

Assemblage de cellules PEM-BT et essais expérimentaux de reproductibilité

Gautier CAPDEVILLE^{1,2}, Amine JAAFAR¹, Fabien LACRESSONNIÈRE¹, Christophe TURPIN¹, Thomas JARRY¹, Emilie SOYEZ¹, Pierre HENRARD², Paul KRECZANIK²

¹ Université de Toulouse ; LAPLACE, CNRS, INPT, UT ; LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie) ; ENSEEIHT, 2 rue Charles Camichel, BP 7122, F-31071 Toulouse cedex 7, France.

² IRT Saint Exupéry, CS34436, 3 Rue Tarfaya, 31400 Toulouse

RESUME – Une méthodologie pour effectuer un Assemblage Membrane-Electrodes (AME) de type PEM-BT (Proton Exchange Membrane – Basse Température) intégré en boîtier monocellule est présentée et testée dans cette étude. Des essais de caractérisation (courbe de polarisation, spectroscopie d'impédance) ont été ensuite réalisés afin d'évaluer la qualité de la procédure proposée et les performances de l'AME sélectionné. La reproductibilité des performances est un critère important dans notre cas. La validation de la méthodologie d'assemblage d'un AME et de son intégration en boîtier monocellule permettra par la suite de tester l'endurance de différents AME lors d'essais de vieillissement sous ondulations de courant et à courant constant. Les travaux présentés dans cet article ont été réalisés dans le cadre du projet HEMOWHY (HEavy Mobility With HYdrogen).

Mots-clés— Assemblage membrane-électrodes AME, pile à combustible PEM, reproductibilité, ondulations de courant

1. INTRODUCTION

Dans un contexte de réchauffement climatique, de nouvelles solutions de mobilités électriques à base de piles à combustible (PAC) voient le jour. L'énergie électrique produite par la PAC est transmise aux consommateurs au travers d'un convertisseur statique qui impose à la PAC des harmoniques de courant haute fréquence qui peuvent entraîner son vieillissement accéléré. Des travaux menés au sein du Laboratoire LAPLACE ont pu mettre en évidence l'aptitude du condensateur équivalent de double couche d'une PAC à membrane échangeuse de protons basse température (PEM-BT) à filtrer les harmoniques de courant haute fréquence [1][2]. D'autres travaux scientifiques [3][5] ont montré une accentuation du vieillissement d'une PAC sous l'effet d'harmoniques de courant HF alors que les auteurs de [4] sont mitigés et ceux de [6] n'ont pas relevé d'impacts significatifs. De nouveaux essais expérimentaux doivent être menés en utilisant plusieurs boîtiers monocellules ou stacks afin d'avoir un effet statistique plus grand, de permettre l'investigation de plusieurs fréquences d'ondulations de courant, de réaliser des campagnes de vieillissement plus longues et d'étudier l'influence du dosage de platine et de l'épaisseur de la membrane sur ce vieillissement sous ondulations de courant.

Afin d'étudier finement le vieillissement de monocellules soumises à des ondulations de courant et d'établir une comparaison d'AME, l'assemblage doit être parfaitement maîtrisé et les performances doivent être reproductibles. Ainsi dans le cadre du projet HEMOWHY, des investigations sur des méthodologies d'assemblage d'un AME et de son intégration au sein d'un boîtier monocellule ont été menées, notamment afin de confirmer l'importance de la maîtrise du taux de compression de

la GDL comme cela est systématiquement affirmé dans la littérature [7].

Dans une première partie, la méthodologie pour assembler un AME et l'intégrer au sein d'un boîtier monocellule sera tout d'abord traitée. Sa mise en œuvre sera ensuite illustrée. Dans une deuxième partie, les résultats des essais de caractérisation seront présentés afin d'analyser la robustesse de la méthode d'assemblage d'un AME. Enfin, la reproductibilité des performances obtenues sera discutée au travers de l'analyse d'un essai de rodage d'un AME assemblé par nos soins et intégré au sein d'un boîtier monocellule.

2. PROCEDURE D'ASSEMBLAGE ET D'INTEGRATION D'UN AME AU SEIN D'UN BOITIER MONOCELLULE

2.1. Méthodologies évaluées

Comme le montrent les figures 1 et 2, une monocellule est constituée de plusieurs éléments jouant chacune un rôle. Les premiers travaux d'assemblage d'un AME et son intégration au sein d'un boîtier monocellule ont conduit à la réalisation d'un premier design d'assemblage (voir figure 1.a) utilisant une cale en téflon avec une épaisseur qui permet de garantir le bon taux de compression de la couche de diffusion des gaz (GDL). Dans la littérature, des travaux montrent qu'un taux de compression idéal des GDL se situe entre 15 et 30 % [11] de leur épaisseur initiale et que la pression idéale appliquée sur la GDL est de 1,55 MPa [12]. Le joint (gasket) en silicone garantit l'étanchéité.

