

# Filière Energie et techniques environnementales

Orientation Energies renouvelables

## Travail de bachelor Diplôme 2019

*Thibault Fournier*

*Stockage saisonnier d'énergie électrique*

- *Professeur*  
Christoph Ellert
- *Expert*  
Alexandre Closset
- *Date de la remise du rapport*  
16.08.2019

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.  
Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.

|      |     |      |
|------|-----|------|
| SYND | ETE | TEVI |
| X    | X   | X    |

|   |  |  |
|---|--|--|
| Filière / Studiengang<br><b>ETE</b>   | Année académique / Studienjahr<br><b>2018/19</b>   | No TD / Nr. DA<br><b>er/2019/54</b>  |
| Mandant / Auftraggeber<br><input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais<br><input type="checkbox"/> Industrie<br><input type="checkbox"/> Etablissement partenaire<br><i>Partnerinstitution</i> | Etudiant / Student<br><b>Thibault Fournier</b><br><br>Professeur / Dozent<br><b>Christoph Ellert</b>                     | Lieu d'exécution / Ausführungsort<br><input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais<br><input type="checkbox"/> Industrie<br><input type="checkbox"/> Etablissement partenaire<br><i>Partnerinstitution</i> |
| Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit<br><input type="checkbox"/> oui / ja <sup>1</sup> <input checked="" type="checkbox"/> non / nein   | Expert / Experte (données complètes)<br><b>Alexandre Closset</b><br>Swiss Hydrogen, Passage du Cardinal 1, 1700 Fribourg |  |

|   |
|---|
| Titre / Titel<br><br><b>Stockage saisonnier d'énergie électrique</b>  |
| Description / Beschreibung<br><br>Dans le cadre de ce projet, un système power-to-gas sera réalisé, permettant techniquement un stockage saisonnier d'énergie électrique. Pour y arriver, le système entier (conversion d'électricité en hydrogène via un électrolyseur, le stockage d'hydrogène, ainsi que la reconversion en électricité grâce à une pile à combustible) sera dimensionné et réalisé. Les composants déjà existants à la HES-SO Valais seront intégrés avec des nouveaux composants pour réaliser le système entier. Le projet sera achevé avec une intégration d'une pile à combustible (PACo) commerciale dans la chaîne de stockage à hydrogène dans le DC-microgrid présent à la HES-SO Valais.<br><br>Objectifs / Ziele:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>– Mis en route &amp; caractérisation d'une pile à combustible mono-cellule</li> <li>– Dimensionnement &amp; conception d'un banc de test pour un stock de piles à combustible commerciales</li> <li>– Réalisation &amp; opération du banc de test</li> <li>– Branchement de la PACo &amp; caractérisation du système entier.</li> </ul> |

|  |  |
|--|--|
| Signature ou visa / Unterschrift oder Visum<br><br>Responsable de l'orientation / filière<br><i>Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang:</i><br><br>.....<br><br><sup>1</sup> Etudiant / Student :<br>..... | Délais / Termine<br><br>Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags:<br><b>13.05.2019</b><br><br>Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation<br><b>13 – 14.06.2019</b><br><br>Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts:<br><b>16.08.2019, 12:00</b><br><br>Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten:<br><b>28, 29 – 30.08.2019</b><br><br>Défense orale / Mündliche Verfechtung:<br><b>02 – 05.09.2019</b> |
|--|--|

<sup>1</sup> Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.  
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.

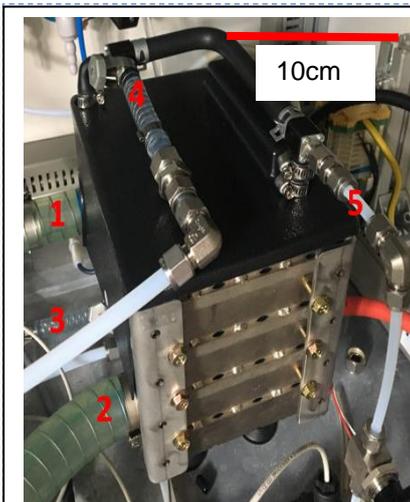


Figure 1: Stack APFCT. 1- Entrée air, 2- Sortie air, 3- Entrée eau refroidissement, 4- Sortie eau refroidissement, 5- Entrée H2. Sortie H2 sur la droite de la pile.

## Stockage saisonnier d'énergie électrique

Diplômant/e Thibault Fournier

### Objectif du projet

Le projet consiste à caractériser le fonctionnement d'une pile à combustible (PACo) mono-cellule pour réaliser un banc de test et mettre en fonction un stack de PACo (40 cellules en série) commerciale de 2.4 kW.

### Méthodes | Expériences | Résultats

La caractérisation expérimentale de la monocellule a permis de développer le banc de test du stack PACo et de l'opérer. Ainsi l'impact de plusieurs facteurs tels que les débits d'H<sub>2</sub> et d'air ou l'impact des variations de charge a été déterminé. Une optimisation a permis de déterminer un point de fonctionnement maximum à 0,3 W/cm<sup>2</sup> pour un rendement de 32 % et optimal à 0,22 W/cm<sup>2</sup> pour un rendement de 47 %.

Le banc de test du stack de PACo comprenant les circuits de gaz et du liquide de refroidissement a été développé et testé. Une instrumentation a été installée pour contrôler les facteurs importants tels que la pression, la température, les débits de gaz et l'humidification. Le stack a été caractérisé jusqu'à 110 mA/cm<sup>2</sup>, voir figure 2 (40A avec surface active PACo environ 360 cm<sup>2</sup>). Le rendement obtenu est de 48 % à 110 mA/cm<sup>2</sup>, résultant en une puissance de 800 W, donc, 10 % inférieure à la valeur du fournisseur APFCT pour le même point de fonctionnement. Le meilleur point de fonctionnement, étant à 120 A, 2,4 kW, selon spécifications APFCT, ce point peut être atteint après livraison de composants essentiels (pompe, humidificateur H<sub>2</sub>).

Travail de diplôme  
| édition 2019 |

Filière  
*Energie et techniques  
environnementales*

Domaine d'application  
*Energie renouvelable*

Professeur responsable  
*Christoph Ellert  
Christoph.ellert@hevs.ch*

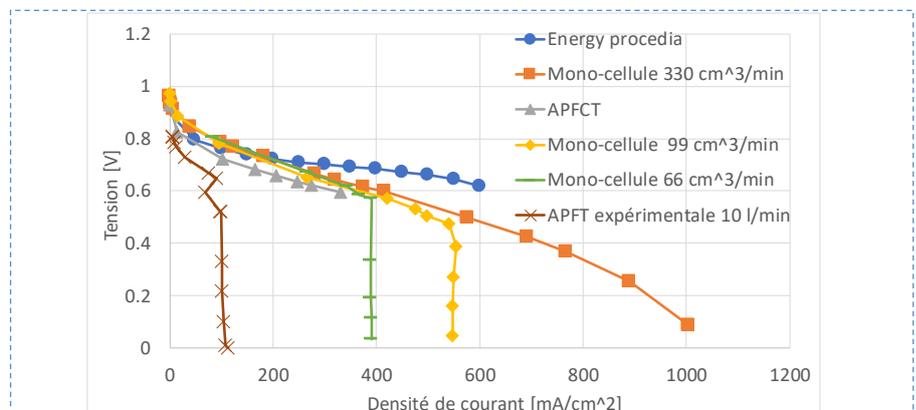


Figure 2 : Résultats des tests de la monocellule et du stack à plusieurs débits d'H<sub>2</sub> comparés avec des spécifications de PACo commerciales. La chute de la tension à 110 mA/cm<sup>2</sup> pour le stack APFCT correspond à 1% près aux valeurs théoriquement attendues pour 10 l/min H<sub>2</sub>.

## Table des matières

|      |   |    |
|------|---|----|
| I.   | Liste des figures .....   | 2  |
| II.  | Liste des tableaux .....  | 4  |
| 1.   | Motivation .....  | 5  |
| 2.   | Objectifs .....   | 6  |
| 3.   | Introduction .....  | 6  |
| 4.   | Composition et fonctionnement d'une pile à combustible.....       | 7  |
| 4.1. | Composition d'une pile à combustible .....                        | 7  |
| 4.2. | Potentiel et pertes du système.....                               | 8  |
| 4.3. | Capacité théorique de production de courant du système .....      | 10 |
| 4.4. | Capacité de production de puissance du système et rendement ..... | 12 |
| 4.5. | Débit d'air en fonction du débit d' $H_2$ utilisé .....           | 12 |
| 4.6. | Facteurs influençant le rendement d'une pile à combustible .....  | 13 |
| 4.7. | Recirculation.....  | 15 |
| 4.8. | Principe stack de piles à combustible .....                       | 17 |
| 5.   | Cellule éducative .....   | 17 |
| 5.1. | Tests et résultats.....   | 18 |
| 6.   | Pile à combustible monocellule.....                               | 19 |
| 6.1. | Méthode de développement.....                                     | 20 |
| 6.2. | Protocole de mesure.....  | 24 |
| 6.3. | Tests et résultats.....   | 24 |
| 7.   | Stack industriel.....   | 38 |
| 7.1. | Circuit système power to gas .....                                | 39 |
| 7.2. | Caractéristiques techniques .....                                 | 40 |
| 7.3. | Méthode de développement.....                                     | 41 |
| 7.4. | Test de l'instrumentation .....                                   | 47 |
| 7.5. | Protocole de mesure.....  | 49 |
| 7.6. | Tests et résultats.....   | 50 |
| 7.7. | Analyse financière .....  | 55 |
| 8.   | Améliorations possibles .....                                     | 56 |
| 9.   | Conclusion.....   | 56 |
| 10.  | Remerciements .....   | 58 |
| 11.  | Bibliographie.....  | 59 |
| 12.  | Annexes.....  | 60 |

## I. Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1: Principe système "power to gas" .....   | 5  |
| Figure 2: Principe d'une pile à combustible à hydrogène [4] .....   | 6  |
| Figure 3: Schéma détaillé composants une cellule élémentaire [5] .....  | 7  |
| Figure 4: structure du Nafion .....   | 8  |
| Figure 5: Pertes de polarisation d'une pile à combustible [7] .....   | 9  |
| Figure 6: Gradient de concentration au niveau de l'électrode [7] .....  | 10 |
| Figure 7: Pertes en fonction de la densité de courant. Tension de la cellule en [V] en fonction de la densité de courant en [mA]. [13] .....  | 10 |
| Figure 8: Lien entre l'humidité relative de la membrane en [%] et sa résistance protonique en [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]. [14] .....  | 13 |
| Figure 9: Influence de la température sur la conductivité de la membrane. La température est exprimée en [ $^{\circ}\text{C}$ ] et la résistance de la membrane en [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]. [17] .....   | 14 |
| Figure 10: Stack de piles à combustibles [18] .....   | 17 |
| Figure 11: Pile à combustible réversible avec stockage de Heliocentris academia .....   | 17 |
| Figure 12: Test en mode électrolyse de la cellule éducative .....   | 18 |
| Figure 13: Test en mode pile à combustible de la cellule éducative .....  | 19 |
| Figure 14: Mono-cellule de chez Fuel Cell Store .....   | 20 |
| Figure 15: Vue en coupe de la moitié de la mono-cellule permettant de visualiser la disposition des différents éléments qui sont à l'intérieur de la mono-cellule. ....   | 20 |
| Figure 16: Assemblage des éléments de la mono-cellule. ....   | 21 |
| Figure 17: Banc de test de la mono-cellule. La partie haute est le circuit permettant l'alimentation en H <sub>2</sub> depuis une bouteille, alors que la partie située en bas fournit le débit d'air à la cellule à l'aide d'un compresseur. Au centre la mono-cellule avec à gauche, la résistance variable permettant les tests .....                | 21 |
| Figure 18: Mise en place réelle du circuit développé précédemment .....   | 22 |
| Figure 19: Principe de la calibration. Le gaz utilisé passe à travers un débitmètre à flotteur puis est stocké dans un récipient gradué. La mesure du temps de l'expérience ainsi que le volume de gaz stocké donnent un débit de comparaison à la mesure affichée par le débitmètre. ....  | 23 |
| Figure 20: Test de stabilisation du système. Débit d'H <sub>2</sub> de 50 cm <sup>3</sup> /min, débit d'air de 150 cm <sup>3</sup> /min et résistance de 0.1 $\Omega$ (à froid). ....   | 25 |
| Figure 21: Tension en fonction de la densité de courant pour les premiers tests sur la monocellule. Débits H <sub>2</sub> de 16.5, 33 et 56 cm <sup>3</sup> /min. Débit d'air d'un facteur 3 supérieur au débit d'H <sub>2</sub> pour chaque prise de mesure .....  | 26 |
| Figure 22: Puissance en fonction de la densité de courant pour les premiers tests effectués sur la monocellule. Débits H <sub>2</sub> de 16.5, 33 et 56 cm <sup>3</sup> /min. Débit d'air d'un facteur 3 supérieur au débit d'H <sub>2</sub> pour chaque prise de mesure .....  | 27 |
| Figure 23: Impact du débit d'air. Débit H <sub>2</sub> fixe de 23 cm <sup>3</sup> /min et une résistance fixe en sortie de 0.1 $\Omega$ (à froid) .....   | 29 |
| Figure 24: Influence du débit d'air. Deux différents débits d'H <sub>2</sub> fixes de 23 et 33 cm <sup>3</sup> /min. Résistance fixe de 0.1 $\Omega$ (à froid) .....  | 31 |
| Figure 25: Tension en fonction de la densité de courant après optimisation du circuit électrique de la monocellule. Débit d'H <sub>2</sub> de 33 cm <sup>3</sup> /min et débit d'air de 150 cm <sup>3</sup> /min .....  | 32 |
| Figure 26 : Puissance en fonction de la densité de courant après optimisation du circuit électrique de la monocellule. Débit d'H <sub>2</sub> de 33 cm <sup>3</sup> /min et débit d'air de 150 cm <sup>3</sup> /min .....   | 33 |
| Figure 27: Tension en fonction de la densité de courant après optimisation du circuit électrique et de l'augmentation des débits de gaz pour la monocellule. Pour les débits d'H <sub>2</sub> de 33 à 99 cm <sup>3</sup> /min le débit d'air est de 500 cm <sup>3</sup> /min et pour les autres tests ce dernier est de 1000 cm <sup>3</sup> /min ..... | 34 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 28 : Puissance en fonction de la densité de courant après optimisation du circuit électrique et de l'augmentation des débits de gaz pour la monocellule. Pour les débits d'H <sub>2</sub> de 33 à 99 cm <sup>3</sup> /min le débit d'air est de 500 cm <sup>3</sup> /min et pour les autres tests ce dernier est de 1000 cm <sup>3</sup> /min.....   | 35 |
| Figure 29: Rendement et puissance en fonction du débit d'H <sub>2</sub> afin de trouver le point de fonctionnement optimal de la pile. Pour les débits d'H <sub>2</sub> inférieurs à 100 cm <sup>3</sup> /min le débit d'air est de 500 cm <sup>3</sup> /min et pour les autres tests ce dernier est de 1000 cm <sup>3</sup> /min. ....   | 36 |
| Figure 30: Comparaison des résultats de la monocellule pour la tension en fonction de la densité de courant, avec les données des fournisseurs de différents stack du commerce. Tests de la monocellule avec 66, 99 et 330 cm <sup>3</sup> /min d'H <sub>2</sub> . ....   | 37 |
| Figure 31: Comparaison des résultats de la monocellule pour la puissance en fonction de la densité de courant, avec les données des fournisseurs de différents stack du commerce. Tests de la monocellule avec 66, 99 et 330 cm <sup>3</sup> /min d'H <sub>2</sub> . ....   | 38 |
| Figure 32: DuraPEM W240 (Source: <a href="http://www.apfct.com/en/product/durapemw240/">http://www.apfct.com/en/product/durapemw240/</a> ) .....  | 39 |
| Figure 33: Circuit d'eau déminéralisée commun entre l'électrolyseur avec les deux vannes trois voies permettant la sélection de l'un ou l'autre des éléments. Chauffage de l'eau, pompe, débitmètre eau déminéralisée et filtre en commun également. ....   | 39 |
| Figure 34: Performance théorique de la stack fournit dans le guide d'utilisation avec hypothèse de la surface de la zone active et tension par cellule. ....  | 41 |
| Figure 35: Schéma du banc de test du stack. Au centre le stack lui-même, juste en dessus le circuit d'H <sub>2</sub> , encore en dessus celui de N <sub>2</sub> permettant la purge du système et en dessous le circuit d'air. A gauche le circuit d'eau déminéralisée permettant le refroidissement du système et finalement à droite l'ensemble des cartes d'acquisitions et alimentations permettant le contrôle des différents éléments et le relevé des valeurs des capteurs. .... | 42 |
| Figure 36: Principe de la technique d'humidification. Passage du gaz dans de l'eau déminéralisée, basée sur le fonctionnement d'un barboteur. ....  | 44 |
| Figure 37: Source de courant. Alimentation 15 V d'un côté et la résistance du thermistor de l'autre. La tension aux bornes de la résistance est ensuite lue sur une entrée 0-10 V du module AI.....   | 45 |
| Figure 38: Interface permettant la commande et la lecture des différents éléments d'instrumentation du stack. ....  | 47 |
| Figure 39: Calibration capteurs de pression. Circuit composé de deux capteurs de pressions afin de calibrer le nouveau débitmètre par rapport à l'ancien qui l'est déjà et cela avec l'air et l'H <sub>2</sub> . ....   | 48 |
| Figure 40: Calibration débitmètre. Un débit d'H <sub>2</sub> est injecté dans un circuit ou deux débitmètres sont en séries afin de calibrer le nouveau débitmètre grâce à la valeur délivrée par l'ancien qui l'est déjà. ....   | 48 |
| Figure 41: Test instrumentation. L'ouverture de la vanne de sortie est variée afin d'observer l'impact de la résistance en sortie du circuit sur la pression et cela pour l'air et pour l'H <sub>2</sub> .....  | 49 |
| Figure 42: Tension en fonction de la densité de courant pour le stack APFCT comparée avec les données du fournisseur. ....  | 50 |
| Figure 43: Puissance par cellule en fonction de la densité de courant pour le stack APFCT comparée avec les données du fournisseur. ....  | 51 |
| Figure 44: Relevé des mesures transmises par l'instrumentation durant les tests effectués sur le stack de piles à combustible. Les courbes permettent de visualiser l'ensemble des mesures relevées durant les tests ainsi que leurs évolutions dans le temps. ....   | 54 |

## II. Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1 : Données générales nécessaires pour déterminer la limite de courant. Les cases annotées du symbole* sont les facteurs qui varient en fonction des divers tests. ....   | 11 |
| Tableau 2: Données générales nécessaires pour déterminer la puissance maximale et le rendement. Les cases annotées du symbole* sont les facteurs qui varient en fonction des divers tests. ....   | 12 |
| Tableau 3: Données générales nécessaires pour déterminer le débit d'air. ....   | 13 |
| Tableau 4: Résultats théoriques des puissances et courants maximaux pour des débits d'H <sub>2</sub> donnés pour la monocellule. La densité de courant a été calculée grâce à la surface de la zone active de la membrane de 25 cm <sup>2</sup> (cf point 6.1.1.1). ....                                  | 27 |
| Tableau 5: Mesure dans le temps pour un débit d'air de 70 cm <sup>3</sup> /min et un débit d'H <sub>2</sub> de 20 cm <sup>3</sup> /min. ....  | 30 |
| Tableau 6: Résultats théoriques pour la variation du débit d'air. La densité de courant a été calculée grâce à la surface de la zone active de la membrane de 25 cm <sup>2</sup> (cf point 6.1.1.1). ....   | 31 |
| Tableau 7: Puissances et limites de densité de courants pour le circuit optimisé de la monocellule. La densité de courant a été calculée grâce à la surface de la zone active de la membrane de 25 cm <sup>2</sup> (cf point 6.1.1.1). ....   | 35 |
| Tableau 8: Données techniques du fournisseur du stack APFCT. ....   | 40 |
| Tableau 9: Données générales nécessaires pour déterminer les débits d'H <sub>2</sub> et d'air maximum du stack aux valeurs limites de stœchiométrie. ....   | 43 |
| Tableau 10: Puissance et limites de courant théorique du stack pour des débits donnés. ....   | 51 |
| Tableau 11 : Données générales nécessaires pour déterminer les pertes dues au circuit du stack. Les cases annotées du symbole* sont les facteurs recherchés. ....   | 52 |
| Tableau 12: Différents coûts en fonction du niveaux de développements du circuit. Les principales modifications apportés pour le type 2 et 3 sont mentionnées dans le tableau. Il va permettre de rendre compte des dépenses effectuées pour le système actuel et celles à prévoir pour l'optimiser. .... | 55 |

## 1. Motivation

En raison du développement important des énergies renouvelable, le stockage d'énergie électrique est actuellement une problématique principale dans ce domaine. En effet les différentes méthodes de production d'énergie renouvelable n'étant pas prévisibles et contrôlables, il est donc nécessaire de pouvoir stocker cette énergie produite afin de l'utiliser au moment propice et donc de faire correspondre l'offre et la demande.

