



HAL
open science

Développement d'un banc pédagogique pile à combustible dans le cadre du projet GENHYO

Maëlie Heuls, Thomas Jarry, François Parache, Antony Plait, Olivier Rallieres,
Bruno Sareni, Christophe Turpin

► **To cite this version:**

Maëlie Heuls, Thomas Jarry, François Parache, Antony Plait, Olivier Rallieres, et al.. Développement d'un banc pédagogique pile à combustible dans le cadre du projet GENHYO. Symposium de Génie Électrique SGE 2025, cnrs, ups, Jul 2025, Toulouse, France. <hal-05506464>

HAL Id: hal-05506464

<https://hal.science/hal-05506464v1>

Submitted on 12 Feb 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Développement d'un banc pédagogique pile à combustible dans le cadre du projet GENHYO

Maëlie HEULS ^a, Thomas JARRY ^a, François PARACHE ^a, Antony PLAÏT ^a, Olivier RALLIERES ^a,
Bruno SARENI ^a, Christophe TURPIN ^a

^aLAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse INP, Toulouse, France

RESUME - 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, monocellule, banc pédagogique, travaux pratiques.

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'ENSEEIH et l'ENSIACET, adossé au mastère spécialisé « Nouvelles Technologies de l'Énergie ». Son implication dans le projet GENHYO se traduit par le développement de bancs pédagogiques illustrant différentes briques technologiques de l'hydrogène (pile à combustible, électrolyseur, combustion, stockage...). Ces équipements seront déployés sur la plateforme pédagogique de 550 m² (sur les 9000 m²) du futur Technocampus Hydrogène Occitanie [3] dont le chantier a débuté en février 2025 (Fig. 1).



Fig. 1. Visuel 3D du Technocampus Hydrogène Occitanie.

La « Plateforme Hydrogène de Toulouse » opérée par le laboratoire LAPLACE (Unité Mixte de Recherche du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), de Toulouse INP et de l'Université Toulouse (UT)) 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.

Ce papier se concentrera sur le développement du banc pédagogique monocellule / petit stack pile à combustible, en abordant son dimensionnement en lien avec les besoins académiques et industriels.

2. TECHNOCAMPUS HYDROGENE 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 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 en privilégiant l'apprentissage pratique.

Reposant sur un modèle collaboratif, le Technocampus Hydrogène Occitanie rassemblera, en un lieu unique, des chercheurs, des industriels et des 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. Les briques technologiques représentées sur la plateforme pédagogique

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 avancée en termes de compétences que les dispositifs actuellement disponibles sur 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 hydrogène sous forme gazeuse, liquide ou solide,
- La combustion de l'hydrogène,
- La pile à combustible (PàC) pour la production d'électricité, voire la cogénération de chaleur,
- La pompe à chaleur,
- La micro-fluidique dans les systèmes à hydrogène
- L'hybridation avec des composants de stockage électrochimique (batterie/supercondensateurs).

Certains bancs exigent des installations spécifiques (notamment en termes de sécurité, de consommation en gaz et de maintenance) 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.

Il y sera principalement dispensé des enseignements de type travaux pratiques au sein de la plateforme pédagogique, 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. PRESENTATION DU PARCOURS DE FORMATION PILE A COMBUSTIBLE

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 favorisent 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 (à Membrane Echangeuse de Protons – Basse Température) occupe une place centrale (Fig. 2). L'objectif de ce parcours est d'illustrer le fonctionnement et les concepts clés associés à 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.

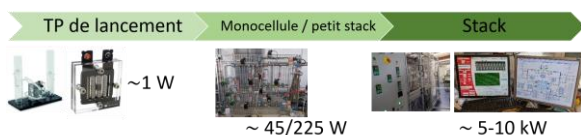


Fig. 2. Articulation des TP pile à combustible.