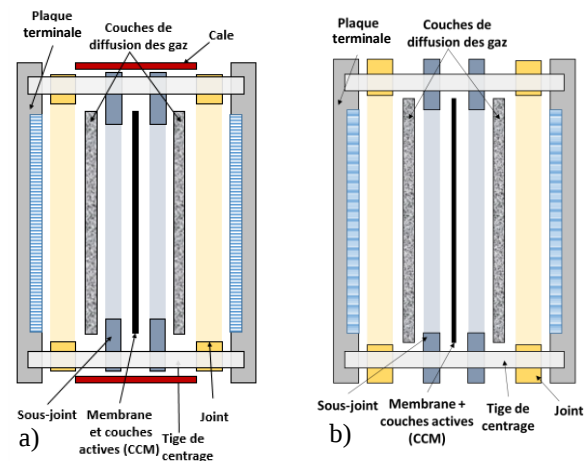


Fig. 1. Architecture d'une monocellule assemblée en vue de côté selon la 1^{ère} méthode d'assemblage (a) et suivant la 2^{ème} méthode d'assemblage (b)

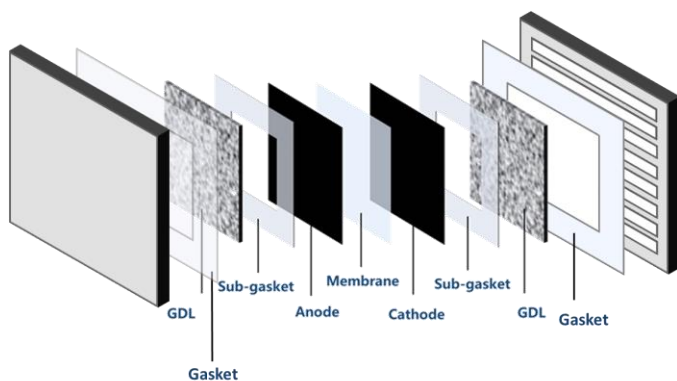


Fig. 2. Vue éclatée d'une cellule PEM-BT à assembler (deuxième méthode d'assemblage)

Les sous-joints (subgaskets) délimitent la surface active. Les couches actives ou catalytiques sont chargées d'un certain taux de catalyseur (CCM). Un processus d'amélioration continue de la méthode d'assemblage a conduit au design d'assemblage présenté sur la figure 1.b. Sur ce design, c'est le joint (gasket) qui fait à la fois office de cale pour assurer le bon taux de compression de la GDL et qui garantit également l'étanchéité du montage final dans le boîtier. Les joints et sous-joints ont été élargis jusqu'au rebord des plaques terminales diminuant ainsi les risques de fuites de gaz. Par ailleurs, le joint présent dans la deuxième méthode d'assemblage est en téflon (matériau incompressible) facilitant ainsi la compression de la GDL au taux désiré. Des essais de fuites menés avec des joints en téflon ont permis de conclure quant à l'efficacité de ce matériau à assurer l'étanchéité du montage. Enfin le recouvrement entre la GDL et le sous-joint a été déporté à l'extérieur de la zone d'écoulement des gaz (dans la plaque terminale) sur la deuxième méthode d'assemblage afin d'éviter toute obstruction des canaux d'écoulement des gaz.

L'assemblage commence par le choix des épaisseurs de cale et/ou joints pour comprimer la GDL au taux souhaité. Ensuite les couches (GDLs, CCM, joints et sous-joints) sont découpées une première fois à la main avec un scalpel sous la forme d'un carré légèrement plus large que la forme finale à découper (voir figure 2.a).

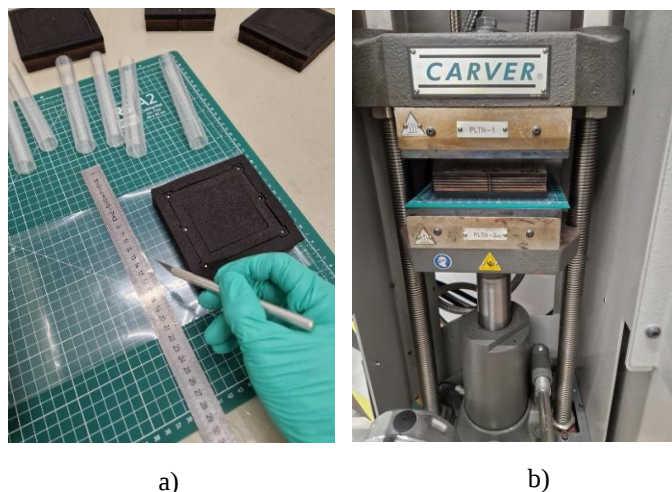


Fig. 2. Découpe au scalpel d'un carré large de sous-joint (a) et découpe d'un sous-joint à l'aide d'un emporte-pièces et sous presse (b)

