



L'expertise du Carnot M.I.N.E.S pour la filière H₂



R&D



Innovation



Formation

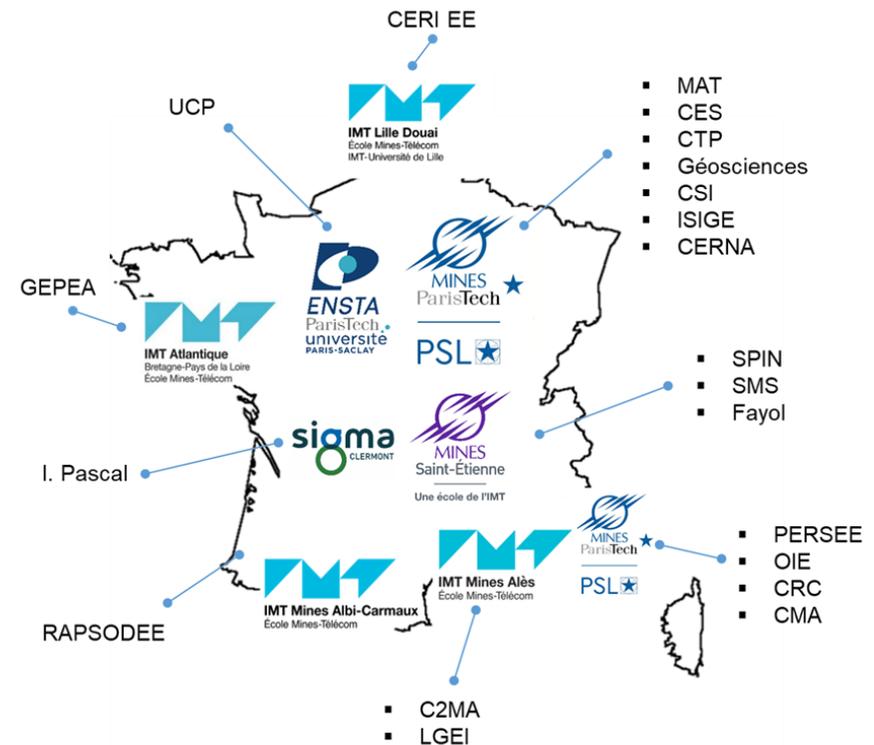
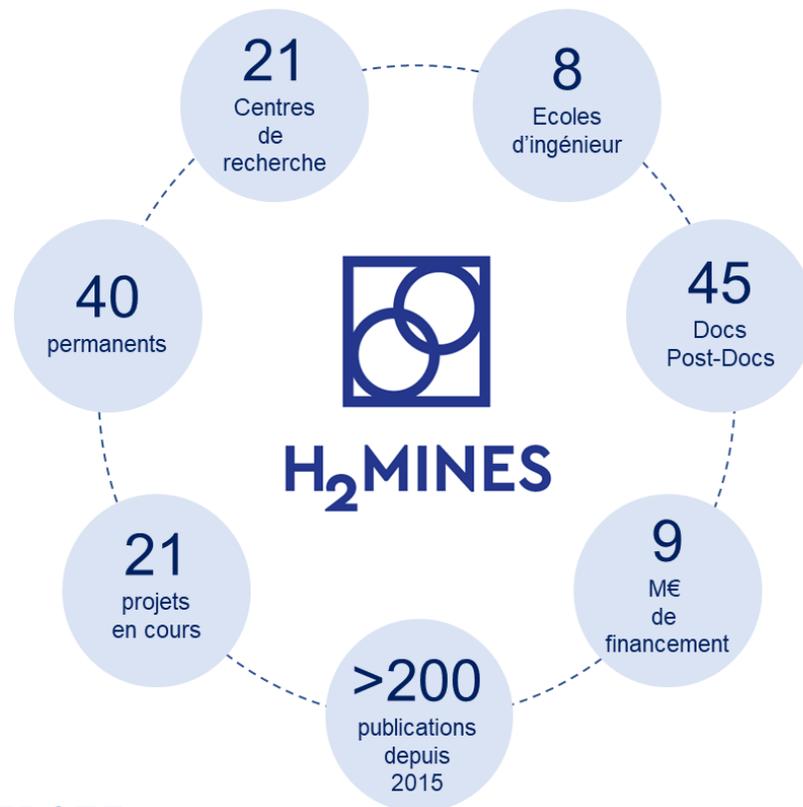
Christian Beauger



