

## Formations autour des systèmes hydrogène sur le futur Technocampus Hydrogène Occitanie dans le cadre du projet GENHYO\*

Maëlie HEULS<sup>1</sup>, Thomas JARRY<sup>1</sup>, François PARACHE<sup>1</sup>, Antony PLAÏT<sup>1</sup>, Éric BRU<sup>1</sup>,  
Olivier RALLIERES<sup>1</sup>, Amine JAAFAR<sup>1</sup>, Bruno SARENI<sup>1</sup>, Christophe TURPIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse INP, Toulouse, France

\*Auteur de correspondance : [heuls@laplace.univ-tlse.fr](mailto:heuls@laplace.univ-tlse.fr)

**Résumé :** *Le projet GENHYO (GENération HYdrogène Occitanie) a pour objectif de favoriser l'émergence de talents et d'accélérer l'adaptation des formations (du CAP au Doctorat) aux besoins en compétences de la filière de l'hydrogène décarboné. Partenaire du projet, Toulouse INP (Institut National Polytechnique) mobilise l'expertise acquise au travers des activités de recherche conduites sur la « Plateforme Hydrogène de Toulouse » opérée par le laboratoire LAPLACE (une plateforme d'expérimentation dédiée à l'étude des technologies de production, de stockage et d'utilisation de l'hydrogène) pour développer et concevoir des bancs pédagogiques qui seront installés au sein du futur Technocampus Hydrogène Occitanie situé près de Toulouse et qui s'intégreront à terme dans différents parcours de formation.*

**Mots clés :** Hydrogène, pile à combustible (PàC), électrolyseur, banc pédagogique, travaux pratiques (TPs).

**Abstract:** *Training program on hydrogen systems at the future Technocampus Hydrogène Occitanie as part of the GENHYO project*  
The GENHYO project (GENération HYdrogène Occitanie) aims to support the development of skilled professionals and accelerate the alignment of educational programs (from vocational training to doctoral studies) with the evolving needs of the low-carbon hydrogen industry. As a project partner, Toulouse INP (Institut National Polytechnique) leverages on the expertise gained through research activities conducted on the « Plateforme Hydrogène de Toulouse » (an experimental platform operated by the LAPLACE laboratory dedicated to the study of hydrogen

*production, storage, and utilization technologies) to design and develop educational test benches. These benches will be installed at the future Technocampus Hydrogène Occitanie, located near Toulouse, and will ultimately be integrated into a range of training pathways.*

**Keywords:** Hydrogen, Fuel cell, Electrolyser, Educational test bench, Practical lab work.

## 1. Introduction

Le développement des technologies liées à l'hydrogène décarboné est au cœur des enjeux de transition énergétique et industrielle, nécessitant à la fois des innovations techniques et une montée en compétence des futurs acteurs du secteur [1]. Dans ce contexte, et pour préparer les jeunes générations aux métiers de demain, 24 partenaires se sont alliés pour construire le projet GENHYO [2]. Toulouse INP figure parmi les acteurs du projet et s'inscrit pleinement dans cette dynamique ayant intégré depuis plusieurs années des enseignements sur l'hydrogène dans ses formations d'ingénieurs, notamment dans le parcours éco-énergie porté par l'ENSEEIHT et l'ENSIACET, adossé au mastère spécialisé « Nouvelles technologies de l'Energie ». Son implication dans le projet GENHYO se traduit par le développement de bancs pédagogiques illustrant différentes briques technologiques de l'hydrogène. Ces équipements seront déployés sur la plateforme pédagogique de 550 m<sup>2</sup> du futur Technocampus Hydrogène Occitanie (9000 m<sup>2</sup>) [3] dont les travaux de constructions ont débuté en février 2025 (Figure 1).



**Figure 1.** Visuel 3D du Technocampus Hydrogène Occitanie

La « Plateforme Hydrogène de Toulouse » opérée par le laboratoire LAPLACE (Laboratoire PLAsma et Conversion d'Énergie), unité Mixte de Recherche dont les tutelles sont le CNRS, Toulouse INP et l'Université Toulouse, s'appuie sur son expérience et son savoir-faire dans la conception et la réalisation de ses propres bancs de recherche [4], afin d'adapter ces équipements aux besoins pédagogiques. Les travaux réalisés à ce jour, dont une partie sera présentée dans ce papier, ont pour objectif de structurer des parcours de formation de travaux pratiques (TPs) destinés à des niveaux allant de technicien à ingénieur.

## **2. Technocampus Hydrogène Occitanie**

### **2.1. Plateforme pédagogique**

Le secteur de l'hydrogène connaît une croissance rapide mais il est confronté à une pénurie de talents dans plusieurs domaines stratégiques. L'identification de 17 métiers déjà en tension révèle un manque de compétences disponibles et profils associés à court terme, ces métiers étant soumis à une forte concurrence entre diverses filières industrielles [5]. Il est donc urgent de mettre en œuvre des actions pour remédier à la faible attractivité de ces filières industrielles. Former et acquérir les compétences nécessaires pour exercer les métiers de l'hydrogène sera essentiel pour garantir le bon développement de la filière en France. Dans ce contexte, la future plateforme pédagogique du Technocampus Hydrogène Occitanie jouera un rôle crucial dans la réponse à la pénurie de talents, en proposant un accès à des équipements de pointe, constamment mis à jour, et privilégiant l'apprentissage pratique.