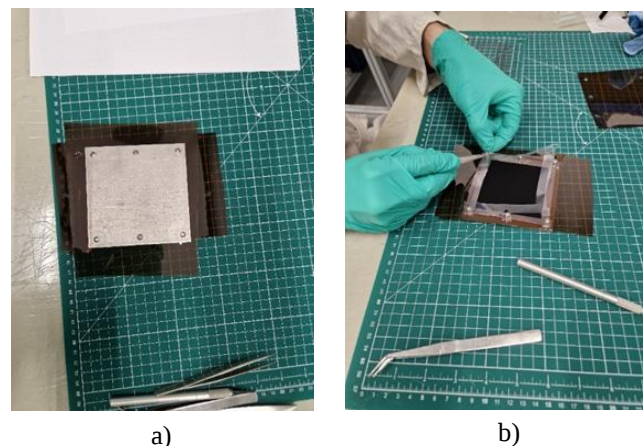
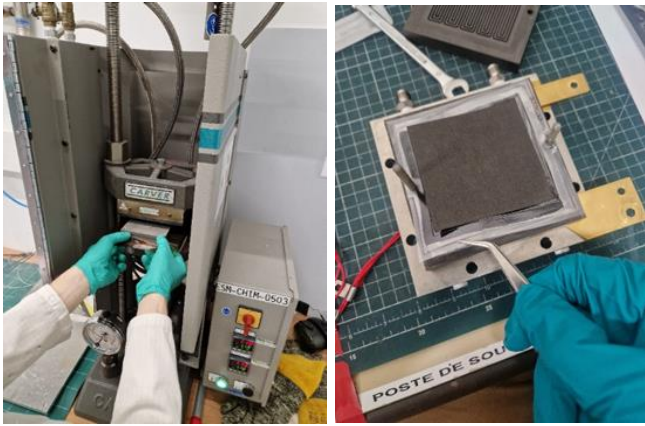


Fig. 3. Positionnement des sous-joints (a) et découpe d'un sous-joint à l'aide d'un emporte-pièce et sous presse (b)

La découpe finale a lieu sous presse à froid au moyen d'un emporte-pièce (voir figure 3.b) constitué d'une lame coupante et d'une mousse servant à éjecter la matière découpée. Toutes les couches découpées et/ou polymérisées sont stockées dans des sachets hermétiques pour éviter toute contamination.

Des plaques support d'assemblage ont pu être dessinées puis usinées pour guider précisément le positionnement des sous-joints et de la CCM devant être polymérisés. En effet, la plaque support inférieure présente des tiges d'assemblage qui servent à insérer les sous-joints à travers leurs trous d'assemblage. Cette étape de positionnement des sous-joints et de la membrane débute par la mise en place d'une feuille de papier Kapton pour protéger le sous-joint et la membrane d'un contact direct avec la plaque support inférieure. Cela permet d'une part, de ne pas polluer la CCM et d'autre part, de retirer l'assemblage des plaques support plus facilement une fois polymérisé. Ensuite un sous-joint est positionné grâce aux tiges d'assemblage et la CCM est minutieusement placée au centre ; un recouvrement de 2 mm est prévu sur chaque côté entre la membrane et le sous-joint. Puis un deuxième sous-joint est positionné au-dessus (voir figure 3.a). Une attention particulière est portée au centrage de la CCM. Une deuxième feuille de papier Kapton vient recouvrir l'ensemble. La plaque support d'assemblage supérieure est finalement insérée dans la plaque support d'assemblage inférieure au moyen des tiges d'assemblage (voir figure 3.b).

Une étape de polymérisation à chaud sous presse d'une durée de 30 secondes, à 110 °C avec une pression exercée de 2 MPa sur les plaques est ensuite réalisée (voir figure 4.a). La température choisie reste sous la limite de dégradation thermique des membranes (souvent entre 110 °C et 130 °C) mais elle est suffisante pour activer la polymérisation des colles thermodurcissables. Pour finir toutes les couches découpées et/ou polymérisées sont assemblées très précautionneusement dans le boîtier final et l'opérateur veille à leur bon alignement (voir figure 4.b) en s'aidant de tiges de centrage. Les couches de diffusion des gaz (GDLs) comportent un côté macroporeux à positionner au contact de l'alimentation directe des gaz actifs et un côté microporeux qui doit être en contact avec la couche catalytique correspondante de la CCM.



a)

b)

Fig. 4. Positionnement des plaques support d'assemblage dans la presse thermique pour polymérisation des sous-joints et de la CCM (a) et assemblage final de toutes les couches découpées dans le boîtier (b)

2.2. Mise en œuvre de la procédure retenue

Les AME sont réalisés à partir de matériels commercialisés et approvisionnés par la société Hynology. La nomenclature des AME Hynology que nous avons utilisée est la suivante : AME T6 assemblée à partir des différentes couches découpées au laboratoire ou T6-H assemblée à partir de couches prédécoupées avant réception et déjà assemblées (GDLs + subgaskets + CCM). Comme explicité dans la première partie, une première méthode d'assemblage a consisté à utiliser un joint en silicone pour garantir l'étanchéité du montage ainsi qu'une cale en téflon pour garantir la bonne compression de la GDL. Puis une deuxième méthode d'assemblage a consisté à utiliser seulement un joint en téflon pour garantir l'étanchéité et faire office de cale.

