

2020

L'HYDROGENE ENERGIE

Une filière d'avenir et d'excellence au carrefour de la transition énergétique

**Comité Consultatif Régional
pour la Recherche
et le Développement
Technologique Occitanie**

Laboratoires contributeurs (16) :

CIRAD/BiowooEB

CIRIMAT

ENAC

IMFT

ICA (Mines Albi)

ICGM

IEM

LAAS

LAPLACE

LBE (INRA)

LCC

LGC

LPCNO

PROMES

RAPSODEE

TBI



"Crédit de l'image : Photothèque CNRS – Photographe Frédéric Maligne"



Liste des contributeurs

Structure	Nom/Prénom	Emails
Coordination	X. Roboam, CCRRDT/LAPLACE	xavier.robaoam@laplace.univ-tlse.fr
Soutien	M. Convert, ADOCC	mathilde.convert@agence-adocc.com
Soutien	C. Guillon, ADOCC	christelle.guillon@agence-adocc.com
Soutien	A. Beauchart, ADOCC	aurelie.beauchart@agence-adocc.com
Soutien	B. Fèvre, ADOCC - HYDEO	benjaminfevre.hydrogene@outlook.fr

Structure	Nom/Prénom	Emails
CIRAD/BiowooEB	J.M. Commandre	jean-michel.commandre@cirad.fr
CIRIMAT	C. Vahlas	constantin.vahlas@ensiacet.fr
CIRIMAT	P. Lenormand	lenorman@chimie.ups-tlse.fr
ENAC	I. Laplace	isabelle.laplace@enac.fr
IMFT	L. Selle	laurent.selle@imft.fr
IMFT	M. Prat	marc.prat@imft.fr
IMFT	M. Marcoux	manuel.marcoux@imft.fr
LBE (INRA)	E. Trably	eric.trably@inra.fr
LBE (INRA)	R. Escudie	renaud.escudie@inra.fr
TBI	C. Dumas	cl_dumas@insa-toulouse.fr
TBI	I.Meynial Salles	meynial@insa-toulouse.fr
Institut Charles Gerhardt	D. Jones	deborah.jones@umontpellier.fr
Institut Charles Gerhardt	F. Favier	fredf@univ-montp2.fr
Institut Charles Gerhardt	J. Rozière	Jacques.Roziere@umontpellier.fr
Institut Charles Gerhardt	G. Taillades	gilles.taillades@umontpellier.fr
Institut Européen des Membranes	P. Miele	philippe.miele@umontpellier.fr
Institut Européen des Membranes	S. Roualdes	stephanie.roualdes-boutevin@umontpellier.fr
Institut Européen des Membranes	Y. Holade	yaovi.holade@umontpellier.fr
LAAS	A. Esteve	aesteve@laas.fr
LAPLACE	C. Turpin	turpin@laplace.univ-tlse.fr
LAPLACE	H. Schneider	schneide@laplace.univ-tlse.fr
LCC	K. Philippot	karine.philippot@lcc-toulouse.fr
LCC	M. Grellier	mary.grellier@lcc-toulouse.fr
LCC	P. Serp	philippe.serp@ensiacet.fr
LGC	C. Azzaro Pantel	catherine.azzaropantel@ensiacet.fr
LGC	J.P. Torr�	jean-philippe.torre@ensiacet.fr
LGC	B. Erable	benjamin.erable@ensiacet.fr
LGC	N. Raimondi	nathalie.raimondi@iut-tlse3.fr
LGC	R. Basseguy	regine.basseguy@ensiacet.fr
LGC	C. Julcour	Carine.julcour@ensiacet.fr
PROMES	S. Abanades	stephane.abanades@promes.cnrs.fr

RAPSODEE IMT MINES ALBI	A. Nzihou	ange.nzihou@mines-albi.fr
RAPSODEE IMT MINES ALBI	F.J. Escudero	javier.escuderosanz@mines-albi.fr
RAPSODEE IMT MINES ALBI	D. Pham Minh	doan.phamminh@mines-albi.fr
ICA IMT MINES ALBI	D. Delagnes	denis.delagnes@mines-albi.fr
ICA IMT MINES ALBI	L. Penazzi	uc.penazzi@mines-albi.fr

Table des matières

.....	1
.....	1
.....	1
1. INTRODUCTION, CONTEXTE, ENJEUX	5
2. ETAT des LIEUX et positionnement des forces ACADEMIQUES occitanes	7
2.1. Structuration thématique.....	7
2.2. Etat des lieux, bibliométrie et diagnostic des forces Occitanes	8
2.3 Synthèse des besoins industriels d’occitanie vis-à-vis de la recherche bas TRL	14
3. POSITIONNEMENT THEMATIQUE des recherches en cours.....	16
3.1. la production d’hydrogène	16
3.2. Le stockage d’hydrogène	20
3.3. La conversion d’hydrogène.....	22
3.4. Les auxiliaires et constituants transverses	24
3.5. L’hydrogène au sein des chaines énergétiques.....	26
4. Prospective de la filière – Principaux défis.....	27
4.1. la production d’hydrogène	27
4.2. Le stockage d’hydrogène	29
4.3. La conversion d’hydrogène.....	31
4.4. Les auxiliaires et constituants transverses	33
4.5. L’hydrogène au sein des chaines énergétiques.....	34
5. PROPOSITION D’ACTIONS POUR L’EXECUTIF REGIONAL.....	35
6. ANNEXES.....	41
Annexe 1 : Liste des thèses menées dans les 10 dernières années	41
Annexe 2 : moyens d’essais et de modélisation spécifiques hydrogène énergie	49
Annexe 3 : extrait des 5 principales publications des 10 dernières années.....	54

L'HYDROGENE ENERGIE : une filière d'avenir et d'excellence pour l'Occitanie au carrefour de la transition énergétique

Ce document, rédigé à l'initiative du CCRRDT, avec le soutien de l'animation hydrogène régionale HyDéo, élabore un état des lieux de la filière hydrogène énergie. Les forces académiques Occitanes sont positionnées au regard d'une structuration thématique de cette filière qui implique 16 laboratoires en région, mettant ainsi en exergue les forces en présence (bibliométrie, ETPR¹, liste des thèses, moyens d'essais,...). Dans la partie suivante, les académiques listent thème par thème un bilan des recherches menées. Les perspectives et principaux défis de la filière hydrogène énergie, qui constitue une filière d'avenir et d'excellence au carrefour de la transition énergétique, sont ensuite listées en conservant la même structuration thématique. Enfin, la dernière partie de ce livret liste un certain nombre d'actions concrètes de nature à structurer la R&D bas TRL pour les prochaines années afin de contribuer à orienter (si possible) le soutien de la région. Le consortium académique envisage en particulier la mise en place d'un laboratoire sans murs : HyRéO « Hydrogène Recherche Occitanie » constituera un Centre d'Excellence Occitan sur l'Hydrogène Energie.

1. INTRODUCTION, CONTEXTE, ENJEUX

L'hydrogène ou "H₂" est l'un des vecteurs énergétiques indispensables à la réussite de la transition énergétique. Il permet, grâce à l'électrolyse de l'eau ou au vaporeformage de biogaz, de stocker sans limitation de durée les énergies renouvelables. Il peut ensuite être valorisé sous de multiples formes : matière première pour l'industrie (900 000 tonnes par an en France), injecté dans les réseaux pour décarboner le gaz naturel, et enfin utilisé comme vecteur énergétique pour générer de l'électricité pour des usages de mobilité ou stationnaires, grâce aux piles à combustible ou encore pour générer de la chaleur via sa combustion pour des besoins de chauffage notamment.

D'après l'étude de McKinsey réalisée pour l'Hydrogen Council (consortium rassemblant les principaux industriels du secteur) en 2017, il permettrait de réduire de 20 % les émissions de CO₂ d'ici 2050.

Les perspectives ouvertes par « la montée en puissance de l'hydrogène » font de cette source d'énergie une alternative très crédible aux énergies fossiles et un allié de poids aux énergies renouvelables intermittentes : dans moins de vingt-cinq ans, l'hydrogène représenterait 18 % du total de l'énergie consommée sur la planète. Il permettrait de réduire les émissions de CO₂ de quelques 6 gigatonnes par rapport aux niveaux actuels. L'impact serait aussi économique, l'hydrogène générant un chiffre d'affaires de 2 500 milliards de dollars et créant plus de 30 millions d'emplois sur la même période.

Les technologies liées à l'hydrogène énergie portent avec elles des enjeux environnementaux et industriels majeurs pour le territoire d'Occitanie, notamment autour des mobilités routières et ferroviaires, maritimes, fluviales et également, à terme, aériennes : les solutions électriques hydrogène sont « zéro émission ».

¹ ETPR : Equivalent Temps Plein Recherche ; dans cet indice, un chercheur ou ingénieur de recherche à temps plein est compté à 100%, tandis qu'un enseignant chercheur effectuant la totalité de sa recherche sur l'hydrogène est comptabilisé 0.5

Rappel du contexte européen et national :

Depuis deux ans, l'ensemble des acteurs de l'énergie et la Commission Européenne commencent à reconnaître l'hydrogène comme un axe incontournable de la feuille de route énergétique (Roadmap énergie de l'Europe) : l'Europe (H2020), l'industrie et la recherche soutiennent ensemble le développement des technologies hydrogène dans un partenariat public-privé, le FCH-JU, doté de 1,8 milliards d'euros de budget sur 7 ans. L'hydrogène fait partie des 6 priorités thématiques de la chaîne stratégique de valeur européenne « Important Project of Commun European Interest ».

La France dispose d'une incontestable avance en matière de recherche et développement sur l'hydrogène qui commence à apparaître dans les priorités gouvernementales, comme par exemple lors du Plan National Hydrogène présenté par Nicolas Hulot en juin 2018, plan largement relayé en région, en particulier en Occitanie. Ces priorités coïncident aussi avec l'investissement d'acteurs majeurs de l'industrie automobile française : Michelin, PSA, Plastic Omnium, Faurecia, etc., et avec l'intérêt affirmé de grands énergéticiens tels que Engie, Shell, Total, Air Liquide, Linde, etc et plus récemment EDF.

La Région Occitanie est une région phare en France pour son soutien à la filière H₂ :

La Région Occitanie / Pyrénées -Méditerranée fait partie des régions initiatrices, parmi les plus dynamiques en France pour le développement de l'hydrogène. C'est en particulier la première Région de France à s'être dotée (dès 2016) d'une étude complète de filière, d'une stratégie et de premiers moyens d'actions ; elle dispose également d'un cadre ambitieux, la stratégie REPOS ; en outre, elle initie et accompagne la structuration de grands projets.

La stratégie REPOS fixe des objectifs de production d'hydrogène « vert » ambitieux. En particulier, l'objectif est de développer l'hydrogène vert à partir des ENR du territoire, en consacrant 11% de la production ENR électrique à l'électrolyse de l'eau en 2050 soit 6,3 TWh, correspondant ainsi à 123 350 tonnes d'hydrogène.

L'Occitanie porte l'ambition de développer une « filière du futur » sur l'hydrogène. Sur le plan industriel, la mise en place d'HyDéO, suite à une initiative de la Stratégie Régionale de l'Innovation, fait de la Région Occitanie la première Région française à se doter d'une stratégie globale sur cette filière.



Figure 1.1. Animation de la filière Hydrogène en Occitanie

Après plus de 18 mois de mise en place effective de l'animation, plus de 60 structures sont impliquées de manière active dans la dynamique de la filière régionale dont plus de 50% d'entreprises, 25% de laboratoires et 25% de collectivités.

2. ETAT DES LIEUX ET POSITIONNEMENT DES FORCES ACADEMIQUES OCCITANES

2.1. STRUCTURATION THEMATIQUE

Selon qu'il s'agit d'études sur les constituants ou les systèmes à hydrogène énergie, nous avons choisi de structurer la recherche selon 5 thèmes (cf. tableau 2.1) : pour les constituants, il s'agira de production, stockage et conversion d'hydrogène auxquels s'ajoutent les constituants et auxiliaires ; pour les systèmes, il s'agira des problématiques de réseaux (souvent multi vecteurs d'énergie) et de filières logistiques. Cette structuration thématique met en évidence la largeur du spectre des activités et leur caractère interdisciplinaire.

Constituants	Production H2	Thermoconversion (reformage, pyrolyse, gazéification,...)	CIRIMAT, ICGM, IEM, LAAS, LAPLACE, LBE, LCC, LGC, LPCNO, RAPSODEE, PROMES, BioWooEB
		Électrolyse (SO, PEM, alcalin,...)	
		Photo-catalyse	
		Biologique	
Constituants	Stockage H2	Compressé	IEM, LCC, LGC, RAPSODEE, ICA
		Liquide	
		Solide	
Constituants	Conversion H2	Pile à combustible	CIRIMAT, ICGM, IEM, IMFT, LAPLACE, LBE, LCC, LGC, TBI, LPCNO, RAPSODEE, BioWooEB
		Combustion	
		Méthanation	
		Hydrogénation (autre que méthanation)	
Constituants	Auxiliaires, Constituants transverses	Capteurs, Détecteurs	ICGM, IEM, RAPSODEE, LCC, LGC, BioWooEB, LAPLACE
		Séparation	
		Purification	

		Auxiliaires (compresseurs, humidificateurs, électroniques, échangeurs thermiques,...)	
Systèmes	Chaînes énergétiques	Réseaux	RAPSODEE, LGC, LAPLACE, ENAC, LAAS
		Logistique	

Tableau 2.1 : structuration thématique et positionnement académique

2.2. ETAT DES LIEUX, BIBLIOMETRIE ET DIAGNOSTIC DES FORCES OCCITANES

A partir de cette structuration, le tableau 2.2 positionne les recherches des 16 laboratoires académiques Occitans ayant contribué à ce livret et constituant les forces académiques Occitanes sur l'Hydrogène énergie.

	Axes de recherches	Thèmes
CIRIMAT	Synthèse et mise en forme de matériaux pour piles à combustible et électrolyse de l'eau opérant à haute température (SOFC - SOEC).	Production Conversion Hydrogène
	Participant actif au développement de la plateforme Hydrogène dans le cadre du projet PACAERO, développement de composants (cellules SOFC).	
	Production de l'hydrogène par solar water splitting. Collaborations LAAS, LAPLACE, IEM Montpellier, ICMMO Paris-Sud.	
ENAC	Impact sur les stratégies des acteurs aéronautiques (compagnies aériennes, aéroports, etc.) du développement de services basés sur des technologies hydrogène.	Chaines énergétiques
	Impact environnemental et opérationnel sur une plateforme aéroportuaire du taxiage électrique alimenté hydrogène.	
	Impact sur la sécurité aéroportuaire de l'introduction et l'utilisation pour des applications aéronautiques de l'hydrogène.	
ICGM	Electrolyse alcaline. Electrolyse à membrane échangeuse de proton et à membrane alcaline. Electrolyse haute température (SOEC).	Production Hydrogène
	Production d'hydrogène par déshydrogénation partielle d'essence, de kérosène.	
	Piles à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC), à membrane alcaline (AEMFC), à électrolyte polymère (HT-PEMFC), à membrane céramique protonique (PCFC).	Conversion Hydrogène
	Capteurs à hydrogène.	Auxiliaires Transverse
	Stockage et production réversible d'hydrogène par vecteurs organiques (LOHC: Liquid Organic Hydrogen Carriers).	Stockage Hydrogène
	Purification et compression électrochimique.	
	En production de H ₂ : (i) assemblages par PE-CVD et matériaux 2D ou composites (type céramique -à base de Si et B- et graphène) pour la (photo)-électrolyse de l'eau, (ii) nanomatériaux à faible charge de métaux nobles pour le couplage électrolyse/électrosynthèse de molécules organiques à partir de composés biosourcés.	Production Hydrogène

IEM	En stockage de H ₂ : matériaux à base de bore et d'azote (e.g. borohydrure et boranes) pour le stockage chimique (irréversible) d'hydrogène ; matériaux dérivés de type BNH pour un stockage réversible de l'hydrogène.	Stockage Hydrogène
	En séparation/purification/détection de H ₂ : membranes microporeuses céramiques, hybrides ou composites, par voie moléculaire, impression 3D et templating, croissance assistée par micro-ondes ou en solvant CO ₂ supercritique, PE-CVD, ALD ou PE-ALD, pour la séparation ou détection de gaz par tamisage moléculaire sur supports industriels (up-scaling) ou nanocapteurs (down-scaling).	Auxiliaires
	En conversion d'énergie : (i) membranes PE-CVD pour PEM-FC miniatures, (ii) étude de la distribution de l'eau dans les membranes électrolytes par mesures microRaman operando, et (iii) hydrures de bore (borohydrure de sodium, clusters de bore B3 à B12) comme combustibles de pile à combustible direct.	Conversion Hydrogène
IMFT	Piles PEM. Modélisation des transferts. Caractérisation des couches poreuses.	Conversion Hydrogène
	Production de chaleur par combustion de l'hydrogène. Contrôle de la combustion dans les foyers aéronautiques par injection d'hydrogène.	
LAAS	Production d'hydrogène par photocatalyse pure (équipe NEO).	Production Hydrogène
LAPLACE	Caractérisation et modélisation des électrolyseurs d'eau en régime sain (PEMWE, AWE) et en vieillissement (PEMWE).	Production Hydrogène
	Caractérisation et modélisation des piles à combustible en régime sain (PEMFC-BT, PEMFC-HT, SOFC) et en vieillissement (PEMFC-BT, PEMFC-HT). Diagnostic/pronostic de l'état de santé des piles à combustible.	Conversion Hydrogène
	Electronique de puissance optimisée pour piles à combustible et électrolyseurs.	Auxiliaires
	Hybridation des piles à combustible avec des composants électrochimiques. Etudes technico-économiques des micro-réseaux intelligents incluant le vecteur énergétique hydrogène.	Chaines énergétiques
TBI(LISBP)	Etude de Hydrogénase à Fer/développement d'enzymes mutantes/ Ingénierie de souches pour la production d'H ₂ à un rendement plus élevé.	Production Hydrogène
	Méthanation biologique : enrichissement du biogaz en méthane, valorisation du CO ₂ , valorisation des surplus d'électricité renouvelable, traitement /enrichissement du syngaz (entre autres CO) en méthane.	Conversion Hydrogène
LPCNO	Electrolyse de l'eau assistée par induction magnétique.	Production
	Hydrogénation du CO ₂ par un procédé utilisant l'induction magnétique.	Conversion
LBE	Production d'hydrogène par voie biologique - fermentaire et bioélectrochimique - (biohydrogène) à partir de produits résiduaux (effluents, déchets).	Production
	Méthanation biologique <i>in situ</i> (enrichissement du biogaz en méthane en digesteur anaérobie par réaction de biométhanation).	Conversion Hydrogène
LCC	Production d'hydrogène par scission électro-activée ou photo-activée de la molécule d'eau ou par déshydrogénation d'amine-boranes catalysées par des matériaux nanostructurés.	Production Hydrogène
	Hydrures métalliques et matériaux nanostructurés pour le stockage d'hydrogène.	Stockage Hydrogène
	Catalyse pour la transformation sûre, efficace et propre; piles à combustible; méthanation et hydrogénation du CO ₂ ; synthèse Fischer-Tropsch; hydrogénation.	Conversion Hydrogène
LGC	Production d'hydrogène par voie électrochimique. Electrolyse de l'eau basée sur l'utilisation des acides faibles. Electrolyse microbienne : remplacement de l'oxydation de l'eau par l'oxydation de la matière organique catalysée par les microorganismes. Production de mélanges gazeux riches en hydrogène (plus de 70%) et CH ₄ par les procédés de gazéification de la biomasse et des déchets.	Production Hydrogène

	Stockage de l'hydrogène : développement de nouveaux matériaux pour le stockage de l'hydrogène en phase solide	Stockage Hydrogène
	Chimiosynthèse : utilisation de l'hydrogène pour la synthèse microbienne de molécules plateformes par hydrogénation de CO ₂ . Utilisation de l'hydrogène en réacteur triphasique pour la transformation de molécules organiques par catalyse homogène et hétérogène. Réactions d'hydrogénation catalytique avec les membranes catalytiques.	Conversion Hydrogène
	Etudes de modélisation sur la perméation d'hydrogène au travers de membranes (mécanismes de transfert, perméation, membrane, diffusion).	Constituants transverses : séparation
	Travaux portant sur la chaîne logistique de l'hydrogène : Production massive d'hydrogène par cycles thermo-chimiques ou par électrolyse haute température ; injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz naturel existants ; Conception, déploiement et exploitation de chaînes logistiques « énergie », notamment dédiées « hydrogène » à travers le développement d'un cadre méthodologique générique et systémique prenant en compte les aspects multi-sources, multi-acteurs, multi-critères, multi-échelons, multi-périodes, multi-usages ; modélisation des écosystèmes H ₂ .	Chaines
PROMES	Production d'hydrogène par voie solaire thermo-chimique (craquage/reformage CH ₄ , gazéification de biomasse, dissociation de l'eau par cycles thermo-chimiques). Carburants solaires à partir de l'eau et du CO ₂ . Développement de matériaux actifs pour la dissociation de l'eau (et CO ₂) par cycles thermo-chimiques. Conversion du gaz naturel en syngas et matériaux carbonés. Conception de réacteurs/procédés solaires. Valorisation de biomasse et déchets par gazéification solaire.	Production
RAPSODEE	Reformage du biogaz en vue de la production d'hydrogène liquide.	Production
	Production du gaz de synthèse (syngas, mélange riche en CO et H ₂) par la thermo-conversion. Développement des nouveaux catalyseurs innovants pour la transformation de l'hydrogène en hydrocarbures à usages variés, tels que carburants liquides par la synthèse Fisher-Tropsch.	Conversion
	Compression, transport et distribution de l'hydrogène liquide aux véhicules à hydrogène.	Chaines
BioWooEB	Production de syngas riche en H ₂ et CO par gazéification de biomasses et combustibles solides de récupération.	Production
	Epuration du gaz de synthèse sur un lit de solide réactif.	Conversion
ICA	Aspects mécaniques : Dimensionnement de tanks pour stockage et transport hydrogène comprimé : développement de modèles en statique et en fatigue vibratoire.	Stockage
	Aspects matériaux : Analyse des dégradations des matériaux de stockage et développement de matériaux composites résistants et innovants.	Stockage

Tableau 2.2 : positionnement thématique et axes de recherche des laboratoires

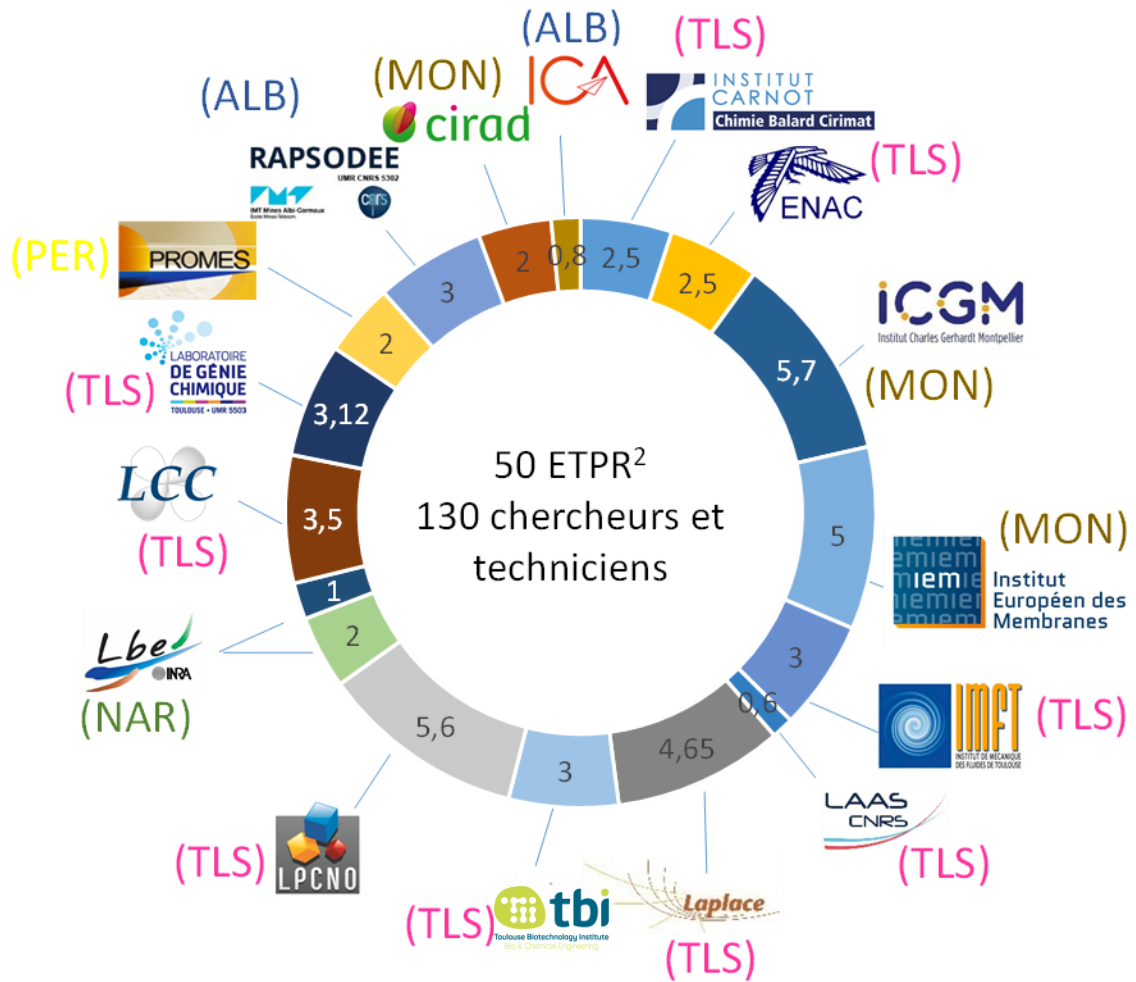


Figure 2.1 : positionnement des forces académiques Occitanes en ETPR²

La liste complète des thèses par laboratoire est en Annexe 1.