Reposant sur un modèle collaboratif, le Technocampus Hydrogène Occitanie rassemblera, en un lieu unique, chercheurs, industriels et acteurs de l'enseignement et de la formation. L'intégration d'une plateforme pédagogique dans cet écosystème synergique propice à l'innovation, favorisera une approche immersive et représentative des défis industriels actuels et futurs. En accélérant le développement des compétences nécessaires à la filière hydrogène, elle contribuera et renforcera ainsi l'insertion professionnelle dans ce secteur en expansion.

### **2.2. Briques technologiques**

La plateforme pédagogique permettra la manipulation de l'hydrogène sur des équipements de puissance plus significative (jusqu'à quelques dizaines de kiloWatt) que ce qui se fait habituellement sur des maquettes généralement limitées à quelques dizaines de Watt. Qualifié de « petite puissance » en comparaison aux fortes puissances développées sur le reste du site (jusqu'à 1 MW), ces équipements offriront néanmoins une expérience plus représentative et avancées en termes de compétences que les dispositifs de paillasse. Il est prévu que de nombreuses thématiques de formation pratique soient abordées sur le Technocampus :

- La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau
- Le stockage d'hydrogène (gaz, liquide ou solide)
- La combustion de l'hydrogène
- La PaC pour la production d'électricité, voire la cogénération de chaleur
- La pompe à chaleur
- La micro-fluidique dans les systèmes hydrogène
- L'hybridation avec batterie ou supercondensateur

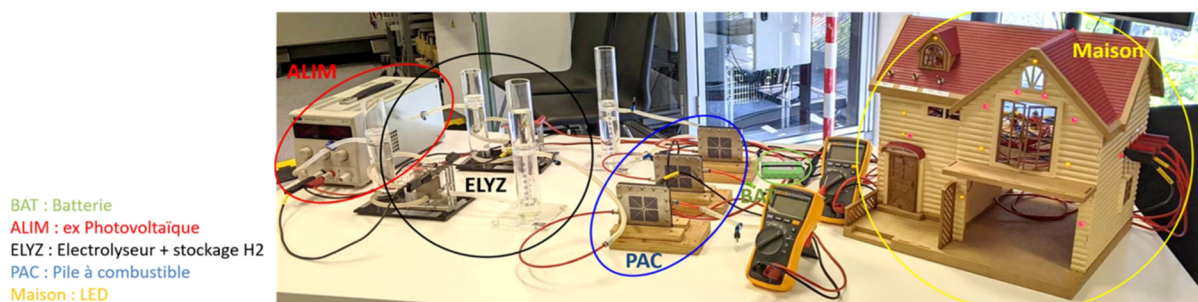
Certains bancs exigent des installations spécifiques (sécurité, consommation en gaz, ...) ainsi que l'intervention de professionnels qualifiés dédiés. Leur implantation au sein du Technocampus est un atout stratégique primordial puisqu'ils pourront bénéficier d'une infrastructure adaptée.

La plateforme pédagogique accueillera des enseignements de type travaux pratiques mais des rappels théoriques pourront être également assurés dans une salle spécialement aménagée. Une formation sur la sécurité et les bonnes pratiques de manipulation sera obligatoire en début de séance, combinant théorie et pratique. Elle permettra de garantir une application et une compréhension rigoureuse des mesures et consignes de prévention et de protection vis-à-vis des risques liés à la manipulation de l'hydrogène.

### 3. Maquette pédagogique de communication grand public

#### 3.1. Caractéristiques techniques

Parmi les dispositifs de présentation de l'hydrogène auprès du grand public (lors de salons, séminaires...), la maquette pédagogique développée au sein de l'ENSEEIH, propose de manière interactive de découvrir les principes de la production d'hydrogène par électrolyse, du stockage de l'énergie, de l'intermittence des énergies renouvelables et de la production d'énergie électrique par pile à combustible (PàC) (Figure 2).



**Figure 2.** La maquette pédagogique de communication grand public

Pour illustrer les besoins électriques d'une maison isolée, des LED sont intégrées dans la maquette. Elle comprend deux électrolyseurs PEM (Proton Exchange Membrane) de 2 cellules de 16 cm<sup>2</sup> chacune, ainsi qu'un dispositif de stockage d'énergie sous forme d'hydrogène gazeux. L'énergie chimique est ensuite convertie en énergie électrique grâce à trois PàC à respiration (cathode ouverte) PEM de 25 cm<sup>2</sup>. La batterie lithium-ion représente également une solution de stockage de l'énergie. Enfin, les ressources renouvelables sont émulées par une alimentation stabilisée de laboratoire (pour simplification) mais ces éléments pourraient être remplacés par exemple par des panneaux photovoltaïques (PV).

La maquette est dotée de commutateurs permettant de sélectionner la source d'énergie, ce qui constitue un choix clé dans la conception du système. Le premier commutateur permet de choisir entre la source renouvelable (émulation via une alimentation de laboratoire) ou les PàC. Le deuxième permet de produire de l'hydrogène via les électrolyseurs. Enfin, le troisième commutateur permet de connecter la batterie à ce micro-réseau. Des voltmètres peuvent être raccordés aux bornes des PàC et de la batterie pour observer l'évolution de la tension. Cette configuration offre aux utilisateurs la possibilité de sélectionner et tester différents scénarios énergétiques.