Dans cette optique de production d'énergie respectant l'environnement il est donc aussi nécessaire de pousser cette réflexion au développement de moyens de stockage en phase avec les techniques de production. C'est pour cette raison que la technologie du « power to gas » est au centre de beaucoup d'études et de recherches, car c'est un moyen de stocker de l'énergie électrique de manière saisonnière, sans rejet de CO<sub>2</sub>.

Le stockage d'hydrogène est réalisé en utilisant le surplus d'énergie électrique afin de réaliser l'électrolyse de l'eau dans le but de séparer la molécule d'H<sub>2</sub>O. L'hydrogène stocké peut ensuite être revendu ou alors être retransformé en électricité au moyen d'une pile à combustible.

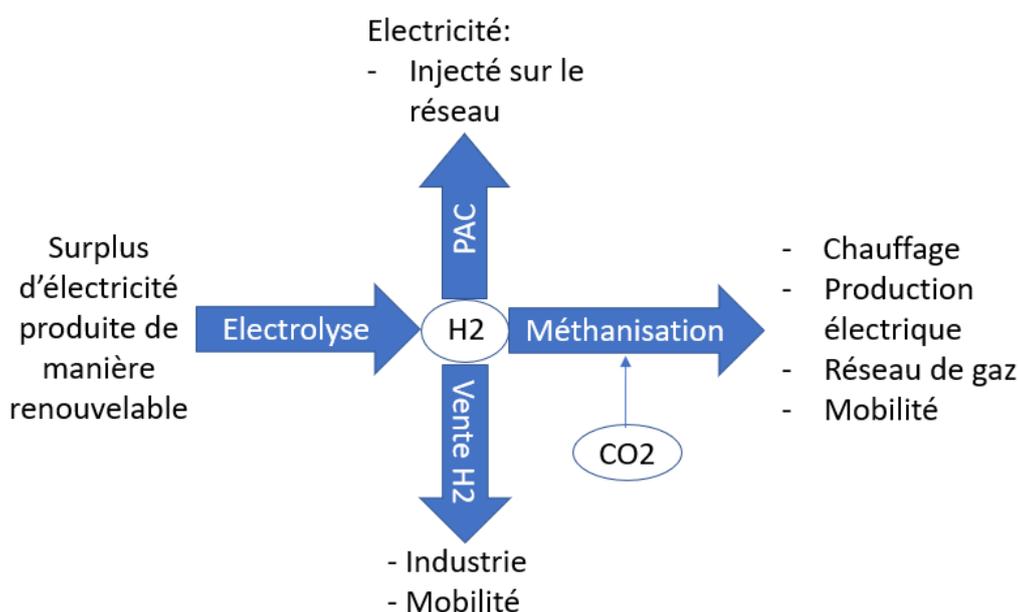


Figure 1: Principe système "power to gas"

Un électrolyseur de 5 kW étant déjà développé et opérationnel au sein de l'école, la suite du projet se caractérise donc par la mise en fonction d'une pile à combustible de 2.4 kW pour que le cycle de stockage/déstockage soit complet.

De nombreux projets ont été développés en utilisant la technologie de pile à combustible en Europe (particulièrement en Allemagne) mais aussi en Suisse, à l'image de Hyundai, qui en 2018 a annoncé la vente entre 2019 et 2023, d'environ mille camions fonctionnant à l'hydrogène à la Suisse, dont la grande majorité vont rouler pour l'entreprise Coop [1] [2]. En Allemagne le train Coradia iLint de l'entreprise Alstom mis en service commercial en 2018, fonctionne-lui aussi grâce au système de pile à combustible [3].

Ces différents exemples démontrent bien l'importance qu'est en train de prendre le développement de cette technologie en particulier au niveau de la mobilité où elle apparaît comme une réelle solution en vue de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub>.

## 2. Objectifs

L'objectif de ce projet est de réaliser un système de pile à combustible (PACo) qui va permettre de transformer de l'énergie préalablement stockée sous forme d'hydrogène en énergie électrique. N'ayant aucune connaissance et expérience en ce qui concerne la technologie des piles à combustible, un travail de documentation a donc dû être préalablement réalisé. Dans un second temps, une pile mono-cellule a été caractérisée de manière expérimentale afin de comparer les observations et les résultats obtenus avec la théorie. Finalement en s'appuyant sur les deux étapes précédentes, le développement et le dimensionnement d'un stack de piles à combustible ont été effectués, c'est-à-dire aussi bien pour la phase de conversion de l'hydrogène en électricité dans la pile que pour le circuit permettant de raccorder ce dernier aux différents éléments qui l'entoure.

L'objectif final de ce projet est de mettre à profit l'expérience acquise et le circuit développé pour intégrer la pile à combustible commerciale dans le microgrid-DC de la HES-SO Valais au niveau de la chaîne de stockage à hydrogène et de caractériser son fonctionnement.

Les objectifs détaillés sont les suivants :

- Mise en route et caractérisation d'une pile à combustible
- Dimensionnement et conception d'un banc de test pour un stack de piles à combustibles commerciales.
- Réalisation et opération du banc de test.
- Branchement de la PACo et caractérisation du système entier (du stack et du circuit qui l'encadre).

## 3. Introduction

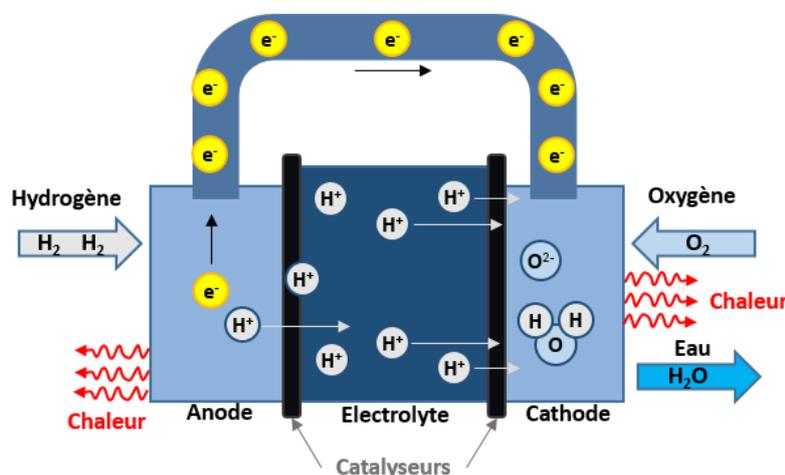


Figure 2: Principe d'une pile à combustible à hydrogène [4]

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est basé sur l'oxydation d'un réducteur, l'hydrogène (à l'anode) et sur la réduction d'un oxydant (à la cathode), l'oxygène. Cette réaction d'oxydoréduction permet de produire un courant électrique entre les électrodes de la pile et de ne rejeter que de l'eau en sortie. Une part de la réaction va produire du travail (de la puissance électrique) et l'autre va produire de la chaleur.

## 4. Composition et fonctionnement d'une pile à combustible

Dans cette partie l'objectif est d'exposer et de comprendre les différents facteurs qui influent sur le fonctionnement d'une pile à combustible, afin de pouvoir les prendre en compte lors du développement des différents circuits d'expérimentation.

### 4.1. Composition d'une pile à combustible

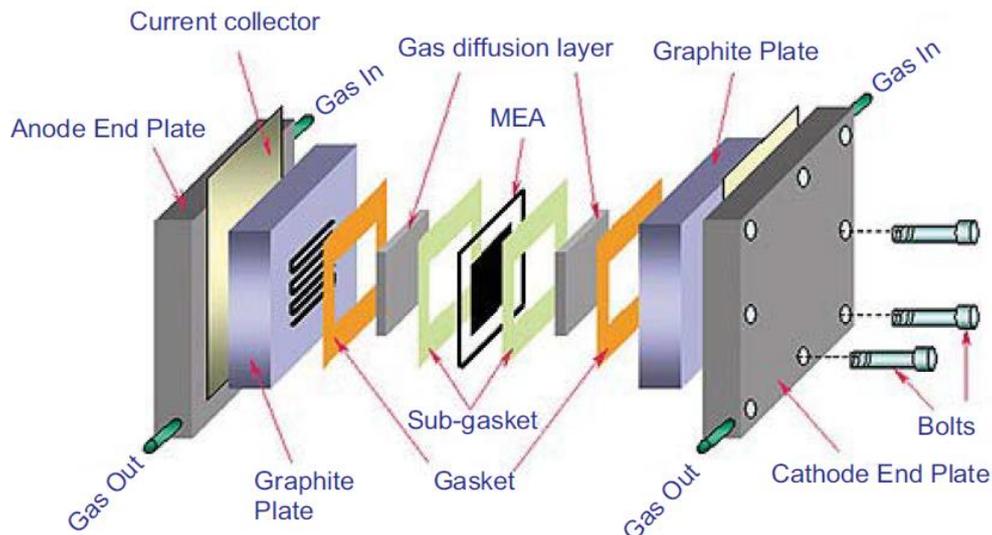


Figure 3: Schéma détaillé composants une cellule élémentaire [5]

#### 4.1.1. Plaques d'extrémités

Les plaques d'extrémités (« Anode/Cathode End Plate ») permettent l'entrée des deux gaz dans la cellule, la sortie d'excédents d'hydrogène, d'oxygène et de l'eau résultant de la réaction ainsi que le maintien de tous les éléments ensemble. [6] [7]

#### 4.1.2. Collecteurs de courant

Les collecteurs de courant (« Current collector ») vont permettre de récupérer les électrons qui vont être libérés lors de la réaction d'oxydation au niveau de l'anode et de les restituer pour la réaction de réduction au niveau de la cathode. [6]

#### 4.1.3. Canal d'écoulement

Le canal d'écoulement (« Graphite Plate ») va permettre de définir le chemin qui va être suivi par le gaz dans la pile à combustible. Ce dernier peut varier en fonction des modèles et est toujours constitué en matière conductrice (le graphite par exemple) afin d'assurer la conduction entre les plaques d'extrémités et le reste de la cellule. [6]

#### 4.1.4. Cadre zone active

Le cadre de zone active (« Gasket » et « Sub-gasket ») est un élément essentiel au bon fonctionnement de la cellule, car il va permettre d'encadrer la zone active de la membrane et donc de rendre possible le procédé. Son rôle va également être de contrôler la compression du GDL dont nous allons parler par la suite. [8]

#### 4.1.5. GDL

La couche de diffusion des gaz (GDL ou « Gas diffusion layer ») a de multiples utilisations au sein de la pile à combustible. C'est l'élément permettant la diffusion du gaz depuis la grille de circulation jusqu'au catalyseur et à la membrane, il va également laisser passer les électrons produits lors de la réaction afin que ceux-ci rejoignent le collecteur de courant. Il va aussi jouer un rôle au niveau de l'humidification de la membrane, car il va permettre d'évacuer l'eau qui va se former à la suite de la réaction à la cathode et ainsi prévenir de possibles inondations (les bouchons d'eau) et d'hydrater la membrane. Pour terminer, cet élément va aussi permettre de transférer la chaleur qui est dégagée lors du fonctionnement de la cellule, ce qui est un facteur important pour le rendement de la cellule. [6] [7] [9]

#### 4.1.6. MEA

Une membrane MEA est un assemblage constitué de la membrane et du catalyseur. [6]

##### 4.1.6.1. Catalyseur

La présence du catalyseur est essentielle étant donné que c'est à ce niveau que vont se produire les réactions d'oxydation et de réduction. Il augmente la vitesse de la réaction chimique en facilitant la rupture des liaisons, en abaissant l'énergie nécessaire à l'activation de la réaction. Très souvent cet élément est en platine du fait qu'il est considéré comme le meilleur catalyseur pour cette réaction. [7] [10]

##### 4.1.6.2. Membrane

La membrane est un polymère qui a la particularité d'offrir un bon compromis entre une faible résistance protonique et une forte perméabilité au gaz afin de ne laisser passer que les ions positifs ( $H^+$ ) résultants de la réaction d'oxydation et de les transmettre à la cathode. Dans la plupart des cas le polymère est du Nafion™. [11] [6]

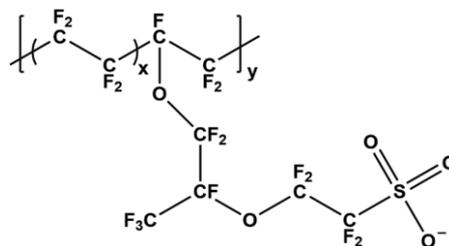
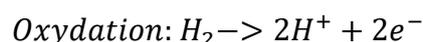


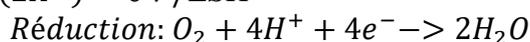
Figure 4: structure du Nafion

## 4.2. Potentiel et pertes du système

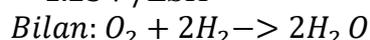
Le potentiel maximal aux bornes de la pile à combustible est déduit à partir du potentiel redox de la réaction d'oxydoréduction de notre système, qui se calcule de la manière suivante :



$$\text{Potentiel redox : } E^0(H_2)/(2H^+) = 0 \text{ V/ESH}$$



$$\text{Potentiel redox : } E^0(O_2)/(H_2O) = 1.23 \text{ V/ESH}$$



$$\text{Potentiel redox : } E^0 = 1.23 \text{ V/ESH}$$

ESH (électrode standard à l'hydrogène) est l'électrode de référence absolue, dans notre cas, celle où se produit la réaction d'oxydation (Anode).

Ce bilan démontre bien qu'avec les deux gaz utilisés dans cette réaction que sont l'oxygène et l'hydrogène, nous n'allons rejeter que de l'eau en sortie et donc aucun CO<sub>2</sub>.

Cette valeur est donc théoriquement la valeur maximale que l'on devrait mesurer aux bornes de notre pile lorsqu'aucun courant ne circule dans le circuit. En réalité, le potentiel maximal qui pourra être mesuré lors de tests ne pourra pas dépasser 1 V, en raison des différentes pertes [7] [12] du système que sont les polarisations ohmiques, d'activation et de concentration.

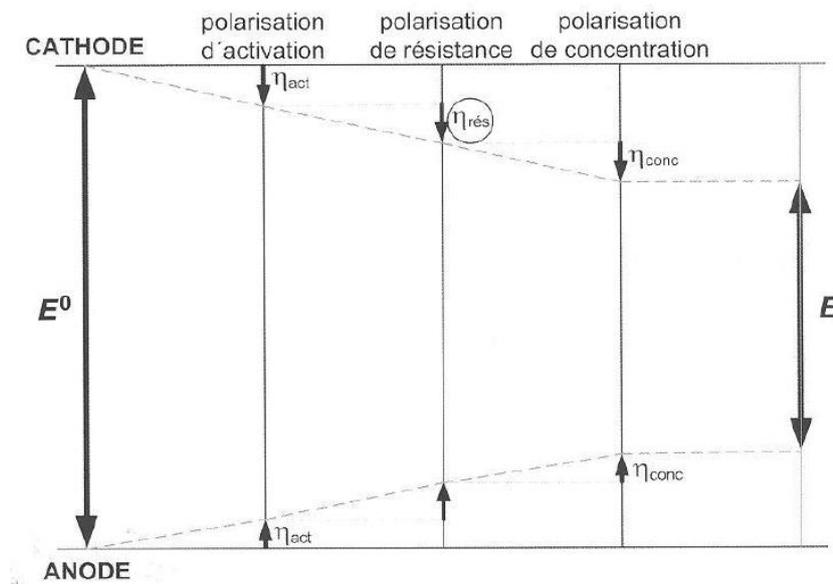


Figure 5: Pertes de polarisation d'une pile à combustible [7]

La polarisation d'activation due à la cinétique des réactions de réduction et d'oxydation qui se produisent dans la cellule est elle-même liée à l'énergie d'activation de ces dernières. Cette perte vient en particulier de la réaction de réduction de l'oxygène qui est plus lente à du fait qu'elle nécessite quatre électrons contre deux seulement pour l'oxydation comme on peut le constater dans le calcul du potentiel redox de la réaction fait ci-dessus.

La polarisation ohmique est principalement due à la résistance protonique de la membrane, mais aussi à celle des électrodes et du circuit au passage des électrons. La résistance due au courant d'électrons est bien moins importante que la résistance ionique de l'électrolyte.

La polarisation de concentration se traduit par l'incapacité de fournir une quantité suffisante de réactifs aux catalyseurs pour les deux réactions. Lors des réactions citées ci-dessus, le réactif est progressivement transformé en son produit lors de sa diffusion dans l'électrode. Comme le montre la Figure 6, ceci crée un déséquilibre de concentrations de produit et de réactif entre l'entrée et la sortie des électrodes : un gradient de concentration.

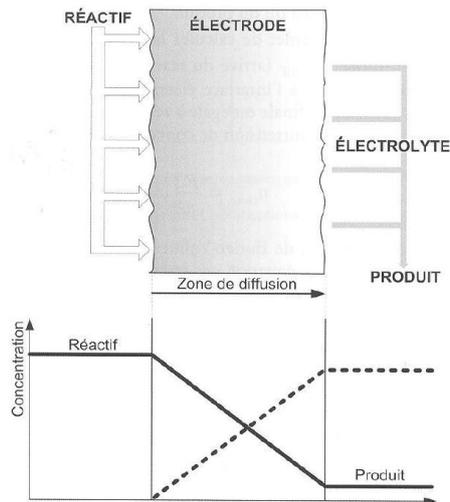


Figure 6: Gradient de concentration au niveau de l'électrode [7]

Ce dernier est à l'origine du transport du réactif à travers l'électrode par diffusion. Plus le courant produit est important, plus l'engorgement au sein de l'électrode augmente et plus la diffusion va être lente menant à des pertes d'efficacité.

Ce phénomène est plus important à la cathode qu'à l'anode d'une part, du fait de la production d'eau à la suite de la réduction de l'oxygène ; d'autre part du fait de la plus faible diffusivité de l'oxygène que de l' $H_2$ . En effet, l'eau va fortement participer à cet effet d'engorgement de l'électrode.

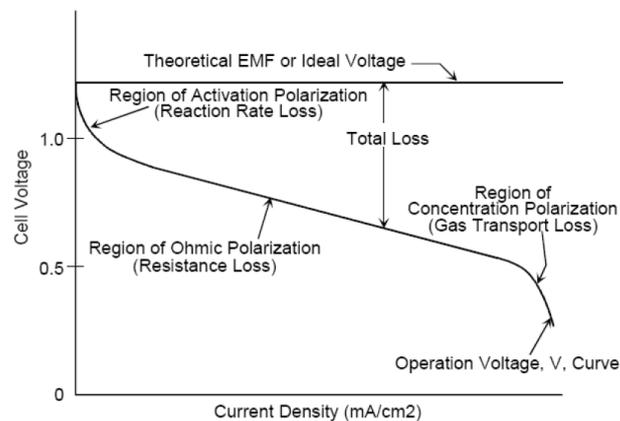


Figure 7: Pertes en fonction de la densité de courant. Tension de la cellule en [V] en fonction de la densité de courant en [mA]. [13]

On voit sur la Figure 7 que les pertes d'activation se trouvent dans la région où la densité de courant est faible alors que les pertes ohmiques du système qui sont linéaires se trouvent elles dans la région où la densité de courant est moyenne. Le fait que ces pertes soient linéaires peut s'expliquer par le fait que, tant la résistance de la membrane que celle des électrodes et des fils restent constantes. La perte de concentration se fait elle lors de densité de courant importante. Lors des différents tests effectués, la même tendance devrait donc être observée et les différences seront discutées.

#### 4.3. Capacité théorique de production de courant du système

Dans cette partie, l'objectif va être de déterminer une formule afin de pouvoir estimer le courant qui devrait théoriquement pouvoir être produit par le système pour un débit d' $H_2$  donné.

Cette formule va permettre de comparer les résultats qui seront obtenus lors des tests dans la suite de ce travail.

Les débits de gaz (aussi bien d'H<sub>2</sub> que d'air) seront exprimés en l/min ou en cm<sup>3</sup>/min et sont aux conditions standards de température et de pression de 25 °C et 1 bar (souvent respectivement notés slm et sccm).