² ETPR (Equivalent Temps Plein Recherche) : Chercheurs (CNRS, INRA) = 1 ; Ingé Recherche = 1 ; Enseignant Chercheur = 0.5

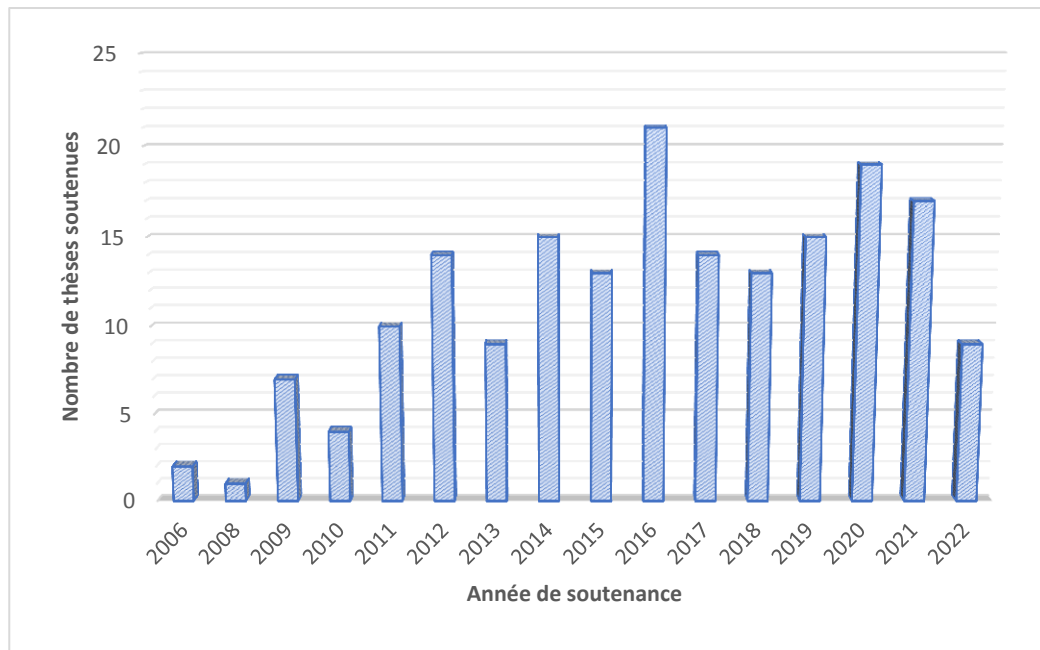


Figure 2.3 : Évolution du nombre de thèses sur la thématique Hydrogène Énergie par année entre 2006 et 2022

De façon non exhaustive, les moyens d'essais et expérimentaux présents dans les laboratoires sont synthétisés dans l'annexe 2. On compte 70 moyens d'essais de divers types spécifiques à l'Hydrogène énergie. En complément, les laboratoires impliqués disposent de moyens de synthèse de matériaux, de fabrication de composants, de caractérisations, d'essais et de tests qui, bien que non spécifiques à l'hydrogène, leurs permettent de répondre aux besoins R&D de la thématique hydrogène énergie. Sont listés ci-après, les sites web des plateformes mobilisables :

- Plateforme de Micro et Nanotechnologies du LAAS: <https://www.laas.fr/public/fr/plate-forme-de-micro-et-nanotechnologies>
- Plateforme Multifab LAAS/Cirimat: <https://www.laas.fr/projects/MultiFAB/>
- Plateforme VALTHERA de l'IMT Mines Albi: <https://www.imt-mines-albi.fr/fr/plateforme-valthera>
- Plateforme PPM du Laplace: <http://www.laplace.univ-tlse.fr/Presentation-de-la-Plateforme-1482?lang=fr>
- Plateforme CARMAT du Laplace: <http://www.laplace.univ-tlse.fr/Presentation-de-la-plateforme?lang=fr>
- Plateforme du CIRAD/BioWeeEB: <https://ur-biowoeb.cirad.fr/plateformes-equipements/biomasse-energie>
- Plateforme du Pôle Chimie Balard (ICGM/IEM): <http://www.polechimie-balard.fr/rub/162/plate-forme-analyse-et-caracterisation.htm>
- Plateformes du LGC: <https://lgc.cnrs.fr/services/>
- Plateforme du LCC/ICT: <https://www.lcc-toulouse.fr/article1086.html?lang=fr>
- Plateforme de Mécanique des fluides environnementale (IMFP): <https://www.imft.fr/La-nouvelle-Plateforme-de?lang=fr>
- Plateforme IMFP: <https://www.imft.fr/Services-d-Interet-General?lang=fr>
- Plateforme LBE/INRA: <https://www6.montpellier.inra.fr/narbonne/La-plateforme-BIO2E>
- Plateforme CIRIMAT: <http://www.cirimat.cnrs.fr/spip.php?article612&lang=fr>
- Plateforme Frittage Flash/Cirimat: <http://pnf2.cnrs.fr/?lang=fr>

En termes de bibliométrie, sur un intervalle de 5 ans, plus de 500 revues, 33 brevets et 32 ouvrages édités ont été répertoriés.

	Revues	Brevets	Ouvrages édités
CIRIMAT	6		
ICGM	95	9	3
IEM	145	8	12
IMFT	9		
LAAS	1		
LAPLACE	16	2	1
TBI(LISBP)	5	5	
LBE	65	1	6
LCC	19	2	
LGC	37	4	7
PROMES	45	2	2
RAPSODEE	50		1
BioWooEB	12		
ICA	2		

Tableau 2.3 : bibliométrie sur les 5 dernières années

Une liste des 5 publications les plus significatives pour chaque laboratoire est fournie en Annexe 3.

2.3 SYNTHÈSE DES BESOINS INDUSTRIELS D'OCCITANIE VIS-AVIS DE LA RECHERCHE BAS TRL

La synthèse qui suit émane d'un questionnaire soumis aux principaux industriels d'Occitanie investis dans la filière « Hydrogène Energie ». La plupart de nos contacts ayant souhaité garder l'anonymat de leur positionnement, nous avons pris le parti de ne citer « aucune source » en nous efforçant de synthétiser au mieux l'ensemble des retours au questionnaire. Ajoutons cependant que les retours obtenus témoignent d'attentes fortes, y compris sur les bas niveaux TRL, à la hauteur de la dynamique présente dans ce secteur scientifique et disciplinaire. Les réponses et les besoins industriels sous-jacents ont été répertoriés selon la structuration thématique telle que définie en 2.1. :

Sur la production d'hydrogène :

Il existe des attentes en termes de modélisation et de simulation, notamment des phénomènes hydrodynamiques et thermiques, par exemple pour des réacteurs-échangeurs pouvant être réalisés à court terme par fabrication additive.

Sur la **thermoconversion**, il serait nécessaire de développer des reformeurs au gaz naturel par biogaz, en particulier pour les PEM-HT.

Autour des **électrolyseurs**, il est nécessaire d'augmenter les performances électrochimiques, fluidiques, thermodynamiques, thermiques... Les progrès de ces technologies passent aussi par une miniaturisation et/ou modularisation des systèmes afin de pouvoir réduire leur prix de revient industriels, ce qui devrait favoriser leurs déploiements commerciaux, et promouvoir l'industrialisation de la Filière Hydrogène énergie. Les progrès passent aussi par :

- le développement de nouveaux matériaux et/ou mise en forme d'électrodes innovantes.
- de nouveaux design et architectures systèmes fluidiquement optimisés. L'accès à des ateliers de mécanique dédiés, à haut niveau de technicité et évolutifs sont attendus.
- l'augmentation de la robustesse/fiabilité des systèmes afin de les rendre compatibles avec la diversité des applications devant pénétrer le marché.

Sur le stockage d'hydrogène : l'intérêt se focalise sur le stockage liquide, compte tenu des réponses obtenues.

Sur la conversion d'hydrogène :

L'augmentation de la température de fonctionnement des piles à combustibles est un premier objectif, visant par exemple la caractérisation de PEM-HT sous diverses conditions (pureté du gaz, pression, température). La caractérisation/amélioration de la durée de vie des stacks (diagnostic vieillissement) est un second enjeu important. Il faut améliorer les performances des AME : exemple du traitement de surface sur plaques bipolaires métalliques.

La Production de chaleur par combustion d'hydrogène est une autre préoccupation. Elle peut engendrer des études et des moyens permettant le développement de brûleurs spécifiques visant à optimiser la maîtrise et les performances de la combustion/flamme H₂. Ceci nécessite la mise à disposition de logiciels de modélisation thermodynamiques dédiés à la combustion.

Enfin, l'électro-méthanation, de même que l'électrocatalyse pour la transformation du CO₂ en produits issus de la biomasse (viticulture et agriculture), complètent les préoccupations industrielles sur la conversion d'hydrogène.

Sur les auxiliaires et les constituants transverses (capteurs, détecteurs, séparation/purification, compresseurs, humidificateurs, échangeurs thermiques,...)

Il est nécessaire de développer des **capteurs** d'hydrogène capables de s'adapter simplement et rapidement à différentes spécifications d'usages. Il y a aussi besoin de **détecteurs** de gaz plus compacts que les modèles industriels actuels, ces détecteurs devant embarquer leur électronique.

Il faut innover pour proposer des **membranes de séparation**, de mise en œuvre simple à industrialiser et peu coûteuses : il peut s'agir, par exemple, de membranes de séparation H₂/CO₂ (CO₂/N₂ et CO₂/CH₄) en matériaux céramiques (oxydes, zéolithes, etc..) ou de type « composites » céramique / polymère, hybrides, etc... à déposer sur supports tubulaires céramiques ou plans organiques avec des procédés, ex : enduction de solutions pour membranes tubulaires. De plus, l'amélioration des membranes de séparation H₂/O₂ est un enjeu en termes de robustesse, pertes ohmiques, performances électrochimiques...

L'amélioration de la performance, de l'encombrement et des coûts des technologies actuelles de **purification des gaz** (H₂ et/ou O₂) constitue un autre challenge : il s'agit ici de design fluide, de nouveaux matériaux (poreux ?), de traitements de surface (greffage moléculaire), etc.

Pour ce qui est des auxiliaires, il y a dans les retours industriels sur l'optimisation des échangeurs thermiques et les modules d'électronique de puissance, notamment pour le "balance of plant" des stacks de piles et électrolyseurs.

Sur les aspects système (chaines énergétiques), des réseaux aux chaines logistiques et aux écosystèmes

- L'hydrogène énergie doit activement participer à l'interfaçage entre réseau actuel et système de production décentralisée, ainsi qu'à l'équilibre production consommation en présence de production intermittente massive, y compris à des échelles de temps longues (reports saisonniers) : cette vision doit être « multi vecteur d'énergie », optimisant en particulier l'efficacité globale par une co (tri) génération d'électricité, de chaleur et de froid.
- la filière doit aussi participer au niveau des écosystèmes, par exemple via les synergies entre centre de traitement des eaux usées et injection de bio-méthane sur le réseau.

Sur les besoins en termes de moyens d'essais et de plateformes et l'accès à ces moyens

Les retours soulignent des besoins pour des équipements de R&D fondamentale autour de la caractérisation des matériaux (spectroscopie de masse, diffraction, microscopie électronique...). Les équipements de Bancs de Tests sont probablement plus adaptés à des TRL plus hauts. Il est aussi question de logiciels de Simulation, notamment

en fluide et Thermodynamique. Il pourrait être fait appel à des outils d'intelligence artificielle, par exemple des outils de type Deep Learning. Des bancs de performance et d'endurance de composants jusqu'aux systèmes, en particulier de piles à combustibles adaptables à diverses technologies (PEMFC LT/HT, SOFC) pour des gammes de puissance de 1 à 50kW.

Au-delà des seuls moyens d'essais, il apparaît intéressant, pour les industriels, de clarifier les conditions d'accès aux moyens d'essais académiques et les coûts, notamment pour les start up et PME dont les échelles de temps sont courtes. De façon plus générale, la réactivité des universités pour l'établissement de contrat de partenariat est une préoccupation.

Sur les besoins spécifiques R&D bas TRL en complément des dispositifs de soutien actuels de la région Occitanie

Les industriels ayant répondu à notre enquête souhaiteraient :

- Disposer de dispositifs « agiles » pour des recherches exploratoires sur durée courte avec modalités allégées.
- Dispositif incitatif de « boost » d'aides si plusieurs laboratoires d'Occitanie (et plusieurs pôles géographiques) sont associés aux travaux.
- Le manque de personnel pérenne compétent sur les plateformes est un frein majeur aux relations partenariales.
- Des appels à projets ciblés pour les petites structures axées sur la R&D
- Création d'une filaire d'enseignement dédiée à l'hydrogène, à l'image de celle proposée par l'Université de Franche-Comté.

3. POSITIONNEMENT THEMATIQUE DES RECHERCHES EN COURS

3.1. LA PRODUCTION D'HYDROGENE

3.1.1 La production par thermo-conversion : reformage, pyrolyse, gazéification, water-splitting

La **production d'hydrogène par voie thermo-chimique** peut être réalisée à partir de deux catégories de précurseurs : les **ressources hydrocarbonées** (gaz naturel, biomasse, déchets...) et **l'eau**. Le reformage convertit un hydrocarbure gazeux (principalement du gaz naturel ou du biogaz) en H_2 et CO_2 , la pyro-gazéification ou gazéification convertit un solide à caractère organique en syngas (mélange de gaz composé essentiellement de H_2 et CO), le water gas shift enrichit un mélange de H_2 et CO en H_2 et le water-splitting convertit l'eau en H_2 et O_2 dans des étapes séparées.

Le reformage de méthane (gaz naturel ou biométhane) est une transformation catalytique qui se réalise en présence d'un gaz réactif (vapeur d'eau ou CO_2). Le centre RAPSODEE a développé de catalyseurs (stables et performants) pour la conversion de biogaz en hydrogène et CO_2 . Les résultats du projet VABHYOGAZ3 ont permis de montrer qu'il était possible de réaliser le reformage de biogaz à petite échelle de façon compétitive avec l'électrolyse. Le reformage nécessite un apport d'énergie externe, car ce sont des réactions endothermiques. Afin de réduire cet apport d'énergie externe, RAPSODEE travaille sur le tri-reformage et sur le développement de catalyseurs adéquats. Dans cette technologie, la réaction se réalise avec l'ajout simultané de trois gaz : O_2 , H_2O et CO_2 . CO_2 étant présent naturellement dans le gaz, il faut ajouter de la vapeur d'eau pour les réactions de reformage, ainsi que O_2 pour réaliser une combustion partielle de CH_4 . Le but de cette combustion partielle est de compenser l'enthalpie de réaction.

De façon analogue au reformage, la gazéification est une transformation qui nécessite un apport d'énergie externe, cette énergie est généralement fournie par la combustion partielle de la charge (biomasse et biodéchets) et le concept a été approuvé jusqu'à l'échelle industrielle. De façon avantageuse, l'énergie solaire peut également être utilisée. Il existe deux types de gazéification, en fonction du gaz réactif utilisé : la gazéification à l'air ou la gazéification à la vapeur d'eau. Dans le cas de la gazéification à l'air, une combustion partielle de la charge a lieu à l'intérieur du réacteur, générant de la chaleur (qui permet d'augmenter la température jusqu'à 800-900°C), un résidu solide nommé char et une série de gaz (H_2 , H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 ...) et vapeurs organiques (goudrons). Les réactions entre ces trois fractions produisent des cendres et un syngas dont la teneur en H_2 peut être faible. Les types de réacteurs utilisés pour la gazéification à l'air sont principalement les réacteurs à lit fixe, à

lit fluidisé et à flux entraîné. Ces trois types de réacteurs répondent à des installations de petite (<5MW), de moyenne (>10MW) et grande puissance (>50MW) respectivement. Dans la gazéification à la vapeur, la vapeur d'eau est injectée à 300-400°C ce qui est insuffisant pour apporter la chaleur de réaction des réactions endothermiques et maintenir une température de 800°C (qui est nécessaire pour obtenir de réactions rapides) ; il est donc nécessaire de réaliser un apport extérieur de chaleur. Le média qui véhicule cette chaleur doit avoir une température supérieure à 800°C. Ceci est fait par la combustion d'une partie du char produit par la gazéification ou par la combustion d'un combustible externe. La technologie la plus connue pour la vapo-gazéification est le réacteur à lit fluidisé circulant ; il est composé de deux réacteurs à lit fluidisé interconnectés. Dans le premier a lieu la réaction de gazéification. Une partie du char produit dans ce lit est brûlé dans le deuxième lit. La chaleur de combustion est ramenée à la zone de gazéification via des particules solides chauffées lors de la combustion. Dans ces techniques, la présence de vapeur d'eau est strictement nécessaire. Elle conditionne fortement la richesse en H₂ du syngas. RAPSODEE travaille sur la gazéification de biomasse et déchets depuis 15 ans à l'échelle laboratoire, mais particulièrement à l'échelle pilote. Les recherches se sont orientées vers les méthodes d'abatement de goudrons et polluants, ainsi que vers les études à l'échelle pilote pour la production de gaz de synthèse riche en H₂. Deux unités pilote (capacité environ 30 kg/h) sont disponibles au centre RAPSODEE (Albi) : un lit fixe co-courant d'une puissance de 100kW et un couplage entre un four tournant et un réacteur de reformage de goudrons.

Les procédés de valorisation thermique d'hydrocarbures ou de biomasse par énergie solaire consistent à substituer à la combustion partielle de la charge (apport de chaleur pour les réactions endothermiques) une énergie fournie par des concentrateurs solaires. Ainsi, afin d'améliorer le rendement énergétique des procédés de thermo-conversion, et comme ces procédés endothermiques nécessitent une source de chaleur à haute température, l'énergie solaire à concentration peut être avantageusement utilisée en tant que source externe d'énergie dans les transformations thermo-chimiques. Ces procédés, développés au laboratoire PROMES-CNRS en utilisant les infrastructures solaires (FR-Solaris) du laboratoire (fours solaires d'Odeillo), présentent les avantages suivants : (1) économie de combustible et stockage chimique d'énergie solaire, (2) réduction des émissions (CO₂, SO₂, NOx) par rapport aux procédés classiques, (3) non contamination des produits par les gaz de combustion, (4) valorisation énergétique de ressources carbonées (biomasse, déchets) et production de combustibles synthétiques (carburants solaires). Les procédés de thermoconversion à base de l'énergie solaire à concentration sont notamment développés aux laboratoires PROMES-CNRS (fours solaires d'Odeillo) et RAPSODEE (réacteur BEAMDOWN, Valthera).

A long terme, l'eau constitue la source idéale d'hydrogène en raison de son abondance, faible coût, et l'absence d'émission de CO₂ lors de sa dissociation en hydrogène et oxygène. La dissociation de l'eau avec apport d'énergie solaire peut être réalisée grâce à des cycles thermo-chimiques à 2 étapes impliquant des matériaux redox échangeurs d'oxygène : l'oxyde métallique est d'abord réduit thermiquement à haute température (1200-1400°C) générant O₂ puis l'oxyde réduit est ré-oxydé avec l'eau à plus basse température générant H₂. L'intérêt d'un tel schéma est la production séparée de O₂ et H₂, ce qui écarte le risque de recombinaison, la pureté de l'hydrogène produit qui permet son utilisation directe dans une pile à combustible et des rendements énergétiques supérieurs à l'électrolyse car non limité par le rendement de production d'électricité. Ces cycles sont développés à PROMES ainsi que leur mise en œuvre en conditions solaires réelles.

3.1.2. La production par électrolyse

La génération d'hydrogène par l'électrolyse de l'eau est au cœur des activités de recherche de l'équipe Agrégats, Interfaces et Matériaux pour l'Energie de l'ICGM depuis plus de 10 ans. Nos travaux sur l'électrolyse alcaline réalisés en partenariat avec la société Bulane SAS depuis 2009 ont permis de démontrer l'importance de la formulation et de la mise en forme des électrodes pour maximiser les propriétés des matériaux électrocatalytiques et augmenter des performances de production gazeuse. Un brevet licencié a fait l'objet d'un projet de maturation soutenu par la SATT AxLR et la Région LR pour la mise à l'échelle des procédés de fabrication et la validation des performances des électrodes de grande taille dans des conditions réelles d'utilisation. Ces électrodes seront prochainement intégrées dans les équipements commercialisés par Bulane. Le LabCom MATELHO (ANR 2018) ICGM-Bulane a permis d'étendre nos recherches dans ce domaine à la séparation et la

purification des gaz, l'amélioration de l'efficacité énergétique, et l'exploration de systèmes disruptifs de production d'hydrogène. Dans le domaine des électrolyseurs à membranes (membranes protoniques, membranes anioniques), nos efforts portent à la fois sur le développement de nouvelles approches pour la stabilisation chimique et mécaniques de membranes à faible résistance électrique, sur les catalyseurs anodiques et cathodiques, à base de métaux nobles supportés et de métaux non-nobles. En ce qui concerne l'électrolyse à haute température, les travaux menés à l'ICGM ont permis de montrer que les dispositifs électrochimiques à membranes céramiques à conduction protonique étaient parfaitement réversibles (passage du mode pile à combustible au mode électrolyse). Cette spécificité rend ces dispositifs particulièrement attractifs pour des applications de type power to H₂ - H₂ to power. L'ICGM est doté d'une plateforme de 200 m² comportant des bancs d'essai d'électrolyseur à membranes polymères ou céramique. Ses recherches actuelles sont développées en collaboration avec des partenaires industriels : Bulane, Johnson Matthey, ITM Power, ArevaH2GEN, Siemens, Hydrogenics, IRD Fuel Cells, EDF-EIFER.

Le LGC mène des recherches depuis 2007/2008 sur la production d'hydrogène par voie électrochimique, en proposant le remplacement de la potasse concentrée des électrolyseurs alcalins par l'utilisation des acides faibles à travers les projets suivants : un contrat avec la société SAGIM (PME stéphanoise producteur d'électrolyseurs) en collaboration avec la société 6TMIC (2010-2012 & 2019) a été abondé par un programme de maturation TTT (2014-2015, collaboration avec 6TMIC). Les travaux réalisés ont permis le transfert technologique avec la vente de 2 licences d'exploitation (2015 et 2016). Par ailleurs, le LGC est impliqué dans le projet PACAERO (coordinateur C. Turpin LAPLACE), pour la mise en place de banc de test pour électrolyseurs aqueux avec une implication du service technique du LGC. Enfin, le LGC collabore actuellement avec la société 6TMIC (coordinateur) au projet Région-FEDER Readynov 'ECOH2 : pour une production d'hydrogène par électrolyse à moindre coût' (2019-2020) dans le cadre plus large lié au 'Power to gas' coordonné par H Schneider du LAPLACE et impliquant le LAPLACE, le LGC, 6TMIC et l'IMFT, l'électrolyseur étant une des briques technologiques du système énergétique résidentiel.

Au LCC sont développés des matériaux nanostructurés de différentes natures (métaux et oxydes de métaux) pour leur évaluation en tant que catalyseurs pour la production de H₂ par électrolyse de l'eau. Sont notamment étudiés les effets de composition sur la performance et la stabilité.

L'IEM adresse la filière électrolyse basse température (milieux acide et alcalin) par le biais de trois approches différentes toutes relatives à l'élaboration de matériaux : (i) développement de nanomatériaux électro-catalytiques à base de matériaux bidimensionnels (graphène, chalcogénures métalliques, hydroxydes métalliques lamellaires) ; (ii) préparation de nanomatériaux électro-catalytiques à faible charge de métaux nobles pour le couplage électrolyse/électrosynthèse de molécules organiques à partir de composés bio-sourcés ; (iii) développement de membranes électrolytes déposées par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (procédé de dépôt réputé propre, peu onéreux en fonctionnement et aisément industrialisable).

Depuis 2011, le LAPLACE développe des moyens de caractérisation de tous les types d'électrolyseurs (alcalin, PEM, SOEC, ...) afin de disposer d'une large expertise de ces moyens de production de l'hydrogène. Différents modèles statiques, dynamiques ou de vieillissement sont développés pour rendre compte de cette expertise et sont utilisés ensuite pour étudier les systèmes énergétiques hybrides associant hydrogène et sources renouvelables. Des bancs de caractérisation ont été développés pour pouvoir tester tout type de d'électrolyseur jusqu'à quelques kW. Des bancs fonctionnant en 24H/24 permettent d'évaluer le vieillissement de ces composants.

Les technologies alcalines et PEM, industrialisées et largement diffusées, sont connues pour leur robustesse dans des conditions de fonctionnement standard. L'enjeu aujourd'hui est de déterminer l'impact en termes de durée de vie du couplage de ces électrolyseurs à des sources renouvelables intermittentes. Le plus souvent ce couplage se fait à travers des convertisseurs à découpage qui entraînent des perturbations hautes fréquences dont il faudra également étudier l'impact sur la durée de vie des électrolyseurs.