H₂MINES, R&D, INNOVATION ET FORMATION POUR LA FILIÈRE HYDROGÈNE

Créé en 2016, H₂MINES fédère

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



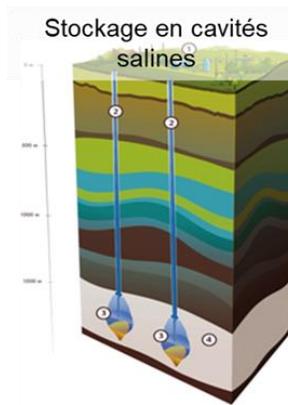
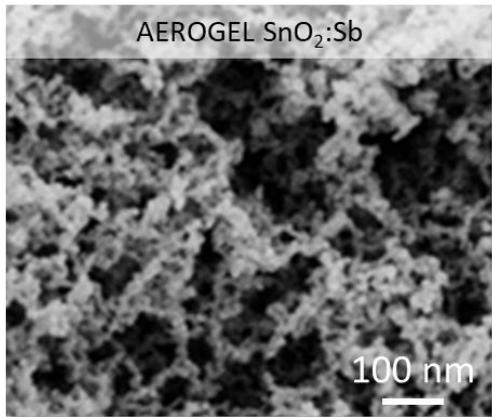
H₂MINES, COMPLÉMENTARITÉ SUR LA CHAÎNE DE VALEUR DE LA FILIÈRE



PRODUCTION	STOCKAGE-DISTRIBUTION	USAGE
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Electrolyse de l'EAU - BT, HT, PEC ▪ Gazéification/Pyrolyse de BIOMASSE ▪ Pyrolyse du METHANE... ▪ ... ▪ Purification - PSA, membrane, électrochimique 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ RESERVOIRS sous pression ▪ MATERIAUX poreux, vecteurs – C, MOF, LOHC, Hydrures ▪ CAVITES salines ▪ ... ▪ Pipelines – Fragilisation, protection 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PILES à Combustible - BT, HT ▪ Synthèse de COMBUSTIBLES FT, capt/rétroconv. CO₂, méthanation biologique ▪ COMBUSTION ▪ Power to Gas ...

DIAGRAMMES de phases, PROPRIETES thermochimiques

CAPTEURS gaz – Plateforme multicapteurs



H₂MINES, DES PLATEFORMES EXPERIMENTALES ORIGINALES (SÉLECTION)

PRODUCTION

Biomasse



Unité pilote VALTHERA



Torche PLASMA

STOCKAGE-DISTRIBUTION

Cavités



Pilote Stockage

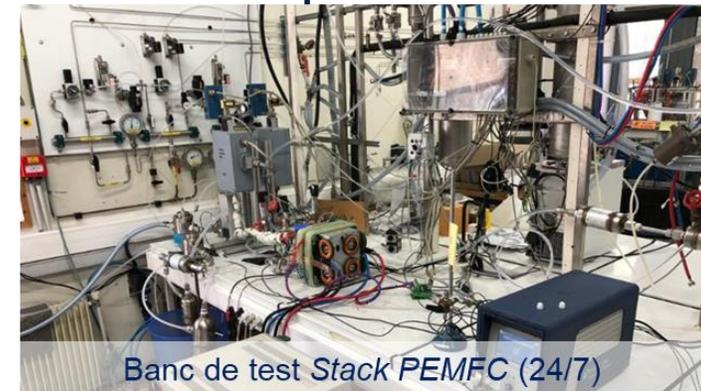
USAGE

SOFC



Banc de test pile monochambre

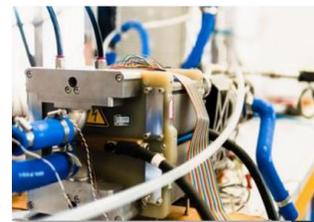
PEMFC (AME → Stack 10 kW)