Plusieurs épaisseurs de joint ont été testées pour analyser l'influence de ce paramètre sur l'évolution de la tension lors du rodage et sur les performances caractérisées après rodage. Dans la communauté qui s'intéresse aux AME, il est usuel de mettre en œuvre des essais au papier Fuji afin d'investiguer l'homogénéité et l'intensité de la compression de la GDL. Une gamme de pression souhaitable à appliquer sur la GDL se situe entre 1 MPa et 3 MPa.

Dans une démarche d'amélioration continue du processus d'assemblage, nous avons nous-mêmes réalisé des tests au papier Fuji LLW (gamme de pression entre 0,5 et 2,5 MPa). Des essais préliminaires réalisés au papier Fuji ont convergé vers une valeur optimale du couple de serrage du boîtier d'assemblage de 10 N.m. En dessous de 10 N.m, la pression appliquée est hétérogène sur le joint ; or celui-ci doit être entièrement sous pression pour garantir le bon taux de compression de la GDL. Le principe des essais au papier Fuji est décrit sur la figure 5. Il consiste à utiliser deux feuilles distinctes de papier Fuji disposées l'une sur l'autre ; lors de la compression du boîtier, une couleur rouge se forme sur une des feuilles indiquant l'intensité de la compression grâce à une lecture d'abaques. Comme le montre la figure 5, les feuilles de papier Fuji ont été positionnées au centre sur la CCM et les sous-joints. Les résultats avec ou sans CCM ont montré peu de différence, il a été donc décidé de garder la CCM lors des essais au papier Fuji présentés plus loin.

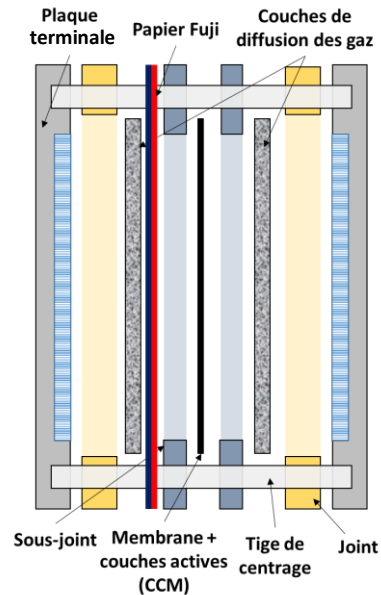


Fig. 5. Architecture d'une monocellule assemblée avec présence des deux couches de papier Fuji

Les principaux résultats des essais au papier Fuji ayant permis de déterminer l'épaisseur idéale de joint à utiliser pour appliquer une pression idéale sur la GDL sont présentés sur la figure 6.

Le tableau I présente, pour chaque cellule, les informations sur les épaisseurs de joint utilisées, les taux de compression théoriques de la GDL et la pression réellement appliquée à la GDL et confirmée lors des essais au papier Fuji.

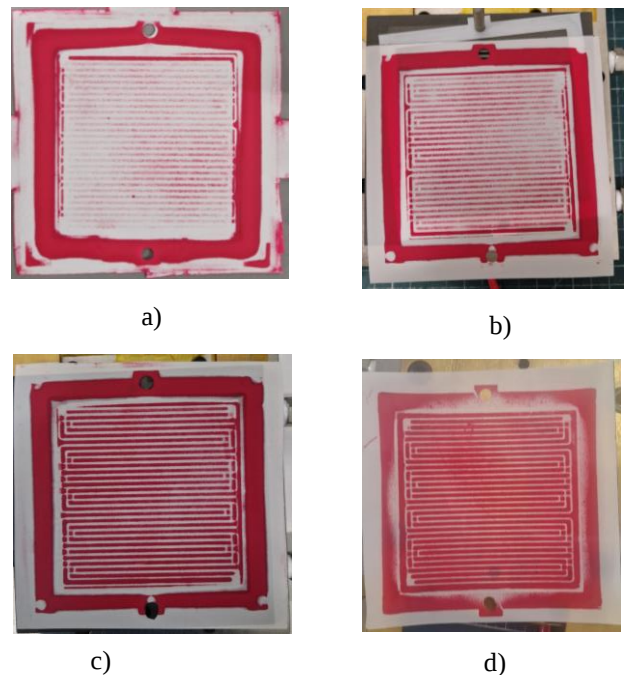


Fig. 6. Résultats des essais au papier Fuji avec des épaisseurs de joint respectives pour a), b), c) et d) de 0,25 mm, 0,20 mm, 0,18 mm et 0,15 mm

TABLEAU I. PARAMETRES MECANQUES DES AME ASSEMBLES

AME	Epaisseur du joint (mm)	Compression de l'épaisseur de la GDL (%)	Pression appliquée sur la GDL (Mpa)
T6-02	0,25	GDL peu comprimée (proche de 0 %)	$0 < P < 1$
T6-03	0,25	GDL peu comprimée (proche de 0 %)	$0 < P < 1$
T6-04	0,25	GDL peu comprimée (proche de 0 %)	$0 < P < 1$
T6-H3	0,25	GDL peu comprimée (proche de 0 %)	$0 < P < 1$
T6-H4	0,25	GDL peu comprimée (proche de 0 %)	$0 < P < 1$
T6-06	0,15	28	$P > 3$
T6-10	0,18	18	$P > 2,5$
T6-11	0,15	28	$P > 3$
T6-12	0,2	8	$P = 2$

