

Réaction du gaz à l'eau



310-450°C

H₂ à forte empreinte C

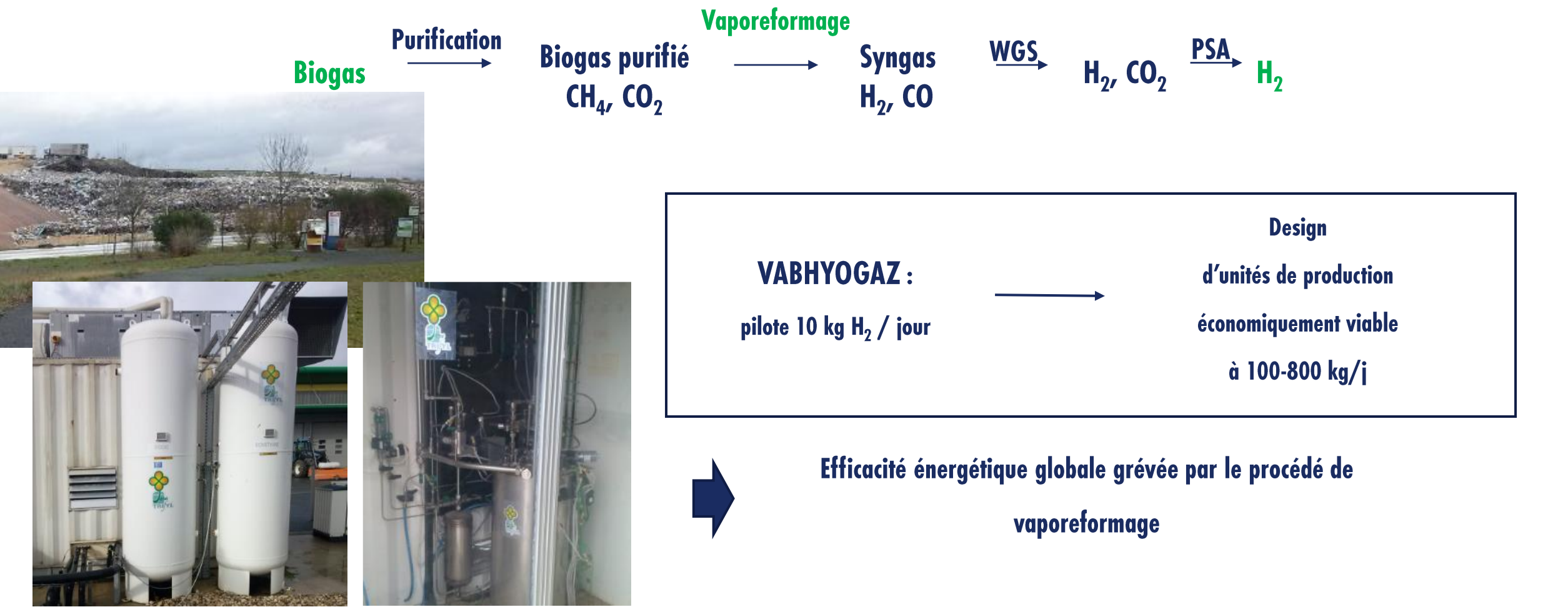
12 kg CO₂ / kg H₂



Production d'hydrogène bas carbone : nouveaux matériaux d'électrode

2. Tri-reformage du méthane / Centre RAPSODEE – IMT Mines Albi

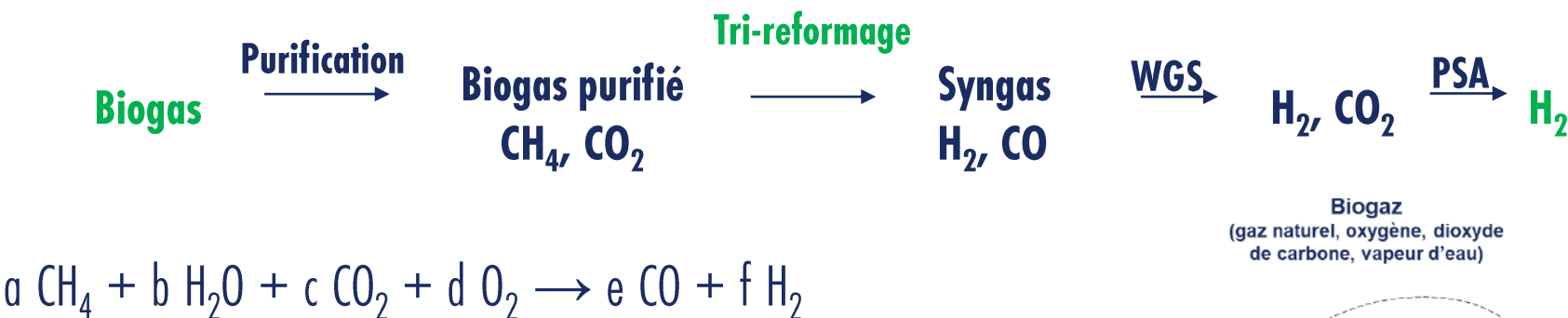
1. Diminution de l'empreinte C par l'emploi de BIOGAZ