### 3.2. Approche pédagogique

Dans cette section, un exemple de présentation avec le discours argumenté associé est exposé :

L'expérience se déroule par une journée ensoleillée où l'énergie solaire alimente les LED, simulant la consommation électrique d'un foyer. Dans cette configuration, le premier commutateur est en position fermé, permettant l'alimentation de la maison par des PV (alimentation de laboratoire). Tous les autres commutateurs, quant à eux, sont maintenus en position ouverte, garantissant que l'énergie provient exclusivement des PV pour n'alimenter que la maison.

Avec les énergies renouvelables, il est essentiel de gérer les fluctuations dues aux conditions climatiques, au cycle jour/nuit et aux variations saisonnières. Voici comment cela se traduit dans cette expérience :

- Si l'on se place dans le cas d'une journée avec surproduction d'énergie renouvelable, l'alimentation de laboratoire est allumée (émulation des PV) et les LED fonctionnent. Il est possible de basculer le commutateur de la batterie pour la (re)charger, ce qui augmente la tension à ses bornes. En parallèle, il est également possible de produire de l'hydrogène en activant l'électrolyseur via son commutateur. L'hydrogène produit est alors stocké dans une éprouvette (stockage à pression atmosphérique avec de l'eau comme « bouchon »).
- Si l'on imagine qu'un nuage passe ou qu'il fasse nuit, l'alimentation de laboratoire est éteinte, entraînant l'extinction des LED. Il est alors nécessaire de passer le relais à la batterie chargée via le troisième commutateur. Les LED se rallument et la tension aux bornes de la batterie peut être mesurée.
- En hiver, si la batterie n'est pas suffisamment dimensionnée pour une longue période, il faut envisager une autre source d'alimentation. Si de l'hydrogène a été stocké, il est possible de basculer le premier commutateur sur la source PàC. Les LED se rallument, et le niveau d'hydrogène dans l'éprouvette diminue progressivement suite à sa conversion en électricité.

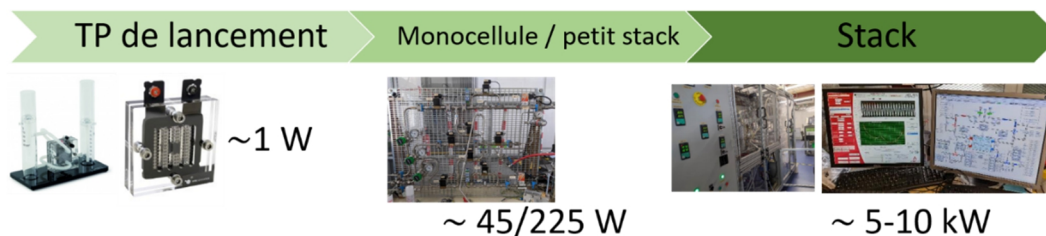
Cette gestion dynamique permet de simuler différents scénarios liés à l'intermittence des énergies renouvelables, et démontrant l'importance du stockage et de l'adaptabilité du système pour assurer une alimentation continue.

La maquette offre une approche à la fois ludique et pratique, facilitant la compréhension des mécanismes de gestion de l'énergie, de la production à la consommation d'hydrogène, dans le contexte de l'utilisation d'énergies renouvelables intermittentes. Elle met en évidence l'importance d'une hybridation énergétique optimisée, permettant de stocker l'énergie disponible pour une utilisation différée. Elle constitue ainsi une introduction accessible et intuitive, mettant en scène des éléments concrets et visuels, afin de sensibiliser un public sans connaissances particulières sur l'hydrogène

## 4. Parcours de formation PàC

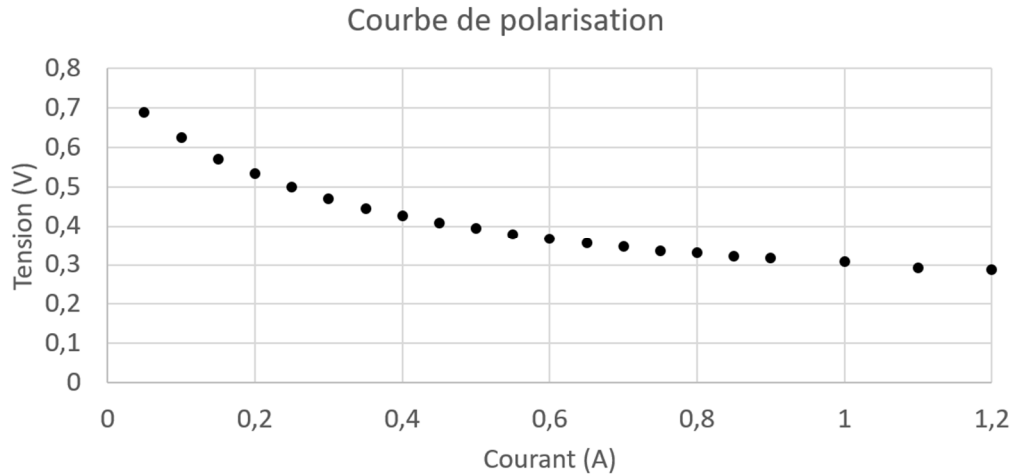
Sur la plateforme pédagogique du Technocampus, des parcours de formation organisés autour de différents bancs pédagogiques, permettront d'expérimenter des composants à différentes échelles de puissance. Ces parcours favoriseront une montée en compétence

progressive, allant de la découverte des bases jusqu'à l'étude de systèmes quasi-industriels. Parmi ces parcours de formation, celui dédié à la PàC PEM-BT (Basse Température) occupe une place centrale (Figure 3). L'objectif de ce parcours est d'illustrer le fonctionnement et les concepts clés de cette technologie. Chaque étape du parcours présente des contraintes spécifiques d'intégration et des objets d'études adaptés à l'évolution des compétences des apprenants.