Banc de test Stack PEMFC (24/7)

H₂MINES, UNE RECHERCHE APPLIQUÉE

- Etroite collaboration avec le monde industriel
- Recherche par projets
- Contrats directs (Accords cadre, Cifre, CIR)
- Mode collaboratif (ANR, FUI, Ademe, Eu)



La recirculation passive :
une idée innovante,
du labo à son intégration.



H₂MINES, CONNECTÉ AUX RÉSEAUX

Pôles de compétitivité

Associations

Sociétés

GDR

...



H₂MINES, FORMATION

Une grande variété de formats – Une voie de recrutement privilégiée

- Formation par la recherche (thèse de doctorat)
- Cycles ingénieurs
 - Stages, projet de fin d'étude
 - Métier de l'Ingénieur Généraliste (MIG)
 - Trimestres recherche et ingénierie
 - Enseignements spécialisés
- Master Recherche
- Mastères spécialisés (*Post master*)
- *Executive Education*



H₂MINES, PROJET FÉDÉRATEUR HYTREND ('19-'23)

Mobilisation des expertises transdisciplinaires de H₂MINES autour de la plateforme *Power to gaz* MINERVE (Nantes)

MINERVE :
Un démonstrateur *power-to-gas*
pour expérimenter l'avenir

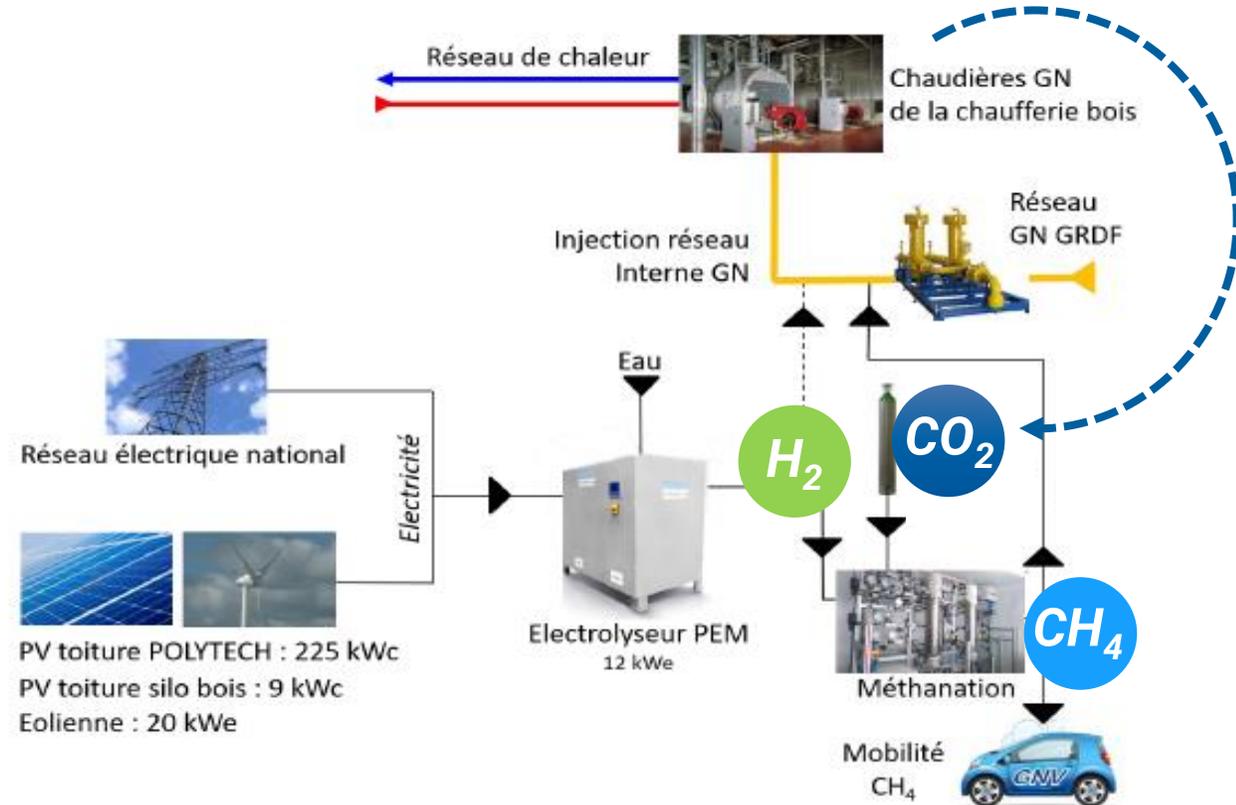
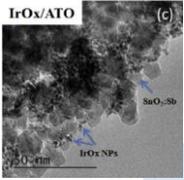