Le banc « TP de lancement » (puissance de l'ordre du watt) 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 la démystification de l'hydrogène : 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, il est déjà maîtrisé au sein de l'ENSEEIHIT depuis plus de 15 ans. Grâce à une charge active pilotable spécifiquement développée, il est possible de tracer des courbes de polarisation, de réaliser des spectroscopies d'impédance électrochimique (EIS) et, avec un GBF (générateur basse fréquence), d'émuler des convertisseurs statiques (par exemple un Buck ou un Boost).

La courbe de polarisation (Fig. 3) représente la tension en fonction du courant et met en évidence les différentes pertes : activation, ohmique et de concentration. Son analyse permet de sensibiliser les étudiants aux limites de fonctionnement, d'identifier les zones de dégradation et d'optimiser les conditions d'opération.

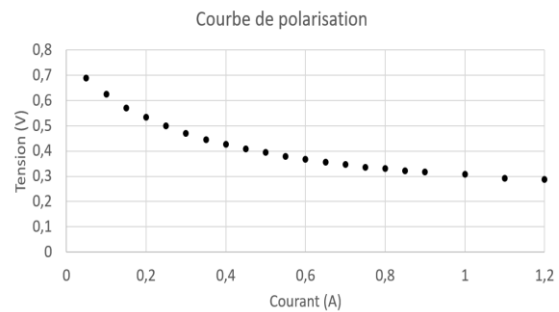


Fig. 3. Exemple de courbe de polarisation d'une PàC PEM-BT 16 cm² à cathode ouverte (prototype pédagogique)

L'EIS (Fig. 4) est une technique d'analyse permettant d'étudier le comportement interne des piles à combustible en réponse à des signaux électriques de différentes fréquences autour d'un point de fonctionnement (approche petits signaux). Elle permet de séparer les différentes résistances (ohmique, transfert de charge, diffusion) et d'identifier les phénomènes limitants. Réaliser des EIS offre un certain niveau de diagnostic non destructif, utile pour aller vers l'optimisation des performances, vers la détection de dysfonctionnements et vers l'amélioration de la durée de vie de la pile.

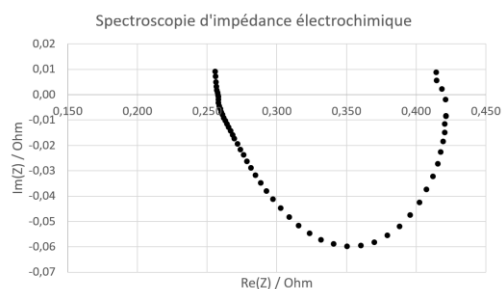


Fig. 4. Exemple de spectre d'impédance d'une PàC PEM-BT 16 cm² à cathode ouverte (prototype pédagogique)

D'un point de vue pédagogique, ce « TP de lancement » permet ainsi aux étudiants d'aborder des concepts fondamentaux

: (i) comprendre le principe de fonctionnement d'une PàC, (ii) comprendre la relation courant-tension d'une PàC et les interactions entre la PàC et la charge, (iii) identifier une partie des outils d'analyse et de diagnostic non destructif d'état de santé d'une PàC, le tout pouvant être étendu à l'électrolyseur (utilisé dans ce TP pour générer en continu l'hydrogène nécessaire à la PàC à respiration).

La seconde étape du parcours de formation pratique consiste 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 (≈ 100 W), ce banc permet 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 conception, il sera présenté plus en détail dans la suite de ce papier.

La dernière étape du parcours porte sur un banc de plus forte puissance (entre 5 et 10kW), 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. De plus, 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 la chaleur.

Chaque étape du parcours est complémentaire aux précédentes et conçoit 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 du niveau de complexité et des connaissances de l'hydrogène (débutant, intermédiaire, avancé).

4. CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DU BANC MONOCELLULE / PETIT STACK

4.1. Contexte

Une collaboration entre plusieurs enseignants chercheurs de différentes disciplines (procédés, génie électrique, matériaux...) issus des institutions partenaires (ENSEEIH, UT)

ENSIA CET, UT) a permis de définir les spécifications techniques et pédagogiques du banc.