Pour ce faire, quelques données générales ont été nécessaires :

|           |  |                                   |
|-----------|--|-----------------------------------|
| $Q$       | Charge d'un électron                       | $-1.602 * 10^{-9} As$             |
| $m$       | Masse d'une mole d'H <sub>2</sub>          | 2 g                               |
| $\varphi$ | Masse volumique de l'H <sub>2</sub>        | 0.0898 g/l                        |
| $n$       | nombre de moles d'électron                 | 2 pour une mole de H <sub>2</sub> |
| $Q_{H_2}$ | Débit d'hydrogène aux conditions standards | *                                 |
| $S$       | Surface zone active                        | *                                 |
| $I$       | Courant électrique                         | *                                 |
| $j$       | Densité de courant par unité de de surface | *                                 |

Tableau 1 : Données générales nécessaires pour déterminer la limite de courant. Les cases annotées du symbole\* sont les facteurs qui varient en fonction des divers tests.

Ces données ont permis de déterminer la charge d'une mole d'électrons (constante de Faraday) :

$$Q_{mole e} = Q * Na = (-1.602 * 10^{-9}) As * 6.022 * 10^{23} mol^{-1} = 9.65 * 10^4 As * mol^{-1}$$

Afin de déterminer le débit d'hydrogène, il faut connaître le volume qu'occupe une mole d'H<sub>2</sub> :

$$V = \frac{m}{\varphi} = \frac{2g}{0.0898 \frac{g}{l}} = 22.25 l$$

Ce qui permet de déterminer la constante qui relie le courant et le débit :

$$Q_{H_2} = cst * I = cst * \frac{Q_{mole e} * n}{60}$$

$$cst = \frac{Q_{H_2}}{\frac{Q_{mole e} * n}{60}} = \frac{22.25 \frac{l}{min}}{\left(\frac{9.65 * 10^4 As * 2}{60 s}\right)} = 0.006919 \frac{l}{A * min} = 6.919 \frac{cm^3}{A * min}$$

La formule permettant d'estimer le débit nécessaire en  $\left[\frac{cm^3}{min}\right]$  afin d'atteindre un courant donné est :

$$Q_{H_2} = I * 6.919 \frac{cm^3}{A * min} \quad 1$$

La formule permettant d'estimer la limite de courant théorique pour un débit d'H<sub>2</sub> donné en  $\left[\frac{cm^3}{min}\right]$  est donc :

$$I = \frac{Q_{H_2}}{6.919 \frac{cm^3}{A * min}} \quad 2$$

La division de ce courant obtenu par la surface de la zone active de la membrane permet d'obtenir la densité de courant par unité de surface :

$$j = \frac{Q_{H_2}}{S * 6.919 \frac{cm^3}{A}} \quad 3$$

#### 4.4. Capacité de production de puissance du système et rendement

Comme pour le point précédent cette étape va permettre de déterminer une formule permettant de définir de manière théorique la puissance pouvant être libérée par la pile et ainsi de pouvoir comparer par la suite les résultats obtenus de manière expérimentale et de déterminer le rendement réel.

Les données nécessaires à cette étape sont les suivantes :

$1kg \text{ d}'H_2 \Leftrightarrow 11Nm^3 \Leftrightarrow 33kWh$

|              |   |                      |
|--------------|---|----------------------|
| $\epsilon_m$ | Densité énergétique par unité de masse de l' $H_2$  | $33 \frac{kWh}{kg}$  |
| $\epsilon_v$ | Densité énergétique par unité de volume de l' $H_2$ | $3 \frac{kWh}{Nm^3}$ |
| $P$          | Puissance électrique maximum                        | *                    |
| $Q_{H_2}$    | Débit d'hydrogène au conditions standards           | *                    |

Tableau 2: Données générales nécessaires pour déterminer la puissance maximale et le rendement. Les cases annotées du symbole\* sont les facteurs qui varient en fonction des divers tests.

Pour ce qui est du rendement de la cellule lorsqu'elle fonctionne en mode pile à combustible, nous allons utiliser le rendement théorique donné dans la littérature pour un modèle PEMFC (pile avec une membrane polymère qui a pour combustible l'hydrogène) qui est entre 40 et 50 %. [9]

$$\eta_{pile \text{ à combustible}} = 50\% = 0.5$$

La puissance électrique pouvant être produite pour un débit d'hydrogène va donc dépendre de la densité énergétique du combustible ainsi que du rendement de la pile :

$$P = \epsilon_v * \eta_{pile \text{ à combustible}} * Q_{H_2} \quad 4$$

Le rendement de la pile se calcule donc de la manière suivante :

$$\eta_{pile \text{ à combustible}} = \frac{P}{\epsilon_v * Q_{H_2}} \quad 5$$

#### 4.5. Débit d'air en fonction du débit d' $H_2$ utilisé

Pour que la réaction d'oxydoréduction se fasse efficacement, il est nécessaire qu'un équilibre entre les débits d'air (donc l' $O_2$ ) et d' $H_2$  soit trouvé. C'est donc dans cette optique que de manière théorique cet équilibre va être calculé.

Pour se faire il est nécessaire de prendre en compte que le porteur d'oxygène est de l'air et que ce dernier n'est composé que partiellement d' $O_2$  (21 %) et que le produit de la réaction est de l' $H_2O$ . Ce dernier indique que deux fois plus d'hydrogène sera nécessaire que d'oxygène pour compléter la réaction.

|           |  |
|-----------|--|
| $Q_{H_2}$ | Débit d'hydrogène aux conditions standards |
| $Q_{O_2}$ | Débit d'oxygène aux conditions standards   |
| $Q_{air}$ | Débit d'air aux conditions standards       |

Tableau 3: Données générales nécessaires pour déterminer le débit d'air.

$$Q_{O_2} = Q_{H_2}/2$$

$$Q_{air} * 0.21 = Q_{H_2}/2$$

$$Q_{air} * 0.42 = Q_{H_2}$$

$$Q_{air}/Débit_{H_2} = 2.38$$

Il faut donc un débit d'air 2.38 fois plus important d'air que d' $H_2$ .

$$Q_{air} = Q_{H_2} * 2.38$$

6

#### 4.6. Facteurs influençant le rendement d'une pile à combustible

Dans cette partie vont être présentés les principaux facteurs pouvant impacter les performances de notre système et qui devront donc être pris en compte lors du développement du circuit encadrant la pile à combustible.

##### 4.6.1. Humidification

L'un des éléments essentiels au bon fonctionnement d'une pile à combustible est de maintenir la membrane humide afin que sa conductivité reste satisfaisante.

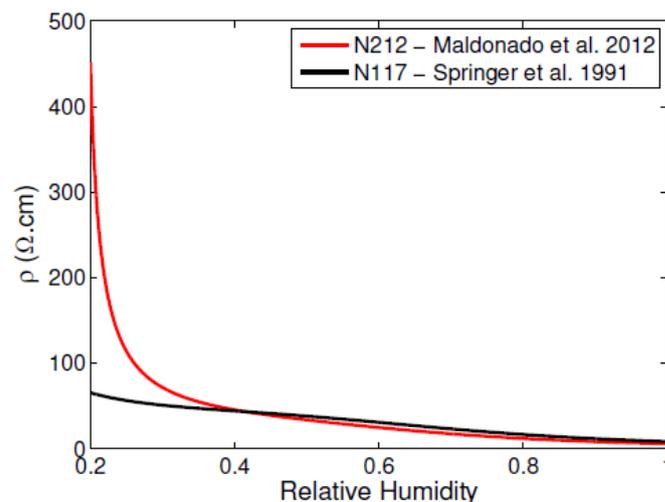


Figure 8: Lien entre l'humidité relative de la membrane en [%] et sa résistance protonique en [ $\Omega \cdot cm$ ]. [14]

L'importance de ce facteur explique la nécessité des humidificateurs qui sont en général placés à l'entrée des deux gaz au niveau de l'anode et de la cathode. Comme on peut l'observer sur la Figure 8, la résistance protonique de la membrane va diminuer lorsque son humidification va être importante d'autant plus lorsque du Nafion 212 est utilisé pour la membrane. [9] [6]

Trois phénomènes vont permettre de faire circuler de l'eau au travers de la membrane et vont donc influencer son humidification.

- **L'électro-osmose** qui due au potentiel qui est appliqué aux bornes de la cellule et va créer un champ électrique. Ce dernier va créer une force qui va permettre de mettre en mouvement les charges libres dans la couche de diffusion ; or comme les ions sont hydratés, ils vont traverser la membrane avec leurs molécules d'eau. L'électro-osmose va avoir tendance à assécher l'anode qui est naturellement moins hydratée que la cathode ou de l'eau se forme à la suite de l'oxydation. [9] [15]
- **La rétrodiffusion** qui est due à la formation d'eau à la cathode qui engendre un gradient de teneur en eau entre le côté cathode et anode provoquant un flux d'eau vers l'anode. De ce fait et contrairement au phénomène précédent, ce dernier va avoir tendance à homogénéiser l'hydratation de la membrane et donc d'améliorer sa conductivité. [9] [16]
- **Le transfert par convection** qui est dû au gradient de pression à travers la cellule et qui peut engendrer un flux d'eau à travers la membrane. [9] [16]

#### 4.6.2. Pression

Tant la pression de l'air (porteur de l'oxygène) que de l' $H_2$  vont jouer un rôle étant donné que ce facteur va augmenter la densité moléculaire du gaz et donc la probabilité de chocs efficaces. Il est cependant important de noter qu'une augmentation de pression demande un compresseur et plus l'augmentation de pression va être importante plus le travail nécessaire à cette étape va être élevé. Il est donc nécessaire de prendre en compte cet élément lors du développement, afin de trouver le bon compromis entre l'augmentation des performances et le travail nécessaire pour comprimer le gaz qui va diminuer le rendement de l'installation.

De plus une pressurisation de la pile peut augmenter le phénomène de croisement (passage des gaz à travers la membrane) entre l'oxygène et l'hydrogène ce qui implique des pertes. [8]

#### 4.6.3. Température

La température de fonctionnement de la cellule va avoir une influence sur la cinétique des réactions au sein de la cellule étant donné que cette dernière va augmenter l'état d'agitation des particules ce qui va augmenter la probabilité de chocs efficaces. De plus, une température plus élevée va avoir tendance à améliorer la conduction des protons dans la membrane comme le montre la Figure 9 et donc améliorer le rendement du cycle.

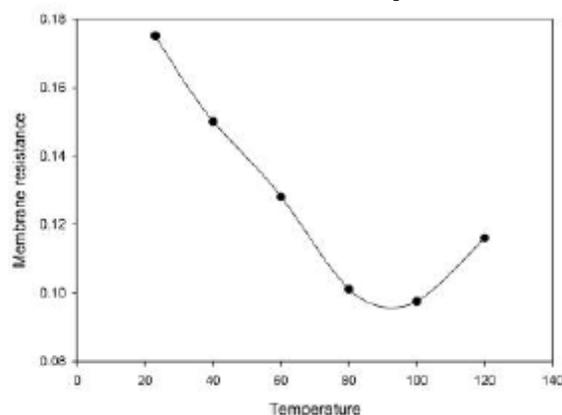


Figure 9: Influence de la température sur la conductivité de la membrane. La température est exprimée en [°C] et la résistance de la membrane en [ $\Omega \cdot cm$ ]. [17]

Une autre influence de la température est le fait d'augmenter de manière beaucoup plus significative le phénomène de rétrodiffusion par rapport à l'électro-osmose. La température permet à la membrane de gonfler et ainsi d'augmenter son coefficient de diffusion du fait de la structure du Nafion [16]. Une augmentation de la rétrodiffusion va avoir pour conséquence une meilleure répartition de l'eau entre l'anode et la cathode et donc une meilleure hydratation de la membrane et donc une conductivité protonique accrue de cette dernière.

Cependant une température trop élevée va avoir tendance à assécher l'électrolyte, à augmenter le taux de transfert d' $H_2$  par la membrane ou encore à dégrader certains éléments tels que les joints et les catalyseurs, un compromis doit être trouvé. [17]

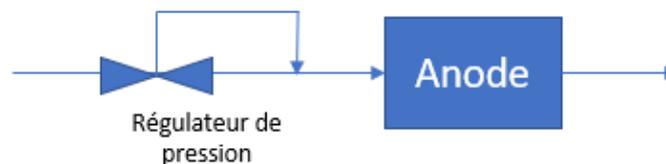
#### 4.6.4. Stœchiométrie

La stœchiométrie est le fait de multiplier par un facteur les débits de gaz qui seraient théoriquement nécessaires d'injecter dans la cellule. L'excédent de flux ainsi créé va permettre d'évacuer l'eau qui va se former au niveau des chambres anodique et cathodique. La stœchiométrie va être plus importante du côté de l'anode étant donné qu'une plus grande quantité d'eau se trouve de ce côté de la pile. Ce facteur va notamment permettre d'éviter une accumulation d'eau à cet endroit qui réduirait les performances de la pile. Cette stœchiométrie va également permettre de mettre un flux légèrement plus important que le débit minimum théorique afin de pouvoir produire la puissance souhaitée. [11]

#### 4.7. Recirculation

Lors du développement d'un système de pile à combustible, il est nécessaire de prendre en compte qu'une partie de l'hydrogène injecté dans la cellule ne va pas être consommé et va donc ressortir directement. C'est pour cette raison que plusieurs méthodes sont généralement utilisées [6] afin de répondre à cette problématique :

- **Architecture en fuite continue** : Cette première méthode consiste à laisser la sortie du côté anode ouverte et donc de laisser le surplus d'hydrogène s'échapper.

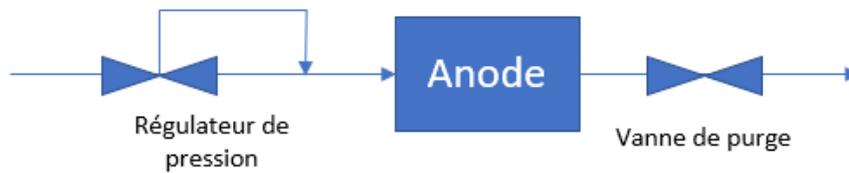


Les avantages de ce système sont que l'excédent de gaz va permettre d'évacuer le surplus d'eau, ce qui va donc éviter la formation de bouchons d'eau. Un bouchon d'eau est une accumulation d'eau dans le compartiment anodique qui a pour conséquence de réduire la zone active où la réaction est susceptible de s'effectuer.

Cette configuration va éviter les risques de surpression au niveau de la chambre anodique étant donné que la sortie est ouverte.

Les désavantages sont notamment le fait que les pertes d'hydrogène d'un tel système sont élevées ce qui va poser des problèmes de sécurité et de rendement. Il est donc difficilement viable pour des systèmes qui demandent une stœchiométrie importante afin d'évacuer l'eau de l'intérieur de la pile.

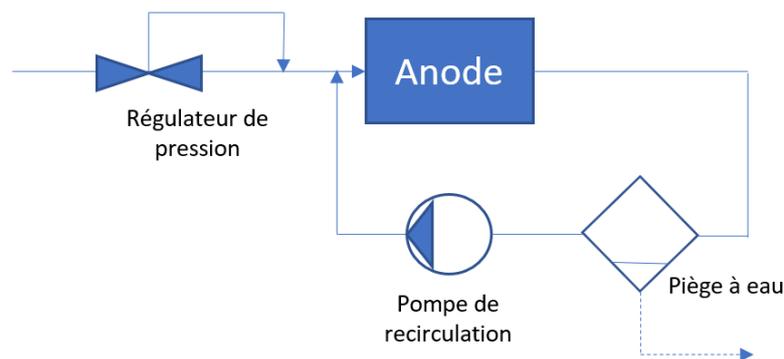
- **Fonctionnement en purge périodique ou mode impasse** : Cette méthode consiste à fermer la sortie du compartiment anodique et de l'ouvrir (de faire une purge) de manière cyclique afin d'éviter les surpressions et d'évacuer l'eau.



Les avantages de cette deuxième méthode sont le fait que les pertes en hydrogène vont être limitées par rapport au système précédent et que les cycles de purge vont pouvoir être optimisés afin de prévenir l'accumulation d'eau et les surpressions.

En revanche, les purges peuvent perturber les performances de la cellule en faisant varier la pression (cf: 4.6.2) au niveau du compartiment anodique et que néanmoins des pertes de réactif persistent.

- **Boucle de recirculation** : Cette dernière méthode consiste à reboucler la sortie du compartiment anodique au niveau de l'entrée dans le but de ne pas perdre de réactif.



Cette dernière technique possède de nombreux avantages comme par exemple le fait de permettre un sur débit important permettant d'évacuer le surplus d'eau dans le compartiment anodique et limite les pertes de réactif. C'est pour cette raison que le piège à eau est nécessaire afin de ne pas réinjecter de l'eau à l'entrée de l'anode et qui explique le rôle de la pompe de recirculation qui permet d'imposer le sur débit.

Le débit de fonctionnement de la pompe de recirculation est déterminé par le coefficient stœchiométrique imposé au débit d' $H_2$ .

Dans un premier temps la première méthode va être privilégiée du fait qu'elle est plus simple à mettre en place que les deux autres.

#### 4.8. Principe stack de piles à combustible

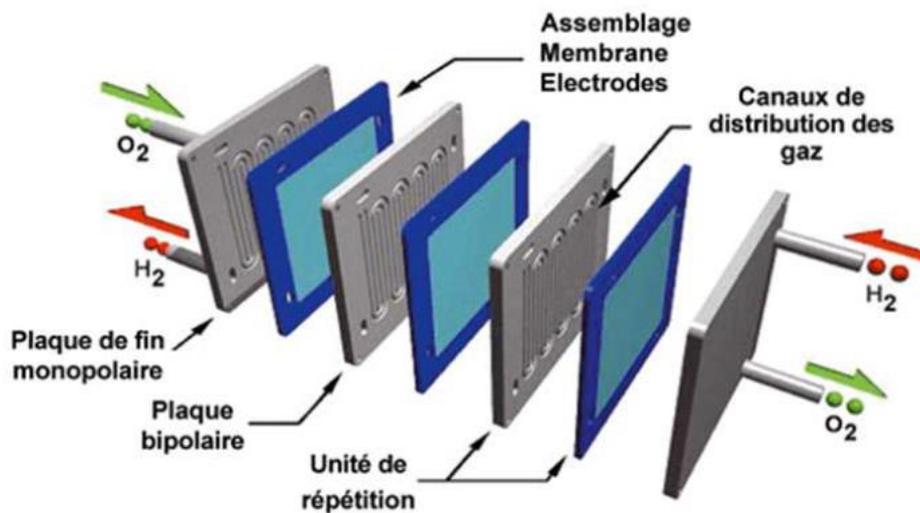


Figure 10: Stack de piles à combustibles [18]

Le principe d'un stack de piles à combustible est tout simplement une mise en série de cellules pour effectuer à plusieurs reprises la réaction et ainsi d'augmenter la tension. En effet comme expliqué dans le point 4.2, le potentiel maximal d'une cellule est de 1,23 V auquel les pertes doivent être soustraites ce qui limite cette tension aux bornes à environ 1 V.

Au niveau de la Figure 10, on peut voir trois cellules mises en série ce qui permet donc d'avoir 3 V à disposition.

Dans le cas des tests qui seront présentés dans ce travail, le stack de piles à combustible est composé de 40 cellules.

### 5. Cellule éducative

Cette première étape sur ce modèle de cellule éducative va permettre d'estimer les conditions d'utilisations et les caractéristiques de la monocellule, telles que les débits de gaz ou encore la puissance.

Cet élément est une cellule réversible qui peut donc être utilisé dans un premier temps en tant qu'électrolyseur afin de stocker l'hydrogène et l'oxygène dans deux compartiments de 15 ml chacun. Dans un second temps, on peut réutiliser ces deux gaz stockés en branchant une résistance sur les bornes de la cellule et donc l'utiliser en tant que pile à combustible. La surface active de cet élément est de 4 cm<sup>2</sup>.



Figure 11: Pile à combustible réversible avec stockage de Heliocentris academia

Pour la partie électrolyse la mesure est automatisée avec un total de 10 mesures prises chaque seconde, contrairement à une mesure manuelle pour le mode pile à combustible. La mesure automatique se fait grâce au programme TENMA permettant de contrôler l'alimentation DC de la même marque.

### 5.1. Tests et résultats

Pour le mode de fonctionnement pile à combustible, le débit d'hydrogène dépend notamment de la tension, du courant et de la surface de la zone active de la membrane. Il a donc fallu dans un premier temps extraire les courbes reliant la densité de courant par unité de surface et la tension dans un tel système. C'est pour cette raison que les premiers essais ont été effectués sur un modèle éducatif permettant de nous délivrer ces informations. Les résultats obtenus lors de l'électrolyse ne seront que brièvement exposés, car ils ne sont pas l'objectif final de ce travail.