D'autre part le laboratoire LAPLACE continue à investiguer de nouvelles solutions de production de l'hydrogène. Des études de caractérisation et modélisation du système à électrolyse fractionnée développé par ERGOSUP devraient démarrer d'ici peu. Tout système de production d'hydrogène innovant pourra être évalué et comparé en termes d'efficacité, fiabilité, comportement dynamique. Cette démarche continue de veille technologique

permettra de disposer d'une base de connaissance propre à résoudre les défis des systèmes énergétiques de demain.

Les études portant sur le couplage à l'échelle système entre un électrolyseur et un stockeur d'hydrogène pourraient également intéresser le LAPLACE.

3.1.3. La production par photo-catalyse

Le développement de systèmes de production de H₂ à haut rendement représente un challenge auquel la recherche actuelle tente d'apporter des solutions technologiques innovantes et performantes. La France, leader mondial dans la production de H₂, a opté pour des stations de production locale de H₂, permettant une consommation immédiate ou différée, afin de pallier les baisses intermittentes de production en énergies renouvelables. Dans ce contexte, les procédés photo (électro)-catalytiques de production de H₂ à partir de l'eau, bien plus respectueux de l'environnement que les procédés thermochimiques traditionnels, apparaissent comme une alternative intéressante. En effet, bien qu'offrant des rendements en H₂ encore limités, ils n'en restent pas moins attractifs du fait de l'utilisation combinée de l'eau et du soleil comme ressources naturelles, propres, renouvelables et peu onéreuses. Pour ces procédés, le LCC développe des catalyseurs pour lesquels la rationalisation de l'usage des métaux nobles, leur substitution par des métaux plus abondants ou l'ajout d'additifs (antenne pour la capture de l'énergie solaire, support tel que TiO₂, ...). Optimiser les performances ainsi que la durabilité de ces catalyseurs figurent parmi les verrous à lever. Par ailleurs, un consortium régional entre les laboratoires CIRIMAT, LAPLACE et IEM vise le développement de cellules photo-électrochimiques « tout solides » constituées de couches actives préparées par des techniques de dépôt sous vide pour garantir à ces systèmes autant d'atouts que sont la compacité, l'intégrité et la stabilité. La préparation de nouveaux matériaux à base de TiO₂ présentant une photo-activité sous irradiation solaire est au cœur de ce projet collaboratif. Enfin, l'IEM développe depuis peu des matériaux électro-catalytiques à base de matériaux bidimensionnels (graphène, chalcogénures métalliques, hydroxydes métalliques lamellaires) qui semblent prometteurs pour un usage en photo (électro)-catalyse.

Le LAAS développe des substrats 2D triptyques pour la production d'hydrogène par photocatalyse. Ils sont composés de couches minces semiconductrices (TiO₂, ZnO), des nanoparticules métalliques (Au, Ag) ainsi que de photosensibilisateurs de type carbobenzènes. Ces architectures structurées à l'échelle nano sont intégrées dans des dispositifs de production d'hydrogène modulaires en vue de la réalisation de panneaux à hydrogène.

3.1.4. La production biologique

Les procédés biologiques de production d'hydrogène basés sur la transformation de la matière organique constituent assurément les technologies présentant les plus faibles impacts environnementaux. Ces bioprocédés sont adaptés aux biomasses résiduelles (déchets, résidus agricoles, biomasses à vocation énergétique, eaux usées urbaines et agro-industrielles) et permettent donc, en sus de la production de H₂, de traiter ou de valoriser des sous-produits, dans une logique de développement de la bioéconomie. A ce jour, le principal verrou de ces biotechnologies est un rendement limité de conversion en raison de contraintes métaboliques inhérentes à l'utilisation de microorganismes. En région, les expertises académiques sont internationalement reconnues en fermentation sombre et sur les systèmes bioélectrochimiques.

La fermentation sombre est un procédé biologique qui met en œuvre de nombreux microorganismes lorsque la biomasse est d'origine complexe. Elle peut être associée (i) aux filières de traitement, dont la méthanisation, l'intérêt étant de pouvoir bénéficier des filières actuelles existantes pour une implantation territoriale de cette technologie. A ce jour, les efforts de recherche ont porté sur le développement de bioprocédés aux performances stables à partir de résidus complexes. La présence d'une multitude de microorganismes impose néanmoins d'approfondir les connaissances sur les interactions microbiennes, leur écologie, les contraintes métaboliques et les paramètres opératoires associés (ii) au développement de microorganismes dont le métabolisme est rationnellement modifié afin d'augmenter le rendement de conversion en hydrogène et leur association au sein de consortia microbiens synthétiques.

Les systèmes bioélectrochimiques sont parfaitement adaptés au traitement des eaux et effluents liquides. Ils font appel à la capacité des microorganismes à convertir l'énergie chimique de la biomasse sous la forme d'un courant électrique (flux d'électrons), qui sert à produire un H₂ par électrolyse biologiquement assistée (3x moins de puissance requise par rapport à l'électrolyse conventionnelle). Les densités de courant électrique et rendements doivent néanmoins être encore améliorées. Pour cela, la combinaison des procédés de fermentation et bioélectrochimiques permettent d'obtenir des performances de conversion particulièrement élevées (proches du maximum théorique).

En Région, les laboratoires suivants ont développé une expertise sur la fermentation sombre et son couplage aux autres bioprocédés dont la méthanisation et les systèmes bioélectrochimiques (LBE), sur l'ingénierie métabolique de souches hyperproductrices de H₂ (TBI) et sur le développement de systèmes bioélectrochimiques adaptés à la valorisation des eaux usées domestiques et des biodéchets (LGC).

3.2. LE STOCKAGE D'HYDROGENE

3.2.1. Stockage compressé

Cette voie consiste à compresser de l'hydrogène gazeux en hydrogène à haute pression (350-700 bar). L'objectif est d'augmenter le rapport de quantité d'hydrogène stocké sur le volume du stockage. L'hydrogène obtenu par cette voie est particulièrement adapté pour le transport entre le site de production et celui de distribution, et la distribution aux véhicules à hydrogène.

Le laboratoire RAPSODEE travaille sur la conception des systèmes de compression adaptés aux unités locales de production d'hydrogène vert de capacité entre 80 et 800 kg/jour, et plus particulièrement sur l'optimisation de la consommation énergétique et du coût global de l'opération qui sont liés à différents facteurs tels que : le type et le nombre de compresseurs, le type et le nombre de buffers, la pression, la taille des tanks de stockage etc.

La contribution du laboratoire ICA est focalisée d'une part sur l'analyse mécanique des sollicitations des tanks de stockage de l'hydrogène à haute pression, notamment soumis à des vibrations (transport). Les activités concernent à la fois les développements expérimentaux pour reproduire la sollicitation en laboratoire (avec mesures de déformations et thermiques sans contact), une modélisation du comportement mécanique et le dimensionnement de tanks à l'aide de notre plateforme de calculs de structure. Ces analyses peuvent être proposées à la fois sur des alliages métalliques et sur des matériaux composites.

3.2.2. Stockage liquide

Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide peut être réalisé suivant deux approches.

L'une de ces voies consiste à le liquéfier par refroidissement à une température inférieure à -253°C. Cette approche est utilisée dans le domaine spatial, pour la propulsion des fusées (Ariane V) mais elle n'est pas compatible avec un usage grand public, en raison des problèmes de sécurité et de manipulation de l'hydrogène liquéfié.

L'autre approche, explorée depuis quelques années, consiste à associer l'hydrogène à des molécules porteuses. Ces molécules porteuses ont pour propriétés de rester à l'état liquide durant l'ensemble du processus de capture, stockage et relargage à la demande de l'hydrogène, et ceci à des températures usuelles d'utilisation. Les avantages de cette approche sont a) de réduire au maximum les problèmes de sécurité tout en conservant une densité de stockage élevée et b) d'utiliser le réseau de distribution des carburants fossiles (après adaptation) à la fois pour le stockage, le rechargement, et la distribution dans le cadre d'applications stationnaires (énergie pour les bâtiments) ou mobiles.

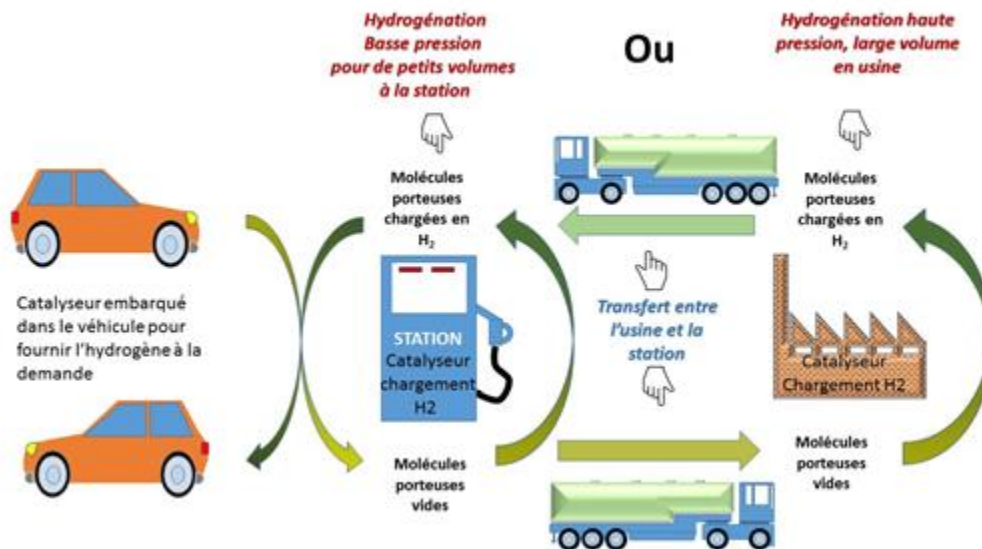


Figure 3.1. Schéma d'un réseau de distribution potentiel pour un stockage liquide par molécules porteuses de l'hydrogène.

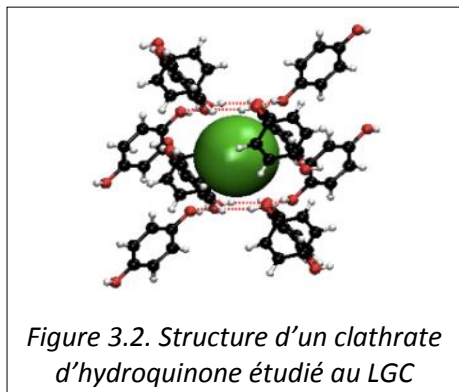
Au LCC, des catalyseurs sont développés en vue d'accélérer le chargement et le relargage de l'hydrogène des molécules porteuses. Ces molécules sont généralement des dérivés organiques identifiés sous le terme anglais LOHC (*Liquid Organic Hydrogen Carrier*).

L'ICGM intervient depuis plus de dix ans sur la production d'hydrogène par déshydrogénation partielle de LOHC en collaboration avec EADS (Allemagne), et avec Safran et EDF-EIFER.

3.2.3. Stockage solide

Le stockage de l'hydrogène (H_2) dans des matériaux solides offre de nombreux avantages (sécurité, réversibilité, densité gravimétrique en hydrogène élevée, etc...).

Le LCC développe des additifs permettant aux hydrures métalliques de libérer plus rapidement et à des températures inférieures à $100^\circ C$, l'hydrogène stocké dans ces matériaux. Les études consistent à comprendre les mécanismes de stockage et relargage de l'hydrogène en présence de ces additifs. Des études comparatives menées sur différents types d'additifs visent à rendre cette voie de stockage économiquement compétitive.



Le LGC tente de comprendre les mécanismes de capture et stockage de l'hydrogène en phase solide au sein de composés d'inclusion de type « clathrates », formés en milieu libre, ou confinés dans des matrices poreuses. Les « clathrates organiques de gaz », qui sont des cristaux organiques moléculaires constitués d'un réseau tridimensionnel de cages stabilisées par les molécules de gaz, pourraient constituer des alternatives intéressantes pour de nombreuses applications pratiques dans le domaine de l'énergie.

L'IEM étudie les hydrures chimiques bore-azote stockant plus de 10% en masse d'hydrogène et capables de produire (par hydrolyse ou thermolyse) du H_2 à $20-100^\circ C$; c'est un stockage irréversible destiné à

des applications mobiles/portables. Récemment, il a été mis en place une nouvelle approche par laquelle sont développés des matériaux bore-azote, dérivés des précédents, stockant moins d'hydrogène mais le stockant de manière réversible.

Le LAPLACE travaille sur la modélisation de réservoirs commerciaux d'hydrures métalliques destinés à des simulations de systèmes énergétiques les mettant en œuvre. Leur cyclabilité en conditions réelles est particulièrement regardée. L'objectif est de pouvoir les comparer à des solutions de stockage sous pression.

3.3. LA CONVERSION D'HYDROGENE

3.3.1. Piles à combustible

La conversion de l'énergie hydrogène par les piles à combustible à membrane (pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC basse et haute température), anionique, (AEMFC) et à céramique protonique (PCFC) est au cœur des activités de recherche de l'équipe Agrégats, Interfaces et Matériaux pour l'Energie de l'ICGM depuis plus de 20 ans. Le groupe développe actuellement des travaux sur les catalyseurs non-nobles et des alliages à faible contenu en platine pour les piles à combustible à membranes acides (PEMFC) et alcalines (AEMFC), les supports de catalyseurs basse dimensionnalité, les méthodes de dépôt de renforts actifs de membranes pour PEMFC et AEMFC, les matériaux céramiques d'électrolyte et d'électrode pour les cellules réversibles pile à combustible/électrolyseur. L'étude du transfert de matière et d'énergie dans la zone de triple contact au sein des électrodes pour améliorer les interfaces fait aussi partie des préoccupations. L'ICGM est doté d'une plateforme de 200 m² comportant des bancs d'essai de piles à combustible à membranes polymères ou céramiques, de 10 W à 1 kW. Ses recherches actuelles sont développées en collaboration avec des partenaires industriels : BMW, Johnson Matthey Fuel Cells, FuMA-Tech, Solvay Specialty Polymers, 3M-Dyneon, EDF-EIFER, Freudenberg, ITM Power, Symbio, ArevH2GEN.

L'IEM adresse la filière piles à combustibles (milieux acides et alcalins) par le biais de l'élaboration de matériaux et de leur caractérisation : préparation de nanomatériaux électro-catalytiques cathodiques à faible charge de métaux nobles pour la réduction d'oxygène, développement de membranes/électrodes déposées par procédés sous-vide réputés propres, peu onéreux en fonctionnement et aisément industrialisables, et l'étude de la distribution de l'eau dans les membranes électrolytes par mesures micro-Raman operando.

Le LCC étudie des catalyseurs bimétalliques supportés sur de nouveaux supports carbonés également préparés au laboratoire, supportant le développement technologique des cœurs de pile à combustible PEMFC et des électrolyseurs à membrane protonique.

Les activités du groupe Milieux Poreux et Biologiques de l'IMFT sur les piles à combustible de type PEM sont centrées sur le développement de modélisations et de simulations numériques visant à mieux comprendre les transferts au sein des piles et en particulier au sein de ses couches poreuses dans le double but d'améliorer la gestion de l'eau et de mieux comprendre les phénomènes de vieillissement, deux problèmes cruciaux pour la technologie PEM. Par ailleurs, le groupe dispose de moyens d'essai permettant de caractériser ces couches poreuses et notamment leurs propriétés diphasiques.

Les piles à combustible à oxyde solide (SOFC) ont pour avantages notamment, par la haute température à laquelle elles fonctionnent (~750°C), de s'affranchir de catalyseurs de type métaux précieux, de pouvoir valoriser la vapeur d'eau par des procédés de cogénération et ainsi accroître le rendement global de la pile (~ 80-85%), de pouvoir fonctionner avec d'autres combustibles hydrogénés autre que l'H₂ pur pour les essentiels. Les activités de l'équipe Revêtements et Traitements de Surface du CIRIMAT sur les piles à combustible opérant à haute température, depuis près de 20 ans visent à réaliser des modules unitaires de répétition, depuis la synthèse des matériaux, leur mise en forme jusqu'à la réalisation de l'objet final. L'implication d'une partie des membres de l'équipe sur la plateforme H₂, ou les moyens de synthèse et de mise en forme des matériaux ont été mis en place sur une surface d'environ 80 m², devrait à court terme permettre d'atteindre ces objectifs.

Le LAPLACE travaille sur les piles à combustible depuis 20 ans : de la monocellule de petite puissance au stack de forte puissance. Les technologies étudiées sont : la pile PEMFC-BT (70-80°C) depuis le début et, depuis 5 ans, la

pile PEMFC-HT (160°C) et la SOFC (650-800°C). Ses objectifs sont d'abord de caractériser et de modéliser leurs performances en régime sain dans des conditions les plus proches possibles des conditions réelles des applications visées (ex : pression sub-atmosphériques et températures très variables en aéronautique). Les travaux se sont progressivement tournés vers l'étude de leur vieillissement en conditions d'usage les plus représentatives. Les objectifs sont de comprendre ce vieillissement, les conditions de son déroulement et celles de son accélération, de le modéliser en vue de la conception et la simulation de systèmes à piles à combustible et de chercher à le minimiser dans des cas d'usage (par exemple : optimisation des conditions d'arrêt et de démarrage). Parallèlement, des travaux portent sur le développement de méthodologies pour le diagnostic de leur état de santé et, progressivement, également pour le pronostic. La maîtrise du couplage d'une pile à combustible avec d'autres composants électrochimiques (supercondensateur, batterie...) reste une préoccupation scientifique du LAPLACE. Pour mener l'ensemble de ces tests, le LAPLACE a développé une plateforme d'essais d'envergure avec de très nombreux bancs de tests permettant d'éprouver toutes les technologies citées.

3.3.2. Combustion d'Hydrogène

Une des utilisations possibles de l'hydrogène est d'en réaliser la combustion. L'application la plus connue de la combustion de l'hydrogène est sans doute la propulsion des fusées avec une combustion dans l'oxygène pur qui permet une efficacité de propulsion parmi les meilleures. Pour des applications plus courantes, la combustion de l'hydrogène dans l'air permet de produire de la chaleur ou de faire fonctionner des machines thermiques (transport, production d'électricité) avec pour principal avantage de ne pas générer de dioxyde de carbone. L'hydrogène a donc un potentiel considérable pour être un carburant avec un impact climatique faible.

Deux directions sont actuellement explorées à l'IMFT pour la combustion de l'hydrogène : la production de chaleur pour les usages domestiques et la stabilisation de la combustion dans les foyers aéronautiques.

Pour la production de chaleur, les travaux portent sur le développement de brûleurs fonctionnant à l'hydrogène pur pour la cuisson et le chauffage. Les principaux challenges portent sur la stabilisation de la flamme d'hydrogène qui est très rapide et la diminution de la production d'oxydes d'azote, un polluant difficile à limiter lors de la combustion de l'hydrogène.

Dans les foyers aéronautiques, les travaux actuels portent sur l'utilisation de l'hydrogène en complément des carburants actuels pour bénéficier des caractéristiques très particulières de l'hydrogène. En effet, la très grande réactivité de l'hydrogène permet d'envisager son utilisation pour augmenter les plages de fonctionnement, favoriser l'allumage ou le ré-allumage, limiter les polluants et atténuer les instabilités de combustion.

En collaboration avec l'IMFT, le LAPLACE met en place des méthodologies pour concevoir des applications intégrant la combustion de l'hydrogène pour la production de chaleur et d'en montrer l'intérêt technico-économique.

3.3.3. La méthanation

La méthanation, transformation du dioxyde (ou monoxyde) de carbone et de l'hydrogène en méthane, est traitée au sein de la région Occitanie dans plusieurs laboratoires. Elle peut être réalisée par voie biologique (TBI (ex.LISBP), LBE) ou catalytique (LCC, LPCNO). La méthanation s'insère dans les filières de transformation du biogaz ou syngaz en méthane, pour la valorisation du CO₂, la valorisation des surplus d'électricité renouvelable, le traitement /enrichissement du syngaz (entre autres CO) en méthane.

Méthanation Catalytique :

La méthanation catalytique est traitée au sein de deux laboratoires de la région. Les recherches portent sur la découverte et l'activation de nouveaux catalyseurs ou sur des systèmes innovants de chauffage. Au LPCNO, l'hydrogénation du CO₂ est effectuée par un procédé utilisant l'induction magnétique haute-fréquence pour l'échauffement de nanoparticules. Depuis 5 ans, 3 thèses ont été soutenues ou sont en cours, en rapport avec ce sujet, ce qui correspond à 2 ETP. Au LCC et RAPSODEE, l'hydrogénation catalytique est réalisée par chauffage thermique et les innovations se portent sur la découverte de nouveaux catalyseurs.

Méthanation Biologique :

Au sein du LBE, 2 thèses sont en cours portant sur la méthanation biologique (in-situ) sur des aspects à la fois d'optimisation de bioprocédés ou de compréhension des processus microbiologiques. Ainsi, 2.5 ETP travaillent sur le sujet.

A TBI, le thème de la méthanation est traité depuis 5 ans via des programmes de recherche (Occitanie, ADEME). Ces recherches ont été menées en étroite collaboration avec la société ENOSIS (ex. LEAF) et l'association SOLAGRO. Trois thèses sont en cours sur le sujet (expérimental et modélisation) de la transformation de l'hydrogène et du CO₂, soit en méthane ou biomolécules. Ce qui correspond à 2.5 ETP.

3.3.4. L'hydrogénation

L'hydrogène est une ressource de choix pour la conversion de diverses molécules, telles que le dioxyde de carbone (CO₂) ou les dérivés biosourcés (par ex. déchets du bois, huiles essentielles ou végétales) en produits à haute valeur ajoutée pour la chimie fine ou l'énergie. Cette transformation, connue sous le terme « hydrogénation », implique l'utilisation de catalyseurs appropriés dont l'activation nécessite souvent un apport énergétique conséquent qu'il convient de maîtriser au mieux. La mise en œuvre de ces catalyseurs requiert par ailleurs des réacteurs adaptés, dans lesquels la mise en contact des réactifs (gaz, liquide et/ou solide) est un paramètre clé pour optimiser les performances, l'efficacité énergétique et la sécurité du procédé.

Le LCC développe des catalyseurs de différentes natures pour tenter de répondre à cette problématique de diminution du coût énergétique de la catalyse d'hydrogénation. Les études menées au LCC visent à comprendre finement les modes d'action des catalyseurs en termes de performance et de sélectivité, de façon à développer des systèmes moins coûteux sur le plan énergétique, tout en obtenant de hautes conversions. Au LGC-Toulouse, différents types de réacteurs sont étudiés, pour lever les verrous des technologies traditionnelles et proposer des solutions innovantes (par ex. réacteur-échangeur de type monolithe, contacteur membranaire catalytique) permettant d'intensifier les transferts entre phases. D'autres pans de recherche visent à développer des systèmes alternatifs pour l'immobilisation des catalyseurs, ainsi que des cellules électrochimiques pour la transformation du CO₂ en molécules plateformes en utilisant des biocatalyseurs (micro-organismes) et de l'hydrogène produit par électrolyse. Le laboratoire RAPSODEE développe également des nouveaux catalyseurs spécifiques pour la synthèse Fisher-Tropsch, à base de matrices de phosphates, carbone et mousses métalliques.

3.4. LES AUXILIAIRES ET CONSTITUANTS TRANSVERSES

3.4.1. Capteurs et détecteurs

Le caractère explosif et inflammable du gaz dihydrogène fait qu'il n'y aura pas de déploiement généralisé de ce vecteur énergétique sans sécurisation des installations et équipements de production, stockage et mise en œuvre, qu'ils soient industriels ou grand-public. Les capteurs sont des maillons essentiels de cette chaîne de sécurisation. Là où il y aura de l'hydrogène, il y aura un ou des capteurs, dans tous les équipements, les installations et les bâtiments. En fonction des conditions d'utilisation, ces capteurs devront répondre à un cahier des charges très précis en termes de sensibilité, sélectivité, temps de réponse, gamme de température... En effet, détecter de l'hydrogène dans un véhicule n'est pas la même chose que dans une unité de production/distribution ou dans une chaudière hybride, par exemple.

Pour répondre aux besoins variés des industriels ou de l'électromobilité, différentes approches originales de détection et de design de capteurs sont développées au sein des laboratoires régionaux (principalement ICGM, LCC et IEM). En particulier, l'ICGM développe des méthodes innovantes de fabrication de capteurs à façon, en particulier des capteurs résistifs à base de nano-structures discontinues, et s'intéresse à l'intégration de ces capteurs en environnements industriels hostiles ou dans des flottes de capteurs communicants. Plus en amont de la filière, l'IEM développe, en collaboration avec un laboratoire coréen, des nano-capteurs à base de fibres d'oxyde de zinc, pour la détection spécifique de H₂ dans des mélanges de gaz jusqu'à 300°C. Ces nano-fibres sont encapsulés dans une membrane tamis moléculaire permsélective à l'hydrogène. Ce concept est applicable à

diverses géométries de capteurs et la membrane peut être fonctionnalisée avec des nanoparticules (par ex. le palladium pour la détection de H₂) afin de garantir de surcroît une extrême sensibilité du capteur. Enfin, depuis peu, le LCC est impliqué dans le développement de composés innovants permettant la détection d'hydrogène par un changement de couleur. Ainsi, les compétences des laboratoires régionaux couvrent toute la chaîne de conception et de fabrication, des matériaux sensibles à la communication des données en passant par l'intégration des parties sensibles, l'acquisition et le traitement du signal, les procédures d'auto-calibration... C'est cette offre étendue de R&D qui fait la particularité de la Région sur cette thématique.