Les résultats obtenus montrent que l'épaisseur de joint de 0,25 mm conduit à une faible pression appliquée sur la GDL ; cette dernière se situe en dessous de 1 MPa. Les joints de 0,18 mm et 0,15 mm engendrent une trop forte pression appliquée sur la GDL (les canaux sont marqués en rouge vif sur le papier Fuji). Finalement, c'est le joint de 0,20 mm qui permet d'appliquer une pression de 2MPa, cette valeur étant recommandée par le fabricant Freudenberg de la GDL. Les recommandations données par Hynology indiquent que la GDL doit être comprimée de 20 %, c'est-à-dire à une épaisseur comprimée située entre 180 et 200 μm . Les spécifications du fabricant donnent des épaisseurs comprimées pour des pressions appliquées de 0,025 MPa et 1 MPa de respectivement 250 μm et de 210 μm . Il est donc nécessaire d'appliquer une pression supérieure à 1 MPa mais inférieure à 3 MPa sinon la GDL sera trop comprimée. Sur la base de ces critères, il a été décidé de réaliser les essais de validation de l'assemblage des cellules avec une épaisseur de joint de 0,20 mm, seule épaisseur permettant d'obtenir une pression dans la gamme préconisée par le fabricant et dont les tests avec le papier Fuji semblent concluants.

3. ESSAIS DE QUALIFICATION ET D'EXPLORATION

Les AME présentés dans la suite, qu'ils soient déjà réalisés ou à réaliser (couches fournies séparément), sont ceux approvisionnés auprès de la société Hynology. Avant de mettre en œuvre notre campagne d'essais de vieillissement, il est nécessaire de vérifier la reproductibilité des performances de ces AME. Le lot d'AME testé est constitué d'assemblages effectués à l'IRT Saint Exupéry et d'assemblages effectués par Hynology. Les performances des AME assemblés par Hynology constituent une référence pour comparer les méthodes d'assemblage proposées dans cette étude. Ces AME ont été rodés et caractérisés au laboratoire LAPLACE sur un banc dédié aux essais avec des boîtiers monocellules. Les conditions opératoires telles que la température de la cellule (T_{pac}), les pressions d'hydrogène à l'anode (P_{anode}) et d'air à la cathode ($P_{cathode}$), les humidités relatives d'hydrogène (HR_{H_2}) et d'air (HR_{AIR}), et les coefficients de sur-stœchiométrie côté hydrogène (λ_{H_2}) et côté air (λ_{AIR}) sont donnés dans le tableau II.

TABLEAU II. CONDITIONS OPERATOIRES (COP) DE RODAGE ET CARACTERISATION DES DIFFERENTES AME

Conditions opératoires	COP de rodage	COP de caractérisation
T_{pac} (°C)	70	80
P_{anode} (bara)	2	2
$P_{cathode}$ (bara)	2	2
HR_{AIR}	50 %	50 %
HR_{H_2}	0 %	50 %
λ_{AIR}	2	2
λ_{H_2}	1,1	1,5

La densité de courant imposée lors du rodage des AME est choisie pour obtenir une tension de cellule de 0,6 V en début de rodage. Les phases de rodage ont duré entre 3 et 5 h sachant que la fin du rodage est déterminée par l'apparition d'une tension stable. A la suite du rodage, une phase de caractérisation est réalisée. Elle est composée d'une mesure de la courbe de polarisation et d'une spectroscopie d'impédance (EIS).

3.1. Résultats obtenus vus de la courbe de polarisation

Les mesures des courbes de polarisation sont représentées sur la figure 7.

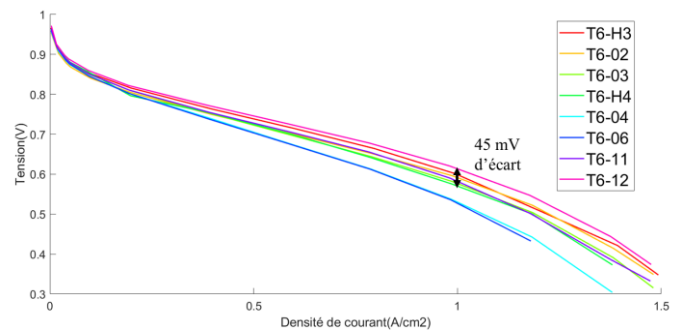
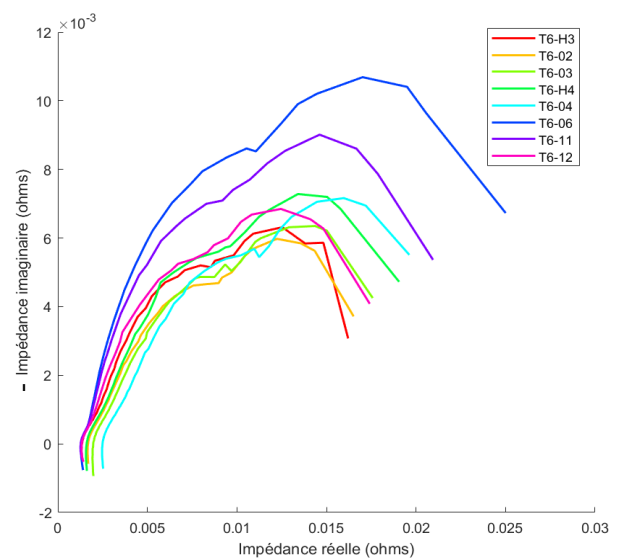