Schéma de principe du fonctionnement
du démonstrateur MINERVE

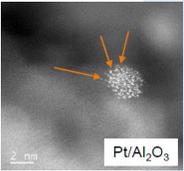
H₂MINES, PROJET FÉDÉRATEUR HYTREND ('19-'23)

Briques technologiques étudiées

EBT :
NPs IrOx supportées sur aérogel oxyde métallique



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



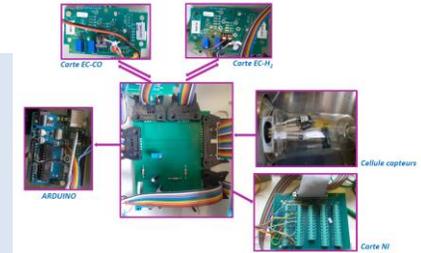
Production d'hydrogène :

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

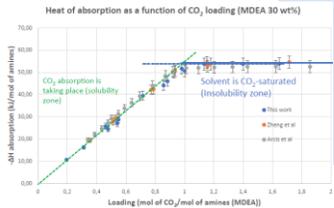
Détection gaz :

- Plateforme multicapteurs (SPIN)

Cartes électroniques & cellule multicapteurs



Absorption CO₂



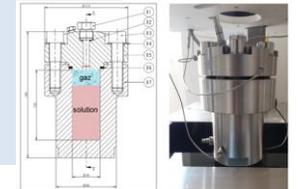
Captage CO₂ :

- Régénération de solvant (DSEE, CTP)
- Valorisation de chaleur fatale/fumées et solvant (CES)

Stockage de gaz :

- Cavités salines (GEOSCIENCES, CTP)

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



Production de méthane :

- Méthanation biologique (LGEI)
- Reformage/Pyrolyse de biomasse (CES)

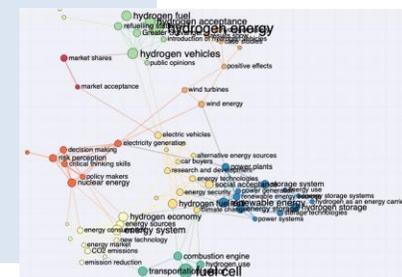
Intégration réseaux d'énergie :

- Synergie réseaux Electricité/Gaz (PERSEE)
- Réseaux de chaleur (CES)

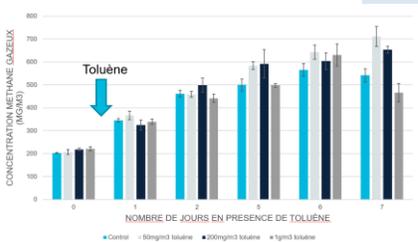
Développement Durable :

- Evaluation environnementale de la chaîne (OIE, FAYOL)
- Etude et caractérisation des risques (LGEI)
- Synergies Eco-Indus. (LGEI)
- Cartographie des enjeux / débats (CSI, ISIGE)

Cartographie des enjeux/débats



Méthanation biologique



H₂MINES, FLYER

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

SOME OF OUR INDUSTRIAL PARTNERS:



Air Liquide

AREVA H₂Gen



storengy



ONE CONTRACT MANAGEMENT ORGANIZATION:



CONTACTS

first.name.name@...