Production d'hydrogène bas carbone : nouveaux matériaux d'électrode

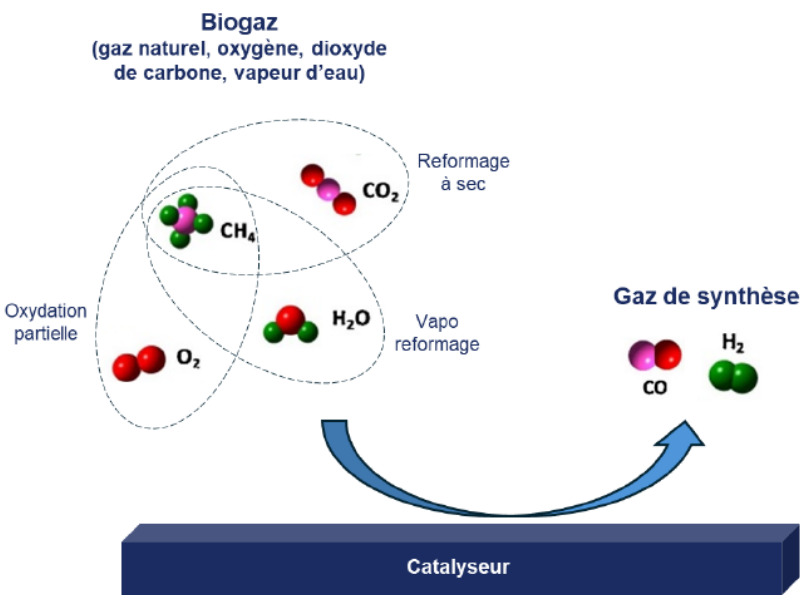
2. Tri-reformage du méthane / Centre RAPSODEE – IMT Mines Albi

2. BIOGAZ + amélioration de l'étape de reformage : TRI-REFORMAGE



Avantages

- Valorisation des principales molécules présentes : CH_4 et CO_2
- Réduction des besoins extérieurs en eau
- Minimisation de la consommation d'énergie pendant l'étape de reformage



Défi



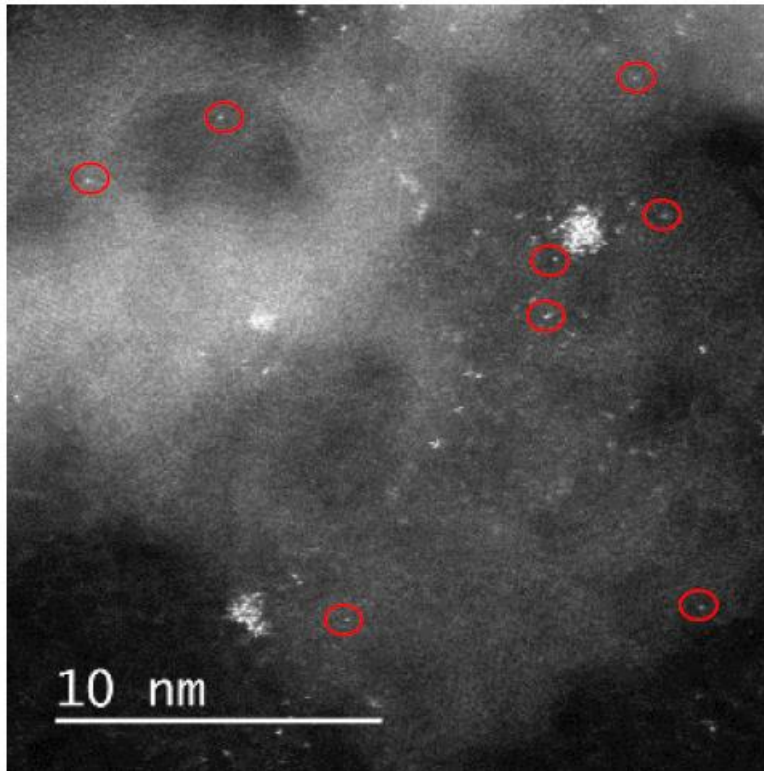
Développer un catalyseur résistant aux conditions sévères du TRM