**Figure 3.** Parcours de formation des TP PàC

Le banc « TP de lancement » ( $P \approx 1 \text{ W}$ ) comparable à la maquette pédagogique présentée précédemment, constitue la première étape de ce parcours. Il propose un système simplifié, sans régulation complexe, pour produire de l'hydrogène par électrolyse, le stocker et le consommer par une PàC. Ce banc ne présente aucun risque de surchauffe ou d'incidents électriques. Il permet un premier contact avec l'hydrogène dans un cadre maîtrisé et joue un rôle fondamental dans sa démystification : en manipulant directement un gaz souvent perçu comme dangereux ou inaccessible, les étudiants acquièrent une meilleure compréhension de ses usages, de ses contraintes et de son potentiel. Facilement déployable à grande échelle dans les collèges et lycées, ce dispositif est déjà maîtrisé à l'ENSEEIH T depuis plus de 15 ans. Sa charge active pilotable permet de tracer des courbes de polarisation (Figure 4), de réaliser des spectroscopies d'impédance électrochimique (EIS) et d'émuler des convertisseurs statiques (Buck/Boost) via un GBF (générateur basse fréquence). Sur le plan pédagogique, il permet aux étudiants d'aborder des concepts fondamentaux : comprendre le principe de fonctionnement d'un électrolyseur et d'une PàC, comprendre la relation courant-tension et l'interaction entre la PàC et la charge, appréhender une partie des outils d'analyse et de diagnostic non destructif de l'état de santé d'un électrolyseur et d'une PàC. Néanmoins, selon les retours d'expériences de nos étudiants (ingénieurs) niveau Master 2, ils prennent aussi conscience que ces expérimentations restent très éloignées des conditions industrielles. Ce constat, renforcé par la visite de la Plateforme Hydrogène de Toulouse, met en évidence le besoin de TP de plus grande puissance, plus représentatifs des systèmes réels. Leur déploiement constituerait une suite logique pour accompagner le développement de la filière et former des ingénieurs pleinement opérationnels dans un secteur en mutation.



**Figure 4.** Courbe de polarisation d'une PàC PEM 16 cm<sup>2</sup>

La seconde étape du parcours de formation consistera en un banc monocellule/petit stack (empilement de cellules), qui introduit des composants de régulation des débits (eau et gaz), des pressions et des températures, ainsi qu'un système de supervision. De faible puissance ( $P \approx 100$  W), ce banc permettra des interventions manuelles et aborde des concepts plus techniques tels que l'asservissement, les boucles de régulation et la gestion des auxiliaires. Encore en phase de réalisation, il sera présenté plus en détail dans la suite de ce papier.

La dernière étape du parcours portera sur un banc de plus forte puissance ( $5 \text{ kW} < P < 10 \text{ kW}$ ), avec une supervision complète se rapprochant des réalités industrielles et de systèmes plus complexes. L'étude d'un stack PàC de 5 kW permet d'explorer plusieurs aspects non accessibles avec une PàC monocellule de 100 W, en raison de différences d'échelle, de comportement et d'intégration système. Par exemple, le bilan de matière pourra être réalisé avec plus de précision, compte tenu des quantités plus importantes mises en jeu. Contrairement à une PàC de 100 W, une PàC de 5 kW produit une chaleur significative, facilitant l'étude des stratégies d'évacuation thermique et l'optimisation du système de gestion de chaleur. Chaque étape du parcours est complémentaire aux précédentes, conçue de manière à couvrir un large éventail de métiers et de domaines de compétences, allant de la conception à la maintenance, en passant par les essais. Ce parcours garantit évidemment la sécurité des participants et propose une adaptation pédagogique en fonction de la complexité et des connaissances de l'hydrogène (débutant, intermédiaire, avancé).

## 5. Banc PàC mono-cellule / petit stack

### 5.1. Caractéristiques techniques

Le choix s'est porté sur la technologie de PàC PEM-BT [6], qui est la plus répandue à ce jour. Le banc est conçu pour être piloté aussi manuellement que possible afin de pouvoir mieux appréhender chaque action réalisée. Il est également pensé pour être facilement cloné et reconfiguré en fonction du budget disponible. Modulable et robuste, il facilite la maintenance, chaque composant pouvant être réparé ou remplacé aisément. De plus, le banc fonctionne de

manière sécurisée, offrant aux étudiants la possibilité de réaliser des essais aux limites du système sans exposer les composants à des risques majeurs.