4.2. Caractéristique 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 aussi manuel (au sens pilotage) que possible afin de pouvoir mieux appréhender chaque action réalisée. Il est également pensé pour être facilement copié et reconfiguré en fonction du budget disponible. Modulaire 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 repose sur un modèle de banc déjà existant sur la Plateforme Hydrogène de Toulouse nommé « LAP2 monocellule », destiné à fonctionner à température et pression fixes, avec simplement un asservissement des débits de gaz et d'eau (pour l'humidification des gaz) en fonction du courant de 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, offrant ainsi un contrôle plus proche d'un environnement industriel.

4.3. Dimensionnement

Le banc peut accueillir une PàC composée d'une à trois cellules ayant une surface active de 50 cm². Moyennant quelques réajustements, notamment au niveau de la gestion thermique de la pile, le banc pourrait recevoir jusqu'à 6 cellules. La densité de courant maximale a été fixée à 1,5 A/cm². Les composants ont été sélectionnés afin de pouvoir fonctionner sur la plus large gamme possible de densité de courant (exemple du calcul du débit H₂ en Eq.(1)).

$$Q_{H_2} = v \frac{N \cdot j \cdot S}{2F} \cdot M_{H_2} \quad (1)$$

avec Q_{H_2} le débit d'hydrogène [g/s], M la masse molaire [g/mol], v le rapport stœchiométrique [-], N le nombre de cellules [-], j la densité de courant [A/cm²], S la surface active [cm²] et F la constante de Faraday [C/mol].

Comme présenté sur la Fig. 4, le circuit fluide permet le contrôle des débits de gaz en entrée de la PàC soit via des régulateurs de débits (Mass Flow Controller, MFC) intégrant une vanne et un capteur de débit (Mass Flow Meter, MFM), soit via des Electrovanes Proportionnelles (EVP) ou des vannes micrométriques avec bascule du MFC en mode MFM. Ces deux

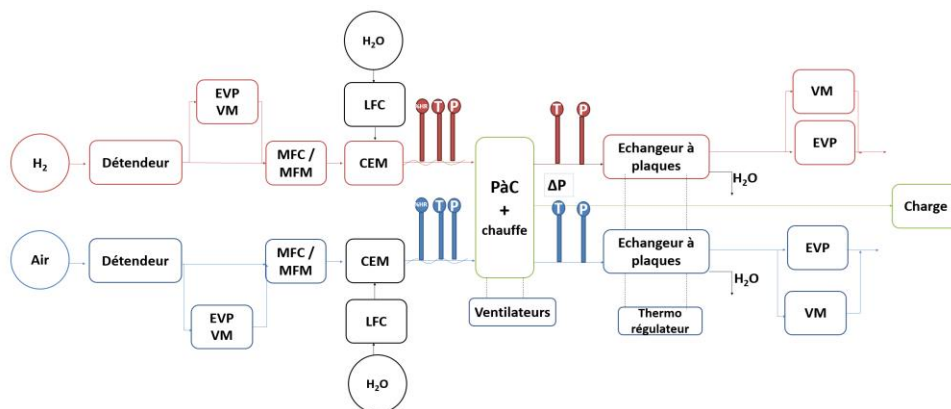


Fig. 4. Schéma de principe du banc monocellule/petit stack.

derniers composants permettent aux étudiants de piloter directement la régulation de débit à la place du MFC.

La pression de la PàC est régulée par le pourcentage d'ouverture des EVP situées en sortie de la PàC, bien que la sonde de pression soit positionnée à son entrée. Le dimensionnement des EVP repose sur la détermination de leur coefficient de débit K_v [m³/h], qui caractérise la capacité d'un fluide à circuler à travers la vanne en fonction de sa conception et de son ouverture (il représente le débit d'eau traversant la vanne avec une perte de charge de 1 bar à une température de 20 °C). Plus le K_v est élevé, plus la vanne permet un débit important pour une même ouverture. Pour dimensionner correctement une vanne, deux valeurs clés doivent être déterminées :

- K_{v_s} : valeur de K_v à pleine ouverture, correspondant au débit maximal pour une perte de charge minimale.
- $K_{v_{min}}$: valeur de K_v à la plus petite ouverture, généralement estimée à 10 % du K_{v_s} , associée au débit minimal avec une perte de charge maximale.