#### 5.1.1. Mode électrolyse

Les mesures ont été effectuées sur la plage de tension délivrée par le fabricant qui allait de 1,5 à 2,5 V. Ces valeurs sont liées au potentiel redox dont nous avons parlé précédemment dans le point 4.2 qui était de 1,23 V. La plage de tension débute à une valeur légèrement supérieure afin de compenser les différentes pertes de la cellule (surtensions).

Le fait d'utiliser la densité de courant plutôt que le courant en lui-même va permettre de pouvoir réutiliser les résultats obtenus durant ces tests lors de la caractérisation de la monocellule et de comparer les résultats.

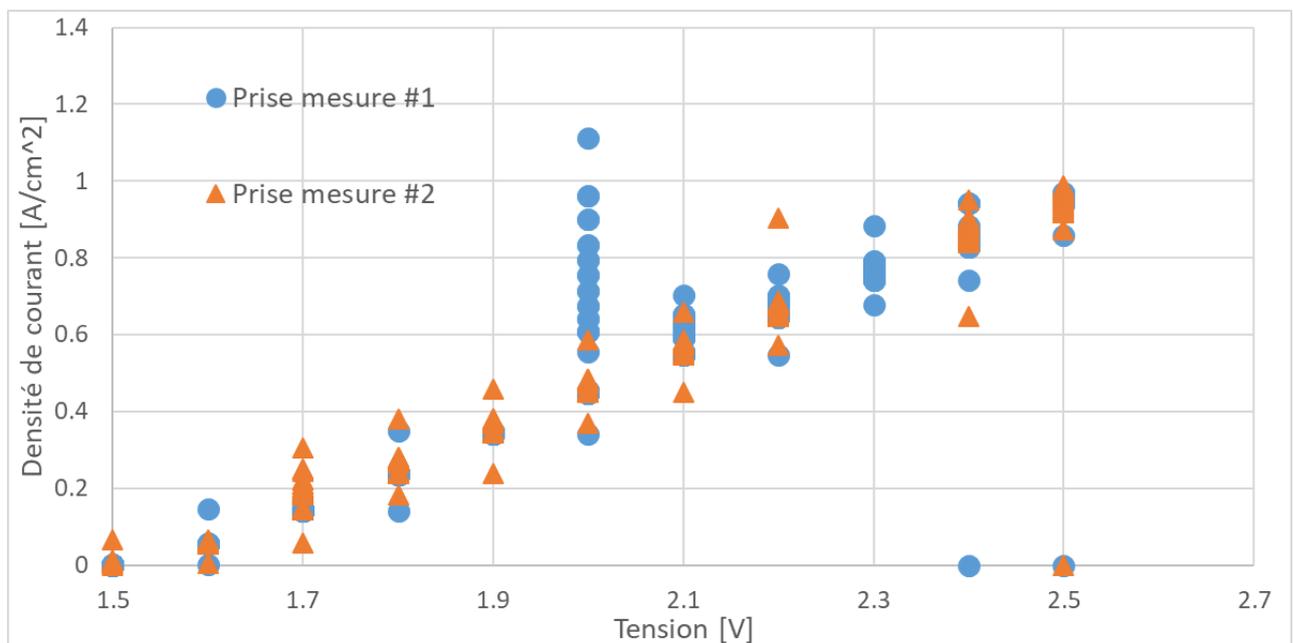


Figure 12: Test en mode électrolyse de la cellule éducative.

Sur la courbe de la Figure 12, on observe que la densité de courant augmente de manière linéaire par rapport à la tension qui est appliquée aux bornes de la cellule afin d'effectuer l'électrolyse. Cette observation peut s'expliquer par le fait que la résistance de la cellule et du circuit sont fixes.

### 5.1.2. Mode pile à combustible

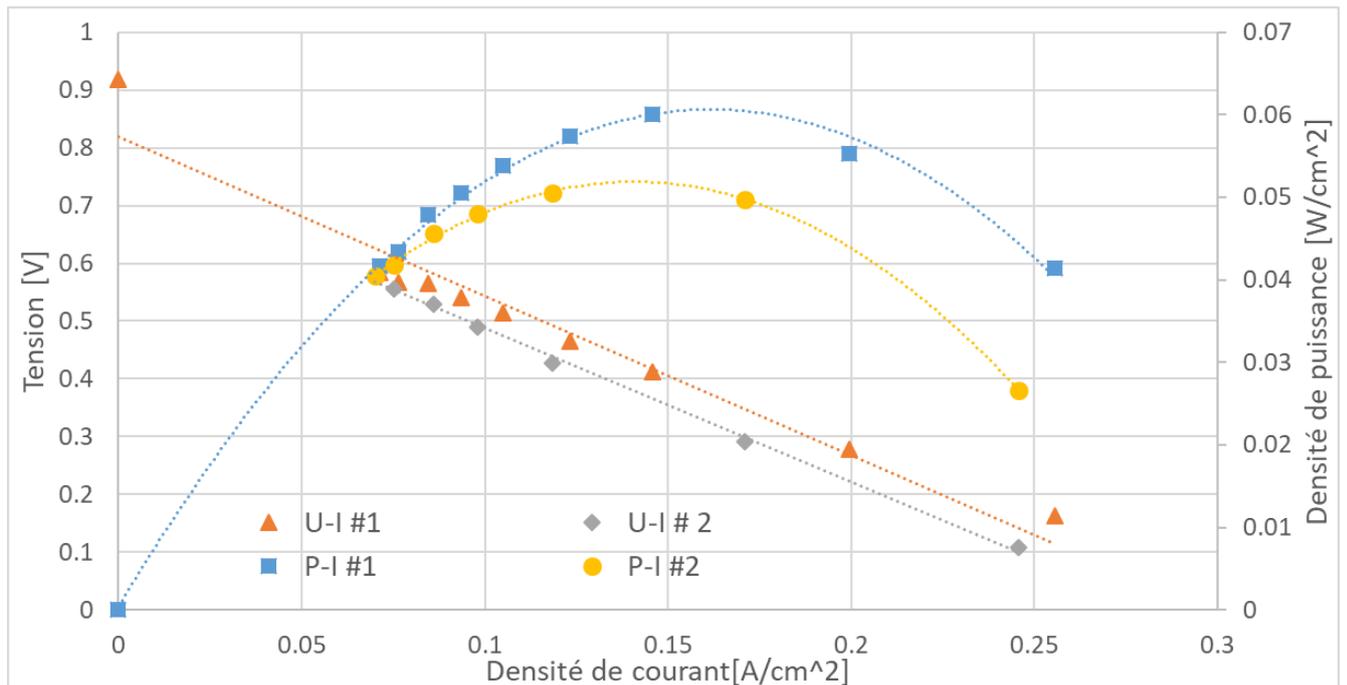


Figure 13: Test en mode pile à combustible de la cellule éducative

Sur la Figure 13, on constate que la puissance délivrée par la cellule suit une fonction parabolique avec une valeur maximale de  $60 \text{ mW/cm}^2$  atteinte pour un courant de  $150 \text{ mA/cm}^2$  et une tension d'environ  $0,4 \text{ V}$ .

La tension diminue de manière linéaire avec l'augmentation du courant, pour une tension maximum d'environ  $0,9 \text{ V}$  et un courant maximum de  $0,26 \text{ A/cm}^2$ .

À nouveau la puissance a été mise en densité par unité de surface afin de pouvoir comparer cette valeur à celles qui vont être obtenues par la suite avec des cellules d'une surface active différente.

La tension maximale observée de  $0,9 \text{ V}$  est en accord avec ce qui a été précédemment mentionné dans la partie théorique (cf point 4.2).

Le fait que la tension en fonction du courant évolue de manière linéaire peut être expliqué par la loi d'Ohm.

Etant donné la tendance parabolique de la courbe de la puissance produite, le point de puissance maximal semble être un optimum à trouver entre la tension et le courant qui évoluent de manière inversement linéaire.

Cette partie nous a donc permis d'avoir une première idée de la densité de puissance par unité de surface active que peut fournir une pile à combustible. Ces résultats ont permis un premier dimensionnement des débits et donc des débitmètres nécessaires pour la monocellule. En effet comme il a été dit dans les points 4.4 à 4.5, la puissance pouvant être produite est liée au débit d' $H_2$  injecté dans la cellule qui est lui-même lié au débit d'air.

## 6. Pile à combustible monocellule

Dans cette seconde phase de test, l'objectif est de se rapprocher un peu plus du circuit du stack industriel afin de pouvoir faire une première estimation des conditions d'utilisation qui seront nécessaires au bon fonctionnement de ce dernier.

Pour ce faire, nous allons donc faire varier différents facteurs clés (débits, résistance) et observer leurs influences, ce qui va donc nous permettre de prendre en main cette technologie et de caractériser son fonctionnement. Dans un deuxième temps, une optimisation sera faite afin de déterminer les limites et les meilleures conditions de fonctionnement de cette monocellule.

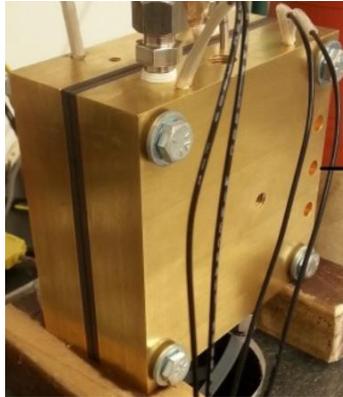


Figure 14: Mono-cellule de chez Fuel Cell Store

## 6.1. Méthode de développement

### 6.1.1. Eléments et assemblage

La monocellule ayant été fournie avec uniquement les plaques d'extrémités, les collecteurs de courant et les canaux d'écoulements, il a été nécessaire d'y ajouter les éléments manquants tels que la membrane, le GDL, le catalyseur ou encore le cadre de zone active.

#### 6.1.1.1. Membrane MEA

Comme il a été dit précédemment, une membrane MEA est un assemblage constitué de la membrane ainsi que du catalyseur et dans le cas de celle utilisée pour ces tests, le GDL y est également intégré. La surface active de cette membrane est de 25 cm<sup>2</sup>.

Une utilisation Hydrogène/Air de la cellule est effectuée lors des tests, et ceci pour des raisons de difficultés de stockage de l'oxygène en général et du fait que légalement il n'est pas autorisé de stocker de l'oxygène sous pression. La membrane sera de type Hydrogène Air Fuel Cell au Nafion 212.

#### 6.1.1.2. Cadre zone active

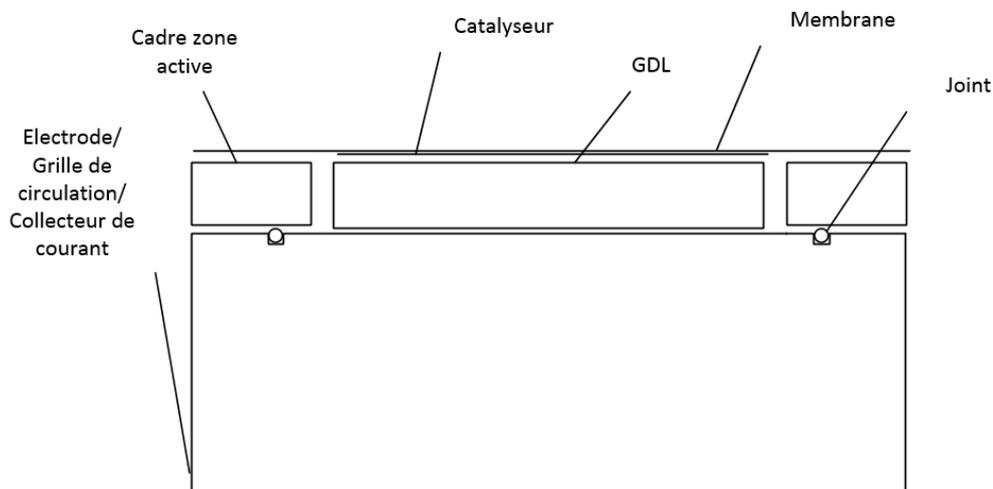


Figure 15: Vue en coupe de la moitié de la mono-cellule permettant de visualiser la disposition des différents éléments qui sont à l'intérieur de la mono-cellule.

Le dimensionnement du cadre de la zone active a été fait en fonction de l'épaisseur du GDL qui sera utilisé lors des tests. En effet comme on le voit sur la Figure 15, le cadre de la zone active va permettre de contrôler la compression du GDL pour assurer la conduction des électrons, mais dans certaines limites admissibles qui sont de 20 à 50 % de l'épaisseur du GDL [8]. Dans le cas du MEA utilisé lors des tests, nous avons des GDL de types tissu qui acceptent une compression plus importante que celles de type papier, permettant des compressions de l'ordre de 40 à 50 % de l'épaisseur du GDL.

L'épaisseur du GDL-CT étant de 0,41 mm il faudra donc un cadre de zone active d'une épaisseur d'environ 0,205 à 0,246 mm.

L'épaisseur du cadre de zone active utilisé pour cette monocellule est de 0,3 mm, ce qui correspond à la limite inférieure de la plage de compression définie précédemment, correspondant à une compression d'environ 30 % de l'épaisseur du GDL.

### 6.1.1.3. Assemblage monocellule

L'assemblage des éléments a été effectué à la suite de la désinfection à l'isopropanol et au rinçage à l'eau déminéralisée de chacun d'eux, à l'exception de la membrane qui aurait pu être détériorée par cette étape.

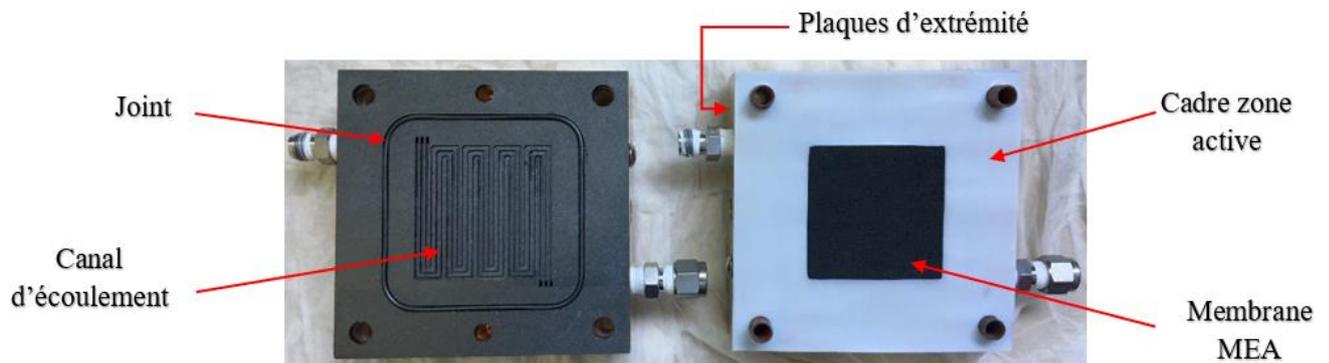


Figure 16: Assemblage des éléments de la mono-cellule.

### 6.1.2. Développement du circuit

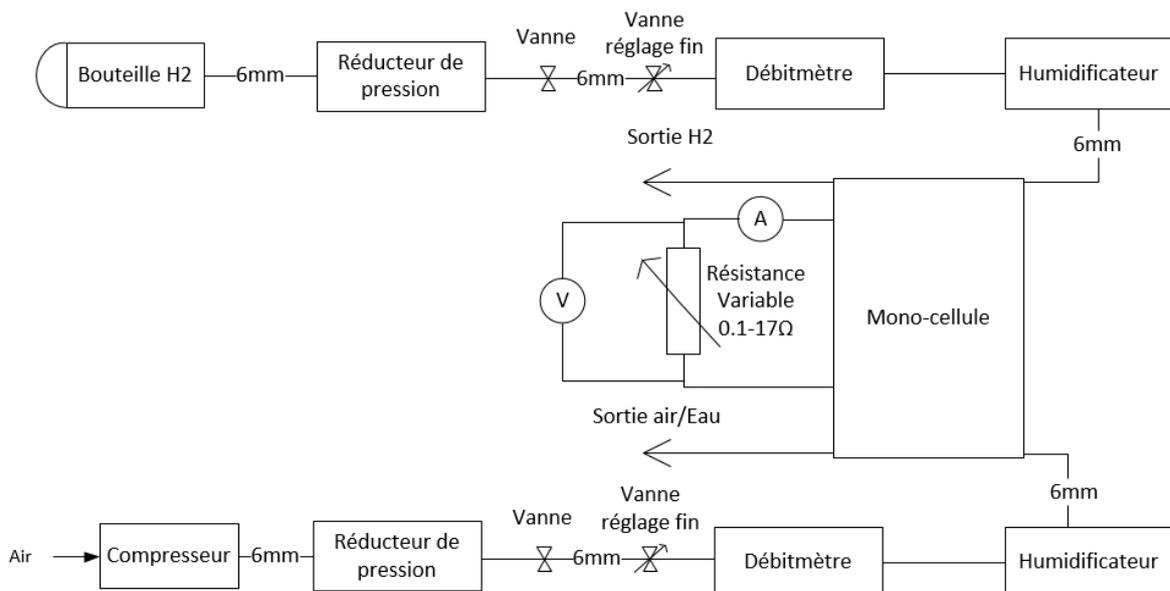


Figure 17: Banc de test de la mono-cellule. La partie haute est le circuit permettant l'alimentation en H2 depuis une bouteille, alors que la partie située en bas fournit le débit d'air à la cellule à l'aide d'un compresseur. Au centre la mono-cellule avec à gauche, la résistance variable permettant les tests.

Comme il a été dit précédemment, les débits des deux gaz sont liés à la puissance qui pourra être produite par le système, c'est donc pour cette raison que des débitmètres et des vannes de réglage fin ont été mis en place afin de pouvoir réguler ces flux.

Dans le point 4, le lien entre la performance de la cellule et différents facteurs tels que l'humidité, la pression ou encore la température a été exposé et c'est donc pour cette raison que des humidificateurs de type barboteur et des réducteurs de pression ont été mis en place dans ce circuit. En sortie une résistance variable a été installée afin de pouvoir exécuter des courbes tension/courant. L'ensemble des éléments composant ce circuit ainsi que leurs prix sont répertoriés dans la liste de matériel de la monocellule (cf Annexe 2 : Liste de matériel monocellule)

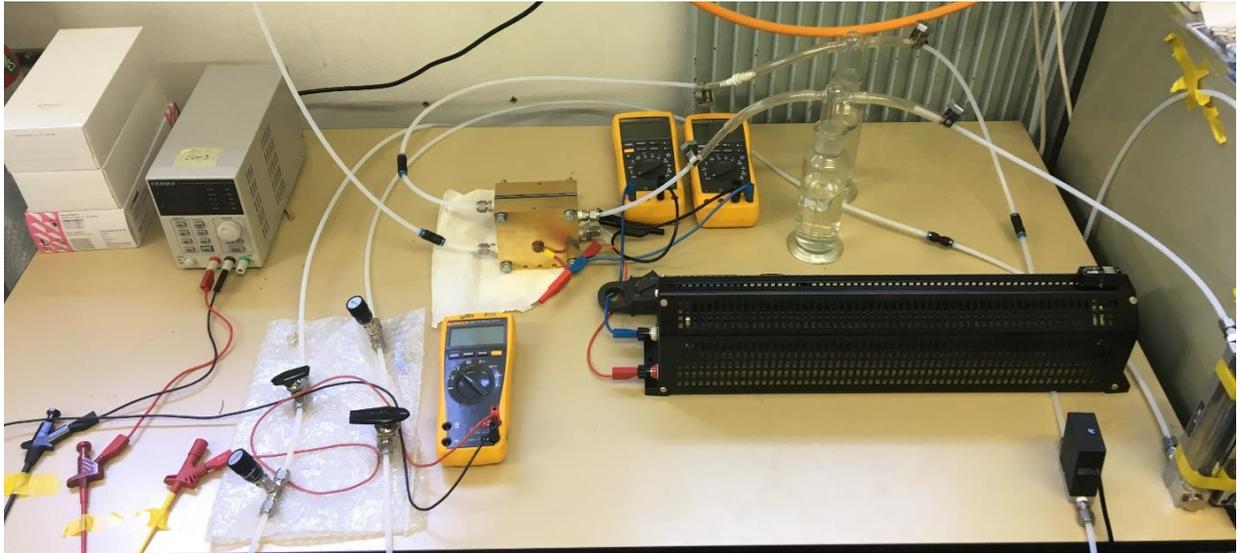


Figure 18: Mise en place réelle du circuit développé précédemment

### 6.1.3. Débits nécessaires

Dans cette partie, l'objectif va être de déterminer le débit d' $H_2$  et d'air qui seront nécessaires pour cette monocellule qui sera testée par la suite. Pour ce faire, le dimensionnement sera basé sur l'expérience et les résultats obtenus précédemment avec le modèle éducatif.