Fig. 7. Courbes de polarisation des AME au sein du boîtier monocellule

Fig. 8. Spectres d'impédance (EIS) mesurés pour 1,2 A.cm⁻² (fréquences balayées de 20kHz à 1 Hz de manière décroissante)

La figure 7 montre des écarts sur la courbe de polarisation pour l'ensemble des AME. Les AME T6-04 et T6-06 nettement en dessous des autres. L'écart absolu en tension pour une densité de courant de 1 A.cm^{-2} entre les AME T6-12 et T6-H4 est de 45 mV. Généralement, la durée de vie d'une cellule au sein d'un stack est estimée en faisant l'hypothèse que sa tension chute de 10 % par rapport à sa valeur initiale pour un courant constant [13]. Ainsi pour une tension initiale de 0,6 V, la cellule doit perdre 60 mV pour qu'elle atteigne sa fin de vie. Or l'écart maximal absolu en tension observé sur la figure 7 (45 mV) correspond déjà à 75 % du critère de fin de vie de la cellule, ce qui est trop important pour réaliser une étude de vieillissement approfondie sur ces AME. Par ailleurs les résultats sur les courbes de polarisation mettent aussi en évidence une disparité de performances en fonction de la compression de la GDL. Ainsi le joint de plus fine épaisseur (0,15 mm) donne lieu aux moins bonnes performances et d'autant plus aux plus fortes densités de courant, tandis que le joint d'épaisseur intermédiaire (0,2 mm) donne lieu aux meilleures performances pour toutes les densités de courant. De plus les performances des AME assemblés par nos soins ou déjà assemblés par Hynology sont dans la même gamme de performances, ce qui est un bon point du point de vue de la procédure d'assemblage qui a été proposée.

3.2. Résultats obtenus vus des spectres d'impédance

Les résultats sur les spectres d'impédance (figure 8) présentent également une disparité sur la dynamique des phénomènes diffusifs et sur la résistance haute fréquence, ce qui est en concordance avec d'autres études [14] [15]. En effet, nous constatons que la largeur de l'arc à basse fréquence (image de la résistance de diffusion) augmente lorsque la compression de la GDL est importante, c'est le cas pour les AME T6-06 et T6-11 (tableau 1). Pour les autres AME comportant des joints d'épaisseur plus importante (0,2 mm ou 0,25 mm), la largeur du de l'arc à basse fréquence varie peu. La valeur de la résistance haute fréquence identifiée à l'intersection de l'axe de la partie réelle a tendance à diminuer lorsque la pression appliquée sur la GDL augmente.

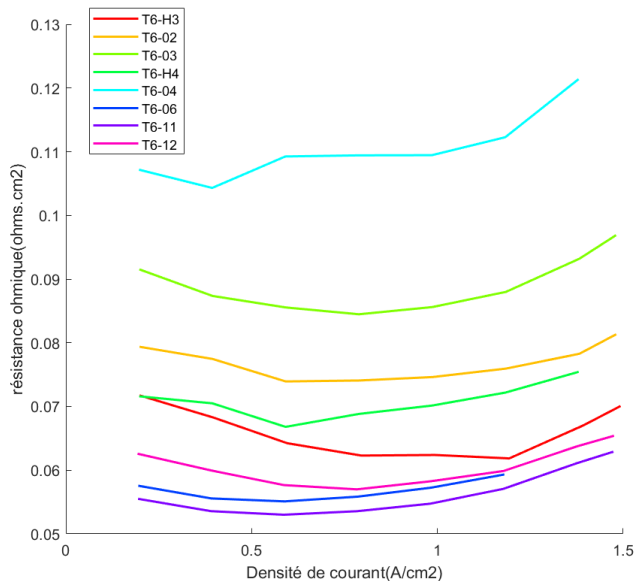


Fig. 9. Résistances ohmiques des AME au sein du boîtier monocellule en fonction de la densité de courant

La figure 9 présente l'évolution de la résistance haute fréquence en fonction de la densité de courant pour tous les AME assemblés. Nous constatons une augmentation anormale de la résistance haute fréquence pour tous les AME aux fortes

densités de courant, cela est en effet le signe d'un assèchement de la membrane et/ou d'une température trop importante. Des investigations menées *a posteriori* ont montré que les gaz actifs arrivaient probablement trop chauds dans la cellule conduisant à un assèchement de la membrane. Comme attendu, les AME avec les joints de 0,2 mm et 0,15 mm présentent les plus basses résistances haute fréquence en raison d'une plus forte compression de la GDL, ce qui diminue la résistance de contact entre les différentes couches de l'AME.