- ▶ **IMT MINES Albi-Carmaux** (@mines-albi.fr)
 - RAPSODEE: Doan Phamminh, Ange Nzihou
- ▶ **IMT MINES Alès** (@mines-ales.fr)
 - C2MA: Belkacem Otazaghine, Aurélie Taguet
 - LGEI: Luc Malhautier, Frédéric Heymes (EUREQUA), Guillaume Junqua (ERT)
- ▶ **IMT Atlantique** (@imt-atlantique.fr)
 - GEPEA: Pascaline Pré
- ▶ **IMT Lille-Douai** (@imt-lille-douai.fr)
 - CERI EE: Rémi Gautier, Daniel Bougeard
- ▶ **MINES ParisTech** (@mines-paristech.fr)
 - PERSEE: Christian Beauger
 - MAT: Yazid Madi
 - CES: Chakib Bouallou
 - CTP: Elise El_Ahmar
 - Géosciences: Faouzi Hadj_Hassen
 - OIE: Paula Perez_Lopez
 - CSI: Madeleine Akrich
 - ISIGE: Jasha Oosterbaan, Daniel Florentin
 - CMA: Gilles Guerassimoff
 - CERNA: François Lévêque
 - CRC: Franck Guamlier
- ▶ **IMT MINES Saint-Etienne** (@mines-st-etienne.fr)
 - SPIN: Mathilde Rieu, Jean-Paul Viricelle
 - Fayol: Valérie Laforest
 - SMS: Cédric Bosch
- ▶ **ENSTA Paris** (@ensta-paris.fr)
 - UCP: Laurent Catolre, Didier Dalmazzone, Johnny Deschamps
- ▶ **Sigma Clermont** (@sigma-clermont.fr)
 - I. Pascal: Jean-François Cornet

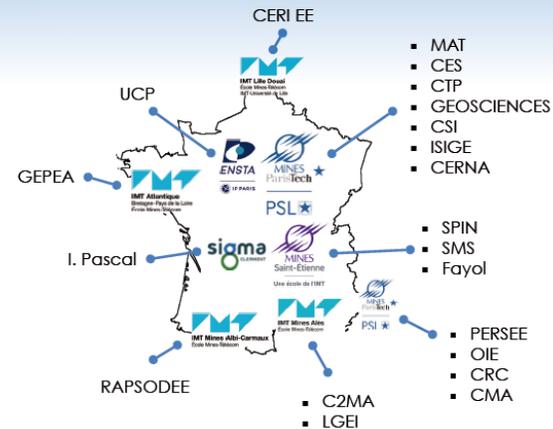
Coordinator: Christian Beauger
christian.beauger@mines-paristech.fr



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/fr

H₂MINES TAKES PART IN:

NETWORKS

- Hydrogen Europe Research
- EERA
- France Hydrogène
- GDR (Solar Fuels, Thermod. moléc. et proc.)
- FRH2 (CNRS)
- Géodénergies
- SFGP
- SFT
- SEE
- Mission H₂ Pays de Loire
- Climate KIC

CLUSTERS

- CAPENERGIES
- DERBI
- MOVEO
- AXELERA
- EMC2
- ASTECH
- TENERDIS

PROJECTS (ANR, EU, PIA...)

- FluidStory, Rostock-H, Waveincore, Stopil-H2, Citeph20, Comehte, Anima, Ingopint-Pacos, Moise, Pretzel, Pegasus, Comet, Momentom, Minerve, Endemat, HyCOMP, FIBreMoD, Osirhys, Chaire industrielle Messiah... & HyTREND (AMI Carnot)

TECHNOLOGICAL PLATFORMS

- Fuel Cell test benches
- H₂ storage, purification test benches
- Gas sensors test benches
- Burners, flash pyrolyzers, gasifiers, HP reactors, methanation...
- Materials synthesis and characterization
- Shaping processes
- Fluids thermophysical properties
- Rock geomechanical characterization
- Power to gas

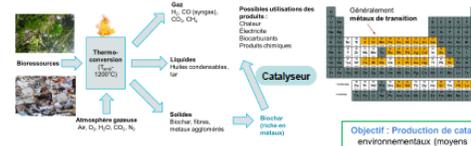
EDUCATION PROGRAMS

- Conferences, courses and student projects in the framework of the different education programs of the partner schools.