Ces valeurs permettent de sélectionner une vanne adaptée au profil de débit requis, sans la surdimensionner (qui entrainerait un contrôle instable) ou la sous-dimensionner (qui limiterait le débit disponible). Afin de pouvoir étudier des configurations d'une à trois cellules, la plage de débits à couvrir doit être large. Cela complique l'utilisation d'une unique EVP capable à la fois de fournir un débit élevé (K_{v_s}) et de maintenir un débit minimal avec une perte de charge maximale ($K_{v_{min}}$). Il est donc nécessaire d'opter pour un compromis lors du choix du K_{v_s} , de l'EVP afin qu'elle puisse se rapprocher autant que possible du $K_{v_{min}}$ requis pour la configuration monocellule. Une fois l'EVP sélectionnée et son coefficient de débit K_v , connu, il est possible d'effectuer le calcul inverse afin de déterminer la plage des densités de courant nécessaires pour couvrir les besoins de l'étude.

Si $P_{out} > \frac{P_{in}}{2}$

$$K_v = \frac{Q_{gaz}}{514} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot T}{\Delta P \cdot P_{out}}} \quad (2)$$

Sinon

$$K_v = \frac{Q_{gaz}}{257 \cdot P_1} \cdot \sqrt{\rho \cdot T} \quad (3)$$

Avec Q_{gaz} le débit gaz [m³/h], ρ la densité du gaz [kg/m³], T la température [K], P_{in} la pression d'entrée de la vanne [bar], P_{out} la contre-pression [bar], et $\Delta P = P_{out} - P_{in}$ la perte de charge [bar].

L'humidité des gaz est mesurée en amont de la PàC et régulée 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 assurent le chauffage et le mélange homogène de l'eau sous forme de vapeur avec le gaz porteur, afin d'assurer la consigne d'humidité relative souhaitée.

Le dimensionnement des LFC et CEM repose sur le calcul des débits d'eau nécessaires pour atteindre les limites inférieure et supérieure d'humidité relative définies pour le fonctionnement du banc d'essai. Ces valeurs sont obtenues à l'aide de l'équation (4), qui permet de déterminer les débits d'injection requis pour garantir le respect des consignes d'humidification dans toutes les conditions opérationnelles.

$$Q_{H_2O} = 6000 \cdot Q_{gaz} \cdot M_{H_2O} \cdot \frac{P_{atm}}{R \cdot T_0} \cdot \frac{P_w}{1000 \cdot (P_p - P_w)} \quad (4)$$

$$P_w = A \cdot 10^{\left(\frac{m \cdot T_p}{T_n + T_p}\right)} \cdot \frac{RH}{100}$$

avec Q_{H_2O} le débit d'eau [g/h], Q_{gaz} le débit de gaz [NL/min], P_w la pression de vapeur saturante [hPa], P_p la pression de process [bara], M_{H_2O} la masse molaire de l'eau [g/mol], P_{atm} la pression atmosphérique [bar], R la constante des gaz parfaits [J/mol/K], $T_0 = 273,15$ la température normale [K], T_p la température de process [°C], RH l'humidité relative [%], et $A = 6,09$ hPa, $m = 7,34$ ainsi que $T_n = 230,39$ °C des constantes empiriques identifiées par Bronkhorst (fournisseur du CEM).

La température des gaz humidifiés est maintenue constante jusqu'à l'entrée de la PàC à l'aide de résistances chauffantes. La température interne de la PàC est quant à elle régulée par une combinaison de résistances chauffantes et de ventilateurs. 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.

Le contrôle du courant est assuré par une charge électrique pilotable, soit en réglage direct pour travailler en point fixe, soit via un pilotage externe pour imposer des profils dynamiques de missions en vue de réaliser des caractérisations.