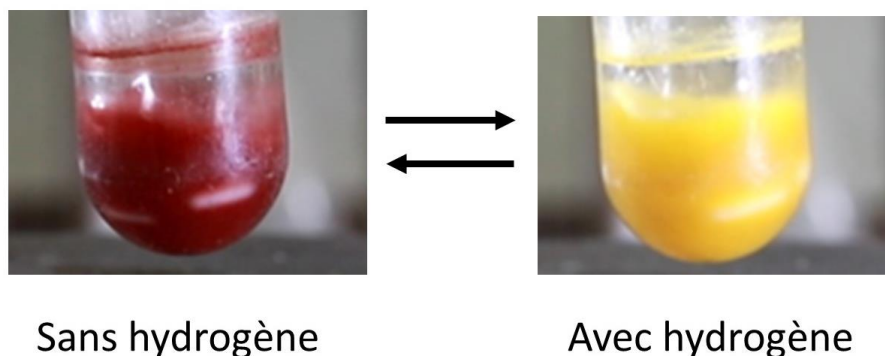


Figure 3.3. Matériau changeant de couleur en présence d'hydrogène : processus réversible (LCC)

3.4.2. Séparation et purification de l'hydrogène

Dans la perspective d'une utilisation croissante de l'hydrogène comme « énergie verte », les divers aspects de la production de ce gaz se doivent d'être considérés et optimisés. La séparation/purification en continu de H₂ constitue (au même titre que la détection) une étape clé de la chaîne de production. Lorsque les membranes à base de polymères (peu coûteuses certes, mais peu résistantes à la température) ou de palladium (infiniment sélectives à chaud certes, mais plus chères et plus sensibles aux composés soufrés) ne peuvent pas être utilisées pour la purification de H₂, le recours à des membranes ultra-microporeuses inorganiques ou hybrides est une option pertinente. Ces membranes permettent d'envisager la séparation d'espèces sur la base de différences de vitesses de diffusion, de compétition d'adsorption et/ou de tamisage moléculaire. Dans ce cadre, l'IEM met en œuvre diverses méthodes en phase liquide (e.g. voie moléculaire, impression 3D avec effet d'empreinte, croissance solvothermale assistée par micro-ondes ou en milieu solvant CO₂ supercritique) ou en phase vapeur (dépôt chimique assisté par plasma (PE-CVD) ou dépôt par couche atomique (ALD) assisté thermiquement ou par plasma (PE-ALD)) pour préparer des membranes prototypes ultra-minces déposées en surface ou confinées dans les pores de supports poreux commerciaux. Le design et les conditions de synthèse de ces membranes sont optimisés en fonction des contraintes de l'application ciblée, afin de maximiser la stabilité thermo-chimique, la résistance à l'abrasion ainsi que les performances des membranes (sélectivité et perméabilité de H₂ ou de gaz associés polluants pour les systèmes d'utilisation associés).

3.4.3. Auxiliaires (compresseurs, humidificateurs, électroniques, échangeurs thermiques,...)

L'ICGM développe des matériaux membranaires et des assemblages pour la compression/purification électrochimique de H₂. Cette approche présente l'avantage de pouvoir être opérée à partir d'un flux gazeux à basse pression, quel que soit son mode de production et éventuellement sous forme d'un mélange complexe de gaz, pour la production de H₂ pur sous haute pression, typiquement jusqu'à 400 bars, demain jusqu'à 800 bars.

Le LAPLACE travaille sur l'optimisation de l'électronique de puissance associée aux piles à combustible ou aux électrolyseurs d'eau. Rappelons que le rôle de l'électronique de puissance est d'interfacer le composant électrochimique avec l'application en adaptant les formes du courant et de la tension qu'il délivre/absorbe avec un rendement de conversion le plus élevé possible (plus de 90% généralement). Le LAPLACE travaille sur des topologies de convertisseurs statiques et sur des méthodologies de dimensionnement permettant de minimiser

les critères les plus pertinents en fonction des applications (ex : masse/volume pour l'embarqué). Afin de dimensionner au plus juste filtrage requis, le LAPLACE étudie aussi l'impact des harmoniques de courant hautes fréquences générés au cours du fonctionnement de l'électronique de puissance et caractérise la durée de vie de ces composants dans un contexte système.

3.5. L'HYDROGENE AU SEIN DES CHAINES ENERGETIQUES

3.5.1. L'hydrogène dans les réseaux d'énergie

Le LAPLACE travaille sur l'intégration des piles à combustible et des électrolyseurs au sein de systèmes énergétiques depuis 20 ans. Les travaux ont commencé autour d'une brique de base : l'hybridation énergétique d'une pile à combustible avec un autre composant de stockage (supercondensateurs, batterie) afin notamment d'optimiser son dimensionnement, sa dynamique de réponse et sa durée de vie. Cela s'est fait principalement dans le cadre d'applications aéronautiques (groupe de secours) et stationnaires (groupe électrogène). Puis, les études, dans le domaine stationnaire, ont porté sur la maîtrise du couplage pile à combustible/ électrolyseur d'eau pour faire émerger la notion de « batterie H₂/O₂ » ou de « batterie H₂ » si l'oxygène n'est pas stocké. L'ANR PEPITE (2008-2011) a été le premier projet du LAPLACE mettant en œuvre un micro-réseau intelligent incluant des panneaux photovoltaïques, une batterie H₂/O₂ et une batterie au plomb afin de rendre autonome un pylône météorologique. Depuis, le LAPLACE est « monté en puissance », progressivement sur l'étude des micro-intelligents (smart grids) avec le projet ADEME SMART ZAE (sans hydrogène), le projet BPI INSULGRID et le projet ADEME HyMAZONIE. Dans le projet INSULGRID (2013-2017), le LAPLACE a mené des études technico-économiques pour comparer le couplage d'une ferme éolienne avec une batterie Li-ion seule ou une association batterie H₂ / batterie Li-ion. Dans ce cas d'application insulaire (Guadeloupe), l'hydrogène a montré un intérêt économique certain pour maximiser le respect des engagements de production. Depuis peu, le LAPLACE est engagé dans le projet HyMAZONIE (2018-2022) où l'objectif pour le LAPLACE est d'étudier d'un point de vue technico-économique le déploiement de micro-réseaux intelligents autonomes sur le territoire de Guyane en exploitant la tri génération électricité chaleur froid.

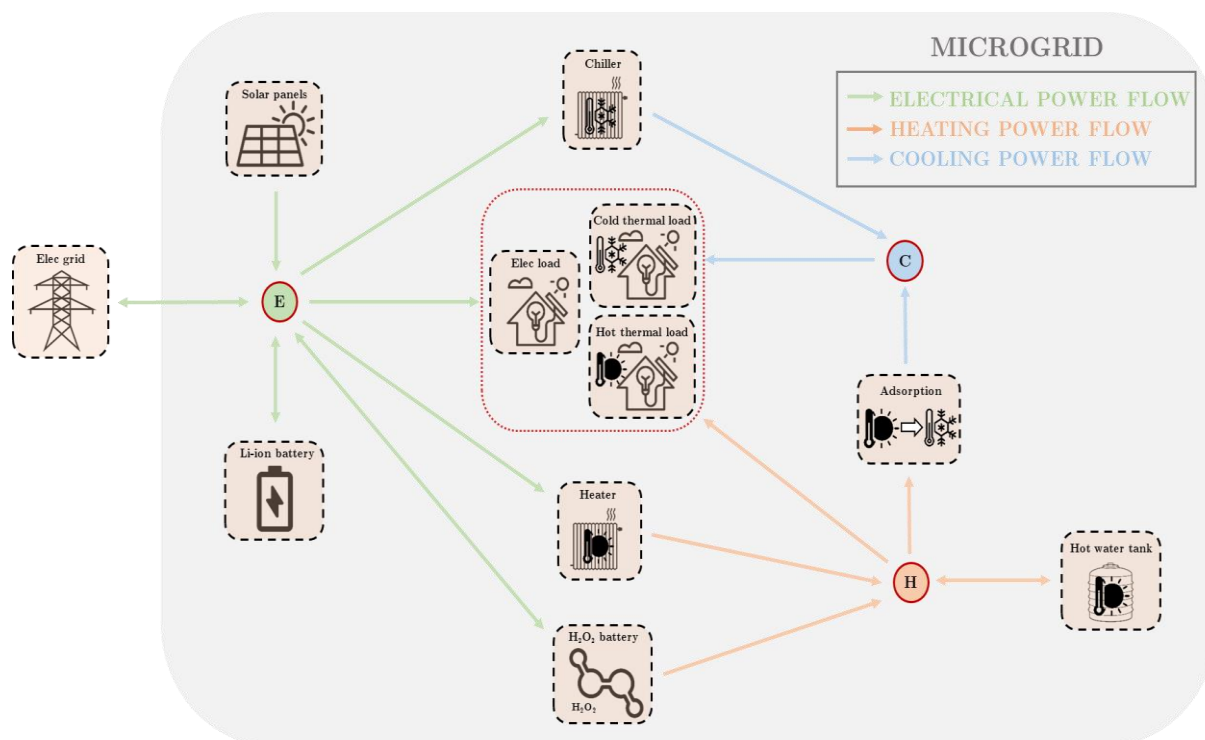


Figure 3.4. Exemple du projet Hymazonie exploitant un stockage H₂O₂ en tri génération

Ajoutons que les futurs réseaux d'avions incluant des piles à combustible ont faits l'objet d'études et constituent un axe de recherche appelé à se développer (synergie recherchée entre les smart-grids aéronautiques et terrestres). Enfin, le LAPLACE s'intéresse de plus en plus à des systèmes multi-vecteurs d'énergie (gaz, électricité, chaleur) et multifonctionnels. Dans tous ces projets, le LAPLACE poursuit le développement de ses compétences sur les architectures électriques, la gestion d'énergie, le dimensionnement des composants du système par co-optimisation en intégrant un maximum de d'éléments avec tous les problèmes que cela suscite (traitement de la complexité) : production renouvelable intermittente, mission intermittente, durée de vie des composants, éléments économiques et financiers, incertitudes des données et des évolutions sur cycle de vie,... Pour les validations expérimentales autour du vecteur « électricité », le LAPLACE peut s'appuyer sur une plateforme d'investigation de micro-réseaux intelligents qu'il a déployée au cours des 5 dernières années.

3.5.2. *Logistique et écosystèmes de la filière hydrogène*

Des travaux portant sur la chaîne logistique de l'hydrogène développés depuis plusieurs années au LGC ont porté dans un premier temps sur différents maillons de la chaîne: (i) production massive d'hydrogène par cycles thermochimiques ou par électrolyse haute température en collaboration avec le CEA de Cadarache, à travers une méthodologie d'optimisation technico-économique de systèmes de cogénération ; (ii) injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz naturel existants par formulation mathématique non linéaire en variables mixtes. Puis la vision s'est élargie à l'étude de la conception et du déploiement de chaînes logistiques « hydrogène » à travers le développement d'un cadre systémique intégrant les aspects multi-sources, multi-acteurs, multi-critères, multi-échelons, multi-périodes, multi-usages. Ces travaux ont ciblé des applications en électro-mobilité, des écosystèmes aéroportuaires (Tarbes-Lourdes) et se sont élargis aux systèmes Power-to-Gas, avec une focalisation sur la prise en compte des jeux d'acteurs de la filière (bilevel programming). Ces travaux ont ainsi abouti à un prototype d'aide à la décision multiobjectif pour la conception d'une chaîne « hydrogène ». Ils ont été appliqués au cas de la région Midi-Pyrénées et de la France dans le cadre du projet hydrogène vert (2013). Le travail proposé (doctorat de S.de Leon Almaraz, 2014) a été sélectionné pour participer au Débat National sur la Transition Énergétique en 2013. Le LGC a participé avec le Laboratoire Laplace au dépôt d'un sous-projet sur la modélisation des écosystèmes Hydrogène énergie au sein du projet Hyport déposé par la Région Occitanie dans le cadre de l'appel à Projet « Territoires Hydrogène », labellisé en 2016.

4. PROSPECTIVE DE LA FILIERE – PRINCIPAUX DEFIS

4.1. LA PRODUCTION D'HYDROGENE

4.1.1 *La production par thermo-conversion : reformage pyrolyse, gazéification, water-splitting*

Les défis à relever sur la production par thermo-conversion concernent le développement (i) des procédés de décarbonisation de ressources hydrocarbonées (conversion du gaz naturel, valorisation de biomasse, déchets) par craquage/reformage/gazéification et (ii) des cycles thermochimiques de dissociation de l'eau (et CO₂). Dans le cadre du déploiement et de la fiabilisation des technologies de thermo-conversion, des efforts sont nécessaires dans le développement de mécanismes d'abattement de polluants et goudrons in-situ ou ex-situ au réacteur, mais également sur l'amélioration de la compréhension des mécanismes complexes qui ont lieu dans les réacteurs à l'échelle pilote. Afin de proposer des procédés propres, durables et innovants, l'accent sera également mis sur la mise au point de réacteurs chauffés par énergie solaire concentrée, ce qui permet d'éviter tout rejet de gaz à effet de serre, ainsi que le développement de procédés solaires continus pilotés en dynamique. Ceci concerne les procédés de production de H₂ par conversion thermochimique de ressources gazeuses (méthane, biogaz) ou solides (biomasse, déchets organiques). Le développement des procédés spécifiques pour la production d'un syngas sans azote est également recommandé, qui faciliteront le déploiement industriel de cette voie de production. Sur le reformage des hydrocarbures tels que le biogaz, le développement des catalyseurs qui sont stables à hautes températures (700-900°C) est indispensable.

Dans le domaine de la décomposition thermochimique de l'eau (water-splitting), le développement de matériaux redox stables thermiquement et présentant une grande capacité d'échange de l'oxygène est nécessaire pour leur intégration dans des réacteurs solaires. Les recherches à mener dans ces différents domaines concernent à la fois la synthèse et caractérisation de nouveaux matériaux redox actifs pour la production d'hydrogène (en particulier, nouveaux matériaux catalytiques de type oxydes conducteurs ioniques), l'étude de la réactivité des systèmes solide/gaz (rendements, cinétiques réactionnelles), et la mise au point de récepteurs/réacteurs solaires (conception, expérimentation, et modélisation) innovants à différentes échelles et opérant à haute température de façon fiable.

4.1.2. La production par électrolyse

La réaction électrochimique de l'électrolyse peut être effectuée à une température inférieure à 100 ° C, où l'eau est liquide, en utilisant un électrolyseur d'eau alcalin (*Alkaline Water Electrolysis, AWE*) ou un électrolyseur d'eau à membrane échangeuse de protons (*Proton Exchange Membrane Water Electrolysis, PEMWE*). Actuellement, l'électrolyseur alcalin domine le marché des stations de ravitaillement en hydrogène et celui du stockage "*power-to-gas*", principalement parce que le coût en capital de cette technologie est toujours inférieur à celui des PEMWE. La possibilité de coupler des électrolyseurs avec des sources d'énergie renouvelables est un des moyens incontournables de baisser leur coût d'opération.

Bien que l'électrolyseur alcalin soit une technologie mature et commercialisée, une densité de courant et une pression de fonctionnement faibles, ainsi qu'un électrolyte liquide corrosif, freinent son développement. De nouvelles générations de membranes à échange d'anions devraient permettre une rupture technologique pour l'électrolyse en milieu alcalin. L'électrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons permet à l'heure actuelle une densité de courant plus élevée, un degré de pureté du gaz plus élevé, une perméabilité au gaz plus faible, et une caractéristique masse-volume plus faible, cependant PEMWE n'est pas encore largement répandu, les pertes d'efficacité étant actuellement dominées par la résistance électrique et la perméabilité de la membrane, ainsi que par la réaction de dégagement d'oxygène.

Les défis scientifiques se situent au niveau des matériaux et de leur assemblage, pour diminuer les résistances aux interfaces :

- Au niveau de l'électrolyte des électrolyseurs alcalins : le remplacement de la potasse concentrée par des acides faibles.
- En ce qui concerne les électrocatalyseurs : la rationalisation de l'utilisation des métaux nobles, leur substitution par des métaux plus abondants ou l'ajout d'additifs (ligands) pour en optimiser les performances, mais aussi la stabilité et la durabilité figurent parmi les verrous à lever pour optimiser les catalyseurs. Intégration des matériaux électro-catalytiques à faible charge de métaux nobles dans des AMEs d'électrolyseurs alcalins.
- Sur les membranes pour électrolyseur PEMWE and AEMWE : le développement de nouvelles membranes renforcées pour les applications PEMWE d'une épaisseur et d'une résistance électrique inférieures à celles des membranes conventionnelles à base d'acides perfluorosulfoniques (PFSA), mais avec des propriétés mécaniques et de perméabilité comparables ou améliorées et des membranes anioniques stables en conditions d'utilisation, faisant appel à de nouvelles chimies et de nouvelles méthodes de dépôt ou d'élaboration.

Dans le domaine des dispositifs réversibles, les principaux défis concernent l'optimisation de l'électrode à oxygène (TRL 2-3) et la mise à l'échelle des cellules (TRL 4-5).

A l'échelle « système », les enjeux portent sur la durabilité des électrolyseurs de puissance face à l'intermittence des énergies renouvelables et celles des harmoniques de courant générées par l'électronique de puissance. Les défis scientifiques portent sur la compréhension du vieillissement, sa modélisation et d'identifier les parades à déployer pour optimiser et maîtriser (pronostic) la durée de vie. Cela pourrait être renforcé par l'aspect multifonctionnel de plus en plus recherché pour des raisons d'amortissement des investissements.

4.1.3. La production par photo-catalyse

Afin de pouvoir à terme envisager la production photo(électro)-catalytique de l'hydrogène comme une réelle alternative aux procédés de production plus conventionnels, le développement de matériaux présentant de bonnes propriétés photo(électro)-catalytiques, une conduction électronique efficace et une porosité contrôlée (pour un transport optimal des différentes espèces impliquées dans ces procédés) est requis. Pour ce faire, des méthodes de synthèse versatiles, respectueuses de l'environnement et aisément industrialisables sont à privilégier. La conception de matériaux nanostructurés photo(électro)-actifs plus performants et plus stables devrait permettre d'atteindre des rendements de production de H₂ plus compétitifs. S'appuyant sur des forces de recherche complémentaires, les laboratoires régionaux positionnés sur ces approches joindront leurs compétences et savoir-faire pour relever ces défis.

4.1.4. La production biologique

Les futurs enjeux de R&D en fermentation sombre et sur les systèmes bioélectrochimiques portent : (i) pour les bas TRL (2-4), sur une meilleure compréhension des processus microbiens d'interactions entre microorganismes et aussi entre microorganismes et matériaux d'électrodes, sur le pilotage du métabolisme des microorganismes pour améliorer la pureté de l'hydrogène produit, sur le développement de souches génétiquement modifiées afin de lever les freins des métabolismes microbiens et augmenter le rendement de conversion, et (ii) pour les plus hauts TRL (5-7), sur le changement d'échelle, le traitement de flux de biomasses importants et variables, afin d'évaluer la robustesse de ces bioprocédés en environnement industriel de fonctionnement.

Dans le cadre de filières de traitement, la fermentation sombre fait office de prétraitement de la matière organique complexe. Les effluents de sortie de la fermentation sombre sont donc plus facilement biodégradables que les déchets bruts entrants. Ces effluents peuvent en suivant être utilisés dans des procédés complémentaires ne pouvant pas directement exploiter la matière organique complexe tels que les systèmes bioélectrochimiques, des cultures pures de bactéries génétiquement modifiées à des fins biotechnologiques, ou simplement en méthanisation (Biogaz). Ce couplage en méthanisation bi-étapes est notamment une technologie relativement mature supportée par de nombreuses études et brevets et pouvant être implantée à court terme (TRL7) avec de nombreux avantages (stabilisation/accélération du traitement). De plus, certaines biomolécules peuvent également être récupérées en vue d'être utilisées en chimie verte. Ainsi, les installations de traitement/valorisation biologique associant fermentation, systèmes bioélectrochimiques et méthanisation, en plus de produire de l'hydrogène et du biogaz, ont le potentiel de devenir de véritables bioraffineries environnementales.

NB : La production de H₂ par des procédés biologiques contribuent également aux technologies clés identifiées³ n°8 et n°24, respectivement « Procédés relatifs à la chimie verte » et « Carburants de synthèse ».

4.2. LE STOCKAGE D'HYDROGENE

4.2.1. Stockage comprimé

Le dimensionnement d'un système de stockage d'hydrogène par compression implique un grand nombre de paramètres qui sont sensibles : le choix de la configuration (nombre de compresseurs, nombres de buffers) et la dimension du système de stockage en fonction de la capacité de production d'hydrogène et la demande et l'utilisation en aval, l'échauffement lors de la recharge du réservoir, la température, la pression du stockage, la pression d'hydrogène résiduel, le volume du réservoir, la durée de remplissage, les conditions d'injection en aval, la nature du liner, le type de refroidissement, etc. En plus, dans la plupart de cas pour les laboratoires, cette étape est réalisée par des outils numériques. La validation expérimentale apparaît pertinente avant une étape de mise à l'échelle.

³ <https://www.entreprises.gouv.fr/politique-et-enjeux/technologies-cles-2020>

Dans cet objectif, les activités de recherche qui ont pour but ultime la maîtrise et l'amélioration de la sécurité lors du transport de l'hydrogène compressé et liquide nécessitent de combiner au quotidien des compétences et savoir-faire sur les 4 éléments suivants :

- Le développement d'essais expérimentaux spécifiques pour reproduire en laboratoire les conditions de sollicitations des tanks en service. Ce premier point est primordial dans l'objectif de prévoir la durabilité de telles structures. Il s'accompagne nécessairement de la mise en place et/ou du développement de mesures thermiques et dimensionnelles sans contact au cours de la mise en pression et lors du transport. Ces techniques sans capteurs intrusifs en fort développement permettent ainsi de ne pas perturber à la fois l'essai et par conséquent la mesure attendue du capteur.
- Le développement de modèles de comportement et de tolérance aux dommages permettant de prévoir les durées de vie en service avec les exigences de sécurité requises.
- L'implémentation des modèles dans des codes de calculs existants qui au final permettront le dimensionnement de tanks en fonction des conditions de chargement.

L'expertise matériaux à la fois au niveau des alliages métalliques (mécanismes physico-chimiques des interactions hydrogène-microstructure et notamment ceux qui entraînent la fragilisation) et sur les matériaux composites actuels et du futur. Le verrou est ici la mise au point de matériaux innovants de parois de tanks (alliages métalliques inoxydables présentant une excellente résistance à la fragilisation par l'hydrogène et composites ultra résistants aux pressions élevées)

4.2.2. Stockage liquide

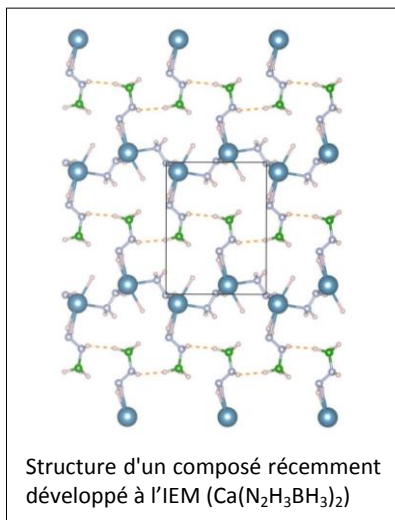
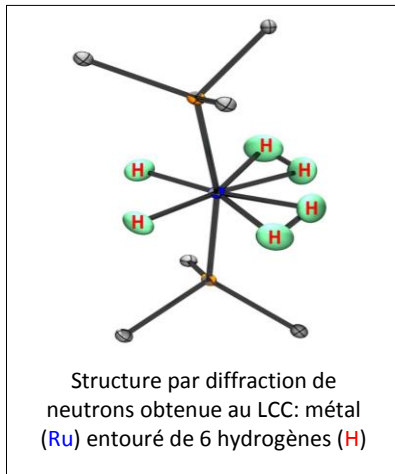
Le stockage de l'hydrogène via des molécules porteuses liquides appelées LOHC (*Liquid Organic Hydrogen Carrier*) constitue une approche compatible à la fois pour les applications embarquées à bord de véhicules et pour une utilisation stationnaire. La faisabilité technique a déjà été démontrée mais il reste un certain nombre de verrous à lever avant de pouvoir envisager une introduction à grande échelle et une viabilité économique. Des recherches en rupture sont nécessaires pour améliorer tous les composants du système : architecture, procédé, nouveaux matériaux catalytiques et supports, nouvelles molécules organiques liquides (LOHC), échangeur thermique, etc... Augmenter la cyclabilité des LOHC (nombre de cycle charge/décharge en hydrogène) et assurer la compatibilité du catalyseur avec de l'hydrogène contenant des impuretés sont aussi des points clé.

Pour répondre à ces défis, la conception de nouveaux catalyseurs moins onéreux et l'identification des meilleurs couples molécule porteuse/catalyseur, ainsi que leurs supports sont essentielles. Des approches en modélisation devraient aussi contribuer à atteindre ces objectifs. La future collaboration entre les équipes d'Occitanie, en pointe sur ce domaine, permet d'envisager des avancées majeures dans le domaine du stockage de l'hydrogène par les LOHC.