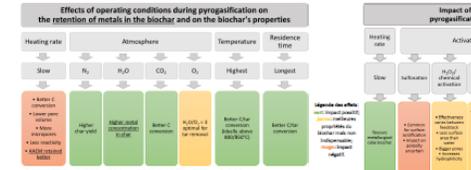
H₂MINES, EN SAVOIR PLUS AVEC LES SESSIONS POSTERS...

Catalyseur biosourcés pour la production d'hydrogène

Introduction : les procédés de thermoconversion

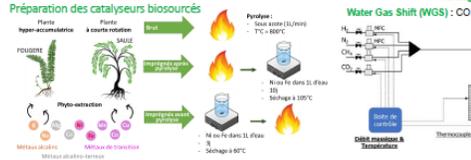


Etat de l'art : impact des conditions opératoires de pyrogazéification dans la préservation des métaux



Conclusion: production de biochar riche en métaux, vitesse de chauffe lente, haute température, temps de séjour long, Clactation sous vapeur

Matériel et méthodes

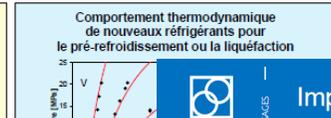
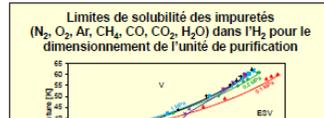


Résultats

Catalyseur	Biomasse	Méthode	Intégration	Concentration des gaz (wt%)	Sélectivité (%)	Conversion (%)	Equilibre (Théor.)
Biocat	saule	saule	saule	21.9	7.4	0.1	100.0
Biocat	saule	saule	saule	21.9	7.4	0.1	100.0
Biocat	saule	saule	saule	21.9	7.4	0.1	100.0
Biocat	saule	saule	saule	21.9	7.4	0.1	100.0
Biocat	saule	saule	saule	21.9	7.4	0.1	100.0
Biocat	saule	saule	saule	21.9	7.4	0.1	100.0
Biocat	saule	saule	saule	21.9	7.4	0.1	100.0
Biocat	saule	saule	saule	21.9	7.4	0.1	100.0
Biocat	saule	saule	saule	21.9	7.4	0.1	100.0
Biocat	saule	saule	saule	21.9	7.4	0.1	100.0

Théodore GRAUL, Maria GONZALEZ MARTINEZ, Ange NZIHOU
IMT Mines Albi, Centre RAPSODEE, CNRS UMR 5302
Campus Jarlard - 81015 Albi CT Cedex 09 (France) marie.gonzalez-martinez@imt-albi.fr

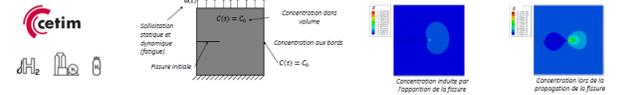
Étude des propriétés thermophysiques de l'hydrogène d'intérêt pour sa liquéfaction



Dimensionnement, Conception et Contrôle des Équipements Sous Pression (ESP) en Environnement Hydrogène Gazeux sous Pression : Structures Métalliques, Composites et Hybrides

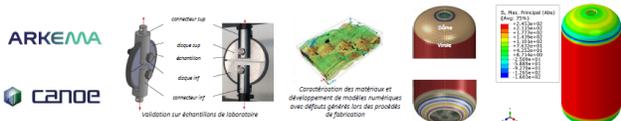
Transport et stockage de H₂ pressurisé dans des ESP métalliques :