Dans une approche pédagogique, l'objectif principal n'est pas la recherche de performance maximale mais l'exploration d'un large éventail de conditions de fonctionnement, permettant l'étude de cas variés et représentatifs. Lorsque cela était possible, les composants ont été sélectionnés de manière à permettre l'investigation du point de fonctionnement optimal tout en conservant un accès aux régimes de fonctionnement les plus faibles. Cependant, dans le cas où l'atteinte du point optimal limitait excessivement l'accès aux régimes bas, un compromis a été fait. Un point de fonctionnement supérieur, légèrement moins performant, a alors été privilégié, car il offrait une plage d'étude plus étendue et mieux adaptée à l'objectif exploratoire.

Un autre objectif est de garantir un fonctionnement efficace en configuration monocellule tout en accédant à des points de fonctionnement similaires en configuration trois cellules, sans avoir à remplacer des composants. Certains éléments, tels que les MFM, ont permis de couvrir l'ensemble de la plage de fonctionnement pour les configurations à une et trois cellules. En revanche, d'autres composants s'avèrent limitants pour l'exploration de certaines zones du domaine opérationnel. Au-delà de trois cellules, le remplacement de certains éléments critiques devient indispensable, notamment les EVP ou le système de régulation thermique (thermorégulateur), afin de garantir des performances et une stabilité suffisante. Une fois les composants sélectionnés, il est pertinent de réaliser un mappage croisé des plages de courant accessibles, en tenant compte à la fois du côté anode et du côté cathode, et des limites imposées par les différents composants. Cette cartographie permet d'identifier les zones pleinement exploitables du domaine opérationnel et d'anticiper les éventuels ajustements nécessaires lors du passage à d'autres configurations.

Un exemple de mappage croisé est illustré en figure 5, illustrant la plage de pression en fonction de la densité de courant réellement accessible, en tenant compte des limitations imposées par plusieurs composants : EVP pression, LFC débit d'eau coté

● LFC ● EVP pression
 50% HR – 80°C
 1 cellule vs 3 cellules

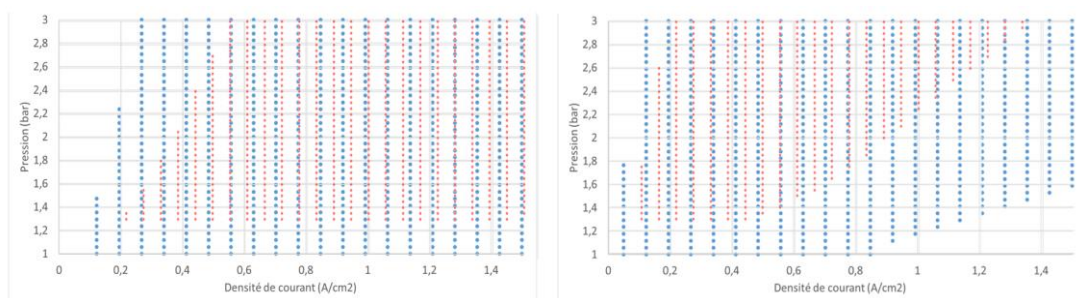


Fig. 5. Plage de pression en fonction de la densité de courant, à 50% humidité et 80°C pour 1 cellule à gauche et 3 cellules à droite

anode et côté cathode. Ce mappage est réalisé à température et humidité relative fixe pour les 2 configurations, à savoir, une cellule (à gauche) et trois cellules (à droite). La zone d'étude effective est représentée par l'intersection des domaines accessibles (zones bleues et rouges superposées). Lors de la comparaison 1 cellule / 3 cellules, il peut être observé que la zone d'intersection se réduit significativement, limitant davantage l'étendue expérimentale disponible.

4.4. Régulation et asservissement

Plusieurs modes de contrôle seront proposés, permettant de passer d'un mode manuel à un mode asservissement (régulateur de type WEST avec consigne interne ou externe). Une supervision par IHM sera également disponible, offrant un environnement proche de celui de l'industrie.