L'analyse des spectres d'impédance montre ainsi qu'il existe un compromis à trouver concernant la pression à appliquer sur la GDL. En effet, une forte compression entraîne une diminution de la valeur de la résistance ohmique tandis qu'une faible compression provoque une augmentation des phénomènes diffusifs (tendance à l'accumulation d'eau voire au noyage). Comme pour les courbes de polarisation, ce sont aux hautes densités de courant que les écarts sont les plus marqués. Cela s'expliquerait par une nette augmentation des limitations d'accès des gaz réactifs aux sites réactifs à cause de l'accumulation d'eau accrue pour ces densités de courant. Ainsi, aux fortes densités de courant, les performances deviennent plus sensibles aux caractéristiques du montage et à la compression de la GDL.

L'analyse des courbes de polarisation ainsi que des spectres d'impédance converge vers le choix d'un compromis pour l'épaisseur du joint. Dans l'état actuel d'avancement de cette étude, une épaisseur du joint de 0,2 mm semble donner aux AME les performances les moins éloignées des attendus.

3.3. Essais à courant constant

Des tests à courant constant de « longue » durée ont été réalisés sur des AME montés par nos soins (toujours avec du matériel HYNOLGY) pour relever l'évolution de la tension de la cellule sur plusieurs dizaines d'heures. La figure 10 présente ainsi les résultats d'un essai à courant constant (40 A soit environ $0,78 \text{ A.cm}^{-2}$) réalisé sur un AME monté par nos soins (T6-22) après son rodage.

Comme cela a été constaté sur des essais à courant constant menés sur d'autres AME testés dans cette étude, la tension se met à décroître après un rodage de 3 à 5 h avec un taux de chute mesuré ici à $-90 \mu\text{V/h}$ (meilleur résultat obtenu dans nos études où les valeurs atteintes pour les taux de dégradation sont plutôt de quelques centaines de $\mu\text{V/h}$ à quelques mV/h). Ce taux de chute en tension est trop élevé par rapport à ce qui est généralement obtenu pour des AME PEM-BT [16].

Des discussions post-essais avec Hynology ont permis de comprendre la cause de cette chute en tension lors du rodage et de la non reproductibilité des performances obtenues après rodage.

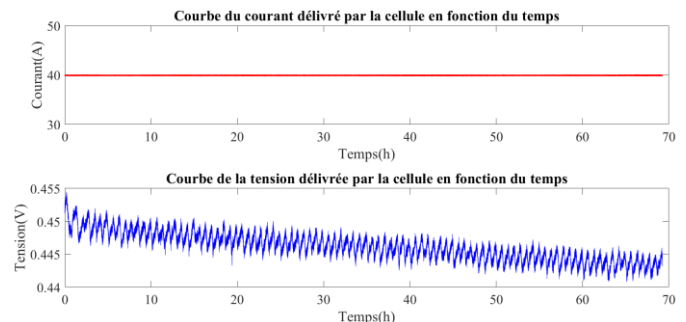


Fig. 10. Evolution de la tension de la cellule T6-22 lors de l'essai à densité de courant constante à $0,78 \text{ A.cm}^{-2}$

Il s'avère en effet que les membranes utilisées pour les AME approvisionnés par Hynology sont des membranes coulées avec une forte inhomogénéité de l'épaisseur du polymère. Cela conduit à des AME non reproductibles en termes de fabrication sur un lot donné. Ce qui explique très probablement la disparité des performances constatée après rodage. De plus, l'épaisseur de ces membranes coulées est trop fine, ce qui accélère le vieillissement ; ce type de membrane coulée a en effet tendance à s'engorger ou à sécher rapidement, ce qui engendre des difficultés importantes dans la gestion hydrique. Le choix de cette membrane n'était pas donc pas adapté à notre objectif de réaliser des essais d'endurance de plusieurs milliers d'heures.

Par ailleurs le chargement en platine de ces AME est très faible, donc peu adapté pour des essais de très longue endurance.

Tous ces paramètres conduisent à une plus grande sensibilité de la membrane aux mécanismes de dégradation comme la création de points chauds, le perçage de la membrane avec crossover d'hydrogène, la dissolution du platine et son agglomération au sein de la membrane.

Enfin, les conditions opératoires utilisées pour roder les cellules semble ne pas être compatibles avec ce type de membrane coulée et fragile.

La prise de conscience de ces non-optimalités a été tardive et post-essais.

De nouvelles campagnes d'assemblages et de tests sont programmés avec de nouvelles membranes plus épaisses et avec des chargements en platine plus élevé.

4. CONCLUSION

Une méthodologie d'assemblage d'un AME PEM-BT intégré en boîtier monocellule a été présentée avec une exploration concernant différents paramètres mécaniques.