Le banc s'appuie sur un modèle de banc déjà existant sur la Plateforme Hydrogène de Toulouse (nommé « LAP2 monocellule »). Il est conçu pour fonctionner à température et pression fixes, avec asservissement des débits de gaz et d'eau (pour l'humidification des gaz) en fonction du courant délivré par la PàC. Il intègre également des fonctions d'un autre modèle de banc (nommé « Vi ») pilotable via une supervision IHM (Interface Homme-Machine) semi-automatique et offrant un contrôle proche des conditions industrielles. Ce banc d'essai a été dimensionné pour accueillir une PàC composée d'une à trois cellules (surface active : 50 cm<sup>2</sup>), et avec quelques ajustements, notamment sur la gestion thermique, jusqu'à 6 cellules. Les composants auxiliaires ont été choisis pour permettre un fonctionnement sur une large gamme de densités de courant dans toutes les configurations (de 0,5 A/cm<sup>2</sup> à 1,5 A/cm<sup>2</sup>).

Comme présenté sur la Figure 5, le circuit fluide permet le contrôle des débits de gaz en entrée de la PàC grâce à deux méthodes : soit via des régulateurs de débits (Mass Flow Controller, MFC) intégrant une vanne et un capteur de débit (Mass Flow Meter, MFM), soit par l'utilisation d'Electrovannes Proportionnelles (EVP) ou de vannes micrométriques (VM). Ces deux derniers composants offrent aux étudiants la possibilité de piloter manuellement la régulation de débit, en remplacement du MFC. La pression de la PàC est régulée à l'aide d'EVP placées à sa sortie. L'humidité des gaz est mesurée en entrée de la PàC et ajustée par injection d'eau via des régulateurs de débit de liquide (Liquid Flow Controller, LFC), alimentant des évaporateurs de type CEM (Controlled Evaporator Mixer). Ces évaporateurs chauffent et mélangent le gaz et l'eau afin de respecter la consigne d'humidité. La température des gaz humidifiés est maintenue jusqu'à l'entrée dans la PàC à l'aide de cordons chauffants. En sortie de la PàC, l'eau présente dans le gaz excédentaire est condensée par des échangeurs à plaques, et l'eau liquide ainsi récupérée est évacuée par des purgeurs. La température de la PàC est régulée au moyen de résistances chauffantes et de ventilateurs.

Le contrôle du courant est réalisé par une charge pilotable, permettant d'imposer des profils de missions et de réaliser des caractérisations. Le banc sera équipé de détecteurs d'hydrogène, d'oxygène et de fumée, reliés à une centrale gaz avec des seuils de détection ajustables. Des sondes de précision, certaines étant dédiées à la sécurité, assureront les mesures. Un automate surveillera en temps réel les paramètres tels que les pressions, températures, courant et tension, et déclenchera un arrêt de sécurité si nécessaire. Dans ce cas, l'automate coupera, entre autres, le circuit électrique de puissance de la PàC et activera l'inertage de la PàC à l'azote via des réservoirs dédiés. Une résistance de décharge est également installée pour protéger la PàC lors des arrêts / démarrages.

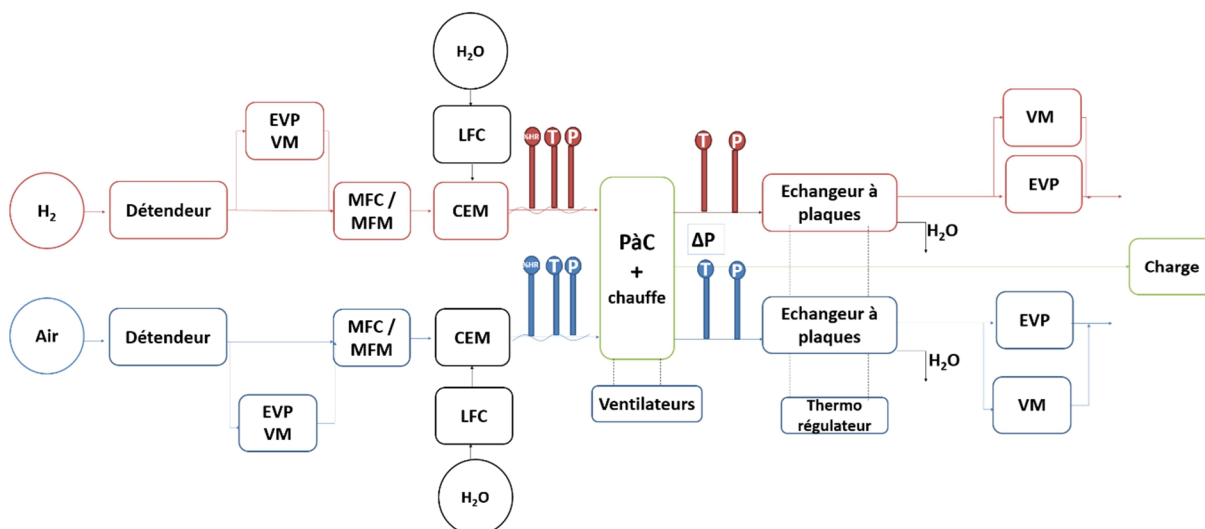


Figure 5. Schéma de principe du banc PàC mono-cellule / petit stack

## 5.2. Approche pédagogique : compétences et connaissances scientifiques développées

Les TP seront modulables « à la carte » selon le niveau de formation et les objectifs pédagogiques. Ils couvriront des thématiques variées, adaptées aussi bien à l'initiation (bac à bac+3) que dans un cadre d'approfondissement (master, école d'ingénieurs). Ils s'adresseront à des publics de spécialités diverses, en formation initiale comme en formation continue.