- Mode « manuel » : pilotage direct par des vannes micrométriques pour le réglage des débits et des pressions. Ce mode met en évidence les interactions entre variables ainsi que la sensibilité des réglages manuels.
- Mode « réglage manuel des consignes via régulateurs » : pilotage manuel local par des régulateurs de type WEST pour maintenir des points fixes de débits, pression et température par la boucle PID interne de chaque régulateur.
- Mode « mixte : manuel et asservissement » : pilotage manuel et local par des régulateurs de type WEST des températures et des pressions tandis que les débits de gaz et d'eau sont asservis à une consigne de courant. Ce mode permet la mise en œuvre de profils de mission dynamique et la réalisation de caractérisations transitoires. Ce mode permet de conserver un compromis entre automatisation et contrôle pédagogique
- Mode supervisé : pilotage par ordinateur via une IHM (Interface Homme Machine) pour travailler en point fixe ou en asservissement complexe, offrant une configuration proche d'un environnement industriel.

Le système de supervision retenu repose sur l'architecture compactRIO (cRIO) de National Instruments, associée au logiciel LabVIEW. Cette solution, largement répandue et éprouvée dans les environnements académiques et industriels, offre une grande modularité grâce à l'ajout de cartes d'extension, facilitant ainsi l'évolution du banc. Ce choix s'appuie également sur la maîtrise de cette technologie par la Plateforme Hydrogène de Toulouse, ce qui favorise l'harmonisation entre les bancs de recherche et les bancs pédagogiques. Une interface de supervision spécifique sera développée pour répondre aux

usages pédagogiques, avec une ergonomie simplifiée et des fonctionnalités dédiées aux travaux pratiques, permettant un accès encadré à l'environnement de commande.

Concernant la régulation de pression, elle a été conçue pour offrir une flexibilité maximale. Un commutateur permet de basculer le pilotage de l'EVP entre le PID interne des régulateurs WEST, un PID développé sur le cRIO, ou encore un PID externe tel qu'un automate programmable. Cette architecture permet l'intégration sécurisée de portions de code personnalisées, accessibles aux étudiants selon leur niveau de formation, tout en préservant l'intégrité du système global. L'acquisition en temps réel et l'enregistrement des données expérimentales seront assurés par le cRIO, garantissant la traçabilité, l'analyse post-expérimentation et la compatibilité avec l'environnement de supervision.

4.5. Sécurité

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 assureront les mesures, certaines étant dédiées à la sécurité. Un automate dédié assura la surveillance des pressions, températures, courant et tension, déclenchant un arrêt de sécurité si nécessaire. En cas d'anomalie, le système coupera notamment l'alimentation électrique de puissance de la pile et activera un inertage de la pile à l'azote via des réservoirs dédiés.

Le schéma électrique a été conçu pour isoler les circuits devant rester alimentés même en cas d'arrêt d'urgence ou de déclenchement d'un dispositif de sécurité, garantissant ainsi la continuité de fonctionnement des sous-systèmes critiques (surveillance, inertage, acquisition). Le changement de session, correspondant à un changement de mode opératoire, impliquera un arrêt contrôlé du système, permettant de réinitialiser l'environnement de test de manière sécurisée. Chaque session active est associée à des niveaux de seuils d'alerte différenciés et peut restreindre l'accès à certaines fonctions ou zones sensibles du banc. Cette logique vise à éviter les variations brutales de consigne, à préserver l'intégrité des composants et à garantir la stabilité des essais.