- Modélisation du comportement et de l'endommagement des ESP sous H₂ (fragilisation par hydrogène)
 - Dimensionnement et conception de nouveaux appareils et équipements
 - Développement de méthodes et modèles numériques d'initiation et propagation de fissures par la méthode champ de phase
 - Validation des modèles sur éprouvettes et maquettes réduites d'ESP
 - Développement de jumeaux numériques d'appareils à pression
- Contrôle non destructif et suivi en service des ESP (ultrasons, émission acoustique)



Matériau composite pour le stockage et le transport de H₂ pressurisé :

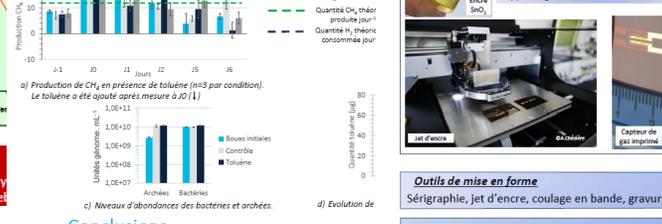
- Conception et modélisation multi-échelle du réservoir en composite à faible coût et 100% recyclable pour le stockage et le transport de H₂
 - Optimisation des paramètres du procédé de fabrication d'enroulement filamentaire (vitesse, tension fils, température)
 - Modèle numérique généré directement à partir d'images µCT (statistique des phases des matériaux et des défauts)
 - Modélisation multi-échelle avec prise en compte de la variation de la microstructure et des défauts générés au cours du procédé
- Contrôle non destructif et suivi en service des réservoirs (ultrasons, émission acoustique, fibres optiques à réseaux de Bragg,...)



Impact de composés du syngaz sur la biométhanation ex situ

Positionnement et enjeux scientifiques

Thermo-conversion de la biomasse (déchets municipaux) Objectif : Valorisation des produits gazeux par méthanation impact de composés organiques volatils (COV) sur le fonctionnement



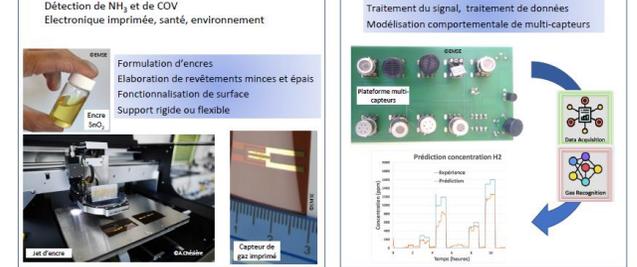
Conclusions

- Impact limité du toluène sur la production de méthane
- Données similaires en présence de styrène
- Structure des communautés microbiennes (en cours)
- Validation des résultats

M. Rieu, J.-P. Viricelle, M. Minot, R. Lakhmi, R. Alammouz
Mines Saint Etienne, Centre SPIN
158 cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne Cedex 02

Les capteurs pour la filière hydrogène à Mines St-Etienne

De la physico-chimie des interactions solide-gaz à l'instrumentation



Outils de mise en forme

Sériographie, jet d'encre, coulage en bande, gravure laser

Bancs de caractérisation

Développement de bancs de tests sous gaz contrôlés en température, génération gazeuse du ppb au % (mise en œuvre et métrologie des gaz), mesures électriques et électrochimiques

H₂MINES, 3 ILLUSTRATIONS DE NOS ACTIVITÉS DE RECHERCHE :

- ❖ **Production et utilisation de l'hydrogène renouvelable par la conversion thermochimique de bioressources.**

Maria Gonzalez Martinez – IMT Albi | Centre RAPSODEE



- ❖ **Aspects thermodynamiques et géomécaniques liés au stockage de l'hydrogène en cavités salines**

Faouzi Hadj Hassen – Mines Paris – PSL | Centre de GEOSCIENCES



- ❖ **Les piles à combustible pour la mobilité lourde : enjeux et axes de recherche**

Pedro Affonso Nobrega – Mines Paris – PSL | Centre PERSEE