Le débit de gaz nécessaire au bon fonctionnement de la cellule est fixé par différents facteurs tels que la densité énergétique de l'hydrogène, la surface de la cellule, ou encore la tension et le courant maximum (puissance maximale) obtenus à la sortie de la cellule.

$$\sigma_p = \text{Densité de puissance max.} = 0.06 \frac{W}{cm^2}$$

$$S = \text{Surface zone active monocellule} = 25 \text{ cm}^2$$

$$P = \text{Puissance électrique maximum} = S * \sigma_p = 1.5 \text{ W}$$

Avec ces données et l'équation 1, nous pouvons donc déterminer que le débit d' $H_2$  maximum qu'il pourra être nécessaire d'injecter dans la pile afin d'atteindre cette densité de puissance est de  $17 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

De la même manière grâce à l'équation 6, le débit d'air nécessaire au bon fonctionnement du système est déterminé à l'aide du facteur le reliant au débit d' $H_2$  et fixe cette valeur à  $40,46 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

Une fois ces deux débits déterminés, il est donc possible de passer au développement et aux tests du circuit.

Tout au long de ces tests, les débit d'air et d' $H_2$  seront exprimés en l/min ou en  $cm^3/min$  et sont aux conditions standards de température et de pression de 25 °C et 1 bar (souvent respectivement notés slm et scm).

#### 6.1.4. Calibration débitmètres

Afin de s'assurer que les débitmètres nous délivrent des informations correctes durant les différents tests, nous allons effectuer une calibration. Cette étape va également permettre de connaître le coefficient qui lie le débit d'air et le débit d'hydrogène étant donné que les débitmètres ont été calibrés pour de l'air.

##### 6.1.4.1. Méthode de calibration

La méthode pour effectuer la calibration a été de mesurer de manière manuelle le débit à l'aide d'un récipient gradué et d'une prise de mesure de temps afin de le comparer avec la valeur affichée par le débitmètre.

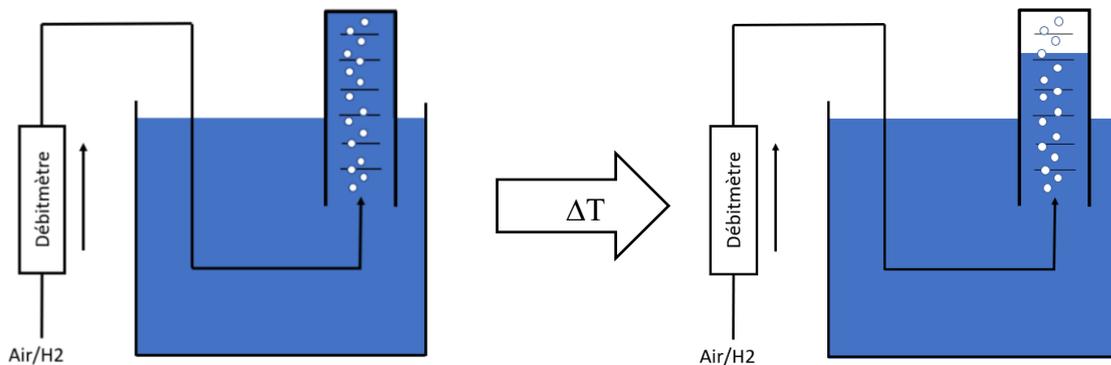


Figure 19: Principe de la calibration. Le gaz utilisé passe à travers un débitmètre à flotteur puis est stocké dans un récipient gradué. La mesure du temps de l'expérience ainsi que le volume de gaz stocké donnent un débit de comparaison à la mesure affichée par le débitmètre.

#### 6.1.4.2. Résultats obtenus

##### 6.1.4.2.1. Calibration des débitmètres avec l'air

- Réglage débitmètre :  $100 \pm 5 \frac{cm^3}{min}$ .
- Volume d'air stocké : 30 ml.
- Temps pour stocker la quantité d'air : 18 s.
- Débit calculé =  $\frac{30 ml}{18s} = 1.67 \frac{ml}{s} = 100 \frac{cm^3}{min}$ .

Ces mesures valident donc la qualité de la mesure de débit affichée par le débitmètre.

##### 6.1.4.2.2. Calibration des débitmètres avec l' $H_2$

- Réglage débitmètre :  $100 \pm 5 \frac{cm^3}{min}$ .
- Volume d' $H_2$  stocké: test 1: 300 ml, test 2: 200 ml
- Débit calculé test 1 =  $\frac{300 ml}{57s} = 5.26 \frac{ml}{s} = 315.8 \frac{cm^3}{min}$ .
- Débit calculé test 2 =  $\frac{200 ml}{36s} = 5.56 \frac{ml}{s} = 333.3 \frac{cm^3}{min}$ .

Ce qui donne un facteur moyen d'environ 3.3 pour l'hydrogène entre le débit affiché par le débitmètre et le débit réel.

## 6.2. Protocole de mesure

Ce protocole va indiquer en détail les étapes importantes à respecter afin de pouvoir reproduire les tests effectués et obtenir des résultats similaires. Cette étape prend en compte les différentes difficultés qui ont été rencontrées tout au long des essais et dont certaines sont exposées dans la suite de ce travail.

### - Mise en route :

- 1) Réglage résistance sur sa valeur minimale, puis mise en route et réglage de l'ampèremètre et du voltmètre.
- 2) Ouverture de la vanne du circuit de l'air et réglage du débit à l'aide de la vanne de réglage fin et du débitmètre.
- 3) Vérification de l'évacuation de la sortie de l'anode dans une ventilation. Ouverture de la vanne du circuit d'H<sub>2</sub> et réglage du débit de la même manière que pour l'air.

### - Mesures :

- 1) Attente de la stabilisation avec la méthode indiquée dans le point 6.3.1.
- 2) Pour obtenir les courbes tension-courant et puissance-courant, une augmentation progressive de la valeur de la résistance doit être réalisée. Pour les tests effectués jusqu'au point 6.3.3.2.1 inclus, la plage de la résistance suffit à observer les tendances et les phénomènes étudiés. Pour l'ensemble des tests qui suivent, l'augmentation de la puissance obtenue nécessite un élargissement de la plage de résistance balayée. Une mesure en circuit ouvert et une en court-circuit sont à réaliser. La mise en série de fils sécurisés aux bornes de la pile permettant d'atteindre des tensions plus basses qu'avec la résistance variable sont à mettre en place afin de compléter la plage de mesure.
- 3) Pour obtenir les courbes courant en fonction du débit d'air, ce dernier doit être fixé à la valeur maximale que la plage de mesure des débitmètres permet puis doit être diminué de manière progressive. La résistance va-elle rester fixe à sa valeur minimale (0,1  $\Omega$  à froid).
- 4) Entre chaque prise de mesure les deux débits doivent être coupés et la résistance remise à sa valeur initiale avant de pouvoir relancer une mesure.

### - Mise hors service :

- 1) Fermeture vanne débit H<sub>2</sub>.
- 2) Fermeture vanne débit air.
- 3) Déconnexion résistance.

## 6.3. Tests et résultats

Maintenant que les différents facteurs de fonctionnement de cette mono-cellule sont déterminés, plusieurs tests vont être effectués afin de pouvoir caractériser le fonctionnement d'une pile à combustible de manière expérimentale. De cette manière une mise en parallèle avec les informations obtenues lors de la documentation faite dans le point 4 sera effectuée.

### 6.3.1. Temps de stabilisation

Cette partie a pour objectif de déterminer un temps de stabilisation lors de l'enclenchement du système afin d'avoir des résultats corrects lors des tests.

La mise en route a été effectuée avec un débit d' $H_2$  de  $50 \text{ cm}^3/\text{min}$  et un débit d'air de  $150 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

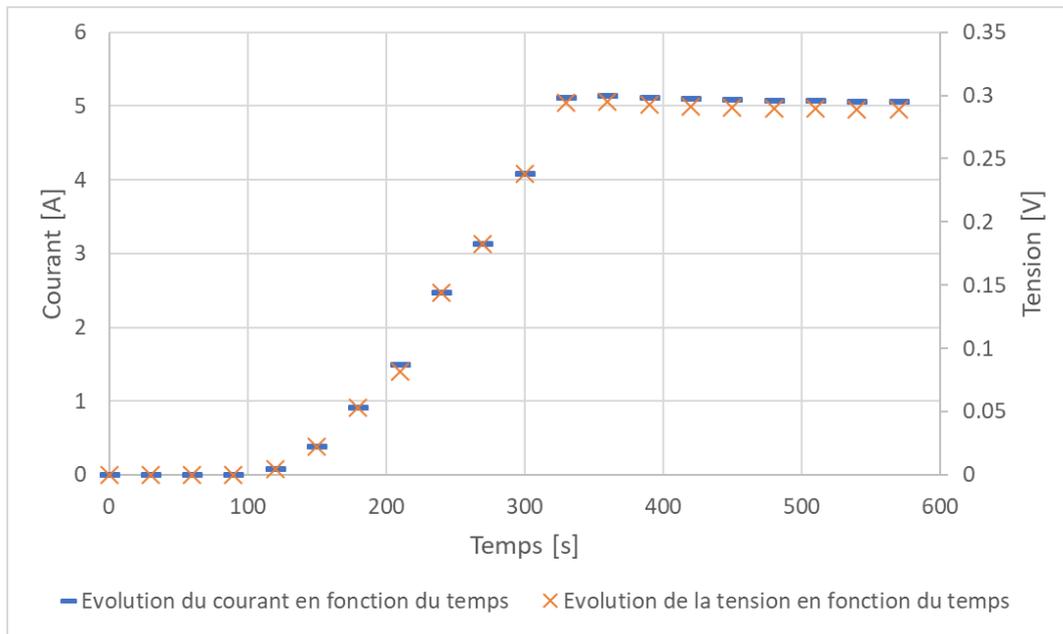


Figure 20: Test de stabilisation du système. Débit d' $H_2$  de  $50 \text{ cm}^3/\text{min}$ , débit d'air de  $150 \text{ cm}^3/\text{min}$  et résistance de  $0,1 \Omega$  (à froid).

Sur la Figure 20, on voit que le courant et la tension commencent à augmenter après 1 minute et 30 secondes et se stabilisent après 5 minutes et 30 secondes environ.

Ce temps de mise en route peut être expliqué par le fait que la cellule se remplit d'air tant du côté de l'anode que de la cathode lorsque cette dernière n'est pas en fonction. Ainsi dans un premier temps, cet air doit être évacué ce qui expliquerait ce temps de purge de la cellule.

Aucune reproductibilité n'a pu être obtenue pour déterminer un temps de stabilisation précis. Ce dernier semble varier en fonction du temps d'arrêt entre deux utilisations de la pile ou encore du débit de gaz injecté aux entrées de la pile. Cela implique donc qu'il faut prendre en compte ce temps de mise en route et s'assurer de ne pas débiter les mesures avant que la production soit stabilisée.

Par la suite afin de s'assurer que les mesures relevées soient correctes, un calcul préliminaire du courant limite pour un débit donné sera effectué avant chaque test permettant de fixer un ordre de grandeur de la valeur attendue (équation 2) lors de la première mesure à la résistance minimale (cf point 6.2).

### 6.3.2. Courbes U-I et P-I du système

Lors de ces premiers tests, l'objectif va être d'observer l'influence du débit d'hydrogène sur le fonctionnement d'une pile à combustible et ainsi de caractériser le fonctionnement de cette dernière lorsque la résistance à ces bornes varie.

#### 6.3.2.1. Résultats expérimentaux

Lors de ces premiers tests sur cette monocellule, les essais vont être effectués avec plusieurs valeurs de débits d' $H_2$  et donc d'air différentes afin de pouvoir comparer les résultats obtenus. Le facteur de 2,38 du point 4.5 liant le débit d'air à celui d' $H_2$  va être utilisé pour ces tests. La précision du débitmètre ne permettant pas une telle précision, ce facteur sera arrondi à 3.

La résistance branchée aux bornes de la monocellule est une résistance variable allant de 0,1 à 17  $\Omega$  (à froid).

Différentes prises de mesures ont été effectuées avant la réception du deuxième débitmètre et ont permis d'observer la reproductibilité des mesures avec différentes méthodes de variation de la résistance. Ces mesures ont démontré que cette dernière n'avait pas d'impact sur les résultats obtenus (Cf Annexe 1 : Influence de la méthode de variation de R). C'est donc une diminution progressive de la valeur de la charge qui sera effectuée tout au long de ces tests.

Des tests de reproductibilités pour chaque débit d'hydrogène vont être effectués.

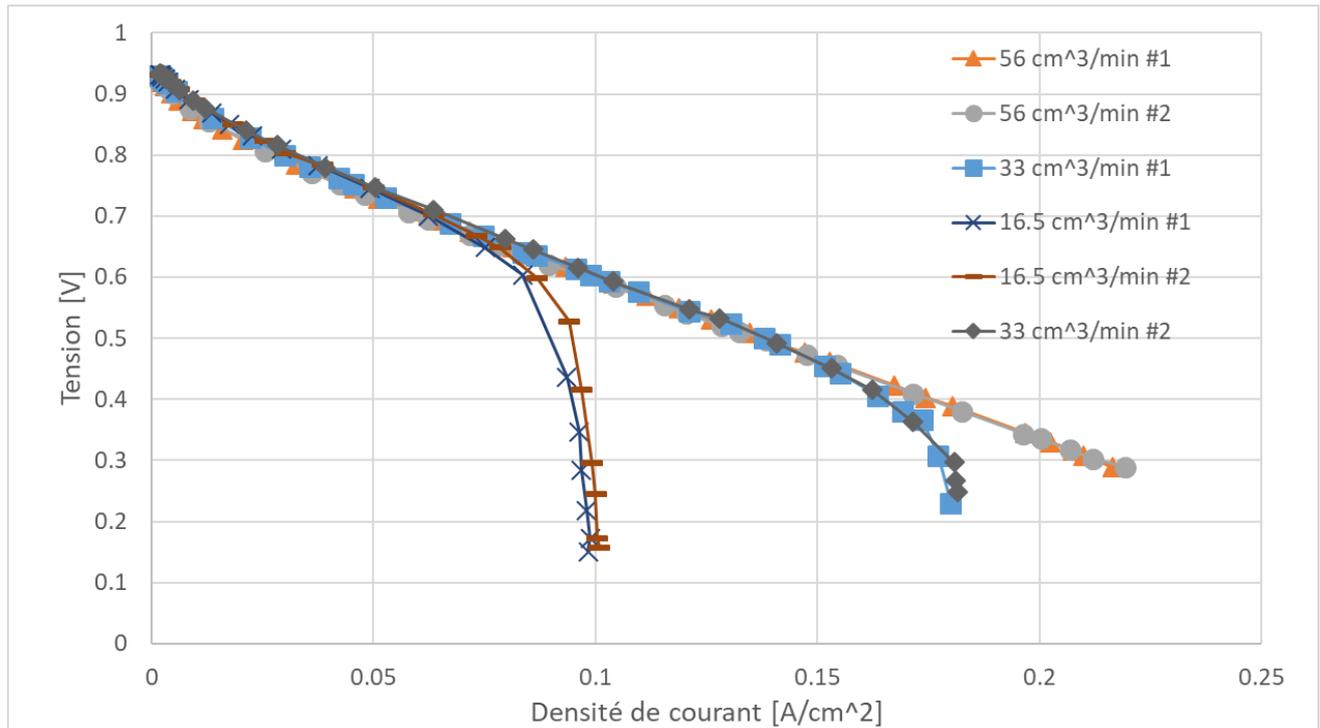


Figure 21: Tension en fonction de la densité de courant pour les premiers tests sur la monocellule. Débits H<sub>2</sub> de 16,5, 33 et 56 cm<sup>3</sup>/min. Débit d'air d'un facteur 3 supérieur au débit d'H<sub>2</sub> pour chaque prise de mesure.

Sur la Figure 21, on observe la même tendance pour les différentes courbes à l'exception de l'effondrement de la tension observé pour les débits de 33 et 16,5 cm<sup>3</sup>/min. Pour ces deux mesures, les densités de courant se stabilisent ensuite respectivement à 0,18 A/cm<sup>2</sup> et 0,09 A/cm<sup>2</sup> environ. On voit également que la densité de courant pour le test avec le débit d'H<sub>2</sub> de 56 cm<sup>3</sup>/min ne se stabilise pas ce qui implique donc probablement que la limite maximale n'a pas été atteinte.

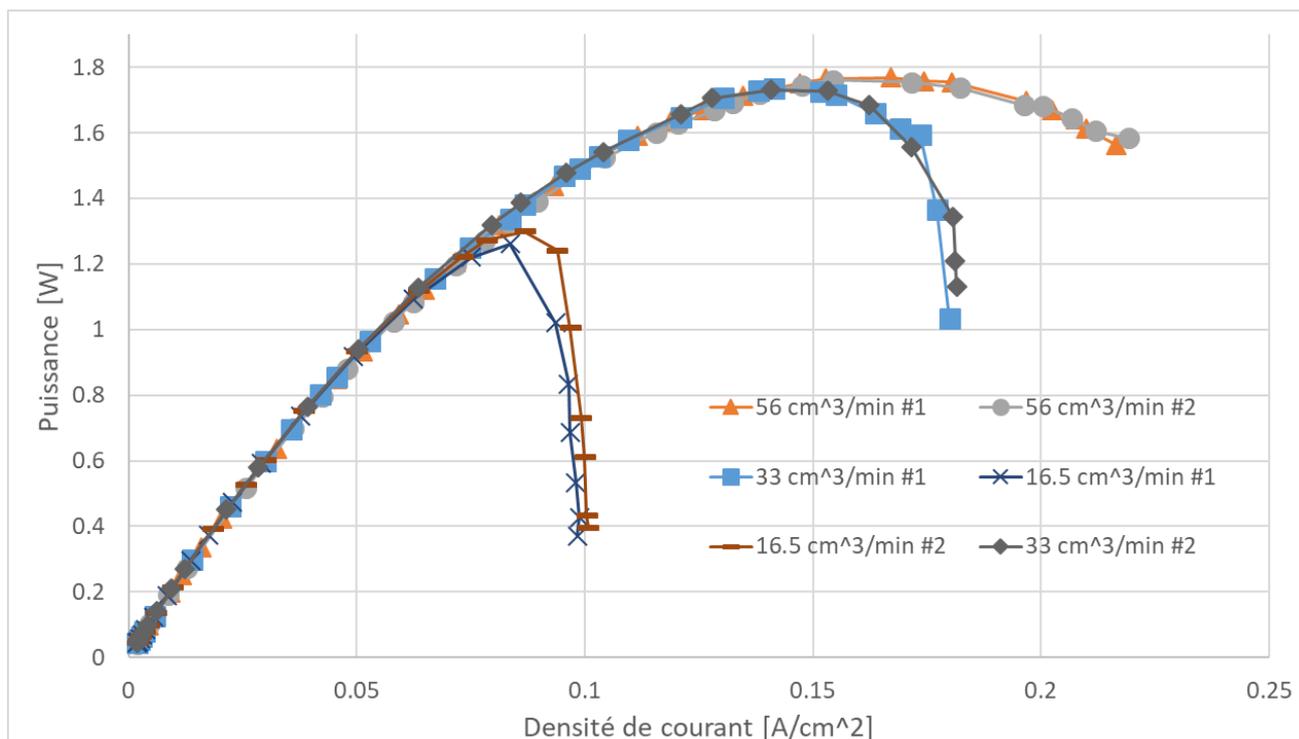


Figure 22: Puissance en fonction de la densité de courant pour les premiers tests effectués sur la monocellule. Débits  $H_2$  de 16,5, 33 et 56  $cm^3/min$ . Débit d'air d'un facteur 3 supérieur au débit d' $H_2$  pour chaque prise de mesure.

Au niveau de la Figure 22, on retrouve les limitations de courant observées précédemment ainsi que la similarité des tendances des courbes. Les puissances maximales pour les débits mesurés de 16,5, 33 et 56  $cm^3/min$  sont respectivement d'environ 1,3, 1,73 et 1,76 W. La puissance maximale obtenue augmente donc rapidement dans un premier temps avant de se stabiliser entre les deux mesures avec les débits d' $H_2$  les plus importants. Cela démontre que l'on atteint la limite de puissance du système dans cette configuration.

La reproductibilité des mesures durant ces tests est bonne, ce qui confirme la fiabilité des résultats obtenus.

#### 6.3.2.2. Résultats théoriques

Les valeurs théoriques de densité de courant et de puissance maximales ont respectivement été calculées à l'aide des équations 3 et 4 et sont exposées dans le Tableau 4.

| Débit $H_2$<br>[ $cm^3/min$ ] | Puissance max.<br>[W] | Densité de courant max.<br>[ $A/cm^2$ ] |
|-------------------------------|-----------------------|---|
| 16.5                          | 2.97                  | 0.095                                   |
| 33                            | 5.94                  | 0.19                                    |
| 56                            | 10.1                  | 0.32                                    |

Tableau 4: Résultats théoriques des puissances et courants maximaux pour des débits d' $H_2$  donnés pour la monocellule. La densité de courant a été calculée grâce à la surface de la zone active de la membrane de 25  $cm^2$  (cf point 6.1.1.1).