En voici une liste non exhaustive :

- Sécurité de l'installation et détection de fuites : acquérir des connaissances techniques et pratiques sur les capteurs et dispositifs de surveillance et de sécurité du banc, leur mise en œuvre, maintenance et étalonnage. Maîtriser les stratégies de sécurités, les procédures d'arrêt d'urgence, les consignes, et la détection de fuites.
- Modes de contrôle et asservissement : exploration de différents modes de contrôle, du pilotage manuel à l'asservissement (régulateur WEST, consigne interne ou externe), avec une IHM type industriel.
- Purge de ligne et changement de gaz : analyse de la réponse en débit lors d'un changement d'un gaz à un autre ( $N_2$  /  $H_2$ ) et étude de la vitesse de changement via chromatographie.
- Etude de scénarios et profils de mission : variation du courant dans le temps, émulation du fonctionnement d'une humidification passive via le CEM ; émulation d'un compresseur d'air.
- Etude des boucles et de la dynamique des régulations : étude des temps de réponse, de la stabilisation, de l'écart à la consigne et des effets liés à la plage de mesure et aux phénomènes parasites. Etude du régulateur PID par pilotage direct de l'EVP dédiée à la régulation de pression.
- Caractérisation statique et dynamique des propriétés et performances électrochimiques : analyse des courbes de polarisation, EIS, balayage basse fréquence et voltamétrie cyclique.

- Gestion et optimisation des performances de la PàC : élaboration d'un plan d'expérience, optimisation des paramètres clés (T, P, HR...), évaluation de leur impact sur les performances et le rendement global.
- Métrologie et qualification : recherche des emplacements optimaux des capteurs, qualification de l'instrumentation et des protocoles associés.

Les emplacements dédiés à la PàC et aux sorties de gaz sont conçus pour accueillir les études mentionnées précédemment et pourront être complétés ultérieurement par des modules spécifiques. Cette modularité permettra d'adapter et d'enrichir progressivement les TPs.

Certains TPs offriront une première approche des systèmes à hydrogène pour développer des compétences transversales : lecture de plans d'installation fluidique et électrique, identification et fonctionnement des composants (électrovannes, capteurs, détendeurs...), maîtrise des procédures de sécurité, de mise en gaz et d'arrêt d'urgence. D'autres TPs cibleront des compétences spécifiques aux PàC : gestion des paramètres de fonctionnement, utilisation d'outils de diagnostic, analyse des indicateurs et évaluation de l'état de santé. Des TPs plus avancés, destinés à un public spécialisé, aborderont des compétences techniques telles que la maintenance, l'instrumentation, la modélisation de systèmes dynamiques, la régulation, la métrologie...

Plus largement, l'ensemble des TPs vise à renforcer la capacité des étudiants à mener une expérimentation scientifique, formuler des hypothèses, mettre en œuvre un protocole, travailler en équipe, rédiger un rapport d'analyse et interpréter des résultats dans un contexte technologique réel, sur des outils industriels.

À ce jour, le banc est en phase de montage. Les enseignements associés n'ont pas encore débuté, aucun retour d'expérience ni résultat expérimental n'est donc disponible. L'objectif est de construire une base solide et évolutive, enrichie progressivement par l'appropriation du dispositif par les équipes pédagogiques et les étudiants.

## **6. Banc électrolyseur mono-cellule**

### **6.1. Caractéristiques techniques**

Bien que les électrolyseurs alcalins dominent actuellement le marché mondial [6], la technologie PEM a été retenue pour ce banc pédagogique, en raison de sa forte croissance et de sa maîtrise avancée sur la Plateforme Hydrogène de Toulouse [7]. Comme pour le banc PàC, le banc électrolyseur a été conçu aussi manuel que possible, pour favoriser la compréhension de chaque action réalisée. Il peut accueillir un électrolyseur monocellule de 50 cm<sup>2</sup> de surface active, et, avec quelques ajustements (dimensionnement des EVP et MFM), un stack jusqu'à 3 kW. De plus, il est conçu pour fonctionner jusqu'à 10 bars de pression. Comme présenté sur la Figure 6, l'électrolyseur fonctionne avec une circulation d'eau coté anode et cathode, assurée par des pompes et des débitmètres manuels à bille. La température de l'eau est asservie par des échangeurs et un bain thermostaté, dont la sonde PT100 peut être positionnée directement dans le circuit d'eau pour une régulation de température au plus près de l'électrolyseur. Des séparateurs gaz/liquide assurent d'une part l'évacuation des gaz produits et, d'autre part, la recirculation de l'eau. Coté anode, l'injection d'eau déminéralisée se fait via une pompe, tandis que du côté cathode, une purge est réalisée par une électrovanne et une EVP pour maintenir le

débit et la pression. Les gaz produits (humides), passent par un filtre coalescent pour éliminer l'eau liquide, puis traversent une colonne dessiccante afin d'éliminer l'humidité résiduelle (eau-vapeur), avant d'atteindre un MFM pour la mesure du débit. En sortie du séparateur, des EVP permettent de maintenir la pression d'étude, tandis que des détecteurs d'oxygène (cathode) et d'hydrogène (anode) assurent la sécurité en cas de crossover (passage non désiré à travers la membrane). Un point de prélèvement est prévu pour des analyses chromatographiques. Le système est aussi connecté au réseau d'azote pour l'inertage des lignes en cas d'arrêt de sécurité.