Le stockage cryogénique (liquéfaction de l'hydrogène gazeux) est de plus en plus envisagé pour les applications aéronautiques (propulsion électrique). Il s'agirait de faire un état des lieux de sa maîtrise et de mettre en évidence les recherches encore à mener au moins en termes d'optimisation.

4.2.3. Stockage solide

Bien que le stockage solide de l'hydrogène présente de nombreux avantages pour les applications mobiles (transports, appareils électroniques, etc.) et stationnaires (habitats individuel et collectif, bâtiments isolés), aucun matériau solide ne satisfait aujourd'hui l'ensemble des exigences et critères fixés par les agences gouvernementales internationales, en particulier en ce qui concerne la capacité de stockage et la réversibilité dans des conditions de coût et de sécurité acceptables par le grand public.



Les laboratoires d'Occitanie sont des acteurs de pointe dans ce domaine (LCC, LGC, IEM). Les travaux menés visent à étudier des méthodes novatrices de stockage d'hydrogène à l'état solide afin de développer de nouveaux dispositifs en adéquation avec chacune des applications envisagées (mobile ou stationnaire). Les voies de recherche envisagées sont centrées sur le développement de méthodes simples et de procédés efficaces pour l'élaboration de matériaux hybrides (hydrures dopés, cristaux moléculaires, clathrates, nouveaux composés boro-azotés hydrogénés, etc.). La poursuite intensive de recherches fondamentales, au niveau le plus infiniment petit de la matière (niveau moléculaire et nano-particulaire), sera l'une des clés pour parvenir à élaborer de nouveaux matériaux performants. Une part importante des études concernera également l'étude de la porosité de ces matériaux et

de leur mise en forme. Les recherches menées à différentes échelles (laboratoire, procédé) permettront d'appréhender l'extrapolation de la fabrication et l'utilisation de ces matériaux à plus grande échelle (banc d'essai pilote, démonstrateur, industrie).

L'ensemble des équipes d'Occitanie impliquées sur ce sujet, mutualiseront et renforceront leurs efforts pour comprendre et optimiser les processus de charge/décharge en hydrogène à l'état solide (capacité de stockage, vitesse de capture et de libération du gaz, robustesse des propriétés sur plusieurs cycles) dans le respect des contraintes économiques et de sécurité/environnement nécessaires au déploiement à grande échelle de ces matériaux.

A l'échelle système, les couplages électrolyseur/stockage solide/pile à combustible ne sont pas maîtrisés ou, dans le meilleur des cas, restent à optimiser. On peut citer par exemple le cas de la valorisation de la chaleur produite par une pile à combustible pour alimenter la réaction

endothermique de décharge d'un hydrure.

4.3. LA CONVERSION D'HYDROGENE

4.3.1. Piles à combustible

Malgré les avancées importantes dans les années récentes, des verrous de la technologie PEMFC subsistent. Que ce soit dans le domaine du transport ou celui des applications stationnaires, la durée de vie et le coût sont clairement identifiés à l'heure actuelle comme points durs, auxquels il faut associer une utilisation non-raisonnée de métal critique (Pt). Pour le transport lourd (ferroviaire, maritime, fluvial, poids lourds) par exemple, l'objectif affiché de 20,000 heures de fonctionnement est actuellement irréalisable. Même si le développement technologique a pu atteindre des TRL élevés, relever ces défis nécessite de faire appel à des développements en recherche fondamentale.

Les défis scientifiques se situent au niveau de la composition et l'architecture de la membrane, de la composition des catalyseurs anodiques et cathodiques et de leurs supports, de l'architecture des électrodes, des couches de diffusion des gaz, ainsi que dans le façonnage des assemblages et cellules.

En ce qui concerne les membranes (échangeuses de proton et alcalines) à faible résistance électrique, le défi est l'obtention de membranes fines, résistantes à la dégradation, mécaniquement et chimiquement stables.

Pour les matériaux supports de catalyseurs, les défis scientifiques se situent au niveau de l'élaboration de nouvelles compositions plus stables que les supports carbonés conventionnels, et l'amélioration des interactions métal-support et leur caractérisation.

Pour ce qui concerne les matériaux catalytiques, une diminution de la quantité de platine ou son remplacement dans les électrodes est nécessaire. Les approches abordées se situent au niveau de la composition du catalyseur (alliage, métaux non-nobles), les nouvelles architectures, les nouvelles procédures de mise en forme et de dépôt.

Le remplacement du platine dans les électrodes par des métaux non-nobles, sans compromettre l'activité catalytique, est un enjeu clé où les problématiques principales, à l'heure actuelle, sont la dégradation en milieu acide et en présence d'oxygène à la cathode, ainsi que l'impact sur le reste de l'assemblage (pollution de la membrane).

L'utilisation des piles à combustible à membrane alcaline (AEMFC), en particulier en raison des avancées considérables réalisées récemment, peut être considérée comme une réponse crédible au problème posé par l'utilisation de métaux nobles dans les électrodes. Cependant, des solutions devront être apportées au regard de la sensibilité au CO₂ atmosphérique, à la faible stabilité des membranes en température, et à la faible activité des catalyseurs non-nobles pour l'oxydation de l'hydrogène.

Dans le domaine de PCFC, l'absence de matériaux cathodiques spécifiques (conducteurs triple e/H⁺/O²⁻) impose l'utilisation de composites électrolyte-conducteur mixte électronique-ionique afin de délocaliser les zones de point triple dans tout le volume de l'électrode, nécessitant l'optimisation de la microstructure des composites.

La compréhension des mécanismes de transfert et d'échange d'énergie et de matière aux interfaces dans la membrane, dans les électrodes et dans des couches de diffusion des gaz de PEMFC est fondamentale pour l'amélioration des performances et de la durée de vie. En particulier, l'amélioration de la compréhension des mécanismes fondamentaux de fonctionnement de la pile (transfert de matière, de la chaleur, cinétique) est un domaine majeur qui doit être abordé à travers la mise en place de techniques de mesure *operando* (Raman, Mössbauer, spectroscopie d'absorption X) de plus en plus perfectionnées, pour sonder tous les éléments du cœur de pile. La compréhension fine des mécanismes du transfert d'eau reste un défi et un enjeu majeur pour les piles PEMFC. Cette compréhension fine paraît désormais possible via des efforts supplémentaires en terme de modélisation et de simulations numériques. Il en va de même pour ce qui concerne l'analyse des mécanismes de vieillissement. Un autre défi majeur lié concerne l'amélioration des performances tout en réduisant la charge en métal noble (catalyseur). Ici encore des modèles performants servant de base à des simulations numériques doivent aider à la conception de cœurs de piles plus performants.

À l'échelle système, la maîtrise du vieillissement reste un vrai défi. Il s'agit de comprendre ces mécanismes afin de concevoir au plus juste, de piloter de manière optimale et de prévenir/maintenir de manière maîtrisée. Le défi s'accroît très fortement dès que l'on s'éloigne des conditions en laboratoire et que l'on s'intéresse aux conditions réelles comme dans le cas extrêmement contraignant des applications aéronautiques. Les besoins pour les industriels de modèles de vieillissement sont très forts. À défaut de pouvoir tout maîtriser en conditions réelles, il est essentiel en parallèle de continuer à travailler sur des outils de diagnostic/pronostic de l'état de santé des piles à combustible.

4.3.2. Combustion d'Hydrogène

L'introduction de l'hydrogène comme carburant, seul ou en complément d'un carburant existant, va nécessiter de modifier les systèmes d'injection ou d'en développer des nouveaux, en particulier afin de remplir les objectifs de sécurité et de limitation des niveaux d'oxydes d'azote dans les gaz brûlés.

Un des enjeux majeurs au niveau de la recherche est la compréhension des mécanismes de stabilisation des flammes d'hydrogène. Des ruptures technologiques seront peut-être nécessaires, dans les technologies d'injection ou dans l'utilisation de nouveaux matériaux. À ce titre, en complément des études expérimentales, la simulation numérique haute performance pourra être très utile pour explorer des solutions technologiques à moindre coût et en sécurité.

À l'échelle système, il s'agit d'étudier toutes les potentialités et l'intérêt de la combustion d'hydrogène dans les systèmes énergétiques.

4.3.3. La méthanation

Méthanation Catalytique :

Les perspectives actuelles de la méthanation catalytique porte sur la montée en échelle et notamment via un programme de maturation en cours avec TTT. L'objectif est de pouvoir établir une preuve de concept du procédé catalytique, d'augmenter l'efficacité énergétique du procédé. Les domaines d'applications envisagés sont l'enrichissement du biogaz couplé ou non à la méthanation biologique et le stockage d'énergies intermittentes. Des discussions sont en cours pour la mise en œuvre de plusieurs partenariats industriels (TERESA, GRDF...)

Méthanation Biologique :

Les perspectives actuelles s'orientent sur le développement de modèle de simulation permettant d'expliquer les phénomènes observables au sein des expérimentations, ou encore de prédire les performances de procédé. Des verrous importants existent, en particulier lors de la méthanation in-situ, pour prendre en compte et le lever des inhibitions liées à la présence de certains composés (H_2 , CO). Par ailleurs, le spectre de produit obtenus à partir d'hydrogène et de CO_2 peut non seulement se situer dans le domaine énergétique (méthane) mais les recherches tentent de produire aussi des biomolécules à haute valeur ajoutée (acides organiques, alcools, ...). Enfin les échelles d'études ne sont plus seulement envisagées au niveau de pilote de laboratoire mais de démonstrateurs en environnement réel (TRL 4-5).

4.3.4. L'hydrogénation

Outre la réduction du coût en énergie, les aspects durabilité et recyclabilité des systèmes étudiés sont parmi les défis majeurs à relever dans le domaine de l'hydrogénation. L'utilisation de métaux plus abondants et donc plus intéressants pour des applications industrielles, ou une meilleure rationalisation de l'emploi des métaux nobles, ainsi que le recours à une source propre et durable d'hydrogène sont parmi les voies à explorer.

Le couplage des catalyses métallique et enzymatique constitue une autre perspective, en vue d'améliorer la production des métabolites microbiens issus du CO_2 tout en réduisant la quantité en métaux.

La criticité de certaines ressources et les exigences de mise en œuvre et de résultats parfois complexes (milieux très visqueux, sélectivité poussée, ...) nécessitent le développement de réacteurs toujours plus performants. Les potentialités offertes par la fabrication additive (impression 3D) et les nouvelles techniques d'élaboration et de modification des matériaux (nano-assemblage ou bio-mimétisme) sont également des pistes à exploiter.

S'appuyant sur des complémentarités fortes, des collaborations étroites entre les laboratoires permettront des actions synergiques pour le développement de catalyseurs d'hydrogénation et de réacteurs optimisés afin de répondre aux défis de production de molécules d'intérêt à partir de ressources durables.

4.4. LES AUXILIAIRES ET CONSTITUANTS TRANSVERSES

4.4.1. Capteurs et détecteurs

La détection de l'hydrogène de demain doit répondre à des besoins très spécifiques en termes de performances et de conditions de mise en œuvre exprimés par les acteurs de la filière hydrogène et les utilisateurs. La conception se fera donc « à façon » sur la base d'un cahier des charges précis, pour que la performance réponde aux besoins. Le corollaire de cette conjoncture est qu'il y a, et qu'il y aura, des besoins accrus en termes de nouveaux matériaux (notamment nano-matériaux) présentant des sensibilité, sélectivité et stabilité (dans des conditions de température et d'humidité relative extrêmes) optimales ainsi qu'un coût et une facilité de mise en œuvre compétitifs. Il y aura également des besoins technologiques relatifs au design des systèmes, à l'intégration, à l'autonomisation énergétique, au traitement avancé du signal, à l'auto-réparation, au déploiement et à la communication des données, aux big-data... Les laboratoires régionaux intéressés à la thématique capteurs/détecteurs poursuivront leurs efforts pour répondre à ces besoins. Dans cette optique, l'offre étendue de R&D en Région Occitanie constitue un atout indéniable.

4.4.2. Séparation/purification de l'hydrogène

Afin de pouvoir à termes envisager la séparation/purification de l'hydrogène dans des conditions d'utilisation industrielles, des membranes permettant l'extraction sélective de H₂ à partir de mélanges de gaz en milieu agressif (e.g. à chaud, en présence de vapeur d'eau ou de gaz poisons, sous irradiation, en cyclage thermique, sous gradient redox,...) doivent être développés. Des méthodes de synthèse respectueuses de l'environnement sont à privilégier pour « designer » de nouvelles architectures de membranes tamis moléculaires, associant des oxydes métalliques, et des matériaux non oxydes plus résistants aux conditions agressives, ou encore des matériaux cristallins présentant des pores calibrés (zéolithes ou réseaux métallo-organiques) éventuellement fonctionnalisés pour des performances (sélectivité et perméabilité) accrues.

4.4.3. Compression de l'hydrogène

Pour atteindre des pressions supérieures à 400 bars et atteindre 800 bars, la compression électrochimique doit mettre en œuvre des matériaux échangeurs protoniques, des assemblages membrane/électrode et des designs de cellule innovants. C'est évidemment la tenue mécanique des composants et des cellules qu'il s'agira d'assurer mais c'est également la réactivité de l'hydrogène et des autres constituants gazeux du mélange vis-à-vis de l'électrode qui devient critique.

4.4.4. Autres auxiliaires (électroniques, humidificateurs, échangeurs thermiques...)

En terme d'électronique de puissance, le défi restera de proposer des solutions de plus en plus compactes et légères tout en garantissant un haut niveau de disponibilité et de fiabilité.

Pour les autres types d'auxiliaires, d'autres défis en termes d'intégration doivent être relevés. En tout premier lieu, le défi d'un refroidissement compact des piles à combustible, pour les applications embarquées, reste un enjeu crucial ; il peut en aller de la faisabilité de l'application (exemple de « l'avion hydrogène »). En outre, l'intégration des auxiliaires fluidiques d'une pile à combustible est aussi un défi à relever pour faire baisser les coûts : l'impression additive 3D pourrait avoir un rôle à jouer.

4.5. L'HYDROGENE AU SEIN DES CHAINES ENERGETIQUES

4.5.1. L'hydrogène dans les réseaux d'énergie

Pour des raisons de rentabilité économique, les smart-grids sont appelés à aller au-delà du seul vecteur électricité. Se dessinent, de plus en plus clairement, des systèmes multi-vecteurs d'énergie (hydrogène, électricité, chaleur) et multifonctionnels opérant en co(tri) génération. Si la conception optimisée et le pilotage énergétique d'un smart-grid « classique » ne sont déjà pas aisés et continuent de faire l'objet de travaux de recherche, il est facile d'imaginer la très haute complexité de ces nouveaux systèmes et la recherche à mener pour les maîtriser et les concevoir sur le plan technico-économique.

En parallèle, on parle d'avions de plus en plus électriques, voire tout électriques. L'hydrogène est, dans ces cas, fortement pressenti pour aller jusqu'à offrir l'avion zéro émission, très fortement attendu dans le contexte géopolitique actuel. Ces systèmes embarqués sont fortement multidisciplinaires et, là encore, hautement complexes. Les travaux engagés sur les méthodologies pour la conception de tels systèmes doivent se poursuivre recherchant idéalement une synergie entre les smart-grids aéronautiques et terrestres.

Au final, dans tous ces cas de figure, il s'agit d'une recherche avec une nécessaire vision systémique, le défi scientifique à relever étant de traiter la complexité pour la conception optimisée : très nombreuses variables de conception, constantes de temps très dispersées (potentiellement de la microseconde à plusieurs décennies), résolution mathématique couteuse du problème d'optimisation.

4.5.2. Logistique de la filière hydrogène

Les perspectives sur la chaîne logistique de l'hydrogène se situent au niveau du développement de la méthodologie d'optimisation multicritère et d'aide à la décision en vue du dimensionnement et du déploiement de la filière intégrant les aspects économiques, environnementaux et sociaux de la filière. D'un point de vue méthodologique, il s'agira d'étendre la formulation développée dans le cadre de travaux précédents au cas de critères sociétaux dont certains peuvent faire intervenir une part d'imprécision ou d'incertitude.

5. PROPOSITION D'ACTIONS POUR L'EXECUTIF REGIONAL

5.1 Mise en place d'un Centre d'Excellence Occitan Hydrogène Energie : HyRéO « Hydrogène Recherche Occitanie »

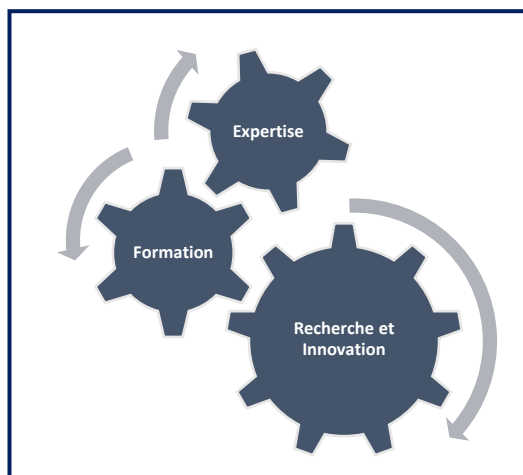
La Région Occitanie est fortement impliquée dans le développement d'une filière hydrogène vert par l'intermédiaire d'HyDéO. Toutefois, la filière hydrogène énergie a besoin d'un effort important de recherche en amont, afin de lever les verrous technologiques encore présents pour obtenir des solutions pérennes pour des utilisations à grande échelle. Les verrous identifiés concernent plusieurs aspects de la chaîne hydrogène tels que la production, le stockage et la conversion de l'hydrogène.

La région Occitanie doit ainsi se doter d'un centre d'excellence en recherche sur l'hydrogène énergie pour initier des solutions d'avenir afin de résoudre les problèmes spécifiques à cette filière. De nombreux laboratoires de la région Occitanie (16) ont en leur sein une ou plusieurs équipes travaillant sur la thématique hydrogène énergie. Ces équipes sont réparties sur plusieurs sites régionaux de recherche (Toulouse, Montpellier, Albi, Narbonne, Odeillo). Une structuration de la recherche sur l'hydrogène au niveau régional permettra d'obtenir un réel effet levier pour résoudre ces problèmes clés et favorisera le mix d'idées entre territoires Occitans. Ce centre régional d'excellence « Hydrogène Recherche Occitanie, HyRéO » bénéficiera des compétences complémentaires apportées par chacune des équipes académiques et permettra ainsi une mutualisation des moyens, des méthodes et des ressources (personnels et outils) de recherche.

Le centre régional d'excellence HyRéO coordonnera un vaste réseau de partenaires académiques en Occitanie engagés dans le développement d'actions de recherche innovantes et/ou en rupture focalisées bas TRL; dans la promotion d'une recherche fondamentale orientée vers l'industrie régionale; dans le démarrage et la création de start-up hydrogène; et enfin dans la formation sur la filière hydrogène énergie.

Ces actions auront toutes pour but commun de confirmer la place de la région Occitanie comme région motrice, au niveau international, en termes de recherche sur l'hydrogène vert (hydrogène énergie), permettant ainsi d'avoir une attractivité accrue par le rayonnement des forces académiques et industrielles. HyRéO pourrait également être en lien avec d'autres régions afin de répondre à des appels à projet trans-régionaux, nationaux, et européens, la présente structuration à 16 laboratoires académiques constituant une force de frappe majeure.

5.1.1 Missions et objectifs du Centre Régional d'Excellence HyRéO



La création du **Centre Régional d'Excellence HyRéO** vise à fédérer les ressources en recherche, disponibles en Région Occitanie pour promouvoir l'excellence régionale dans les différentes thématiques liées à la filière Hydrogène Energie. Afin de soutenir son ambition, **HyRéO souhaite doter les chercheurs (et les entrepreneurs) d'Occitanie d'une structure fédérative de recherche régionale** et d'un environnement scientifique **qui leur permettront de mener des recherches de niveau mondial** fondées sur des approches multidisciplinaires et translationnelles (sciences appliquées). Les objectifs généraux de HyRéO se déclinent en trois points :

1- La création d'un réseau régional d'experts

Afficher les forces académiques en région Occitanie, en termes de potentiel humain, de thématiques scientifiques, de ressources techniques... **Revendiquer l'excellence, l'originalité scientifique et la visibilité** de la recherche sur l'Hydrogène Énergie en Occitanie.

Anticiper les futures actions prioritaires de recherche et définir, avec HyDéO, l'ADEME et la Région Occitanie, une politique prospective et stratégique régionale de recherche sur la filière Hydrogène Énergie. **Épauler/accompagner la Région Occitanie** dans l'expertise et la sélection de projets d'investissement et de recherche.

Attirer des chercheurs et des ingénieurs français ou étrangers de talent, experts dans les thématiques de recherche prioritaires.

Offrir un appui scientifique et technologique ciblé aux industriels de la filière Hydrogène Énergie pour favoriser les échanges, les discussions et les partenariats « Université-Industrie » en Région Occitanie, en particulier sur les recherches sur le long terme, non finalisées.

2- La formation de techniciens et de cadres pour la recherche et l'industrie

Formaliser une offre de formation régionale permettant le transfert des savoirs développés dans le cadre des activités de recherche mais aussi à travers l'anticipation des futurs besoins industriels

Former par la recherche une nouvelle génération de scientifiques, d'entrepreneurs, de cadres, de personnels techniques en les confrontant à des projets complexes de nature multidisciplinaire et souvent multisectorielle dans les thématiques clés ciblées par HyRéO.

Promouvoir la filière Hydrogène Énergie pour faire éclore chez les plus jeunes une conviction, une envie, une volonté de rejoindre et participer au déploiement industriel de cette filière.

3- La plus-value incontestable en recherche et innovation

Développer et rendre accessible aux ²membres d'HyRéO **des plateformes techniques et scientifiques**. Mutualiser et développer des moyens d'essai, **investir dans des équipements innovants collectifs**.

Renforcer la dynamique de collaboration transverse déjà établie, **faire émerger de nouveaux défis scientifiques ambitieux**. Organiser et soumettre aux organismes financeurs (Région, État, Europe) des demandes de projets labélisés HyRéO pour soutenir leurs subventionnements.

Favoriser la création de liens collaboratifs entre la recherche amont ou fondamentale, la recherche appliquée et le secteur industriel. Soutenir la chaîne d'innovation qui relie la recherche académique aux industriels (animation, journées rencontre recherche-industrie en Occitanie,...).

Encourager les transferts de connaissances et de compétences inter territoires en favorisant les thèses ou les projets de recherche co dirigés entre Toulouse, Montpellier, Albi, Narbonne et Odeillo.

Financer des projets collaboratifs innovants à bas TRL pour relever des défis majeurs et dynamiser la filière Hydrogène Énergie en Occitanie.

5.1.2 Gouvernance

Le centre HyRéO poursuit trois objectifs stratégiques :

- construire une stratégie novatrice issue d'une prospective scientifique et technologique partagée par les acteurs;

- renforcer le professionnalisme au service des partenaires industriels ;
- promouvoir l'image du centre pour renforcer sa visibilité nationale et internationale en tant que structure d'excellence sur l'hydrogène énergie.

Afin de répondre à ces objectifs, le centre mettra en place une gouvernance, qui repose sur deux entités : un Comité Scientifique (CS), et un Comité d'Orientation Stratégique (COS), dont les fonctions sont décrites ci-dessous :

- **Le Conseil Scientifique (CS)** a trois fonctions principales: assurer une communication transparente entre les membres du centre, élaborer la stratégie scientifique et technologique du centre et proposer des axes et projets scientifiques. Ces propositions seront faites en amont du Comité d'Orientation Stratégique.

Le CS regroupe un représentant de chacun des laboratoires fondateurs d'HyRéO et des futurs laboratoires susceptibles d'intégrer la structure. Les membres du CS sont nommés pour 4 ans, renouvelable une fois. Le CS élit en son sein pour une période de 4 ans un Président et un Vice-Président. Les sites Toulouse, Montpellier, Albi, Narbonne et Odeillo se succèdent à tour de rôle à la présidence, gage de la représentativité de l'ensemble de la communauté régionale. Le président et le vice-président ne doivent pas être du même site.

Le CS se réunira deux fois par an pour définir les stratégies, les objectifs scientifiques et technologiques, et les moyens à mettre en œuvre pour assurer le bon fonctionnement du Centre. Le rôle du CS sera de préparer, dans le cadre du budget annuel alloué par la Région Occitanie, les appels à projets (thèses, post-docs, équipements...) s'inscrivant dans la stratégie et les objectifs du centre, dont les termes auront été approuvés par le COS ; d'arbitrer les propositions répondant de la façon la plus appropriée aux appels à projets; et enfin de présenter à l'approbation de la Région Occitanie les projets qui lui paraissent devoir être retenus dans le cadre de l'enveloppe inscrite dans le budget du centre pour leur financement.

Le CS sera aussi chargé du suivi et de la bonne réalisation des travaux à travers des échanges entre les laboratoires et la présentation des travaux (par exemple travaux d'avancement des thèses et post-docs), de la veille scientifique et technologique, et de la communication avec la Région Occitanie, les organismes publics, les partenaires industriels et les médias.

- Le CS sera épaulé par un **Comité d'Orientation Stratégique (COS)**, incluant le président et le vice-président du CS, des représentants d'HyDéO et de la Région, des représentants des sites universitaires, des EPIC ou des EPST (CNRS, INRA, ADEME...), et des personnalités extérieures du monde socio-économique (industriels identifiés par HyDéO/HyRéO,...). Le COS se réunira une fois par an. Il fera des propositions qui permettront au CS de réévaluer tous les ans la feuille de route, la structure et les moyens mis en œuvre pour le bon fonctionnement du Centre d'Excellence Occitan Hydrogène Energie.