#### 6.3.2.3. Etude des résultats

On observe que pour les débits de 16,5 et 33  $cm^3/min$ , les résultats théoriques convergent avec ceux obtenus de manière expérimentale (différence d'environ 5 %). Ce qui confirme donc le lien entre le débit d' $H_2$  en entrée de la cellule et le courant maximal pouvant être produit par celle-ci.

Pour le débit de  $56 \text{ cm}^3/\text{min}$ , nous observons que la plage balayée par la résistance variable ne suffit pas à atteindre la valeur limite de courant pour ce flux d' $\text{H}_2$ , ce qui explique sûrement la différence entre le résultat calculé et observé. En effet sur la Figure 21, la tendance de cette courbe ne s'est pas encore stabilisée ce qui démontre qu'il est sûrement possible d'atteindre un courant plus élevé avec une résistance plus faible.

Concernant les rendements pour les différents débits testés, il peut être déterminé grâce à la l'équation 5 et aux puissances théoriques calculées précédemment pour chaque point de fonctionnement :  $\eta = \frac{P_{\text{mesurée}}}{P_{\text{théorique}}}$ .

Les rendements obtenus pour les débits d'hydrogène de 16,5, 33 et  $56 \text{ cm}^3/\text{min}$  d' $\text{H}_2$  sont respectivement de 42, 30 et 18 %.

Comme il a été dit dans la partie 4.4, le rendement théorique d'une pile à combustible est d'environ 50 %, ce qui démontre que le système dans cette configuration n'est pas réellement efficace sauf pour des débits d'hydrogène très faibles ce qui n'est pas optimal (car faible puissance produite). Le fait que le rendement diminue lorsque le débit d'hydrogène augmente peut s'expliquer par le fait qu'une plus grande quantité de réactif n'a pas le temps de réagir et ressort donc directement. La puissance produite reste très faible ce qui peut être dû à un débit d'air insuffisant du côté de la cathode qui limiterait la puissance produite. En effet, comme il a été dit au début de ces tests le débit d'air a été déterminé de manière théorique mais peut être sous-estimé. Une autre hypothèse reposerait sur des pertes trop importantes dans le circuit reliant la pile à la résistance variable.

Par la suite, ces deux hypothèses vont être testées.

### 6.3.3. Influence du débit d'air

Afin de pouvoir confirmer l'hypothèse de l'évolution du courant en fonction du débit d' $\text{H}_2$ , de nouveaux tests ont été effectués avec des débits d'hydrogène de 23 et  $33 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Ces tests vont également définir le débit d'air nécessaire pour atteindre cette valeur limite de courant et ainsi de déterminer expérimentalement le facteur réel reliant le flux d'air et d' $\text{H}_2$ . Ces tests vont être effectués avec une valeur de résistance de  $0,1 \Omega$  (mesuré à froid).

#### 6.3.3.1. Impact de la méthode de variation du débit lors des mesures

Dans un premier temps, afin d'observer si des variations brusques du débit d'air peuvent influencer le fonctionnement d'une PAC, plusieurs mesures (Aléatoire #1 à #4) seront effectuées de manière aléatoires passant d'un débit important à un débit faible et inversement. Afin de pouvoir comparer ces résultats avec ceux obtenus lors d'une diminution progressive du débit d'air, la première mesure (Baisse progressive #1) sera effectuée de cette manière. Finalement l'ensemble des mesures seront précédées d'une coupure totale du circuit (arrêt des deux débits) alors que la mesure 3 avec la variation aléatoire ne le sera pas afin de voir si cela peut avoir un impact.

Les répétitions des mesures vont permettre d'observer la reproductibilité des résultats.

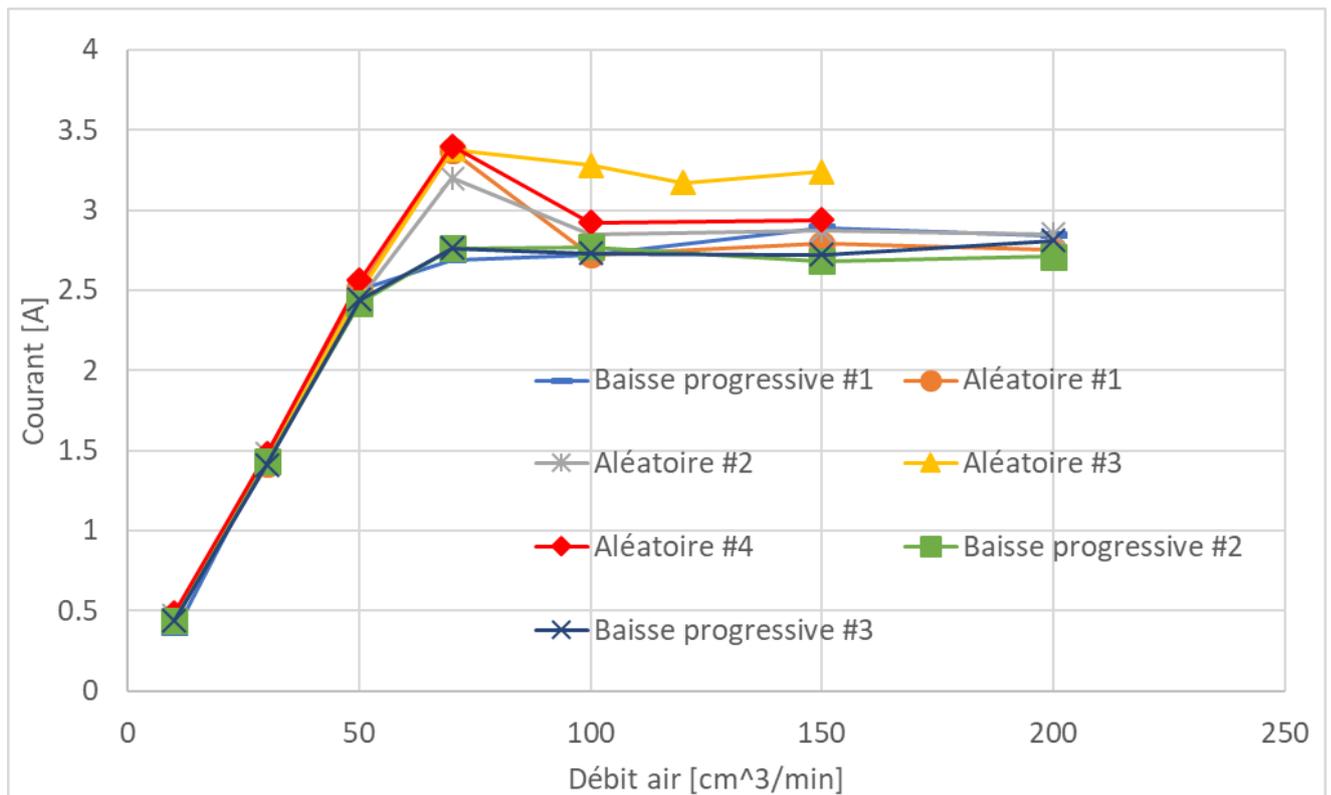


Figure 23: Impact du débit d'air. Débit  $H_2$  fixe de  $23 \text{ cm}^3/\text{min}$  et une résistance fixe en sortie de  $0.1 \Omega$  (à froid).

Lors de ce test on constate dans un premier temps une augmentation du courant avant que ce dernier se stabilise à une valeur d'environ  $2,8 \text{ A}$  à un débit de  $100 \text{ cm}^3/\text{min}$  d' $H_2$ . Lors de la prise de mesure aléatoire, on observe une valeur de courant, pour le débit de  $70 \text{ cm}^3/\text{min}$  d'air qui sort de la tendance formée par les autres mesures et des valeurs de courant plus élevées pour la troisième prise aléatoire.

Une hypothèse qui expliquerait ce pic de courant pour ce débit donné serait que la mesure précédant cette dernière a été faite avec un débit d'air très faible de  $10 \text{ cm}^3/\text{min}$  ce qui fait qu'une grande quantité d' $H_2$  n'a pas été consommé sur le moment. En effet si l' $H_2$  n'est pas consommé, une partie va s'échapper par l'orifice de sortie de l'anode alors qu'une autre partie va rester dans la chambre anodique. Or, si l'on augmente le débit d'air alors qu'un surplus d'hydrogène est dans cette chambre, cela pourrait faire augmenter brusquement le courant jusqu'à ce que le surplus soit consommé pour revenir ensuite à un état d'équilibre entre le débit de combustible et de réducteur.

Comme il a été dit précédemment la prise de mesure aléatoire 3 a été faite directement après la 2 sans interruption des débits, ce qui pourrait expliquer pourquoi les courants sont plus élevés pour cette prise de mesure, qui a donc profité d'un excédant d' $H_2$ . En effet le dernier point de mesure de la seconde prise aléatoire étant celui avec le débit d'air de  $70 \text{ cm}^3/\text{min}$  (pic de courant), il est donc possible que l'excédent d' $H_2$  ait été consommé lors de la prise 3 expliquant les valeurs plus hautes.

Pour avoir une première idée du bon fondement de cette théorie, une première observation a été effectuée. Lorsque le débit de  $70 \text{ cm}^3/\text{min}$  a été réglé pour la cinquième prise (aléatoire #4), une mesure dans le temps a été faite et a donné les résultats suivants :

| Temps [s] | I[A] | U[V]  |
|-----------|------|-------|
| 0         | 3.4  | 0.205 |
| 210       | 3.13 | 0.189 |
| 300       | 2.99 | 0.177 |
| 390       | 2.88 | 0.173 |
| 480       | 2.89 | 0.174 |

Tableau 5: Mesure dans le temps pour un débit d'air de  $70 \text{ cm}^3/\text{min}$  et un débit d' $\text{H}_2$  de  $20 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

On voit dans le Tableau 5 que le courant et la tension diminuent avant de se stabiliser respectivement à une valeur d'environ 2,89 A et de 0,174 V.

Cette première mesure renforce l'hypothèse émise précédemment en observant cette baisse progressive et cette stabilisation.

Afin de confirmer cette hypothèse, deux séries de mesures supplémentaires ont été effectuées (Baisse progressive #2 et #3) et sont venues confirmer la tendance de la première prise de mesure avec la diminution progressive du débit. Le pic de courant obtenu pour le débit de  $70 \text{ cm}^3/\text{min}$  pour la prise de mesure avec la variation aléatoire du débit n'apparaît plus et pour l'ensemble des autres valeurs de débits, les valeurs concordent.

Ces mesures complémentaires permettent donc de valider que la variation du débit doit se faire de manière progressive si l'on veut caractériser correctement le fonctionnement d'une pile à combustible. Par rapport à cette hypothèse, il est légitime de penser qu'une variation de débit brusque peut être effectuée, mais que dans ce cas il sera nécessaire d'attendre un certain temps que le surplus d'hydrogène soit consommé et que le courant se stabilise à sa juste valeur avant de prendre la mesure.

### 6.3.3.2. Influence du débit d'air en fonction du débit d' $\text{H}_2$

Maintenant que la méthode de mesure a été définie, les tests visant à déterminer le facteur reliant le débit d'air au débit d'hydrogène afin d'assurer le bon fonctionnement de la cellule vont être effectués.

#### 6.3.3.2.1. Résultats expérimentaux

Une nouvelle prise de mesure a été effectuée afin de pouvoir comparer les valeurs limites en fonction du débit d'hydrogène, mais surtout le débit nécessaire pour atteindre cette limite. Les mesures effectuées avec la baisse progressive du débit d'air obtenues dans le point 6.3.3.1 ont été reprises et comparées avec de nouvelles mesures effectuées avec la même méthode de variation du débit d'air, mais avec un débit d' $\text{H}_2$  de  $33 \text{ cm}^3/\text{min}$ . La résistance est à nouveau réglée sur sa valeur minimale de  $0,1 \Omega$  (à froid).

De nouveaux tests de reproductibilités ont été effectués pour ces nouvelles mesures.

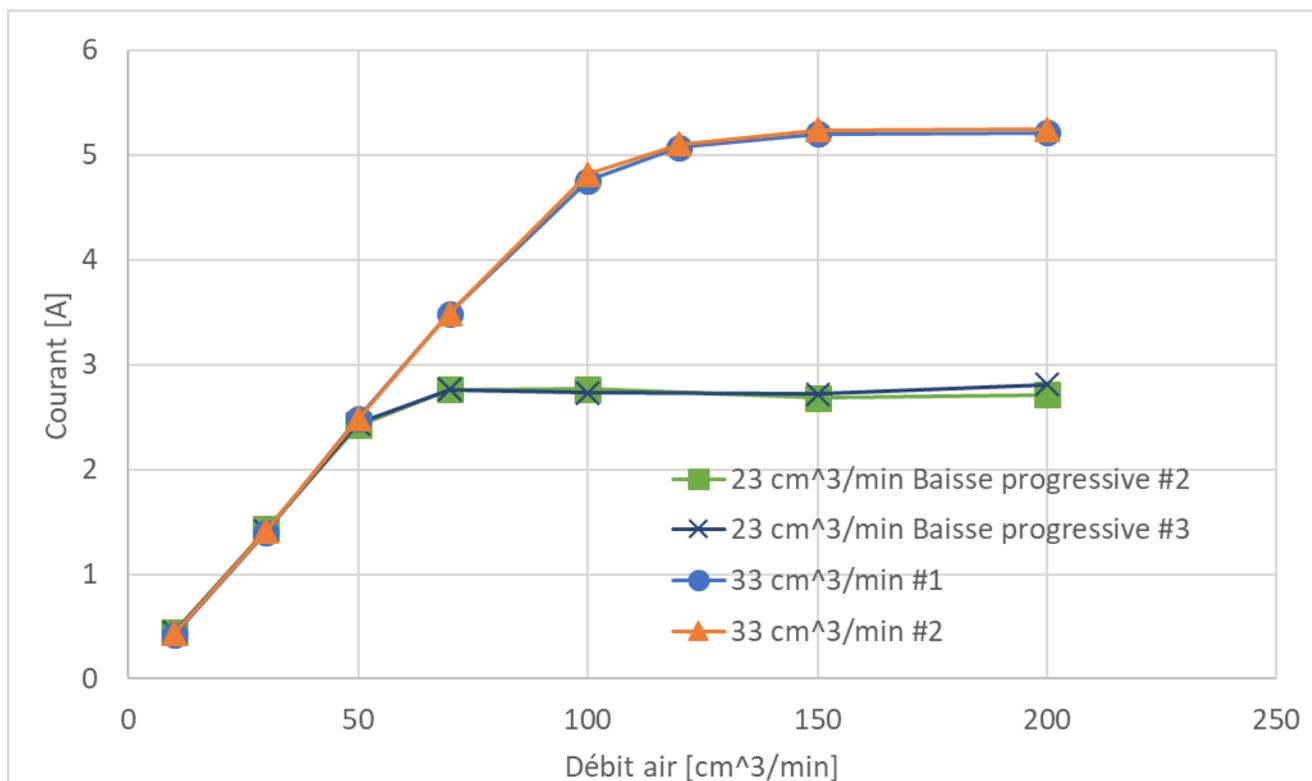


Figure 24: Influence du débit d'air. Deux différents débits d'H<sub>2</sub> fixes de 23 et 33 cm<sup>3</sup>/min. Résistance fixe de 0.1 Ω (à froid).

On observe sur la Figure 24 que la valeur limite à laquelle le courant se stabilise pour le flux d'hydrogène de 23 cm<sup>3</sup>/min est d'environ 2.8 A (0.11 A/cm<sup>2</sup>) qui est obtenue à partir d'un débit de 70 cm<sup>3</sup>/min d'air. Pour le flux de 33 cm<sup>3</sup>/min d'hydrogène, la valeur maximale de courant est de 5.2 A (0.21 A/cm<sup>2</sup>) et est obtenue pour un débit d'air minimum de 150 cm<sup>3</sup>/min.

#### 6.3.3.2.2. Résultats théoriques attendus

Comme précédemment, l'équation 3 va permettre de déterminer la densité de courant limite en fonction du débit d'H<sub>2</sub>. Ensuite l'équation 6 permet de déterminer de manière théorique le débit d'air minimum nécessaire afin d'atteindre la stabilisation du courant. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

| Débit H <sub>2</sub><br>[cm <sup>3</sup> /min] | Valeur<br>théorique de<br>débit d'air<br>permettant<br>d'atteindre<br>I max<br>[cm <sup>3</sup> /min] | Densité de<br>courant<br>max.<br>[A/cm <sup>2</sup> ] |
|--|---|---|
| 23   | 55  | 0.13  |
| 33   | 78.55   | 0.19  |

Tableau 6: Résultats théoriques pour la variation du débit d'air. La densité de courant a été calculée grâce à la surface de la zone active de la membrane de 25 cm<sup>2</sup> (cf point 6.1.1.1).

#### 6.3.3.2.3. Etude des résultats

Les résultats expérimentaux et théoriques divergent quelque peu étant donné que le facteur 2.38 déterminé dans le point 4.5 apparaît légèrement sous-évalué. En effet ce facteur varie entre 4 et 4,5 lors des tests effectués, ce qui semble indiquer qu'un facteur 5 entre le débit d' H<sub>2</sub> et le

débit d'air serait optimal afin d'éviter qu'un flux insuffisant d'air ne vienne limiter la plage de courant couverte.

Concernant la valeur maximale de courant, les résultats théoriques diffèrent d'environ 10 % des valeurs observées lors des tests. Cette différence reste faible étant donné les petites valeurs mesurées ( $0,2 \text{ A/cm}^2$  de différence).

#### 6.3.4. Optimisation

Dans cette partie le but va être de maximiser le plus possible les performances de la monocellule en modifiant différents facteurs cités précédemment (cf point 6.3.2.3) et qui pourraient être les causes de pertes engendrant une baisse de la puissance de sortie et donc de rendement.

##### 6.3.4.1. Réduction maximale du circuit

Dans un premier temps, l'objectif est de répondre à l'une des deux hypothèses émises qui proposait la théorie de pertes trop importantes au niveau du circuit électrique reliant la pile à la charge pour expliquer la faible puissance produite. Pour ce faire, la résistance du circuit a été réduite au maximum et les tests ont été effectués avec un débit d'air de  $150 \text{ cm}^3/\text{min}$  et de  $33 \text{ cm}^3/\text{min}$  d' $\text{H}_2$  avec le circuit optimisé et non optimisé. Des tests de reproductibilités ont été effectués afin de valider la qualité des résultats.

##### 6.3.4.1.1. Résultats expérimentaux

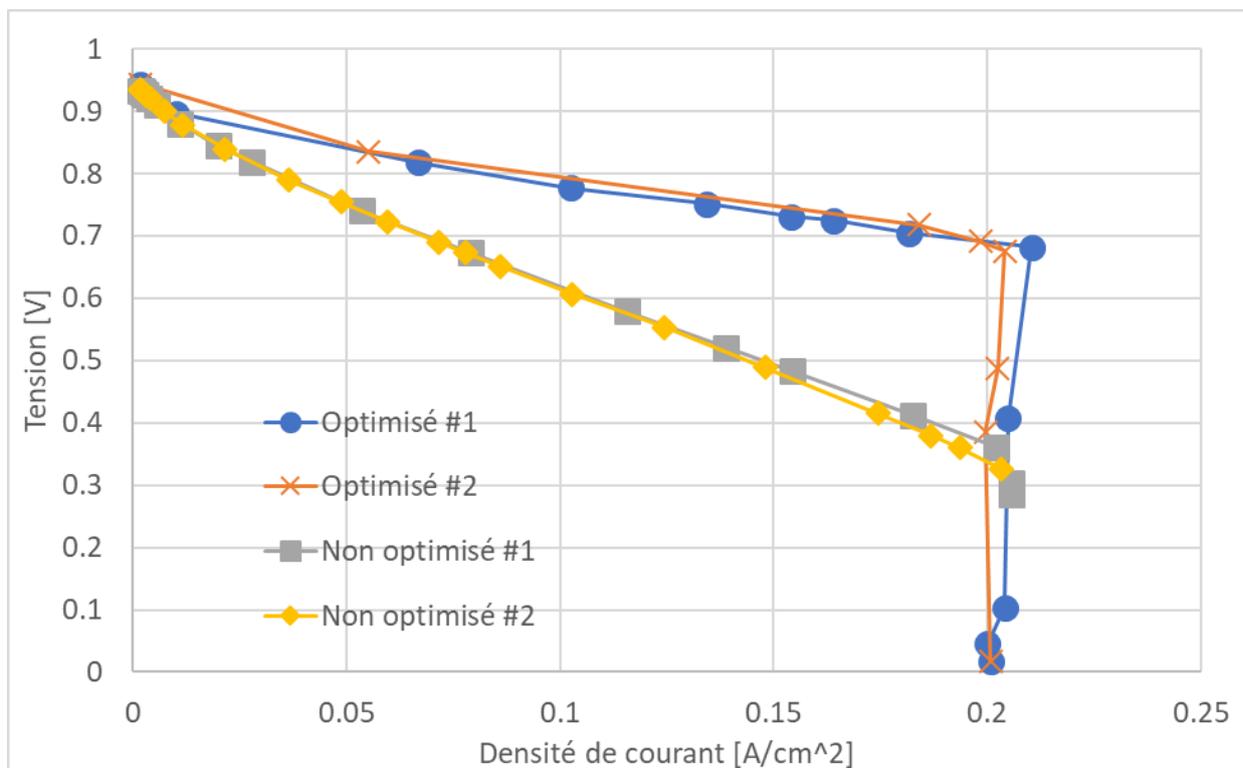


Figure 25: Tension en fonction de la densité de courant après optimisation du circuit électrique de la monocellule. Débit d' $\text{H}_2$  de  $33 \text{ cm}^3/\text{min}$  et débit d'air de  $150 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

Une chute de tension due à la limitation de courant se produit lorsque la valeur de densité de courant est d'environ  $0,2 \text{ A/cm}^2$  pour les deux circuits. La différence des résultats entre les deux circuits est que la limitation de courant se fait à une valeur plus haute de tension d'environ 0,7 V pour le circuit optimisé contre 0,35 V pour le circuit ne l'étant pas (facteur 2).