4.6. Expérimentations réalisables

Les travaux pratiques proposés pourront être choisis « à la carte » et s'adapteront aux niveaux de formation et aux objectifs pédagogiques visés. Plusieurs thématiques pourront ainsi être explorées, permettant une utilisation aussi bien dans un cadre d'initiation (niveau bac à bac+3) que dans un cadre d'approfondissement pour des étudiants en master ou en 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 autres dispositifs utilisés pour surveiller et sécuriser le banc, leur implantation et les méthodes de maintenance et d'étalonnage. Savoir mettre en œuvre des stratégies de sécurité adaptées et des procédures d'arrêt d'urgence. Comprendre et appliquer les consignes de sécurité. Savoir détecter des fuites.
- Modes de contrôle et asservissement : Exploration de plusieurs modes de contrôle, allant d'un pilotage manuel des actionneurs par consigne locale à un mode asservi (régulateur de type WEST avec consigne interne ou externe). Une IHM sera également disponible (similaire à l'industrie).
- 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 : Etude 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.
- Caractérisations statique et dynamique des propriétés et performances électrochimiques : analyse des courbes de polarisation, mesure d'impédance, balayage basse fréquence et voltammétrie cyclique.
- Gestion et optimisation des performances de la PàC : élaboration d'un plan d'expériences, optimisation des paramètres clés (température, pression, humidité...), 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 différentes études précédemment citées et pourront être complétés (*a posteriori*) par l'ajout de modules spécifiques. Cette modularité permettra d'adapter et d'enrichir progressivement les travaux pratique dispensés.

Certains TPs permettront une première approche des systèmes à hydrogène pour acquérir des compétences transversales : lecture de plans d'installation fluidique et électrique, reconnaissance et fonctionnement des composants (électrovannes, capteurs, détendeurs...), maîtrise des procédures de sécurité, de mise en gaz et d'arrêt d'urgence, mise en œuvre d'un protocole expérimental simple. Tandis que d'autres TPs permettront d'acquérir des compétences spécifiques au domaine des PàC : identifier et agir sur les paramètres de gestion et de contrôle en fonctionnement d'une PàC, identifier les outils de diagnostic, l'analyse des indicateurs pertinents et l'évaluation de l'état de santé de la PàC. Enfin, pourront être dispensés des TPs destinés à un public plus avancé et spécialisé et permettront aux apprenants d'acquérir des compétences techniques ciblées en maintenance, instrumentation, modélisation de systèmes dynamiques, régulation, métrologie, etc.

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

À ce jour, le banc est encore en phase de conception et de montage. Les enseignements associés n'ont pas encore débuté, ce qui signifie qu'aucun retour d'expérience ni résultat expérimental n'est encore disponible. L'objectif est cependant de construire une base solide et évolutive, qui pourra être enrichie au fur et à mesure de l'appropriation du dispositif par les équipes pédagogiques et les étudiants.

5. CONCLUSIONS

Le développement de ce banc pédagogique s'inscrit pleinement dans une démarche de formation progressive et adaptée aux besoins industriels. Positionné comme un intermédiaire entre le banc de lancement très sécurisé mais peu représentatif et les systèmes de plus forte puissance, moins accessibles, il permet aux apprenants d'acquérir une compréhension approfondie des principes de fonctionnement d'une pile à combustible tout en se rapprochant des réalités industrielles. Grâce à sa grande flexibilité pédagogique, il constitue ainsi un outil essentiel pour accompagner la montée en compétence des futurs acteurs du secteur, en leur offrant une approche concrète et immersive des technologies hydrogène.

6. 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, A. Jaafar du LAPLACE pour leur contribution.

7. REFERENCES

- [1] Y. Pleshivtseva, M. Derevyanov, A. Pimenov, and A. Rapoport, "Comprehensive review of low carbon hydrogen projects towards the decarbonization pathway", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, Issue 10, pp3703-3724, 2023.
- [2] Projet GENHYO, Génération Hydrogène Occitanie, visited on February 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_2/O_2 lors de campagnes d'endurance : du suivi de l'état de santé en opération à la modélisation du vieillissement ». Institut National Polytechnique de Toulouse - 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 », Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2024.
- [7] John Cockerill, <https://hydrogen.johncockerill.com/fr/presse-et-actualites/actualites/electrolyseurs-alkalins-ou-pem-lequel-choisir/>, visitée en Février 2025
- [8] F. Parache et al., "Impact of Power Converter Current Ripple on the Degradation of PEM Electrolyzer Performances", *Membranes*, 2022, 12 (2).