L'électrolyseur est alimenté par une source d'énergie électrique dédiée, avec un contrôle du courant via une charge pilotable permettant d'imposer des profils de mission et réaliser des caractérisations. Comme le banc PàC, il sera équipé de détecteurs (hydrogène, oxygène et fumée), reliés à une centrale gaz à seuils de détection ajustables. Des sondes de précision assureront les mesures (certaines spécifiques à la sécurité). Un automate surveillera pressions, températures, courant et tension, déclenchant un arrêt de sécurité en cas d'anomalie.

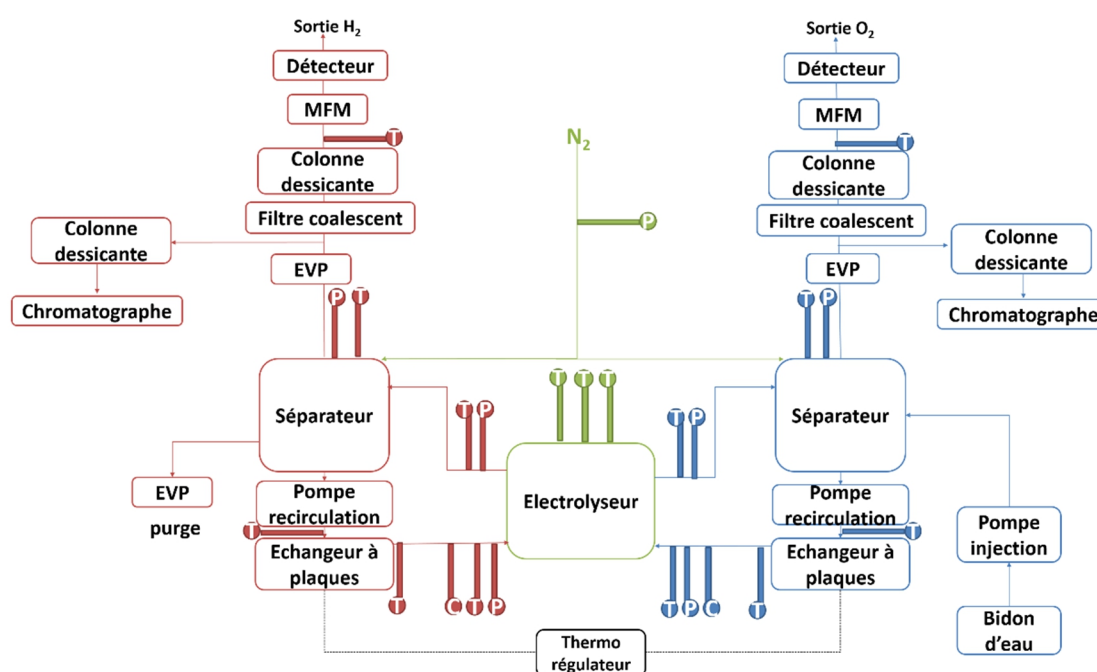


Figure 6. Schéma de principe du banc électrolyseur mono-cellule

## 6.2. Approche pédagogique : compétences et connaissances scientifiques développées

Parmi les études envisageables sur le banc électrolyseur, nous pouvons mettre en exergue :

- Bilan de matière et bilan d'eau : analyse des flux d'eau et de gaz au sein du système.
- Etude de la montée en pression par réaction chimique vs par le réseau d'azote : comparaison des mécanismes d'augmentation de pression (production plus rapide d'hydrogène).
- Caractérisation statique et dynamique des propriétés et performances électrochimiques : réalisation de courbes de polarisation, EIS, balayage basse fréquence et voltamétrie cyclique.

- Gestion et optimisation des performances de l'électrolyseur : élaboration d'un plan d'expérience pour évaluer l'impact de la température et de la pression sur le rendement global ; étude de l'influence du débit de recirculation et de l'évacuation des bulles de gaz sur les performances.

- Etude du crossover d'eau et automatisation : étude du transfert d'eau à travers la membrane, optimisation de la gestion de la purge et du contrôle d'injection d'eau.

Ces TP visent à développer des compétences scientifiques (électrochimie, thermodynamique, transferts) ainsi que des compétences techniques en instrumentation, acquisition de données, maintenance et diagnostic. Ils favorisent aussi l'adoption de méthodes de travail rigoureuses : sécurité en laboratoire, traçabilité des mesures, rédaction de comptes rendus scientifiques. À l'instar du banc PàC, le banc électrolyseur est encore en cours de montage. Les séances pédagogiques n'ayant pas encore débuté, aucun retour d'expérience ni résultat expérimental n'est disponible à ce jour. L'objectif est toutefois de proposer une plateforme évolutive, intégrant retours pédagogiques et ajustements techniques pour répondre aux besoins actuels et futurs de l'enseignement.

## **7. Conclusions**

Les parcours de formation et les bancs pédagogiques qui seront proposés sur le futur Technocampus Hydrogène Occitanie s'inscrivent pleinement dans une démarche de formation progressive, adaptée aux exigences industrielles. Ils offriront aux apprenants une compréhension approfondie des principes de fonctionnement des PàC et des électrolyseurs, tout en se familiarisant avec les réalités du monde industriel. Grâce à leur grande flexibilité pédagogique, ces bancs constituent ainsi des outils essentiels pour accompagner la montée en compétence des futurs acteurs du secteur, en leur proposant une approche concrète et immersive des technologies hydrogène.