Il est chargé de :

- définir les axes stratégiques du centre, sur la base des propositions faites par le Comité Scientifique et de son propre travail de veille et d'analyse ;
- sélectionner et classer les projets et arbitrer l'attribution des moyens financiers. Cette sélection se fera sur la base de critères d'excellence scientifique et de cohérence avec les axes stratégiques du centre.
- d'évaluer le niveau de professionnalisation du centre et tout particulièrement l'atteinte des objectifs;
- d'évaluer en continu le déroulement des projets et l'impact des projets finalisés. Le COS pourra, si nécessaire, demander l'arrêt d'un projet de ressourcement si celui-ci présentait des dysfonctionnements importants.
- statuer, sur proposition du CS, quant à l'intégration de nouveaux membres.

Une attention particulière sera donnée à la circulation de l'information au sein des membres du centre. En plus des réunions annuelles du Comité Scientifique, une **Assemblée Générale** regroupant l'ensemble des membres du centre, ainsi que des représentants des sites universitaires et des tutelles (CNRS, INRA, etc.) et des acteurs de la

sphère socio-économique sera organisée pour partager largement les résultats des activités et assurer une veille scientifique et technique.

5.1.3 Fonctionnement :

1- Les appels à projets annuels impliquant la formation de doctorants ou de post-doctorants

Objectif annuel: financement de 3 projets (150-300 k€)

Les appels à projets annuels ont pour objectif de renforcer ou démarrer des projets de recherche ambitieux et novateurs sur des thématiques à bas TRL en lien avec la feuille de route établie par le CS du centre d'excellence HyRéO. Egalement, ils doivent permettre de former par la recherche de futurs experts et cadres de recherche pour la filière industrielle de l'hydrogène Energie. Ces projets permettent donc principalement le recrutement et le financement de doctorants et de post-doctorants.

Les projets doivent favoriser le développement de nouvelles collaborations entre au moins **deux laboratoires de la Région Occitanie, membres du Centre Régional d'Excellence HyRéO, en privilégiant les collaborations inter-sites** (Toulouse, Montpellier, Albi, Narbonne et Odeillo). **La procédure de sélection s'effectuera par audition** des projets éligibles devant le comité scientifique.

2- Les appels à financement d'équipements mutualisés

Objectif annuel: financement (ou co-financement) de 3 à 4 équipements (100-400 k€)

Les demandes concernant l'achat d'équipements mutualisés doivent contribuer à donner aux laboratoires membres d'HyRéO les moyens de mener à bien des projets de recherche dans le cadre des thématiques prioritaires relevant de la filière Hydrogène Energie. Les nouveaux équipements de plateformes de recherche déjà existantes pourront être financés dans le cadre de cette action, dès lors qu'ils sont accessibles à tous les membres sans distinction du Centre Régional d'Excellence.

Le caractère fédérateur et structurant de la demande d'équipement est particulièrement attendu. La complémentarité et/ou la pluridisciplinarité des différentes équipes ou laboratoires associés à la demande sont encouragées. Aussi, l'accès aux équipes extérieures et le management pour la mise en place et la gestion de l'équipement conditionnent fortement l'intérêt de la demande.

3- L'accueil de chercheurs ou d'ingénieurs invités

Objectif annuel: financement de 3 invitations à (10-50 k€)

HyRéO encourage fortement l'accueil de chercheurs ou d'ingénieurs français ou étrangers dans les laboratoires Occitans partenaires pour stimuler la recherche, promouvoir le partage des connaissances et du savoir-faire et développer les collaborations autour de l'hydrogène Énergie, tant en formation qu'en recherche. Les demandes peuvent venir en complément d'un projet quand une compétence particulière est nécessaire au projet ou à l'encadrement d'un doctorant. Les candidatures sont examinées annuellement par le Conseil Scientifique.

4- Le soutien à manifestations ou événements scientifiques

Objectif annuel: financement ou (co-financement) de 3 événements (10-30 k€)

HyRéO soutient des workshops, des congrès, des écoles scientifiques, des ateliers ou toutes autres manifestations scientifiques qui profitent à la communauté scientifique Occitane. Une attention particulière devra favoriser la participation privilégiée de membres régionaux. L'invitation d'un intervenant à donner un séminaire dans le cadre

de la recherche financée sur l'Hydrogène Énergie est aussi éligible. Les demandes de soutien sont soumises au fil de l'eau et sont examinées à chaque réunion du Conseil Scientifique.

5.1.4 Thématiques et défis transversaux:

Le centre HyRéO ciblera les projets de recherche selon six thématiques prioritaires répondant à six défis transversaux (Efficacité, Compacité, Durabilité, Impact environnemental, Sécurité et Coût) :

Les 6 thématiques et ambitions prioritaires :



⇒ Production efficace et propre

- Améliorer les rendements énergétiques des électrolyseurs : augmenter la température de fonctionnement (PEM HT), développer de nouveaux catalyseurs et de nouveaux liants zone catalytique / électrolyte ;
- Optimisation des rendements et du changement d'échelle des procédés de méthanation biologiques. Augmentation d'échelle des procédés de méthanation catalytique. Comprendre et modéliser les mécanismes chimiques/biologiques de transformation d'hydrogène afin d'orienter les produits (méthane, carburants) ;
- Développer des voies alternatives ("au-delà de l'électrolyse") et innovantes pour la production d'hydrogène décarboné: photocatalyse, photo-électrocatalyse ... ;
- Développer la filière hydrogène solaire (voies thermochimiques à partir de l'énergie solaire concentrée : craquage/reformage/gazéification, water-splitting) ;
- Valoriser la biomasse et les déchets (intégrer la production de biohydrogène aux filières de traitement par voie biologique,...) ;

⇒ Stockage compact et sûr

- Solide et liquide : améliorer les matériaux et molécules existants et chercher de nouveaux matériaux et molécules en vue d'obtenir des densités gravimétrique et volumique en hydrogène

élevées, des vitesses de charge/décharge en H₂ rapides, une meilleure stabilité des matériaux pour un nombre élevé de cycles de fonctionnement, une température modérée de relargage d'H₂, pour un coût et un impact environnemental faibles.

- Gaz et acceptabilité

⇒ **Compacité des systèmes piles et électrolyseurs :**

- Augmenter l'efficacité des électrolyseurs par réduction de l'énergie d'activation
- Optimiser la mise en forme, la mise à l'échelle et l'électrode, en particulier, à oxygène des dispositifs réversibles à membrane céramique
- Améliorer la conception des PAC (PAC multifonctionnelles) pour permettre la récupération de la chaleur produite et chauffe des réactifs in-situ. Plus généralement, maîtriser/optimiser la production d'électricité, de chaleur voire d'autres sous-produits (eau, air appauvri en oxygène)

⇒ **Gestion des ressources sur les piles à combustible et électrolyseurs / écoconception**

- Diminuer ou remplacer le platine dans les technologies H₂ Energie
- Démocratiser la voie bio-électrochimique pour la production et l'utilisation de l'hydrogène

⇒ **Sécurisation et acceptabilité des technologies H₂**

- Concevoir des capteurs répondant spécifiquement aux multiples besoins de sécurisation des moyens de production, de transport, de stockage et lors de l'utilisation de l'hydrogène Energie
- Assurer le passage de PAC basse puissance à PAC haute puissance de manière efficace et sécuritaire, développer et optimiser les stratégies d'extrapolation (parallélisation de PAC basse puissance et/ou changement d'échelle)

⇒ **Vieillesse maîtrisé**

- Compréhension et remédiation des mécanismes du vieillissement des dispositifs hydrogène: depuis l'échelle atomique (nanomatériaux et interfaces) jusqu'à l'échelle du système

6. ANNEXES

ANNEXE 1 : LISTE DES THESES MENEES DANS LES 10 DERNIERES ANNEES

Nom thésard	Prénom	Labo	Année soutenance	Titre thèse	Thème
Ng	Feifei	ICGM	2009	Synthèse et étude de polybenzimidazoles sulfonés : nouvelles membranes électrolytes pour pile à combustible PEMFC	Conversion H2
Emani	Zohrek Khani	ICGM	2009	Elaboration et caractérisation physico-chimiques des matériaux céramiques conducteurs protoniques pour une application comme électrolyte en pile à combustible aux températures de fonctionnement 400-700°C	Conversion H2
Gao	Hongrong	ICGM	2010	Stabilisation des Membranes Perfluorosulfoniques par Réticulation et Développement de Membranes Composites Inorganique-organique. Application aux Piles à Combustible à Moyenne Température	Conversion H2
Ern vie	Kan	ICGM	2011	Fondements de la déshydrogénation partielle : étude théorique et expérimentale sur un nouveau combustible Méthode de traitement pour générer de l'hydrogène à partir de Jet Fuel	Production H2
d'Arbigny	Julien	ICGM	2012	Synthèse, caractérisation et mise en forme d'électrodes nanocomposites platine / carbure de tungstène pour les piles à combustibles à membrane haute température	Conversion H2
Batocchi	Pierre	ICGM	2012	Pile à combustible à céramique conductrice protonique : développement, optimisation des matériaux, réalisation de cellules élémentaires PCFC opérant dans le domaine de température 400-600 °C	Conversion H2
Sephanne	Nicolas	ICGM	2012	Elaboration d'électrodes de piles à combustible à membrane par un procédé de transfert de couches catalytiques	Conversion H2
Patru	Alexandra	ICGM	2013	Electrolyseur basse température pour la génération de mélanges H2/O2	Production H2
Skulimowska	Ania	ICGM	2014	Matériaux pour électrolyseur à membrane électrolyte protonique	Production H2
Rajoua	Khalil	ICGM	2014	Capteurs chimiques à base d'assemblages discontinus	Auxiliaires
Savych	Iuliia	ICGM	2014	Synthesis and characterisation of nanofibre supports for platinum as electrodes for polymer electrolyte fuel cells	Conversion H2
Gianotti	Elia	ICGM	2014	High purity hydrogen generation via partial dehydrogenation of fuels	Conversion H2
Zaton	Marta	ICGM	2014	Study of the degradation of perfluorosulfonic acid fuel cell membranes and development of mitigation strategy	Conversion H2
Pers	Paul	ICGM	2015	Développement et optimisation de matériaux d'électrodes et d'électrolytes, pour cellules PCFC	Conversion H2
Nabil-Moreau	Yannick	ICGM	2015	Supports de catalyseur nanostructurés pour pile à combustible à membrane échangeuse de protons	Conversion H2
Niether	Christiane	ICGM	2015	Étude de l'oxydation électrocatalytique de l'éthanol dans les conditions d'une pile à combustible à membrane électrolyte polymère haute température	Conversion H2
Baklouti	Linda	ICGM	2016	Capteurs résistifs pour la détection de gaz	Auxiliaires
Arcidiacono	Paul	ICGM	2016	Nouvelles électrodes pour électrolyseurs H2/O2	Production H2
Giancola	Stefano	ICGM	2016	Membranes ionomères renforcées par des nanofibres obtenues par électrofilage pour piles à combustible et l'électrolyseur	Production H2
Mao	Visot	ICGM	2016	Nouveaux matériaux à conduction mixte protonique-électronique : Développement de membranes sélectives destinées à la séparation de l'hydrogène	Auxiliaires
Kreis	Aurélien	ICGM	2016	Membranes PBI pour pile à combustible haute température	Conversion H2

Haidar	Fatima	ICGM	2018	Nanostructures 2D et supports dioxydes métalliques pour des cathodes de piles à combustible à faible teneur en platine	Conversion H ₂
Farina	Filippo	ICGM	2018	Nanofilms de Platine Supportes sur des Nanofibres de Carbone et de Nickel: Nouveaux Catalyseurs pour Piles à Combustible	Conversion H ₂
Svitlana	Yarova	ICGM	2019	Elaboration de matériaux de cathode à catalyseur non-noble par filage électrostatique	Conversion H ₂
Akrout	Alia	ICGM	2019	Développement et caractérisation de membranes composites pour piles à combustible à membrane	Conversion H ₂
Santori	Pietro Giovanni	ICGM	2020	Catalyseurs non-nobles pour piles à combustible alcalines	Production H ₂
Hachimi	Ismahan	ICGM	2020	Electrolytes protoniques pour pile à combustible haute température	Conversion H ₂
Spanu	Francesco	ICGM	2020	Développement de membranes bipolaires pour électrolyse et co-électrolyse de l'eau	Production H ₂
Garcia Garrido	Rafael	ICGM	2021	Déhydrogénation partielle de combustibles liquides et couplage avec une pile à combustible à membrane haute température	Production H ₂
RIEU	MATHILDE	CIRIMA T	2009	Préparation par voie sol-gel et caractérisation d'une cellule complète SOFC sur support métallique poreux	Conversion H ₂
PUIG	JEAN	CIRIMA T	2012	Developpement de verres de scellement par voie sol-gel en vue de l'élaboration et de la mise en forme de SRU (Serial Repeat Unit) pour pile à combustible à oxyde solide (SOFC)	Conversion H ₂
AL-KATTAN	DALYA	CIRIMA T	2016	Elaboration, mise en forme et caractérisations de cellules électrochimiques convertissant l'énergie et fonctionnant à haute température (SOFC)	Conversion H ₂
Miquelot	Adeline	CIRIMA T	2019	Hétérojonctions TiO ₂ /Co ₃ O ₄ par MOCVD en tant que photoanodes pour la production de H ₂ par photocatalyse de l'eau	Production H ₂
Guo	Xin Mei	INRA LBE	2012	Biohydrogen production and metabolic pathways in dark fermentation related to the composition of organic solid waste»	Production H ₂
Rafrafi	Yan	INRA LBE	2012	Impact des facteurs biotiques sur le réseau métabolique des écosystèmes producteurs d'hydrogène par voie fermentaire en culture mixte	Production H ₂
Monlau	Florian	INRA LBE	2012	Application of pretreatments to enhance biohydrogen and/or methane from lignocellulosic residues : linking performances to compositional and structural features	Production H ₂
Pierra	Mélanie	INRA LBE	2013	Couplage de la fermentation sombre et de l'électrolyse microbienne pour la production d'hydrogène : Formation et maintenance du biofilm électro-actif	Production H ₂
Cazier	Elizabeth	INRA LBE	2015	Role du transfert de matière lors de la digestion anaérobie par voie sèche de déchets ligno-cellulosiques	Conversion H ₂
Turon	Violette	INRA LBE	2015	Coupling dark fermentation with microalgal heterotrophy: influence of fermentation metabolites mixtures, light, temperature and fermentation bacteria on microalgae growth	Production H ₂
Chatellard	Lucile	INRA LBE	2016	Optimisation de la production de biohydrogène et de synthons à partir de résidus lignocellulosiques : liens entre structure du substrat et communautés microbiennes fermentaires	Production H ₂
Moscoviz	Roman	INRA LBE	2017	Contrôle d'un bioprocédé par voie électrochimique: electrofermentation du glycerol	Production H ₂
Toledo Alarcon	Javiera	INRA LBE	2017	Study and control of electro-assisted fermentation in mixed cultures : the role of engineering of microbial interactions	Production H ₂
Paillet	Florian	INRA LBE	2017	Optimisation du couplage de bioprocédés pour la production d'un mélange hydrogène/méthane (ou biohythane) à partir d'ordures ménagères brutes	Production H ₂
Flayac	Clément	INRA	2018	Eco-ingénierie des biofilms électro-actifs	Production H ₂

		LBE			
Onkonkwo	Jeneth	INRA LBE	2019	Using omics molecular methods for characterizing H ₂ -producing anaerobic biological processes.	Production H ₂
Figeac	Noémie	INRA LBE	2020	Contribution de la méthanation biologique à la valorisation énergétique du CO ₂ et au stockage des excédents d'électricité d'origine renouvelable : optimisation de la bioconversion in-situ par des leviers abiotiques	Conversion H ₂
Braga	Lucia	INRA LBE	2020	Eco-engineering of the microbial ecosystems towards the optimization of In situ biomethanation bioprocesses	Conversion H ₂
Dauptain	Kevin	INRA LBE	2021	Prétraitement des déchets pour la production d'hydrogène par voie fermentaire	Production H ₂
Berthomieu	Roland	INRA LBE	2021	Etude des interactions microbiennes entre bactéries fermentaires et électroactives	Production H ₂
Noguer	Marie	INRA LBE	2022	Etude des facteurs d'inhibition de la production d'H ₂ par voie fermentaire	Production H ₂
TAGUTCHOU	Jean-Philippe	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2008	Gazéification du charbon de plaquettes forestières : particule isolée et lit fixe continu	Production H ₂
CHHITI	Younes	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2011	Gazéification non catalytique des huiles de pyrolyse de bois sous vapeur d'eau	Production H ₂
SEPTIEN STRINGEL	Santiago Joël	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2011	High temperature gasification of millimetric wood particles between 800°C and 1400°C	Production H ₂
WU YU	Qian Michelle	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2012	Etude de procédés de conversion de biomasse en eau supercritique pour l'obtention d'hydrogène : Application au glucose, glycérol et bio-glycérol	Production H ₂
TEIXEIRA	Gabriel	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2012	Gazéification de charbon de granules de bois : comportement thermo-chimique et mécanique d'un lit fixe continu	Production H ₂
BOUCARD	Hélène	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2014	Contributions to the understanding of hydrothermal processes : application to black liquor	Production H ₂
GUIZANI	Chamseddine	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2014	Effects of CO ₂ on the biomass pyro-gasification in High Heating Rate and Low Heating Rate conditions	Production H ₂
DUCOUSSO	Marion	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2015	Gasification biochar reactivity toward methane cracking	Production H ₂
BILLAUD	Joseph	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2015	Gazéification de la biomasse en réacteur à flux entraîné : études expérimentales et modélisation	Production H ₂
POZZOBON	Victor	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2015	Biomass gasification under high solar heat flux	Production H ₂
SAID	Marwa	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2016	Comportements et rôles des métaux lourds au cours de la pyro-gazéification de la biomasse : études expérimentales et thermodynamiques	Production H ₂

EPHRAIM	Augustina	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2016	Valorization of wood and plastic waste by pyro-gasification and syngas cleaning	Production H2
HERVY	Maxime	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2016	Valorisation de chars issus de pyrogazéification de biomasse pour la purification de syngas : lien entre propriétés physico-chimiques, procédé de fonctionnalisation et efficacité du traitement	Production H2
REGO DE VASCONCEL OS	Bruna	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2016	Phosphates-based catalysts for synthetic gas (syngas) production using CO2 and CH4	Production H2
ZENG	Kuo	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2016	Solar pyrolysis of biomass at laboratory scale	Production H2
DONG	Jun	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2016	MSWs gasification with emphasis on energy, environment and life cycle assessment	Production H2
SAID	Marwa	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2016	Comportements et rôles des métaux lourds au cours de la pyro-gazéification de la biomasse : études expérimentales et thermodynamiques	Production H2
TANG	Yuanjun	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2018	Chlorinated contaminants mitigation during pyro-gasification of wastes using CaO reactant : experimental and life cycle assessment	Production H2
HARIMISA RADANIELIN A	Mamy	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2018	Co-valorisation énergie et matière des résidus agricoles par pyro-gazéification	Production H2
LI	Rui	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2019	Solar pyrolysis of contaminated biomass at laboratory scale	Production H2
PHAN	Thanh Son	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2019	Reformage du biogaz pour la production d'hydrogène	Production H2
GHOZIA	Amel	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2020	Catalyseurs monolithiques pour la synthèse Fischer-Tropsch	Conversion H2
HELIAS	Estéban	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2020	Production d'hydrogène par gazéification de plastiques contaminés	Production H2
TANOI	Tchini Séverin	RAPSOD EE-IMT Mines Albi	2021	Production d'un syngaz par pyrogazéification de biomasse en vue d'une biométhanation	Production H2
RODAT	Sylvain	PROME S	2010	Production d'hydrogène par décomposition thermique du gaz naturel dans un réacteur solaire	Production H2
CHAMBON	Marc	PROME S	2010	Production d'hydrogène par cycles thermochimiques de dissociation de l'eau couplés à une source d'énergie solaire	Production H2
LE GAL	Alex	PROME S	2011	Développement d'oxydes mixtes supportés pour la production d'hydrogène solaire par cycles thermochimiques de dissociation de l'eau	Production H2
LEVEQUE	Gael	PROME	2014	Production de combustibles solaires synthétiques par cycles	Production H2

		S		thermochimiques à partir de CO2 et d'eau	
BELLOUARD	Quentin	PROMES	2017	Conversion de biomasse en vecteurs énergétiques par voie solaire thermochimique	Production H2
CHUAYBOON	Srirat	PROMES	2019	Solar-driven syngas production from carbonaceous feedstock through gasification technologies	Production H2
HAEUSSLER	Anita	PROMES	2020	Production de combustibles solaires par conversion thermochimique de l'eau et du CO2 à partir d'oxydes non-stœchiométriques	Production H2
Muller	François	IMFT	2021	Combustion d'hydrogène dans un milieu poreux	Conversion H2
Oztarlik	Gorkem	IMFT	2020	Influence de l'injection de H2 sur les instabilités de combustion	Conversion H2
GONDRAND	Cécile	IMFT	2006	Etude de l'influence des caractéristiques des milieux poreux sur la gestion des transferts de chaleur et de masse : application aux échangeurs, humidificateurs et aux micropiles à combustibles	Conversion H2
CHAPUIS	Olivier	IMFT	2006	Influence des conditions de mouillage sur les déplacements quasi-statiques eau-air et l'évaporation en milieux poreux modèles. Application à la gestion de l'eau dans les piles à combustibles de type PEMFC	Conversion H2
CEBALLOS	Loic	IMFT	2011	Caractérisation des propriétés fluidiques des couches de diffusion des piles à combustible PEMFC par une approche numérique de type réseaux de pores et par une analyse d'images issues de la tomographie X	Conversion H2
EL HANNACH	Mohammed	IMFT	2011	Simulation et analyse des mécanismes de transfert diphasique dans les Couches Actives des Piles à Combustibles PEMFC	Conversion H2
STRAUBHARR	Benjamin	IMFT	2015	Pore network modelling of condensation in gas diffusion layers of proton exchange membrane fuel cells	Conversion H2
BELGACEM	Najib	IMFT	2016	Analysis of durability of a PEMFC in relationship with detailed water management in MEA and guidelines to improve design and durability	Conversion H2
AGAESSE	Tristan	IMFT	2016	Amélioration des modèles de performance des piles à combustibles de type PEMFC	Conversion H2
CARRERE	Pierre	IMFT	2019	Modeling and numerical simulation of water transfer in proton exchange membrane fuel cells (PEMFC)	Conversion H2
ROUSSEAU	Raphael	LGC	2013	Production de biohydrogène par électro-catalyse microbienne	Production H2
BLANCHET	Elise	LGC	2016	Conception d'un procédé d'électrosynthèse microbienne	Production H2
ROUBAUD	Emma	LGC	2019	Technologie électro-microbienne pour le traitement des eaux couplées à la récupération d'énergie	Production H2
ALMARAZ	S. DE LEON	LGC	2014	Multi-objective optimization of a hydrogen supply chain	Chaines energetiques
ROBLES	J. OCHOA	LGC	2018	Optimisation multi-objectif du déploiement d'une chaîne logistique hydrogène	Chaines energetiques
CARRERA	E	LGC	2021	Analyse technico-Economique et évaluation environnementale par ACV (analyse du Cycle de Vie) pour la conception optimale de systèmes énergétiques de type « Power-to-Gas	Chaines energetiques
CANTU	V	LGC	2021	Metaheuristic multi-objective approaches for design of sustainable energy systems	Chaines energetiques
FLORES PEREZ	J. M.	LGC	2021	Optimal design and operation of Power-to-gas (Hydrogen) supply chains with a bilevel programming approach	Chaines energetiques
BRAZZALE	P	LGC	2022	Etude et Modélisation des Phénomènes de transfert par perméation de l'hydrogène entre un milieu gazeux et du sodium liquide	"Constituants transverses : séparation"
de Los Santos	Silvia	LGC	2022	Etude de procédés couplés de production d'hydrogène	Production H2
PECATE	Sebastien	LGC	2017	Gazéification de la biomasse en lit fluidisé dense et circulant entre 750 et 850°C : étude hydrodynamique et réactive	Production H2