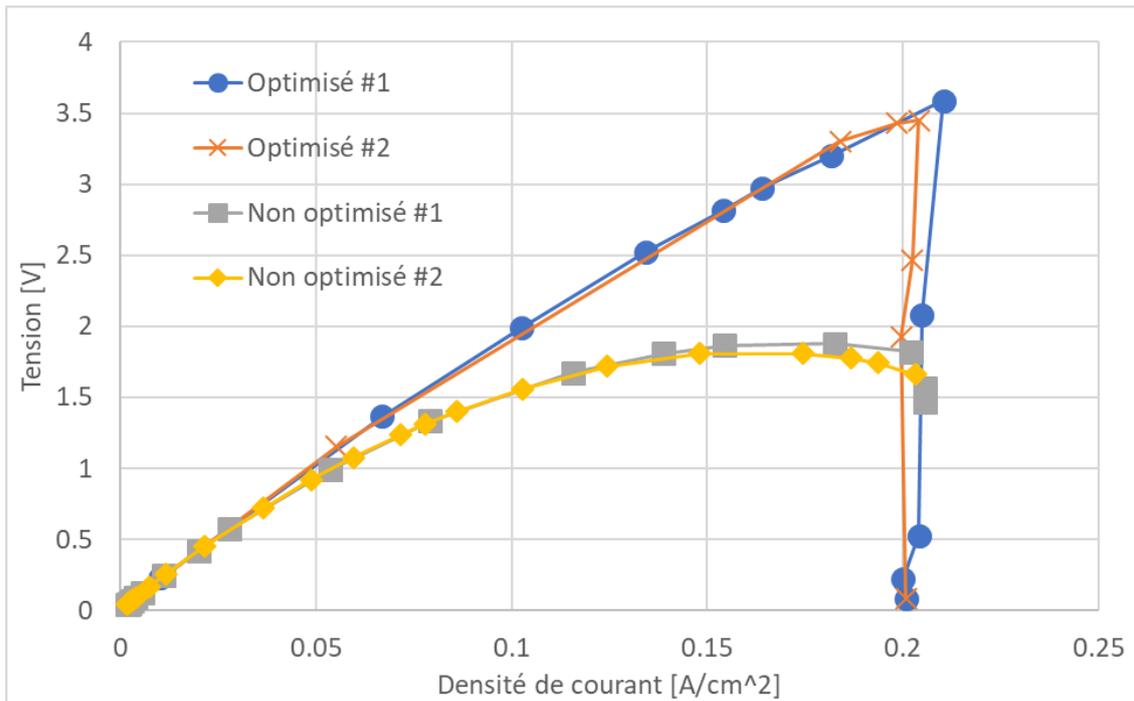


Figure 26 : Puissance en fonction de la densité de courant après optimisation du circuit électrique de la monocellule. Débit d' $H_2$  de  $33 \text{ cm}^3/\text{min}$  et débit d'air de  $150 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

Sur la Figure 26, on observe que l'augmentation de puissance maximale est importante entre les deux circuits étant donné que l'on passe de 1,87 à 3,58 W au niveau de la puissance maximale pour le même point de fonctionnement (augmentation d'un facteur deux).

#### 6.3.4.1.2. Résultats théoriques

Comme cela avait déjà été calculé précédemment dans le point 6.3.2.2, la limite de courant pour un débit de  $33 \text{ cm}^3/\text{min}$  est de  $0,19 \text{ A}/\text{cm}^2$  et la puissance théorique est de 5.94W.

#### 6.3.4.1.3. Etude des résultats

Concernant la limite maximale de courant, on remarque que le résultat obtenu lors des tests et celui calculé correspondent à plus ou moins 5 %. Cette faible différence laisse penser que cet écart est dû soit à une imprécision de mesure ou à une imprécision lors du réglage du débit au niveau des débitmètres.

Concernant le rendement de ce système et en s'appuyant sur l'équation 5, on peut observer que le rendement de la pile pour ce point de fonctionnement est de 66 % pour le circuit optimisé contre 35 % pour l'ancienne version.

Cette partie permet de mettre en avant l'importance de minimiser les pertes ohmiques du circuit en particulier lorsqu'il s'agit de faibles puissances comme dans le cas de cette monocellule.

#### 6.3.4.2. Performances maximales

Cette deuxième phase d'optimisation va être effectuée avec le circuit électrique optimisé précédemment et va viser à déterminer la production maximale que peut fournir cette monocellule. De plus un changement de débitmètre a été effectué afin d'augmenter la plage de débits (débit maximal  $H_2$  de  $330 \text{ cm}^3/\text{min}$  et d'air de  $1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ ) pouvant être testés et ainsi être sûr de pouvoir atteindre la puissance maximale pouvant être produite par la cellule.

Les tests vont être effectués en fixant des débits fixes d' $H_2$  et d'air et en essayant au maximum de respecter le facteur de 5 déterminé entre les deux flux au point 6.3.3.2.3. La variation de la résistance se fera afin de couvrir l'ensemble de la plage de courant possible pour chaque point de fonctionnement. Des tests de reproductibilités ont à nouveau été effectués et ont permis de valider la justesse des résultats obtenus.

#### 6.3.4.2.1. Résultats expérimentaux

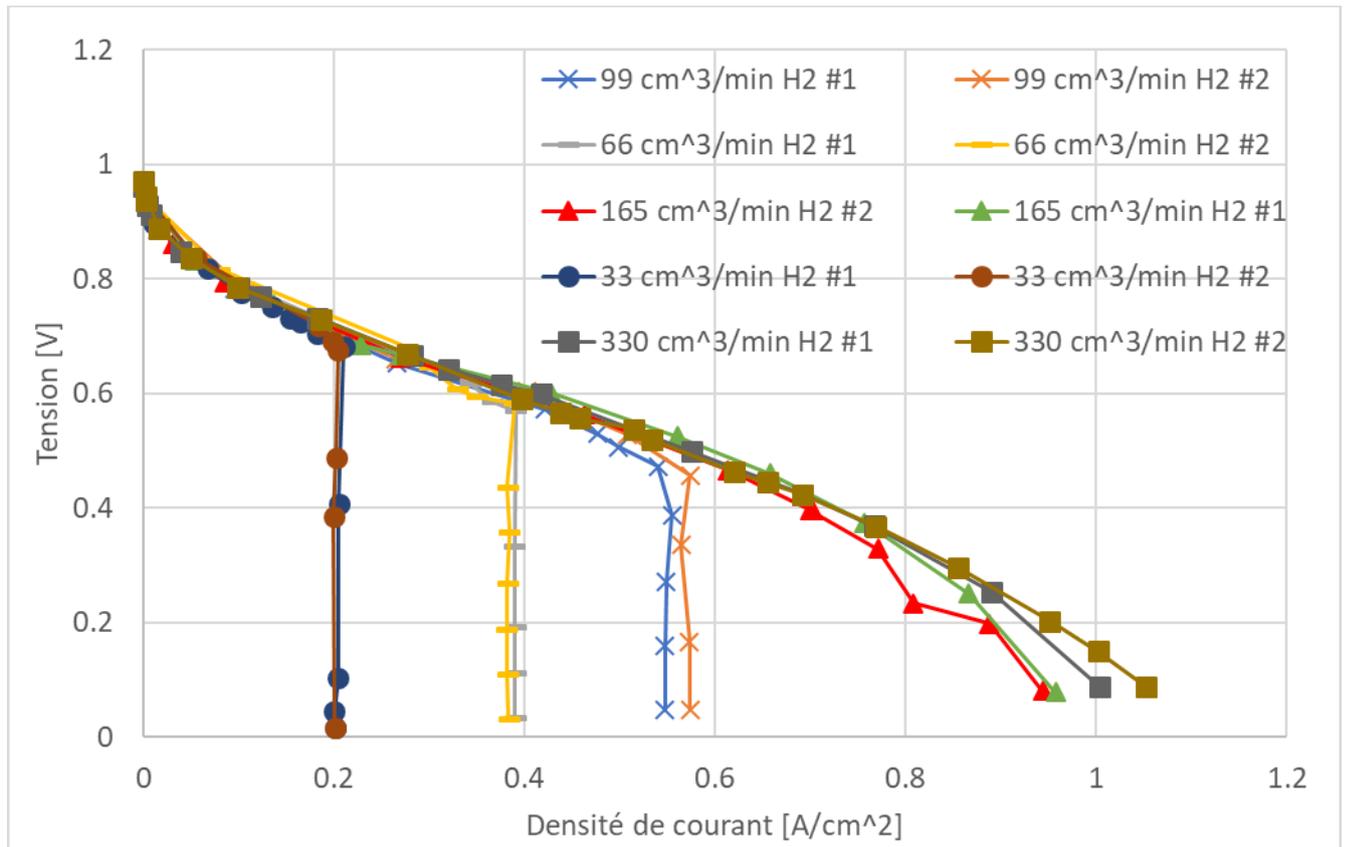


Figure 27: Tension en fonction de la densité de courant après optimisation du circuit électrique et de l'augmentation des débits de gaz pour la monocellule. Pour les débits d' $H_2$  de 33 à 99 cm³/min le débit d'air est de 500 cm³/min et pour les autres tests ce dernier est de 1000 cm³/min.

Au niveau de la Figure 27, on observe tout comme dans les premiers tests effectués dans la partie 6.3.2.1, différentes chutes brusques de la tension en fonction du débit d' $H_2$  fixé en entrée. Cet effondrement de tension ou stabilisation de courant pour les débits de 33, 66 et 99 cm³/min d' $H_2$  se font respectivement pour des densités de courant de 0.2 A/cm², 0.38 A/cm² et de 0.55 A/cm².

Pour les deux débits plus importants de 165 et 330 cm³/min, on observe cependant une limitation de courant moins prononcée.

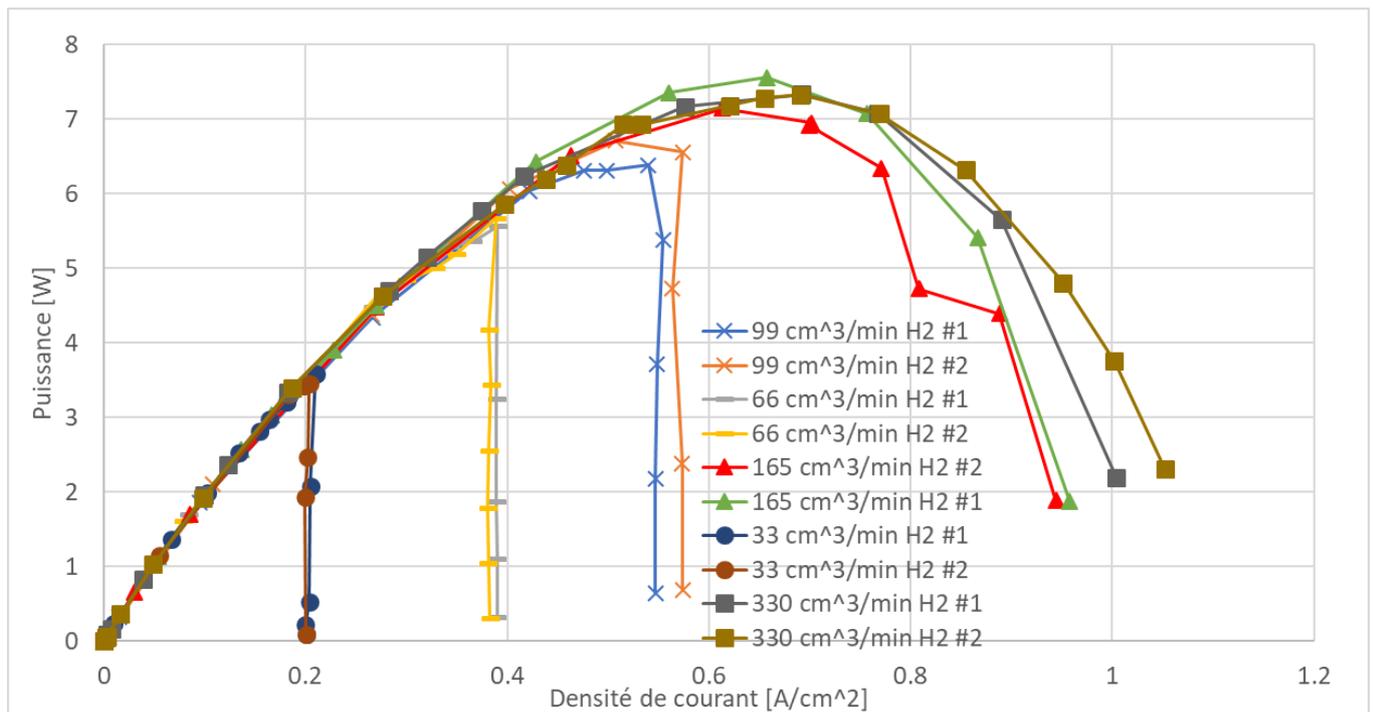


Figure 28 : Puissance en fonction de la densité de courant après optimisation du circuit électrique et de l'augmentation des débits de gaz pour la monocellule. Pour les débits d' $H_2$  de 33 à 99  $cm^3/min$  le débit d'air est de 500  $cm^3/min$  et pour les autres tests ce dernier est de 1000  $cm^3/min$ .

Au niveau de la Figure 28, on retrouve les limites de courant observées précédemment et on voit que la puissance maximale varie en fonction du débit d'hydrogène. La puissance maximale est obtenue pour les débits de 165 et 330  $cm^3/min$  et est d'environ 7.4 W. Pour les débits d' $H_2$  de 99, 66 et 33  $cm^3/min$  la puissance est respectivement de 6.5, 5.5 et 3.5 W.

Le fait que la puissance maximale n'augmente plus entre les tests avec les débits de 165 et 330  $cm^3/min$  montre que la puissance maximale pouvant être produite dans cette configuration par la cellule a été atteinte. La point de puissance maximale est un compromis entre un courant suffisamment élevé et une tension pas trop basse ce qui explique la forme parabolique de la courbe lorsque le débit d'hydrogène permet d'atteindre le point de puissance maximale.

#### 6.3.4.2.2. Résultats théoriques

Les résultats donnés par les formules permettant de déterminer la puissance et la densité de courant maximal théorique pour un débit d' $H_2$  déterminé sont les suivants (équations 3 et 4) :

| Débit $H_2$    | Puissance max. | Densité de courant max. |
|----------------|----------------|-------------------------|
| [ $cm^3/min$ ] | [W]            | [ $A/cm^2$ ]            |
| 33             | 5.94           | 0.19                    |
| 66             | 11.8           | 0.38                    |
| 99             | 17.82          | 0.57                    |
| 165            | 29.7           | 0.95                    |
| 330            | 59.4           | 1.9                     |

Tableau 7: Puissances et limites de densité de courants pour le circuit optimisé de la mono-cellule. La densité de courant a été calculée grâce à la surface de la zone active de la membrane de 25  $cm^2$  (cf point 6.1.1.1).

### 6.3.4.2.3. Etude des résultats

Comme pour l'ensemble des tests effectués précédemment avec des débits d' $H_2$  modérés, les valeurs limite de densité de courant correspondent entre la théorie et la pratique. En effet on se rend compte que pour toutes les limitations de densité de courant inférieures à  $1 \text{ A/cm}^2$  (pour les 3 premiers débits de 33, 66, 99 et  $165 \text{ cm}^3/\text{min}$  d' $H_2$ ), les valeurs calculées et mesurées correspondent de manière exacte ou à plus ou moins 5 %. Pour le débit d' $H_2$  de  $165 \text{ cm}^3/\text{min}$  la limite est atteinte de manière progressive sans effondrement brusque de la tension, ce qui peut s'expliquer par le fait que le flux est suffisamment important pour atteindre de forts courants et donc de très faibles tensions.

En revanche le débit de  $330 \text{ cm}^3/\text{min}$  devrait théoriquement pouvoir aller jusqu'à une valeur de  $1,9 \text{ A/cm}^2$ , cependant la différence observée avec les résultats réels peut être expliquée par le fait que cette limite est trop élevée et donc différents phénomènes de pertes comme en particulier la polarisation de concentration (cf point 4.2) ne permettent pas d'atteindre cette valeur.

Concernant la puissance maximale du système, on observe une valeur d'environ  $7.5 \text{ W}$  ce qui correspond à une densité de puissance par unité de surface de  $0.3 \text{ W/cm}^2$ , qui va être comparée dans le point 6.3.5 avec les performances de piles commerciales.

Les rendements obtenus vont être observés dans le point suivant.

### 6.3.4.3. Point de fonctionnement optimal

L'objectif de ce point va être d'observer l'évolution de la puissance produite et du rendement de la pile en fonction du débit d' $H_2$  utilisé. Cette étape va permettre d'émettre l'hypothèse du meilleur point de fonctionnement du système. Les rendements sont calculés à partir de l'équation 5 et des puissances théoriques et expérimentales déterminées dans le point 6.3.4.2.

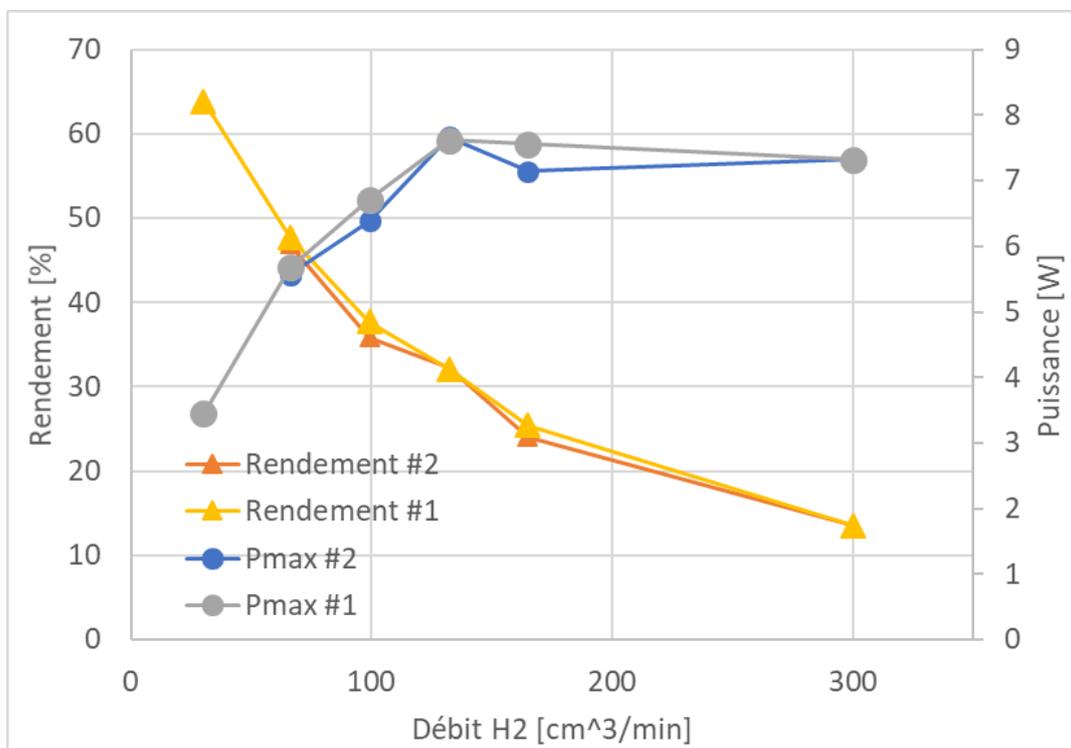


Figure 29: Rendement et puissance en fonction du débit d' $H_2$  afin de trouver le point de fonctionnement optimal de la pile. Pour les débits d' $H_2$  inférieurs à  $100 \text{ cm}^3/\text{min}$  le débit d'air est de  $500 \text{ cm}^3/\text{min}$  et pour les autres tests ce dernier est de  $1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

Sur la Figure 29, on observe que le rendement baisse quand la puissance produite augmente et continue à chuter lorsque la puissance se stabilise à sa valeur maximale et que le débit d' $H_2$  continue à augmenter. La baisse du rendement observée dans le point 6.3.2.3 lorsque le débit d'hydrogène augmente se confirme, l'augmentation du taux d' $H_2$  ne réagissant pas et ressortant directement, peut toujours en être l'explication. En fonction de ce graphe, il est clair que le meilleur point de fonctionnement de la pile à combustible est un compromis entre une puissance suffisamment élevée et un rendement correct.