## **8. Remerciements**

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence « ANR-22-CMAS-0018 ».

Les auteurs remercient les collègues A-M. Billet, H. Vergnes, N. LeSauze du LGC Toulouse et H. Schneider du LAPLACE pour leurs contributions.

## **Références**

- [1] Y. Pleshivtseva, M. Derevyannov, A. Pimenov, and A. Rapoport, "Comprehensive review of low carbon hydrogen projects towards the decarbonization pathway", *Int. Jour. of Hyd. En.*, Vol. 48, Issue 10, pp. 3703-3724, 2023.
- [2] Projet GENHYO, Génération Hydrogène Occitanie, visitée en Février 2025 : <https://www.univ-toulouse.fr/grands-programmes/genhyo-generation-hydrogene-occitanie>.
- [3] Technocampus Hydrogène Occitanie : L'Energie Verte au Cœur de l'Innovation, visitée en Février 2025, <https://www.laregion.fr/technocampus-hydrogene-occitanie>

- [4] M. Tognan, « Etude de dégradations des performances de Piles à Combustible PEM BT alimentées en H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> lors de campagnes d'endurance : du suivi de l'état de santé en opération à la modélisation du vieillissement ». Thèse INPT, 2018.
- [5] Livre Blanc France Hydrogène, « Compétences-métiers de la filière hydrogène – anticiper pour réussir le déploiement d'une industrie stratégique. », avril 2021
- [6] M. Grignon, « Méthodologies pour la modélisation des performances et du vieillissement des piles à combustible PEMBT avec des conditions opératoires variables et représentatives d'une application réelle », Thèse INPT, 2024.
- [7] John Coockerill, <https://hydrogen.johncockerill.com/fr/presse-et-actualites/actualites/electrolyseurs-alkalins-ou-pem-lequel-choisir/>, visitée en Février 2025
- [8] F. Parache, H. Schneider, C. Turpin, N. Richet, O. Debellemannière, E. Bru, A. Thao Thieu, C. Bertail, and C. Marot, "Impact of Power Converter Current Ripple on the Degradation of PEM Electrolyzer Performances", *Membranes*, 2022, 12 (2).

### Biographie des auteurs

**Maelie Heuls** est ingénieure d'étude à Toulouse INP-ENSEEIH et dans l'équipe GENESYS du laboratoire LAPLACE, chargée du développement des bancs pédagogiques sur les systèmes à hydrogène, dans le cadre du projet GENHYO.

**Thomas Jarry** a travaillé en tant qu'ingénieur de recherche à Toulouse INP-ENSEEIH et dans l'équipe GENESYS du laboratoire LAPLACE. Il intervenait au sein de la Plateforme Hydrogène de Toulouse sur la conception, la réalisation et la mise en application de bancs de test destinés à l'étude des piles à combustible.

**François Parache** est ingénieur de recherche à Toulouse INP-ENSEEIH et dans l'équipe GENESYS du laboratoire LAPLACE. Il intervient au sein de la Plateforme Hydrogène de Toulouse sur la conception, la réalisation et la mise en application de bancs de test destinés à l'étude des piles à combustible et des électrolyseurs.

**Antony Plait** est enseignant chercheur (CPJ) à Toulouse INP-ENSEEIH et au laboratoire LAPLACE. Il étudie le comportement des systèmes hydrogène énergie (notamment pile à combustible et électrolyseur), et travaille sur leur diagnostic.

**Eric Bru** est ingénieur d'essai à Toulouse INP-ENSEEIH dans l'équipe GENESYS du laboratoire LAPLACE. Il développe des bancs d'essais dédiés aux plasma à basse température pour le contrôle de la pollution et aux dispositifs d'hybridation dans les réseaux HVDC intégrant des moyens de stockage électrique dont les piles à combustible et les électrolyseurs.

**Olivier Rallieres** est ingénieur de recherche à Toulouse INP-ENSEEIH et dans l'équipe GENESYS du laboratoire LAPLACE. Il est le responsable technique de la Plateforme Hydrogène de Toulouse.

**Amine Jaafar** est Maître de conférences à Toulouse INP-ENSEEIH et au laboratoire LAPLACE. Il travaille sur la modélisation des performances et du vieillissement des piles à combustibles et l'intégration de la technologie hydrogène dans les systèmes énergétiques multi-sources.

**Bruno Sareni** est Professeur à Toulouse INP-ENSEEIH et responsable de l'équipe GENESYS du laboratoire LAPLACE. Dans le cadre du projet CMA GENHYO, il coordonne

les actions de Toulouse INP sur les activités de formation en lien avec l'hydrogène. Il est aussi membre du comité de pilotage et du conseil pédagogique du consortium.

**Christophe Turpin** est Directeur de recherche au CNRS, rattaché au laboratoire LAPLACE. Il est responsable des activités hydrogène du LAPLACE et responsable scientifique de la Plateforme Hydrogène de Toulouse. Il est le créateur et le porteur du nouveau centre d'essais Technocampus Hydrogène Occitanie. Il est spécialiste de la modélisation des performances et du vieillissement des piles à combustible et des électrolyseurs.