ESTEVE-PEREIRA	Thomas	LGC	2021	Vapogazéification de mélanges biomasse / CSR en réacteur à lit fluidisé circulant pour la production d'un gaz de synthèse riche en hydrogène	Production H2
KESSAS	Sid-Ahmed	LGC	2019	Conversion thermochimique de la biomasse en lit fluidisé	Production H2
ALBRAND	Pierre	LGC	2020	Développement d'un réacteur innovant de type monolithe pour l'hydrogénation sélective d'huile végétale	Conversion H2
LIBARDO	Freddy	LGC	2017	Réacteur-échangeur de type monolithe - stratégie de modélisation et description des phénomènes à l'échelle d'un canal catalytique unique	Conversion H2
CARDOZO PEREZ	Fernando	LGC	2012	Vers la catalyse d'hydroformylation biphasique au rhodium supportée sur des polymères cœur-coquille amphiphiles	Conversion H2
SHARMA	Amit	LGC	2019	Catalytic Reaction Engineering using Ionic liquids: Hydroformylation of 1-Octene	Conversion H2
LAGUILLAUMIE	Lea	TBI (ex.LISBP)	2021	Production de biomolécules organiques à partir de CO2 ou de gaz de synthèse	Conversion H2
NGU	Vincent	TBI (ex.LISBP)	2022	Modélisation Multi-échelle de bioréacteurs Gaz-Liquide appliqué à la méthanation.	Conversion H2
Gauquelin	Charles	TBI (ex.LISBP)	2017	Biochemical and electrochemical studies of C. acetobutylicum FeFe-hydrogenase	Production H2
SMART	Katie	LCC	2014	Activation du dihydrogène et de silazanes pour le transfert d'hydrogène et applications en catalyse	Conversion H2
DHAHER	Sameh	LCC	2019	Complexe des métaux de transition et stockage réversible de l'hydrogène	Stockage H2
Harmel	Justine	LCC	2016	Synthèse de nano-catalyseurs hybrides à base de cobalt pour la catalyse Fischer-Tropsch	Conversion H2
GHOZIA	Amel	LCC	2020	Catalyseurs monolithiques pour la synthèse Fischer-Tropsch	Conversion H2
Louisia	Stéphane	LCC	2017	Synthèse de catalyseurs bimétalliques supportés sur nanotubes de carbone dopés pour pile à combustible PEM	Conversion H2
Rivera	Camila	LCC	2020	Synthèse de catalyseur à site unique	Conversion H2
Creus Casanova	Jordi	LCC	2018	Electrocatalytic water-splitting with ruthenium nanoparticles	Production H2
NGUYEN Thi	Quyen	LCC	2020	Development of hybrid photoelectrode via assemblage of a ruthenium based photosensitizer and a metal/metal oxide nanocatalyst onto SC electrodes for the solar H2/O2 generation	Production H2
Mallon Pernia	Laura	LCC	2021	Elaboration of nanomaterials for their evaluation in photocatalysis	Production H2
TEIXEIRA	Gabriel	BioWoo EB	2012	Gazéification de charbon de granules de bois : comportement thermochimique et mécanique d'un lit fixe continu	Production H2
PHAM XUAN	Huynh	BioWoo EB	2018	Biomass oxidative pyrolysis in a continuous fixed bed	Production H2
Vonk	Gwendal	BioWoo EB	2018	Caractérisation de la gazéification de combustibles solides de récupération (CSR) en vue d'optimiser leur utilisation dans une unité de cogénération par gazogène	Production H2
MILLE	Mathieu	BioWoo EB	2013	Pyrolyse de plaquettes forestières en lit fixe continu	Production H2
Daouk	Helias	BioWoo EB	2015	Etudes expérimentale et numérique de la pyrolyse oxydante de la biomasse en lit fixe	Production H2
Nitsch	Xavier	BioWoo EB	2012	CRAQUAGE ET REFORMAGE DES GOUDRONS DE GAZÉIFICATION DE BIOMASSE EN PHASES HOMOGÈNE ET HÉTÉROGÈNE	Auxiliaires
HUCHON	Valentin	BioWoo EB	2021	Epuration du gaz de synthèse sur lit fixe de charbon	Auxiliaires

SALAMEH	Chrystelle	IEM	2014	Synthèse de matériaux nitrures fonctionnels à base du bore ou d'aluminium pour des applications en énergie (production et stockage de l'hydrogène)	Production H2
HANNIET	Quentin	IEM	2021	Applications en électrochimie des composites à base de céramiques non oxydes microstructurées	Production H2
ENNAJDAOUI	Aboubakr	IEM	2009	Elaboration de membranes polymère plasma conductrices protoniques – Intégration en micro-piles à combustible et valorisation	Conversion H2
COUTURE	Guillaume	IEM	2013	Copolymères originaux comme membranes de piles à combustible solides alcalines	Conversion H2
BASSIL	Joelle	IEM	2014	Elaboration par procédés plasma et caractérisation de membranes conductrices protoniques de type phosphonique pour piles à combustible	Conversion H2
HAACKE	Matthias	IEM	2015	Membranes innovantes PECVD pour la séparation de gaz	Auxiliaires
YOUSSEF	Loraine	IEM	2018	Développement par PECVD de dépôts TiO2 et intégration en assemblages multicouches membrane / électrodes pour la production/séparation d'hydrogène par voie solaire	Production H2
KINFAK LEOGA	Arnaud Joel	IEM	2018	Développement par PECVD de membranes phosphoniques et intégration en assemblages multicouches membrane / électrodes pour la production/séparation d'hydrogène par voie solaire	Production H2
DUQUET	Fanny	IEM	2022	Oxydes de titane à porosité contrôlée pour la production d'hydrogène et la dépollution de l'eau par voie solaire	Production H2
CHAREYRE	Laetitia	IEM	2012	Développement de nouvelles membranes céramiques et hybrides de non oxydes pour la séparation de l'hydrogène	Auxiliaires
MOURY	Romain	IEM	2013	Synthèse par voie chimique et caractérisation d'amidoboranes, matériaux à fort potentiel dans le stockage solide de l'hydrogène	Stockage H2
MOUSSA	Georges	IEM	2014	Nanoconfinement de l'ammoniorane dans du carbone ou nitrure de bore mésoporeux : matériaux hybrides pour le stockage chimique et la génération d'hydrogène	Stockage H2
PETIT	Jean-Fabien	IEM	2015	Etude de la stabilité thermique de l'ammoniorane	Stockage H2
OULD-AMARA	Salem	IEM	2017	Chimie du bore pour des applications énergies	Stockage H2
LALE	Abhijeet	IEM	2017	Synthesis and characterization of silicon and boron-based nitride nanocomposites as catalytic mesoporous supports for energy applications	Production H2
KAHRI	Hamza	IEM	2017	Synthèse de nano-structures métalliques et catalytiques, pour être utilisés en génération d'hydrogène	Production H2
CASTILLA-MARTINEZ	Carlos	IEM	2020	Chimie du bore pour des applications énergies (titre provisoire)	Stockage H2
TURANI-I-BELLOTO	Kevin	IEM	2021	Amine-boranes pour le stockage solide de l'hydrogène (titre provisoire)	Stockage H2
KAFROUNI	Wassim	IEM	2009	Membranes a-SiCxNy:H déposées par CVD-plasma ; tamis moléculaires pour la perméation de l'hélium	Auxiliaire
YACOU	Christelle	IEM	2009	Développement de membranes céramiques multifonctionnelles à porosité hiérarchique pour le traitement et la séparation de gaz	Auxiliaire
RICHARDSON	Yohan	IEM	2010	Nouvelles stratégies catalytiques pour la gazéification de la biomasse : génération in-situ de nanoparticules à base de nickel et de fer au cours de l'étape de pyrolyse	Production
DURAND	Véronique	IEM	2011	Développement d'un nouveau procédé de synthèse de membranes inorganiques ou composites par voie CO2 super-critique pour la séparation de gaz	Auxiliaire
DARMAWAN	Adi	IEM	2013	Single (Iron) and Binary (Iron and Cobalt) Metal Oxide Doped Silica Membranes for Gas Separation	Auxiliaire

SALVADOR-LEVEHANG	Claudia	IEM	2014	Development of ZIF-based nanocomposite Metal-Organic Framework membranes	Auxiliaire
EIBNER	Simon	IEM	2015	Pyrolyse flash de biomasse lignocellulosique : comment catalyser la désoxygénation au cours des mécanismes primaires et secondaires ?	Production
EVTIMOVA	Jenny	IEM	2016	Theoretical and experimental study on crystalline porous materials and metal alloys used in gas separation membranes.	Auxiliaire
KALLEM	Parashuram	IEM	2017	Development of poly-benzimidazole and ionic liquid-based membranes for high temperature applications	Conversion
JOUANNAUX	Julien	IEM/PROMES	2020	Développement de structures poreuses et membranes denses à base d'oxydes métalliques conducteurs ioniques pour la production de combustibles solaires	Production
HAEUSSLER	Anita	PROMES/IEM	2020	Production de combustibles solaires par conversion de l'eau et du CO ₂ à partir de cycles thermo-chimiques	Production
PENG	Zhe	IEM	2012	Etude des propriétés du transport d'eau et développement d'une nouvelle structure de polymère pour l'optimisation de la gestion de l'eau d'une PEMFC	Conversion
SUTOR	Anna Katharina	IEM	2013	Étude des relations entre les performances électrochimiques des membranes ionomères pour pile à combustible et leur état d'hydratation : apport des spectroscopies vibrationnelles in situ	Conversion
TRAN	Thi Bich Hue	IEM	2017	Gestion de l'eau dans les piles à combustibles électrolyte polymère : étude par micro-spectroscopie Raman operando	Conversion
PHLIPPOTEAU	Vincent	LAPLACE	2009	Outils et Méthodes pour le diagnostic d'un état de santé d'une pile à combustible	Conversion H2
ZEIDAN	Marwan	LAPLACE	2011	Etude expérimentale et modélisation d'une micropile à combustible à respiration	Conversion H2
RALLIERES	Olivier	LAPLACE	2011	Modélisation et caractérisation de Piles A Combustible et Electrolyseurs PEM	Production H2
GAILLY	Frédéric	LAPLACE	2011	Alimentation électrique d'un site isolé à partir d'un générateur photovoltaïque associé à un tandem électrolyseur/pile à combustible (batterie H ₂ /O ₂)	Chaines énergétiques
MORIN	Benoît	LAPLACE	2013	Hybridation d'une pile à combustible par des supercondensateurs: vers une solution passive et directe	Chaines énergétiques
VIDEAU	Nicolas	LAPLACE	2014	Convertisseurs continu-continu non isolés à haut rapport de conversion pour piles à combustible et électrolyseurs : apport des composants GaN	Auxiliaires
GENEVE	Thomas	LAPLACE	2016	Méthodes de diagnostic des piles à combustible	Conversion H2
LABACH	Isabelle	LAPLACE	2016	Caractérisation et modélisation de Piles à combustible et d'Electrolyseurs PEM à conditions opératoires variables, en vue de leur association	Conversion H2
FAUCHER	Mickaël	LAPLACE	2017	Modélisation et émulation d'une turbine à gaz. Application à l'étude de systèmes multisources (hybridations turbine à gaz/ batterie Li-ions/ pile à combustible) pour une fonction groupe électrogène (APU) destinée à des applications aéronautiques.	Chaines énergétiques
TOGNAN	Malik	LAPLACE	2018	Etude de dégradations des performances de Piles à Combustible PEM BT alimentées en H ₂ /O ₂ lors de campagnes d'endurance - Suivi de l'état de santé en opération et modélisation du vieillissement	Conversion H2
MROZEWSKI	Kamil	LAPLACE	2018	Diagnosis of mechanical tightening of a single polymer electrolyte membrane fuel cell in aeronautical applications	Conversion H2
EL AABID	Sami	LAPLACE	2019	Méthodes fines de diagnostic de l'état de santé d'une pile à combustible PEMFC en vue de sa maintenance	Conversion H2
PESSOT	Alexandra	LAPLACE	2019	Modélisation pour l'évaluation du vieillissement des piles à combustible PEM basses températures (PEMFC-BT)	Conversion H2
RIGAL	Sylvain	LAPLACE	2019	Modélisation pour l'évaluation du vieillissement des piles à	Conversion H2

		E		combustible PEM hautes températures (PEMFC-HT)	
LESMAYOUX	Jonathan	LAPLAC E	2020	Modélisation et caractérisation d'une IT-SOFC	Conversion H2
LEFRANC	Olivier	LAPLAC E	2020	Modélisation de systèmes énergétique à H2	Chaines énergétiques
ROSINSKI	Wojciech	LAPLAC E	2020	Behaviour of high temperature fuel cells without active gases (including the pre-heating with alternative currents)	Conversion H2
PARACHE	François	LAPLAC E	2021	Caractérisation et modélisation du vieillissement d'électrolyseur à membranes	Production H2
DURAND	Maël	LAPLAC E	2021	Optimisation des phases d'arrêts et de démarrage d'une PEMFC-HT	Conversion H2
MULLINS	Timothé	LAPLAC E	2021	Convertisseur statique DC-DC très intégré et à haut rendement pour PEMFC-HT	Auxiliaires
JARRY	Thomas	LAPLAC E	2022	Hybridation simple ou double PEMFC-HT/ supercondensateurs/ batterie	Chaines énergétiques
BAUDY	Mathieu	LAPLAC E	2022	Caractérisation et modélisation du vieillissement d'une PEMFC-HT	Conversion H2
RADET	Hugo	LAPLAC E	2022	Conception robuste de microréseaux intelligents incluant des composants de stockage hydrogène en tri génération	Chaines énergétiques

ANNEXE 2 : MOYENS D'ESSAIS ET DE MODELISATION SPECIFIQUES HYDROGENE ENERGIE

Laboratoire	Description	Typologies de moyens
ICGM	Cellules et banc de test pour l'évaluation des performances de détection de capteurs à hydrogène (spécificité, sensibilité, temps de réponse, humidité relative, gaz poisons/interférents...). Possibilité de tester jusqu'à 10 capteurs simultanément, pression jusqu'à 5 bar, température jusqu'à 250 °C.	Banc d'essais pilotes
ICGM	Bancs d'essai de piles à combustible alimentées en hydrogène ou en combustibles liquides, à membrane polymère ou céramique, de 10 W à 1 kW. Bancs d'électrolyse. Unités d'impression d'électrodes et d'assemblage membrane-électrodes pour piles à combustible et électrolyseur.	Banc d'essais pilotes
CIRIMAT	Elaboration de matériaux en couches minces par MOCVD	
CIRIMAT	Caractérisations structurales, microstructurales, physicochimiques.... Tests électrochimiques...	
LBE	banc d'essais en fioles de 50 à 500 mL automatisé (x50)	Banc d'essais pilotes
LBE	fermenteurs de 2-3L instrumentés (x4)	Banc d'essais pilotes
LBE	pilote de 40L associé à un méthaniseur de 100L	Banc d'essais pilotes
LBE	équipements de bioélectrochimie (potentiostat) (x20 voies)	Banc d'essais pilotes
LBE	analyse de gaz en ligne (automatisées) multiplexées et hors ligne	Moyens de caractérisation

		spécifiques H2
PROMES	Concentrateurs solaires à haut flux (fours solaires) de 2 kW à 1 MW	Banc d'essais pilotes
PROMES	Réacteurs solaires pour la production d'hydrogène par gazéification de biomasse / craquage de gaz naturel / reformage de gaz naturel/ dissociation thermochimique de l'eau haute température	Banc d'essais pilotes
PROMES	Analyseurs de gaz H2 / chromatographie phase gaz / spectrométrie de masse	Moyens de caractérisation spécifiques H2
PROMES	Elaboration et caractérisation de matériaux céramiques conducteurs ioniques pour la dissociation de H2O (production H2 par cycles thermochimiques)	synthèse de matériaux
IMFT	Banc d'essai pour les applications cuisson et chauffage (Puissance <5kW)	
IMFT	Banc d'essai pour les applications aéronautiques (Puissance <20kW)	
IMFT	caractérisation tailles de pores de composants poreux (GDL, CC, etc)	Banc d'essais pilotes
IMFT	caractérisation des propriétés de diffusion des gaz dans des composants poreux	Banc d'essais pilotes
IMFT	vieillessement par cyclage mécanique de composants poreux	Banc d'essais pilotes
LAAS	Production de H2 par photocatalyse de l'eau	
LAAS	Dépôt PVD et ALD de couches minces	
LAAS	Chromatographie en phase gazeuse	
LCC	Caractérisations structurales et tests électrocatalytiques	synthèse de matériaux
LCC	Réacteurs d'hydrogénation à basses et moyennes pressions (1-5 bar; 10-20 bar)	
LCC	Réacteurs d'hydrogénation à moyennes et hautes pressions en batch et continue (10-100 bar)	
LGC (dpt Biosym)	Plusieurs cellules instrumentées d'électrolyse microbienne en milieu salin ou en milieu faiblement conducteur (TRL 4-5)	Banc d'essais pilotes
	Réacteurs instrumentés d'électrolyse ;	Banc d'essais pilotes
	Pilote 1/10, Pilote industriel, analyseur de gaz, plateforme H2 (banc de test PAC et électrolyseur aqueux)	Banc d'essais pilotes
LGC (dpt PSI)	Logiciels de modélisation et d'optimisation multi-objectifs (environnement de modélisation GAMS et utilisation du logiciel d'Analyse du Cycle de Vie SimaPro)	Moyens de modélisation numériques spécifiques H2
	Outils de modélisation pour l'étude des phénomènes de transfert de l'H2 au travers de membranes	Moyens de modélisation numériques

		spécifiques H2
LGC (dpt IRPI)	Réacteurs autoclaves agités (4 réacteurs de 50 à 600 mL, P = 1-50 bar, T = 50-250°C) pour l'étude cinétique des réactions d'hydrogénation triphasique en catalyse homogène/biphasique (G-L-L) et hétérogène (G-L-S). Réacteurs à lit fixe (2 réacteurs de 15 et 600 mL, P = 1-50 bar, T = 50-200°C, QL = 0,2-5 L/h, QG = 5-500 NL/h) et de type capillaire/monolithe (P= 1-20 bar, T = 50-200°C ; QL = 1-15 mL/min et QG = 1-30 NL/h dans les canaux) pour la mise en œuvre des réactions en continu.	Banc d'essais pilotes
	Banc expérimental pour la mesure des capacités de stockage de gaz dans les matériaux solides	Banc d'essais pilotes
	Modélisation des cinétiques réactionnelles et des réacteurs polyphasiques d'hydrogénation (hydrodynamique, transferts entre phases et réactions) à l'aide de différents codes /outils (fortran, Matlab, Comsol Multiphysics)	Moyens de modélisation numériques spécifiques H2
LGC (dpt STPI)	3 réacteurs autoclaves agités (90, 250 et 200 mL) pouvant opérer jusqu'à 300 bar pour la modification en CO2 Supercritique de matériaux permettant le stockage d'H2.	Banc d'essais pilotes
	Réacteur haute pression grande échelle (25L) opéré par le CRITT Génie des "Procédés.	Banc d'essais pilotes
	banc d'essai (Potentiostat, cellule d'électrolyse, réacteur en verre ...) pour l'étude de la production d'H2 à partir d'urée	Banc d'essais pilotes
LGC (dpt GIMD)	Réacteur membrane plane catalytique et contacteur fibre creuse G/L catalytique ; Mesures en continu UV/IR ; Mesure de perméabilité aux gaz	Banc d'essais pilotes
IEM	Bancs d'électrolyse et de piles à combustible basse température : caractérisation électrochimique de l'activité et du vieillissement des électrocatalyseurs, mesures impédancemétriques suivi de la modélisation en circuits équivalents	Moyens de caractérisation spécifiques H2
IEM	Banc d'hydrolyse catalysée	Moyens de caractérisation spécifiques H2
IEM	Bancs et techniques de caractérisation de matériaux hydrures pour le stockage chimique de l'hydrogène avec une production de l'hydrogène par hydrolyse (catalysée ou pas), alcoololyse (catalysée ou pas), et thermolyse (en conditions dynamiques ou isothermes)	Banc d'essais pilotes
IEM	Bancs de thermolyse en conditions isothermes	Banc d'essais pilotes
IEM	Cellules de photo-électrolyse (mono-compartiment liquide, bi-compartiments liquides, « tout solide »)	Moyens de caractérisation spécifiques H2
IEM	ATG optimisées pour l'échantillonnage des matériaux pour le stockage chimique de l'hydrogène	Moyens de caractérisation spécifiques H2
IEM	Perméamètres homemade en configuration frontale (gaz pur, norme ASTM D	Moyens de

	1434-82) pour membrane plane dense pour la détermination des coefficients de perméabilité et de diffusion	caractérisation spécifiques H2
IEM	Installations de perméation de gaz pour membranes tubes et planes poreuses et modules fibres basées sur la détermination débitmétrique du coefficient de perméabilité à température variable et équipées d'une μ GC pour analyses des mélanges de gaz perméat et rétentat	Moyens de caractérisation spécifiques H2
IEM	Systèmes de mesure de la capacité de sorption de H2 par des solides et des liquides de type Sievert's dans larges gammes de pression et températures	Moyens de caractérisation spécifiques H2
IEM	Pilotes sécurisés pour mesurer la perméation de H2 pur ou dans des mélanges de gaz, avec cellule type Wicke et Kallenbach à travers divers types de membranes denses ou poreuses, de géométries variables (disques, tubes, fibres,..), couplés à 2 chaînes d'analyse GC/MS pour identification et quantification des mélanges de gaz perméat et rétentat	Banc d'essais pilotes
IEM	Elaboration de matériaux en couches minces par des méthodes en phase liquide, vapeur ou gaz (sol-gel, PECVD, ALD...)	synthèse de matériaux
BioWooEB	Réacteurs de conversion thermo-chimique de biomasse à petite échelle	
BioWooEB	Dispositifs à petite échelle de craquage et conversion des gaz de pyrolyse et des goudrons de gazéification	
BioWooEB	Production d'électricité par gazéification de biomasse pour des unités décentralisées (15 kWe)	
BioWooEB	Dispositif d'échantillonnage et d'analyse en ligne des gaz condensables et incondensables issus des unités de torréfaction, pyrolyse et gazéification de biomasse	
LAPLACE	Bancs de tests (performances, vieillissement) pour piles à combustible (PEMFC-BT et HT) de la monocellule au stack de 40kW. Bancs de tests pour SOFC : de la monocellule à qq kW.	Moyens de caractérisation spécifiques H2
LAPLACE	Bancs de tests électrolyseurs jusqu'à quelques kW.	Moyens de caractérisation spécifiques H2
LAPLACE	Bancs de tests hydrures	Moyens de caractérisation spécifiques H2
LAPLACE	Bancs d'investigation de micro-réseaux intelligents et de systèmes hybrides incluant piles à combustible et/ou électrolyseurs	Test chaînes d'énergie
RAPSODEE- IMT MINES ALBI	Réacteur à lit fixe pour le reformage du biogaz en gas de synthèse (H2 + CO)	Banc d'essais pilotes
RAPSODEE- IMT MINES ALBI	Réacteur à lit fixe pour la synthèse Fisher-Tropsch (conversion H2 + CO en hydrocarbures)	Banc d'essais pilotes
RAPSODEE- IMT MINES	Réacteurs batchs pour la production du syngas (H2 + CO) par la thermo-	Banc d'essais

ALBI	conversion de la biomasse et biodéchet	pilotes
RAPSODEE- IMT MINES ALBI	Lit fluidisé (d.i. environ 5 cm et hauteur environ 50 cm) pour la production du syngas (H2 + CO) par la thermo-conversion de la biomasse et biodéchet	Banc d'essais pilotes
RAPSODEE- IMT MINES ALBI	Micropyrolyseur couplé à un système de chromatographie de gaz et spectrométrie de masse pour analyser les produits de la thermo-conversion de biomasse et biodéchets en syngas (H2 + CO)	Moyens de caractérisation spécifiques H2
RAPSODEE- IMT MINES ALBI	Four tournant en continu (6-10 kg/h) pour la production du syngas (H2 + CO) par la thermo-conversion de la biomasse et biodéchet	Banc d'essais pilotes
RAPSODEE- IMT MINES ALBI	Réacteur tubulaire pour réformage ou gazéification de solides pour la production du syngas (H2 + CO)	Banc d'essais pilotes
RAPSODEE- IMT MINES ALBI	Four à lit fixe en continu (environ 20 kg/h) au sein de la plate-forme technologique Valthera pour la production du syngas (H2 + CO) par la thermo-conversion de la biomasse et biodéchet	Banc d'essais pilotes
RAPSODEE- IMT MINES ALBI	Pyrolyseur batch à lit fixe traversé (quelques kg) au sein de la plate-forme technologique Valthera pour la production du syngas (H2 + CO) par la thermo-conversion de la biomasse et biodéchet	Banc d'essais pilotes
RAPSODEE- IMT MINES ALBI	Reformeur non catalytique haute température (1200°C) pour le crackage de goudrons présents dans le syngas (H2 + CO) issu de la thermo-conversion de la biomasse et biodéchet	Banc d'essais pilotes
ICA	Machines d'essais hydrauliques monoaxiale et biaxiale pour essais de fatigue.	Moyens de caractérisation spécifiques H2
ICA	Pots vibrants, vibrateurs, tables vibrantes	Moyens de caractérisation spécifiques H2
ICA	Bancs de stéréovision à très haute résolution	Moyens de caractérisation spécifiques H2
ICA	Bancs de caméra rapide	Moyens de caractérisation spécifiques H2
ICA	Système acquisition rapide HBM Genesis	Moyens de caractérisation spécifiques H2
ICA	Plateforme de logiciels de calculs de structure : comportement mécanique en statique et dynamique	Moyens de caractérisation spécifiques H2
ENAC	Simulateur fast time simulant le roulage des avions alimentés hydrogène sur une plateforme aéroportuaire	Moyens de caractérisation spécifiques H2

TBI	reacteurs batchs de 0.5 -2L (x30)	Banc d'essais pilotes
TBI	fermenteurs de 2L instrumentés (x4), regulation pH, agitation.	Banc d'essais pilotes
TBI	deux pilotes de 20L avec analyseurs en ligne	Moyens de caractérisation spécifiques H2
TBI	analyse de gaz en ligne (automatisées) multipléées et hors ligne	Moyens de caractérisation spécifiques H2
TBI	reacteurs batch de 1L adapté pour équipement gaz dangereux (CO)	Moyens de caractérisation spécifiques H2

ANNEXE 3 : EXTRAIT DES 5 PRINCIPALES PUBLICATIONS DES 10 DERNIERES ANNEES

➤ CIRIMAT

F. ANSART, J.M. BASSAT, M.L. FONTAINE, J.C. GRENIER, P. LENORMAND, F. MAUVY, "ELECTRODE A GAZ, SON PROCEDE DE FABRICATION ET SES APPLICATIONS" DEPOT LE 22/12/2006 , FR 2006 0011280, UPS, CNRS

M. ZAHID, M. RIEU, C. ESTOURNES, P. LENORMAND, F. ANSART, "FABRICATION DE MATERIAUX CERAMIQUES AUTOSUPPORTES DE FAIBLE EPAISSEUR A BASE D'OXYDES METALLIQUES." DÉPÔT LE 19/06/2009 , FR 2009 0054168 , UPS, CNRS , EDF

P. LENORMAND, D. CARAVACA, C. LABERTY, F. ANSART, "THICK FILMS OF YSZ ELECTROLYTES BY DIP-COATING PROCESS." JOURNAL OF THE EUROPEAN CERAMIC SOCIETY, 25 (12), 2005, 2643-2646.