Production d'hydrogène bas carbone : nouveaux matériaux d'électrode

2. Tri-reformage du méthane / Centre RAPSODEE – IMT Mines Albi

2. Catalyseurs à base d'atomes isolés (SAC) et de particules subnanométriques

Pt/ Al_2O_3



1 atome à qq 10 atomes

- Prétraitement du support pour favoriser l'ancrage du catalyseur
- Imprégnation du support par le précurseur de catalyseur
- Calcination
- Réduction

Production d'hydrogène bas carbone : nouveaux matériaux d'électrode

2. Tri-reformage du méthane / Centre RAPSODEE – IMT Mines Albi

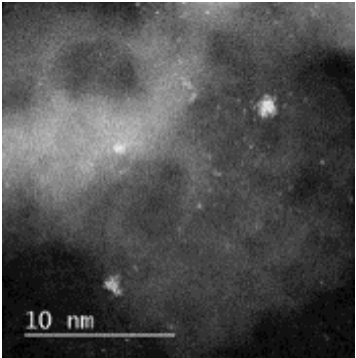
2. Catalyseurs à base d'atomes isolés (SAC) et de particules subnanométriques

$\text{CH}_4 : \text{CO}_2 : \text{H}_2\text{O} : \text{O}_2$
1 : 0.67 : 0.3 : 0.1
Débit $\text{CH}_4 = 45 \text{ mL/min}$
340 mg de catalyseur,
 $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$
 $P = 1 \text{ bar}$
Réacteur lit fixe (8 mm d.i.)

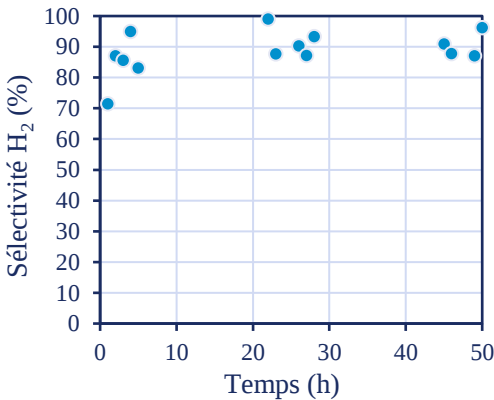
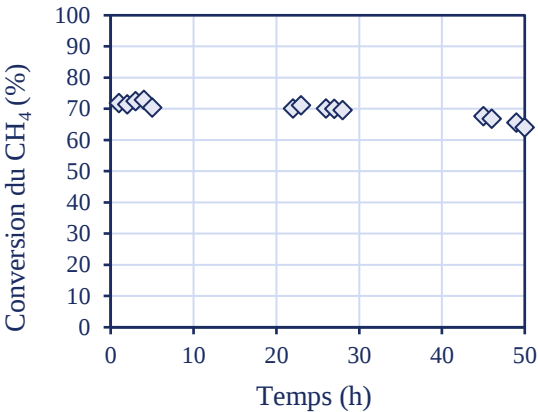
Activité et stabilité

Sélectivité

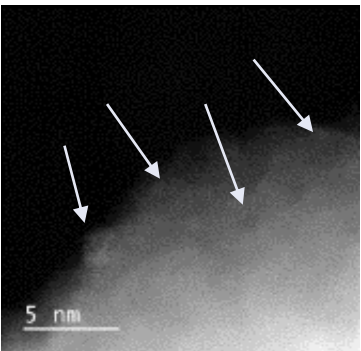
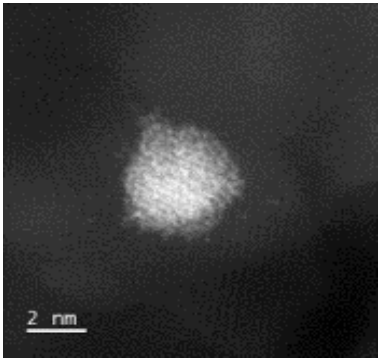
Avant catalyse