Des essais de caractérisation (courbes de polarisation et spectroscopies d'impédance) ont été réalisés sur ces AME. Ils ont permis notamment de mettre en évidence l'influence de la compression de la GDL sur les performances de la cellule.

L'analyse des résultats a finalement montré qu'un assemblage avec un joint de 0,2 mm semble être un bon compromis.

Toutefois, une non reproductibilité des performances obtenue après le rodage des AME a été observée. Elle serait provoquée par l'hétérogénéité de l'épaisseur sans doute trop faible des membranes coulées sélectionnées couplée à des conditions opératoires de rodage mal adaptées, auquel se rajoute l'impact négatif des faibles chargements en catalyseur pour les essais de quelques dizaines d'heures. La prise de conscience de ces non-optimalités a été tardive et post-essais.

Ainsi, de nouvelles membranes et couches catalytiques sont en cours d'approvisionnement et seront utilisées avec le même protocole d'assemblage. Ces nouveaux AME assemblés seront soumises aux essais de caractérisation pour valider la reproductibilité attendue des performances de l'AME.

Ces AME validés seront soumis à des essais de vieillissement à courant constant ou sous ondulations de courant sur plusieurs centaines voire milliers d'heures afin d'évaluer l'impact des harmoniques de courant générés par un convertisseur continu-continu de type élévateur de tension (boost), but ultime de tous nos efforts.

5. REMERCIEMENTS

Ce projet a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'investissements d'avenir intégré à France 2030, portant la référence ANR-10-AIRT-01. Nous remercions aussi les membres industriels du projet HEMOWHY (HEavy MObility With HYdrogen) : Airbus, Flying Whales, Liebherr Aerospace et Aerostack GmbH.

6. REFERENCES

- [1] G. Fontès, « Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques », Manuscrit de thèse, Univ. Montpellier II, France, 2005.
- [2] G. Fontès, C. Turpin, S. Astier *et al.*, "Interactions between fuel cells and power converters: Influence of current harmonics on a fuel cell stack," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 670–678, 2007.
- [3] B. Wahdame *et al.*, "Impact of power converter current ripple on the durability of a fuel cell stack," in *Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron. (ISIE)*, Cambridge, UK, Jun. 2008, pp. 1495–1500.
- [4] O. Rallières, « Modélisation et caractérisation de piles à combustible et électrolyseurs PEM », Manuscrit de thèse, Inst. Nat. Polytech. Toulouse-INPT, France, 2011.
- [5] M. Gérard, « Étude des interactions pile/système en vue de l'optimisation d'un générateur pile à combustible: interactions cœur de pile/compresseur – interactions cœur de pile/convertisseur », Manuscrit de thèse, Univ. De Franche Comté, France, 2010.
- [6] R. Ma *et al.*, "A hybrid prognostic method for PEMFC with aging parameter prediction," *IEEE Trans. Transp. Electrific.*, pp. 1–1, 2021.
- [7] J. Ge, A. Higier, and H. Liu, "Effect of gas diffusion layer compression on PEM fuel cell performance," *J. Power Sources*, vol. 159, no. 2, pp. 922–927, 2006.
- [8] Q. Li, Y. Huangfu, L. Xu *et al.*, "An improved floating interleaved boost converter with the zero-ripple input current for fuel cell applications," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 34, no. 4, pp. 2168–2179, 2019.
- [9] S. K. Mazumder, R. K. Burra, and K. Acharya, "A ripple-mitigating and energy-efficient fuel cell power-conditioning system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 4, pp. 1437–1452, 2007.
- [10] Y. Zhan, Y. Guo, J. Zhu *et al.*, "A review on mitigation technologies of low frequency current ripple injected into fuel cell and a case study," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 46, pp. 25167–25190, 2020.
- [11] E. Carcadea, M. Varlam, D. B. Ingham *et al.*, "Effect of GDL (+ MPL) compression on the PEM fuel cell performance," *ECS Trans.*, vol. 75, no. 14, p. 167, 2016.
- [12] K. Bouziane, X. François, R. Lachat *et al.*, "In-situ experimental investigations to study the impact of mechanical compression on the PEMFC: analysis of the global cell performance," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 56, pp. 1257–1272, 2024.
- [13] P. Pei, Q. Chang, and T. Tang, "A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 14, pp. 3829–3836, 2008.
- [14] K. Bouziane, X. François, R. Lachat, *et al.*, "EIS study to analyse the influence of mechanical compression on the global PEM fuel cell performance," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 68, pp. 352–359, 2024.
- [15] T. J. Mason, J. Millichamp, P. R. Shearing, *et al.*, "A study of the effect of compression on the performance of polymer electrolyte fuel cells using electrochemical impedance spectroscopy and dimensional change analysis," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 18, pp. 7414–7422, 2013.
- [16] M. Tognan, « Étude de dégradations des performances de piles à combustible PEM BT alimentées en H₂/O₂ lors de campagnes d'endurance : du suivi de l'état de santé en opération à la modélisation du vieillissement », Manuscrit de thèse, Inst. Nat. Polytech. Toulouse-INPT, France, 2018.