M. RIEU, R. SAYERS, M.A. LAGUNA-BERCERO, S.J. SKINNER, P. LENORMAND, F. ANSART, "INVESTIGATION OF GRADED LA₂NiO_{4+Δ} CATHODES TO IMPROVE SOFC ELECTROCHEMICAL PERFORMANCE." JOURNAL OF ELECTROCHEMICAL SOCIETY, 157 (4), 2010, B477-B480.

D. AL-KATTAN, P. LENORMAND, F. MAUVY, P. ROZIER, "FROM POWDERED OXIDE TO SHAPED METAL: AN EASY WAY TO PREPARE A POROUS METALLIC ALLOY FOR SOFC" FUEL CELLS, 18 (1), 2018, 18-26.

➤ ICGM

ELECTRODES COMPOSITES POUR ELECTROLYSE DE L'EAU, A. PATRU, F. FAVIER, N. JEREZ, FR12 57612 (03/08/2012) ET PCT/EP2013/066276. BREVET LICENCIE ;

CAPTEUR A HYDROGENE A BASE DE MICROSTRUCTURES DE PALLADIUM ORGANISEES, FREDERIC FAVIER, JUERGEN BRUGGER, JEAN-FRANÇOIS RANJARD, FR2921159 (ICGM-PSA-EPFL);

REINFORCED MEMBRANE, D. J. JONES, J. ROZIERE, S. CAVALIERE, S. SUBIANTO, S. BURTON, DEMANDE DE BREVET D'INVENTION DEPOSEE LE 4 AOUT 2014, No. 1413794.7, WO2016020668 (ICGM-UM-JOHNSON MATTHEY FUEL CELLS) ;

NON-FLUORINATED POLYMER MATERIALS FOR PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELLS, J. ROZIERE, D. J. JONES, ANNU. REV. MATER. RES. (2003) 33, 503 – 555 (814 CITATIONS) ;

HIGH PERFORMING $BaCe_{0.8}Zr_{0.1}Y_{0.1}O_{3-\Delta}Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO_{3-\Delta}$ BASED PROTONIC CERAMIC FUEL CELL, J. DAILLY, G. TAILLADES, M. ANCELIN, P. PERS AND M. MARRONY, J. POWER SOURCES 2017, 361, 221-226 (13 CITATIONS)

➤ IEM

Z. PENG, V. BADETS, P. HUGUET, A. MORIN, P. SCHOTT, T. B. H. TRAN, M. POROZHNYI, V. NIKONENKO ET S. DEABATE, OPERANDO MICRO-RAMAN STUDY OF THE ACTUAL WATER CONTENT OF PERFLUOROSULFONIC ACID MEMBRANES IN THE FUEL CELL, J. POWER SOURCES, 356 (2017) 200. DOI : 10.1016/j.jpowsour.2017.04.095.

M. DROBEK, J.-H. KIM, M. BECHELANY, C. VALLICARI, A. JULBE, AND S.S. KIM, MOF-BASED MEMBRANE ENCAPSULATED ZNO NANOWIRES FOR ENHANCED GAS SENSOR SELECTIVITY, ACS APPLIED MATERIAL & INTERFACES 8 (2016) 8323–8328.

U.B. DEMIRCI, ABOUT THE TECHNOLOGICAL READINESS OF THE H₂ GENERATION BY HYDROLYSIS OF B(-N)-H COMPOUNDS, ENERGY TECHNOL. 6 (2018) 470-486.

Y. HOLADE, K. SERVAT, S. TINGRY, T. W. NAPPORN, H. REMITA, D. CORNU, K. B. KOKOH, ADVANCES IN ELECTROCATALYSIS FOR ENERGY CONVERSION AND SYNTHESIS OF ORGANIC MOLECULES, REVIEW.. CHEMPHYSCHEM 2017, 18, 2573-2605.

L. YOUSSEF, S. ROUALDÈS, J. BASSIL, M. ZAKHOUR, V. ROUESSAC, C. LAMY, M. NAKHL, EFFECT OF PLASMA POWER ON THE SEMICONDUCTING BEHAVIOR OF LOW-FREQUENCY PECVD TiO₂ AND NITROGEN-DOPED TiO₂ ANODIC THIN COATINGS: PHOTO-ELECTROCHEMICAL STUDIES IN A SINGLE COMPARTMENT CELL FOR HYDROGEN GENERATION BY SOLAR WATER SPLITTING. JOURNAL OF APPLIED ELECTROCHEMISTRY, 2019, 49, 135-150.

➤ IMFT

O. CHAPUIS, M. PRAT, M. QUINTARD, E. CHANE-KANE, O. GUILLOT, N. MAYER, TWO-PHASE FLOW AND EVAPORATION IN MODEL FIBROUS MEDIA. APPLICATION TO THE GAS DIFFUSION LAYER OF PEM FUEL CELLS, J. OF POWER SOURCES, 178, 258 -268 (2008).

M.EL HANNACH, M.PRAT, J.PAUCHET, PORE NETWORK MODEL OF THE CATHODE CATALYST LAYER OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELLS: ANALYSIS OF WATER MANAGEMENT AND ELECTRICAL PERFORMANCE, INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 37 (24), 18996–19006 (2012)

T.AGAESSE, A.LAMIBRAC, F.BUECHI, J.PAUCHET, M.PRAT, VALIDATION OF PORE NETWORK SIMULATIONS OF EX-SITU WATER DISTRIBUTIONS IN A GAS DIFFUSION LAYER OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELLS WITH X-RAY TOMOGRAPHIC IMAGES, JOURNAL OF POWER SOURCES 331, 462-474, (2016)

N.BELGACEM, M.PRAT, J.PAUCHET, COUPLED CONTINUUM AND CONDENSATION-EVAPORATION PORE NETWORK MODEL OF THE CATHODE IN POLYMER-ELECTROLYTE FUEL CELL INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 42 (12), ,8150-8165 (2017)

P.CARRÈRE, M.PRAT, LIQUID WATER IN CATHODE GAS DIFFUSION LAYERS OF PEM FUEL CELLS: IDENTIFICATION OF VARIOUS PORE FILLING REGIMES FROM PORE NETWORK SIMULATIONS, INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER 129, 1043–1056 (2019)

➤ LAAS

J. CURE, K. COCQ, A. MLAYAH, T. HUNGRIA, P. ALPHONSE, Y. CHABAL, V. MARAVAL, R. CHAUVIN, A. ESTÈVE, C. ROSSI, A TRIPTYCH PHOTOCATALYST BASE ON THE CO-INTEGRATION OF AG NANOPARTICLES AND CARBO-BENZENE DYE INTO A TiO₂ THIN FILM, ACCEPTED INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY, 2019.

➤ LAPLACE

G. FONTES, C. TURPIN, S. ASTIER, T. MEYNARD, INTERACTIONS BETWEEN FUEL CELLS AND POWER CONVERTERS: INFLUENCE OF CURRENT HARMONICS ON A FUEL CELL STACK, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 22, ISSUE 2, PP.670 – 678, MARS 2007

G. FONTES, C. TURPIN, S. ASTIER, A LARGE SIGNAL DYNAMIC CIRCUIT MODEL OF A H₂/O₂ PEM FUEL CELL: DESCRIPTION, PARAMETER IDENTIFICATION AND EXPLOITATION, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 57, N°6, PP. 1874-1881, 2009

B. MORIN, D. VAN LAETHEM, C. TURPIN, O. RALLIERES, S. ASTIER, A. JAAFAR, O. VERDU, M. PLANTEVIN, V. CHAUDRON , DIRECT HYBRIDIZATION FUEL CELL – ULTRACAPACITORS, FUEL CELLS JOURNAL, WILEY, VOLUME 14, ISSUE 3, PAGES 500–507, JUNE, 2014

A. JAAFAR, C. TURPIN, X. ROBOAM, E. BRU, O. RALLIERES, ENERGY MANAGEMENT OF A HYBRID SYSTEM BASED ON A FUEL CELL AND A BATTERY: EXPERIMENTAL TESTS AND INTEGRATED OPTIMAL DESIGN, ELSEVIER, MATCOM MATHEMATICS AND COMPUTERS IN SIMULATION, ELECTRIMACS 2014 SPECIAL ISSUE, MATHEMATICS AND COMPUTERS IN SIMULATION, AVAILABLE ONLINE 4 FEBRUARY 2016 ; VOLUME 131, JANUARY 2017, PAGES 21–37

A. PESSOT, C. TURPIN, A. JAAFAR, E. SOYEZ, O. RALLIERES, G. GAGER, J. D'ARBIGNY, CONTRIBUTION TO THE MODELLING OF A LOW TEMPERATURE PEM FUEL CELL IN AERONAUTICAL CONDITIONS BY DESIGN OF EXPERIMENT, ELSEVIER, MATCOM MATHEMATICS AND COMPUTERS IN SIMULATION, ELECTRIMACS 2017, SPECIAL ISSUE, VOL. 158, P. 179-198, 2019

➤ TBI (LISPB)

GAUQUELIN C, BAFFERT C, RICHAUD P, KAMIONKA E, ETIENNE E, GUIEYSSE D, GIRBAL L, FOURMOND V, ANDRE I, GUIGLIARELLI B, LEGER C, SOUCAILLE P, MEYNIAL-SALLES I. ROLES OF THE F-DOMAIN IN [FeFe] HYDROGENASE: BIOCHIM. BIOPHYS. ACTA. BIOENERG. 1859:69-77, 2018.

KUBAS A, ORAIN C, DE SANCHO D, SAUJET L, SENSI M, GAUQUELIN C, MEYNIAL-SALLES I, SOUCAILLE P, BOTTIN H, BAFFERT C, FOURMOND V, BEST RB, BLUMBERGER J, LÉGER C. MECHANISM OF O₂ DIFFUSION AND REDUCTION IN FeFe HYDROGENASES. NAT CHEM. (1):88-95, 2017.

SENSI M, BAFFERT C, GRECO C, CASERTA G, GAUQUELIN C, SAUJET L, FONTECAVE M, ROY S, ARTERO V, SOUCAILLE P, MEYNIAL-SALLES I., BOTTIN H, DE GIOIA L, FOURMOND V, LÉGER C, BERTINI, L.. REACTIVITY OF THE EXCITED STATES OF THE H-CLUSTER OF FeFe HYDROGENASES. J. AM. CHEM. SOC. OCT 6, 2016.

ORAIN C, SAUJET L, GAUQUELIN C, SOUCAILLE P, MEYNIAL-SALLES I, BAFFERT C, FOURMOND V, BOTTIN H, LÉGER C.. ELECTROCHEMICAL MEASUREMENTS OF THE KINETICS OF INHIBITION OF TWO FeFe HYDROGENASES BY O₂ DEMONSTRATE THAT THE REACTION IS PARTLY REVERSIBLE. J AM CHEM SOC. 12580-7, 2015.

C.DUMAS, M.SPERANDIO, 2019 " INVENTER L'AVENIR, L'INGENIERIE SE MET AU VERT" CNRS EDITIONS, EAN : 9782271126382,

➤ LBE

CABROL L, MARONE A, TAPIA-VENEGAS E, STEYER JP, RUIZ-FILIPPI G & E TRABLY (2017) MICROBIAL ECOLOGY OF FERMENTATIVE HYDROGEN PRODUCING BIOPROCESSES: USEFUL INSIGHTS FOR DRIVING THE ECOSYSTEM FUNCTION. FEMS MICROBIOLOGY REVIEWS 41: 158-181;

MOSCOVIZ R, TRABLY E, BERNET N & H CARRERE (2018) THE ENVIRONMENTAL BIOREFINERY: STATE-OF-THE-ART ON THE PRODUCTION OF HYDROGEN AND VALUE-ADDED BIOMOLECULES IN MIXED-CULTURE FERMENTATION. GREEN CHEMISTRY 20 : 3159-3179;

PALOMO-BRIONES R, RAZO-FLORES E, BERNET N & E TRABLY (2017) DARK-FERMENTATIVE BIOHYDROGEN PATHWAYS AND MICROBIAL NETWORKS IN CSTR: NOVEL INSIGHTS ON THEIR CONTROL. APPLIED ENERGY 198: 77-87;

MARONE A, AYALA-CAMPOS OR, CARMONA-MARTÍNEZ AA, MOSCOVIZ R, LATRILLE E, STEYER JP, BERNET N, ALCARAZ-GONZALEZ V & E TRABLY (2017) COUPLING DARK FERMENTATION AND MICROBIAL ELECTROLYSIS TO ENHANCE BIOHYDROGEN PRODUCTION FROM AGRO-INDUSTRIAL WASTEWATERS. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 42: 1609-1621;

PAILLET F, ESCUDIE R, BERNET N, BARRAU C & E TRABLY (2017) PROCEDE DE CONTROLE D'UN REACTEUR DE FERMENTATION SOMBRE. BREVET FR17 58803;

➤ LCC

LIGAND-CAPPED RU NANOPARTICLES AS EFFICIENT ELECTROCATALYST FOR THE HYDROGEN EVOLUTION REACTION; J. CREUS, S. DROUET, S. SURIÑACH, P. LECANTE, V. COLLIERE, R. POTEAU, K. PHILIPPOT, J.GARCIA-ANTON, X. SALA, ACS CATALYSIS, 2018, 8, 11094-11102.

➤ LGC

R. BASSEGUY, A. BERGEL, S. DA SILVA, L. DE SILVA MUÑOZ, D. FERON, M. ROY. (2006-2016) DISPOSITIF D'ELECTROLYSE DE L'EAU ET SON UTILISATION POUR PRODUIRE DE L'HYDROGENE."WATER ELECTROLYSIS DEVICE." DEMANDE DE BREVET CEA-INPT - DOSSIER D'INVENTION 06/06772 (25 JUILLET 2006) ; DEMANDE D'EXTENSION INTERNATIONALE PCT/FR2007/000949 (11 JUIN 2007) ; NUMEROS DE PUBLICATION : FR2904330, WO08012403, EP2047011, AU2007279151, US2009294282, RU2009106257, CA2658910A1 ; LICENCE D'EXPLOITATION PRISE PAR SAGIM (27/07/2015) ET PAR ATAWAY (05/10/2016)

E. ROUBAUD, R. LACROIX, S. DA SILVA, A. BERGEL, R. BASSÉGUY, B. ERABLE (2018). CATALYSIS OF THE HYDROGEN EVOLUTION REACTION BY HYDROGEN CARBONATE TO DECREASE THE VOLTAGE OF MICROBIAL ELECTROLYSIS CELL FED WITH DOMESTIC WASTEWATER. ELECTROCHIMICA ACTA, 275 (2018) 32-39.

CATHERINE AZZARO-PANTEL (2018). DESIGN, DEPLOYMENT AND OPERATION OF A HYDROGEN SUPPLY CHAIN, 1ST EDITION, EDITORS: CATHERINE AZZARO-PANTEL, PAPERBACK ISBN: 9780128111970, IMPRINT: ACADEMIC PRESS, PUBLISHED DATE: 1ST JUNE 2018

MERCIER, Y.; HEMATI, M. (2017) DEVICE FOR THE TRANSFORMATION OF ORGANIC MATTER IN MIXTURES OF METHANE (CH₄) AND/OR HYDROGEN (H₂) AND/OR CARBON DIOXIDE (CO₂) BY COUPLING THERMOCHEMICAL AND BIOLOGICAL METHODS. BREVET DEPOSE LE 16 MAI 2017, PCT # WO 2018/210960 A1

F.L. DURAN MARTINEZ, C. JULCOUR, A.M. BILLET, F. LARACHI (2016). MODELLING AND SIMULATIONS OF A MONOLITH REACTOR FOR THREE-PHASE HYDROGENATION REACTIONS — RULES AND RECOMMENDATIONS FOR MASS TRANSFER ANALYSIS CATALYSIS TODAY, VOLUME 273, PAGES 121–130

➤ PROMES

ABANADES S., LEGAL A., CORDIER A., PERAUDEAU G., FLAMANT G., JULBE A., INVESTIGATION OF REACTIVE CERIUM-BASED OXIDES FOR H₂ PRODUCTION BY THERMOCHEMICAL 2-STEP WATER-SPLITTING, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE, 45(15), 2010, 4163-4173.

RODAT S., ABANADES S., SANS J.L., FLAMANT G., A PILOT-SCALE SOLAR REACTOR FOR THE PRODUCTION OF HYDROGEN AND CARBON BLACK FROM METHANE SPLITTING, INT. J. HYDROGEN ENERGY, 35(15), 2010, 7748-7758.

DEMONT A., ABANADES S., BECHE E., INVESTIGATION OF PEROVSKITE STRUCTURES AS OXYGEN-EXCHANGE REDOX MATERIALS FOR HYDROGEN PRODUCTION FROM THERMOCHEMICAL TWO-STEP WATER-SPLITTING CYCLES, THE JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C, 2014, 118(24), 12682–12692.

ABANADES S., KIMURA H., OTSUKA H., HYDROGEN PRODUCTION FROM THERMO-CATALYTIC DECOMPOSITION OF METHANE USING CARBON BLACK CATALYSTS IN AN INDIRECTLY-IRRADIATED TUBULAR PACKED-BED SOLAR REACTOR, INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY, 2014, 39, 18770-18783.

BELLOUARD Q., RODAT S., ABANADES S., RAVEL S., FRAYSSINES P.E., DESIGN, SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF A DIRECTLY-IRRADIATED SOLAR CHEMICAL REACTOR FOR HYDROGEN AND SYNGAS PRODUCTION FROM CONTINUOUS SOLAR-DRIVEN WOOD BIOMASS GASIFICATION, INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY, 2019, 44, 19193-19205.

➤ Rapsodee

DOAN PHAM MINH, TAN JI SIANG, DAI-VIET N.VO, THANH SON PHAN, CYRILLE RIDART, NZIHOU A., DIDIER GROUSET, CHAPTER 4 - HYDROGEN PRODUCTION FROM BIOGAS REFORMING: AN OVERVIEW OF STEAM REFORMING, DRY REFORMING, DUAL REFORMING, AND TRI-REFORMING OF METHANE. HYDROGEN SUPPLY CHAINS DESIGN, DEPLOYMENT AND OPERATION, PAGES 111-166, 2018

DIDIER GROUSET, CYRILLE RIDART, CHAPTER 6 - LOWERING ENERGY SPENDING TOGETHER WITH COMPRESSION, STORAGE AND TRANSPORTATION COSTS FOR HYDROGEN DISTRIBUTION IN THE EARLY MARKET. HYDROGEN SUPPLY CHAINS DESIGN, DEPLOYMENT AND OPERATION, PAGES 111-166, 2018

GUIZANI C., ESCUDERO SANZ F.J., SALVADOR S. (2015). INFLUENCE OF TEMPERATURE AND PARTICLE SIZE ON THE SINGLE AND MIXED ATMOSPHERE GASIFICATION OF BIOMASS CHAR WITH H₂O AND CO₂. FUEL PROCESSING TECHNOLOGY VOL 134, PP. 175-188.

SEPTIEN S., ESCUDERO SANZ F.J., SALVADOR S., VALIN S. (2018). THE EFFECT OF PYROLYSIS HEATING RATE ON THE STEAM GASIFICATION REACTIVITY OF CHAR FROM WOODCHIPS. ENERGY VOL 142, PP. 68-78.

THANH SON PHAN, ABDOUL RAZAC SANE, BRUNA RÉGO DE VASCONCELOS, DOAN PHAM MINH, PATRICK SHARROCK, DIDIER GROUSET, NZIHOU A., HYDROXYAPATITE SUPPORTED BIMETALLIC COBALT AND NICKEL CATALYSTS FOR SYNGAS PRODUCTION FROM DRY REFORMING OF METHANE. APPLIED CATALYSIS B: ENVIRONMENTAL, 224, 310-321, 2018.

➤ BioWooEB

VONK G., PIRIOU B., WOLBERT D., CAMMARANO C., VAÏILINGOM G. 2019. ANALYSIS OF POLLUTANTS IN THE PRODUCT GAS OF A PILOT SCALE DOWNDRAFT GASIFIER FED WITH WOOD, OR MIXTURES OF WOOD AND WASTE MATERIALS. BIOMASS AND BIOENERGY (125) : 139-150.

PHAM XUAN H., PIRIOU B., SALVADOR S., VALETTE J., VAN DE STEENE L. 2018. OXIDATIVE PYROLYSIS OF PINE WOOD, WHEAT STRAW AND MISCANTHUS PELLETS IN A FIXED BED. FUEL PROCESSING TECHNOLOGY, 178 : P. 226-235

CONVERSION OF PHENOL-BASED TARS OVER BIOMASS CHAR UNDER H₂ AND H₂O ATMOSPHERES. NITSCH XAVIER, COMMANDRE JEAN-MICHEL, VALETTE JEREMY, VOLLE GHISLAINE, MARTIN ERIC. 2014. ENERGY AND FUELS, 28 : 6936-6940. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1021/EF500980G](http://dx.doi.org/10.1021/ef500980g)

GASIFICATION OF CHAR FROM WOOD PELLETS AND FROM WOOD CHIPS: TEXTURAL PROPERTIES AND THERMOCHEMICAL CONVERSION ALONG A CONTINUOUS FIXED BED. TEIXEIRA GABRIEL, VAN DE STEENE LAURENT, MARTIN ERIC, GELIX F., SALVADOR SYLVAIN. 2012. FUEL, 102: 514-524. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.FUEL.2012.05.039](http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.05.039)

AUTOTHERMAL AND ALLOTHERMAL PYROLYSIS IN A CONTINUOUS FIXED BED REACTOR. MILHE MATHIEU, VAN DE STEENE LAURENT, HAUBE MICHAËL, COMMANDRE JEAN-MICHEL, FASSINOU WANIGNON FERDINAND, FLAMANT GILLES. 2013. JOURNAL OF ANALYTICAL AND APPLIED PYROLYSIS, 103: 102-111. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.JAAP.2013.03.011](http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2013.03.011)

➤ ICA (Mines Albi)

NGUYEN SINH-KHOA, CHIAMBARETTO PIERRE-LOUIS, CHARLOTTE MIGUEL, VILLEDIEU PHILIPPE, MICHON GUILHEM, MORLIER JOSEPH, GOURINAT YVES. EXPERIMENTAL TESTING OF PRE-STRESSED GRANULAR ASSEMBLIES AS A SURROGATE MATERIAL FOR THE DYNAMIC ANALYSIS OF LAUNCHER CRYOGENIC TANKS. ENGINEERING STRUCTURES (ELSEVIER) ISSN 0141-0296, 197:1-14, 2019.

NGUYEN SK, CHIAMBARETTO PL, CHARLOTTE M, MORLIER J, GOURINAT Y. TOWARDS AN ANALYTICAL FORMULATION FOR FLUID STRUCTURE TANK VIBRATION ANALYSIS : MODAL EQUIVALENCE USING GRANULAR MATERIALS. ENGINEERING STRUCTURES, ISSN:0141-0296 (ELSEVIER) 177-345-356, DEC.2018.

LEGAUD T, GRIPPON E, LAPOUJADE V, CHIAMBARETTO PL, NGUYEN SK, GOURINAT Y. DISCRETE ELEMENT MODELLING OF A METAMATERIAL FOR LAUNCHER TANKS DYNAMIC EXPERIMENTS. LS-DYNA 11TH EUROPEAN CONFERENCE, SALZBURG MAY 2017.

GRIPPON E, LEGAUD T, CHIAMBARETTO PL, FASCIO V, GOURINAT Y, LAPOUJADE V. GUIDELINES OF A METAMATERIAL FOR LAUNCHER TANK DYNAMIC EXPERIMENTS. ECSSMET14 TOULOUSE SEPT.2016.

CHIAMBARETTO PL, CHARLOTTE M, MORLIER J, VILLEDIEU P, GOURINAT Y. VIBRATIONAL TEST BENCH OF A GRAIN FILLED TANK IN VIEW OF CRYOGENIC TANK TESTS. PROCEEDINGS OF 14TH EUROPEAN CONFERENCE ON SPACECRAFT STRUCTURES, MATERIALS & ENVIRONMENTAL TESTING (ECSSMET 14) TOULOUSE 2016.