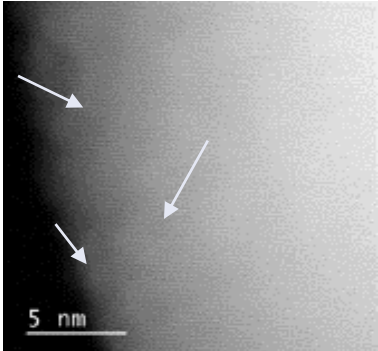
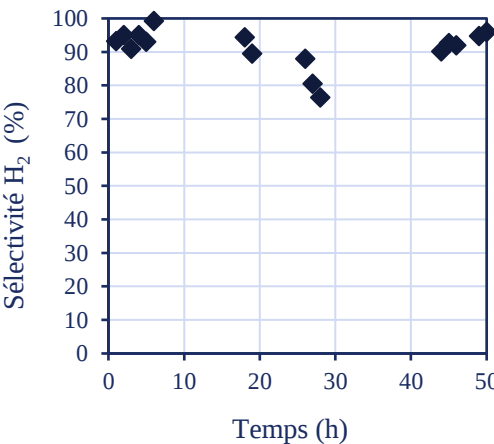
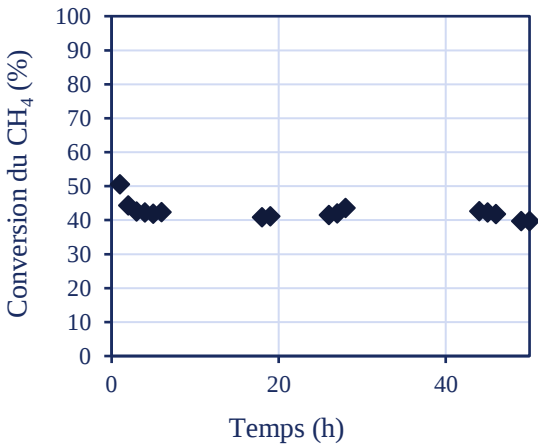
0,5Pt/Al₂O₃



Après catalyse



1Ni/TiO₂



Production d'hydrogène bas carbone : nouveaux matériaux d'électrode

Reformage/SAC

Contact

doan.phamminh@mines-albi.fr

Production d'hydrogène bas carbone : nouveaux matériaux d'électrode

3. Suite : associer les expertises RAPSODEE et PERSEE





Christian.beauger@minesparis.psl.eu



Carnot M.I.N.E.S



carnot-mines.eu

Et après?

PETIT Stéphanie, Dowel Innovation

PRODUIRE, STOCKER ET UTILISER L'HYDROGÈNE

AVEC LES
CENTRES DE RECHERCHE
DU CARNOT M.I.N.E.S

Synthèse du projet phare HyTREND

Elaborer la feuille de route stratégique du groupe H₂MINES

Identification de la maturité technologique (et sociétale) des résultats clés pour un transfert à l'industrie

Identification des collaborations pluridisciplinaires à établir

Identification d'axes non explorés qui le devraient

Stockage en cavités

L'après HyTREND

- Lancement de 4 projets
- Une nouvelle thèse à l'automne
- Un nouveau sujet impliquant 4 centres du Carnot



Nouveaux sujets de recherche

Production

Nouveaux catalyseurs pour électrode
Pyrolyse du méthane & nanotubes de carbone
Dynamique des procédés d'électrolyse
Capteurs de gaz

Valorisation

Valorisation de l'ammoniac vert
Synthèse de CH_4 par méthanation biologique de syngaz
Synthèse de carburant par hydrogénation directe du CO_2
Désorption de solvants CO_2

Transport & stockage

IA et maintenance prédictive des bouteilles de stockage
Prédiction d'usure en compression
Revêtements métalliques et composites pour stockage en cavités minées
Protection et reconversion de conduites

Socio-environnemental

Approvisionnement et gestion des ressources
Gestion des risques
Conception de chaîne de stockage et transport



CONTACTEZ-NOUS!

stephanie.petit@dowel.eu





Christian.beauger@minesparis.psl.eu



Carnot M.I.N.E.S



carnot-mines.eu