En prenant en compte que le rendement standard théorique d'une pile à combustible est d'environ 50 % (cf point 4.4), on peut estimer que pour avoir un système viable à long terme et attractif, ce rendement doit être approché. C'est pour cette raison que le point de fonctionnement semblant être le plus intéressant est un débit d'hydrogène de  $66 \text{ cm}^3/\text{min}$  qui produit une puissance d'environ 5,5 W avec un rendement de 47 %. Ce choix permet de faire fonctionner la majorité du temps la pile à un rendement acceptable et laisse malgré tout une marge pour augmenter la puissance produite en cas de besoins.

### 6.3.5. Comparaison entre les résultats obtenus et les résultats lus dans la théorie

Dans cette partie une comparaison entre les courbes caractéristiques à différents points de fonctionnement obtenus lors des tests optimisés et les courbes caractéristiques de deux modèles de piles à combustible du marché sera effectuée. Cette étape permet d'observer la qualité des résultats des tests par rapport à ce qui se fait dans le commerce.

Pour les chiffres du stack APFCT, une estimation de la zone active a été réalisée dans le point 7.2 afin d'obtenir une densité de courant et ainsi pouvoir effectuer la comparaison avec les autres modèles.

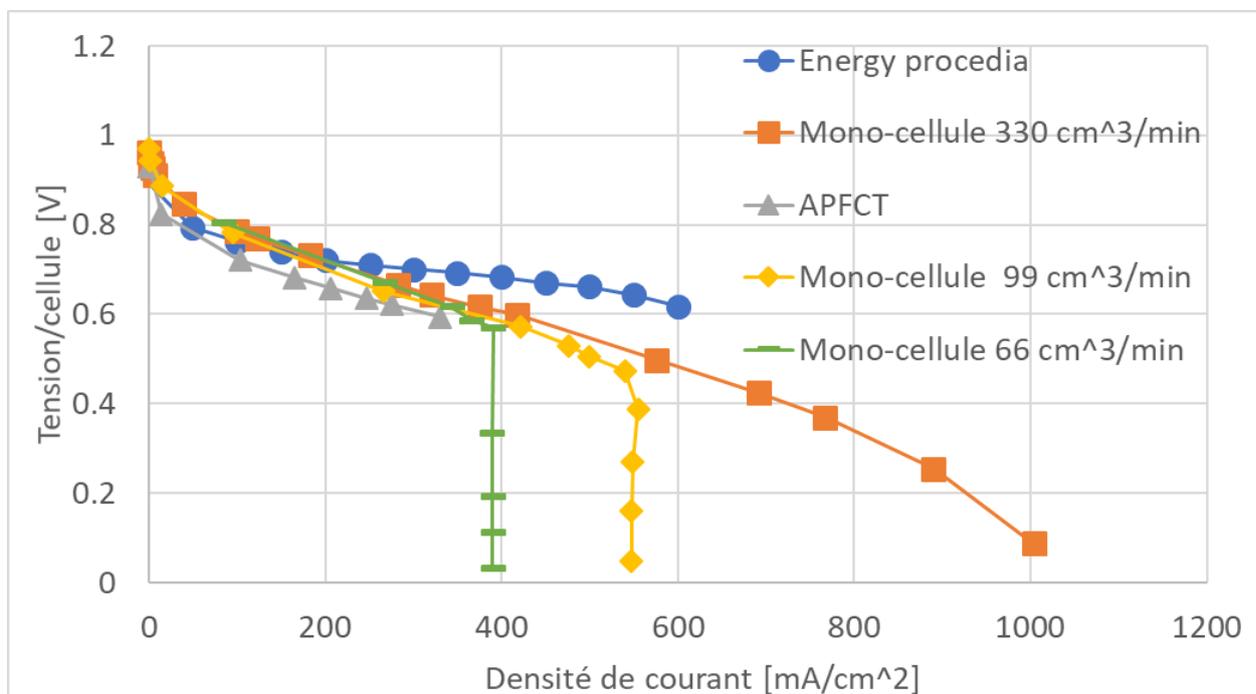


Figure 30: Comparaison des résultats de la monocellule pour la tension en fonction de la densité de courant, avec les données des fournisseurs de différents stack du commerce. Tests de la monocellule avec 66, 99 et  $330 \text{ cm}^3/\text{min}$  d' $H_2$ .

Sur la Figure 30, on observe que l'objectif du fournisseur n'est pas de balayer la plage de densité de courant la plus importante mais simplement de fournir aux clients le compromis le plus intéressant entre un rendement satisfaisant et une plage de fonctionnement suffisamment large malgré tout.

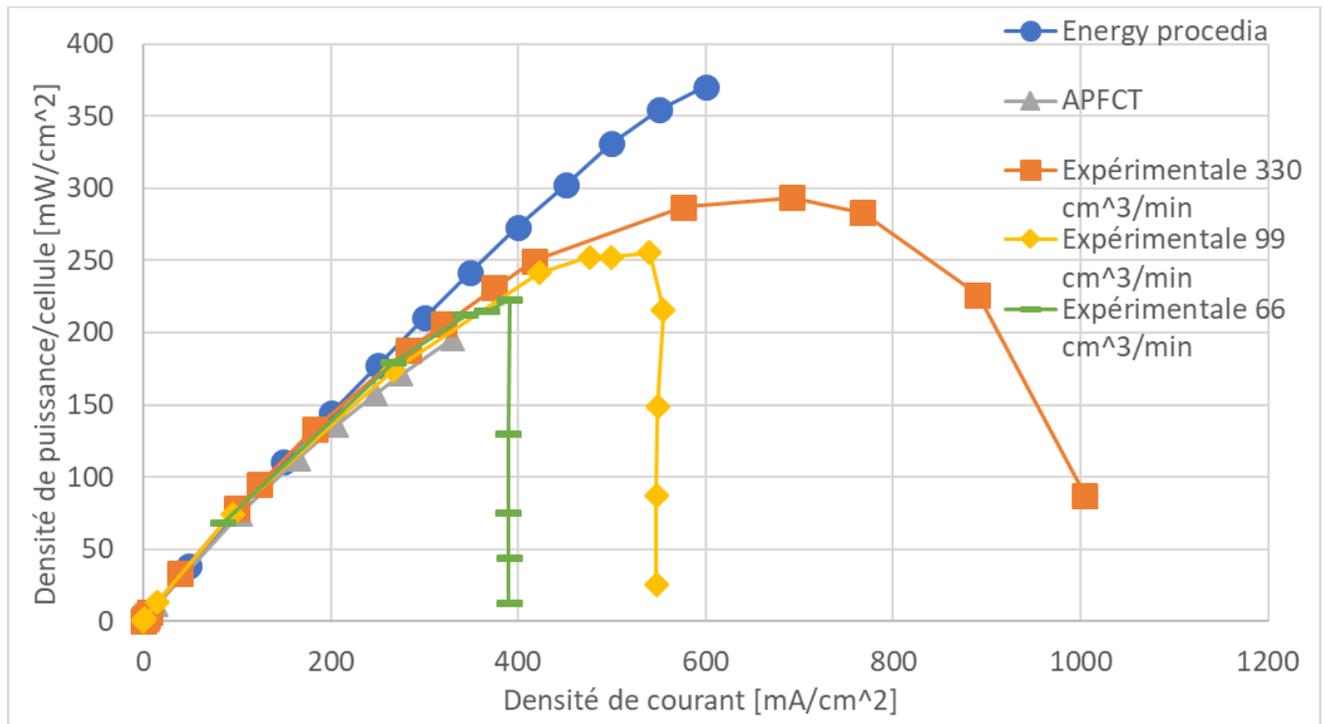


Figure 31: Comparaison des résultats de la monocellule pour la puissance en fonction de la densité de courant, avec les données des fournisseurs de différents stack du commerce. Tests de la monocellule avec 66, 99 et 330 cm<sup>3</sup>/min d'H<sub>2</sub>.

Sur la Figure 31, on observe que la densité de puissance en fonction de la densité de courant obtenue de manière expérimentale se corrèle bien avec les valeurs du stack de piles APFCT, alors que les performances du modèle Energy Procedia sont meilleures lorsque la densité de courant augmente. La différence observée entre la densité de puissance maximale du modèle Energy Procedia et celle obtenue pour la même densité de courant avec la monocellule diffèrent d'environ 20 %. Cette différence est due au fait que la pente de la zone des pertes ohmiques est plus importante (cf point 4.2) pour les tests expérimentaux et pour le modèle APFCT que pour le dernier.

Cette différence peut être due à la qualité de la membrane ou des autres éléments tels que le catalyseur ou encore à des conditions de fonctionnement plus ou moins optimisées (température, pression, humidification) du système.

On observe aussi que pour deux piles de surface active similaire, cette différence peut avoir une influence importante sur le rendement du système étant donné qu'en améliorant la densité de puissance on va augmenter ce dernier.

Cette comparaison permet de montrer que les résultats obtenus lors des tests de la monocellule ne sont certes pas optimaux, mais concordent malgré tout avec des performances affichées par des piles commercialisées.

## 7. Stack industriel

L'étape finale de ce travail est donc le développement du circuit d'un stack de piles à combustible et le test de l'ensemble (circuit et stack) grâce à l'expérience acquise lors de la recherche et des essais effectués précédemment. Ensuite la caractérisation de son fonctionnement et une comparaison avec les spécifications du fournisseur seront effectuées.

Le stack de piles à combustible industriel utilisé pour ces tests est le DuraPEM W240 de l'entreprise APFCT.



Figure 32: DuraPEM W240 (Source: <http://www.apfct.com/en/product/durapemw240/>)

### 7.1. Circuit système power to gas

Comme il a déjà été dit dans la partie 1 de ce travail, l'objectif est de compléter le système « power-to-gas » présent au sein de l'école en développant la dernière étape qui est la retransformation en électricité de l'énergie stockée sous forme d'hydrogène grâce à la pile à combustible. Les deux systèmes vont s'entremêler et fonctionner en alternance en fonction du besoin.

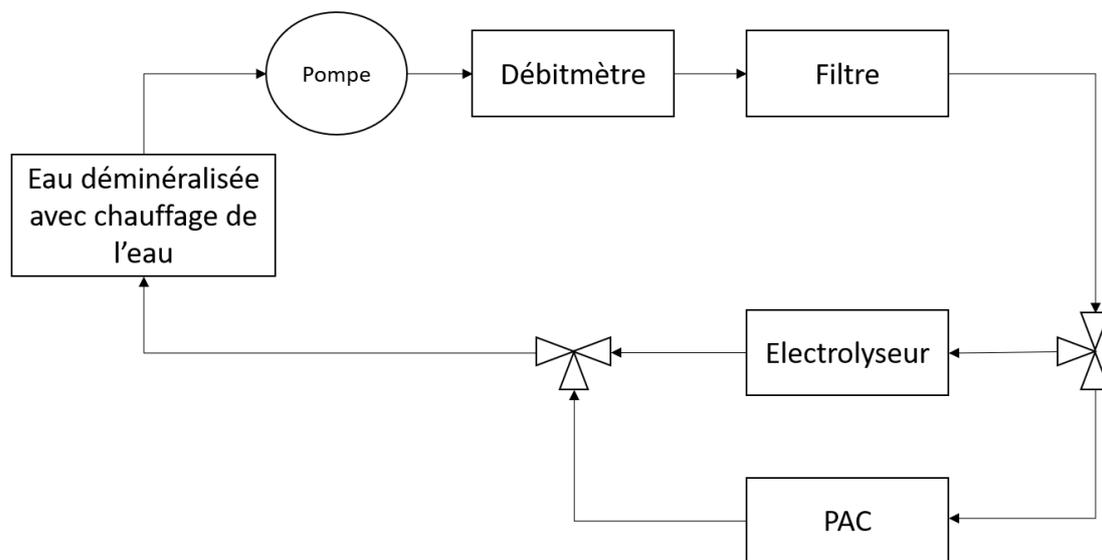


Figure 33: Circuit d'eau déminéralisée commun entre l'électrolyseur avec les deux vannes trois voies permettant la sélection de l'un ou l'autre des éléments. Chauffage de l'eau, pompe, débitmètre eau déminéralisée et filtre en commun également.

Sur la Figure 33, on voit le circuit commun entre l'électrolyseur et la pile à combustible, qui est le circuit d'eau déminéralisée. Ce dernier permet le refroidissement du stack et l'alimentation en eau de l'électrolyseur afin de pouvoir effectuer l'électrolyse et donc le stockage de l'hydrogène. Les deux vannes trois voies placées en entrée et en sortie de la pile à combustible et de l'électrolyseur vont donc permettre de sélectionner le mode stockage ou déstockage dans lequel on veut fonctionner.

## 7.2. Caractéristiques techniques

Des premières informations sont à disposition grâce à la fiche technique fournie par APFCT :

| Données générales                                       |                                    |
|---|------------------------------------|
| Nbr cellules  | 40                                 |
| L*I*H   | 239*152*192 mm                     |
| Rendement   | 48%                                |
| Données électriques                                     |                                    |
| Puissance nominale                                      | 2.4 kW                             |
| Plage de courant d'utilisation                          | 0-120 A                            |
| Plage de tension d'utilisation                          | 0.5-1 V/cell                       |
| Données carburant (H2)                                  |                                    |
| Stoechiométrie  | ≥ 1.2                              |
| Pression entrée   | ≤ 7 psi (0.48 bar)                 |
| Chute de pression à travers le stack à 100 A            | ≈ 70 mbar                          |
| Surpression d'entrée                                    | < 250 mbar                         |
| Humidité d'entrée                                       | 85-100 % RH<br>(Humidité Relative) |
| Consommation de carburant à puissance continue maximale | 45 nL/min                          |
| Données oxydant (Air)                                   |                                    |
| Stoechiométrie  | ≥ 2.8                              |
| Pression entrée   | ≤ 5 psi (0.35 bar)                 |
| Chute de pression à travers le stack à 100 A            | ≈ 70 mbar                          |
| Humidité d'entrée                                       | 90-100 % RH<br>(Humidité Relative) |
| Liquide de refroidissement                              |                                    |
| Type  | Eau déminéralisée                  |
| Conductivité à 25 °C                                    | < 10 μS/cm                         |
| Débit   | 10 L/min                           |
| Température cible d'entrée                              | 60°C                               |

Tableau 8: Données techniques du fournisseur du stack APFCT.

En plus de ces différentes informations, des chiffres exposant le fonctionnement standard du stack de piles à combustible sont fournis dans la fiche technique (cf Annexe 6 : Fiche technique stack APFCT).

Afin de pouvoir comparer ces chiffres avec ceux obtenus précédemment pour la monocellule, une estimation de la surface de la zone active a été faite afin de pouvoir déterminer la densité de courant par unité de surface.

Selon les dimensions données pour le stack (cf Annexe 6 : Fiche technique stack APFCT), la surface d'une cellule est d'environ  $363 \text{ cm}^2$  ( $23.9 \text{ cm} * 15.2 \text{ cm}$ ), ce qui en représente en admettant que cette dernière soit maximisée autant que possible, la surface maximale de la zone active.

De plus, la puissance et la tension étant démultipliées par le nombre de cellules mises en séries, ces dernières seront exprimées en puissance par cellule dans le but que les données soient comparables avec les tests effectués sur la monocellule.

Les courbes de performance du stack qui sont obtenues ainsi sont les suivantes :

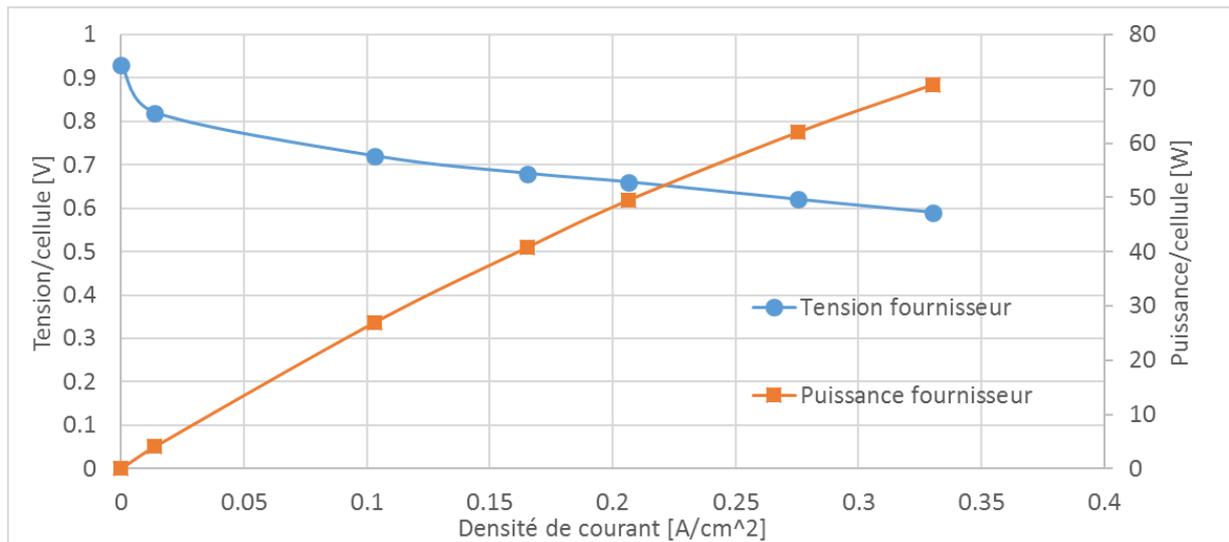


Figure 34: Performance théorique de la stack fournit dans le guide d'utilisation avec hypothèse de la surface de la zone active et tension par cellule.

Ces premières informations permettent de connaître les caractéristiques qui seront nécessaires pour certains éléments tels que les débitmètres pour l' $H_2$  et l'eau déminéralisée. En effet, la fiche technique définit le débit maximal de 45 l/min pour l'hydrogène et de 10 l/min pour le liquide de refroidissement ce qui donne la plage de fonctionnement pour ces éléments.

La Figure 34 va également permettre de dimensionner la résistance qui sera nécessaire aux bornes du stack afin d'effectuer les différentes mesures.

### 7.3. Méthode de développement

#### 7.3.1. Détermination du débit d'air

Contrairement au débit d'air, le débit maximum d' $H_2$  qui pourrait être nécessaire lors de l'utilisation du stack est donné dans la fiche technique.

À la suite de discussions avec le fournisseur, il a été fixé qu'un débit d' $H_2$  de 7 cm<sup>3</sup>/min et un débit d'air de 17.5 cm<sup>3</sup>/min est nécessaire afin de pouvoir produire 1 A.

À la suite de ces informations, une comparaison par calcul a été effectuée afin de déterminer la validité de ces dernières.

A l'aide de l'équation 1 et du courant, il est possible de déterminer le débit d' $H_2$  nécessaire à la production d'un ampère qui est de 6.919 cm<sup>3</sup>/min.

La valeur donnée pour le débit d' $H_2$  est donc cohérente, la différence semble due à un arrondi du résultat à la valeur supérieure afin d'avoir une certaine marge de sécurité.

Une fois ce débit d' $H_2$  validé, le débit d'air peut donc être calculé avec l'équation 6, qui donne un débit de  $16.7 \frac{cm^3}{min}$ .

De nouveau l'ordre de grandeur entre la valeur du fournisseur et la valeur calculée correspond, ce qui permet donc de valider ces données qui pourront être utilisées par la suite.

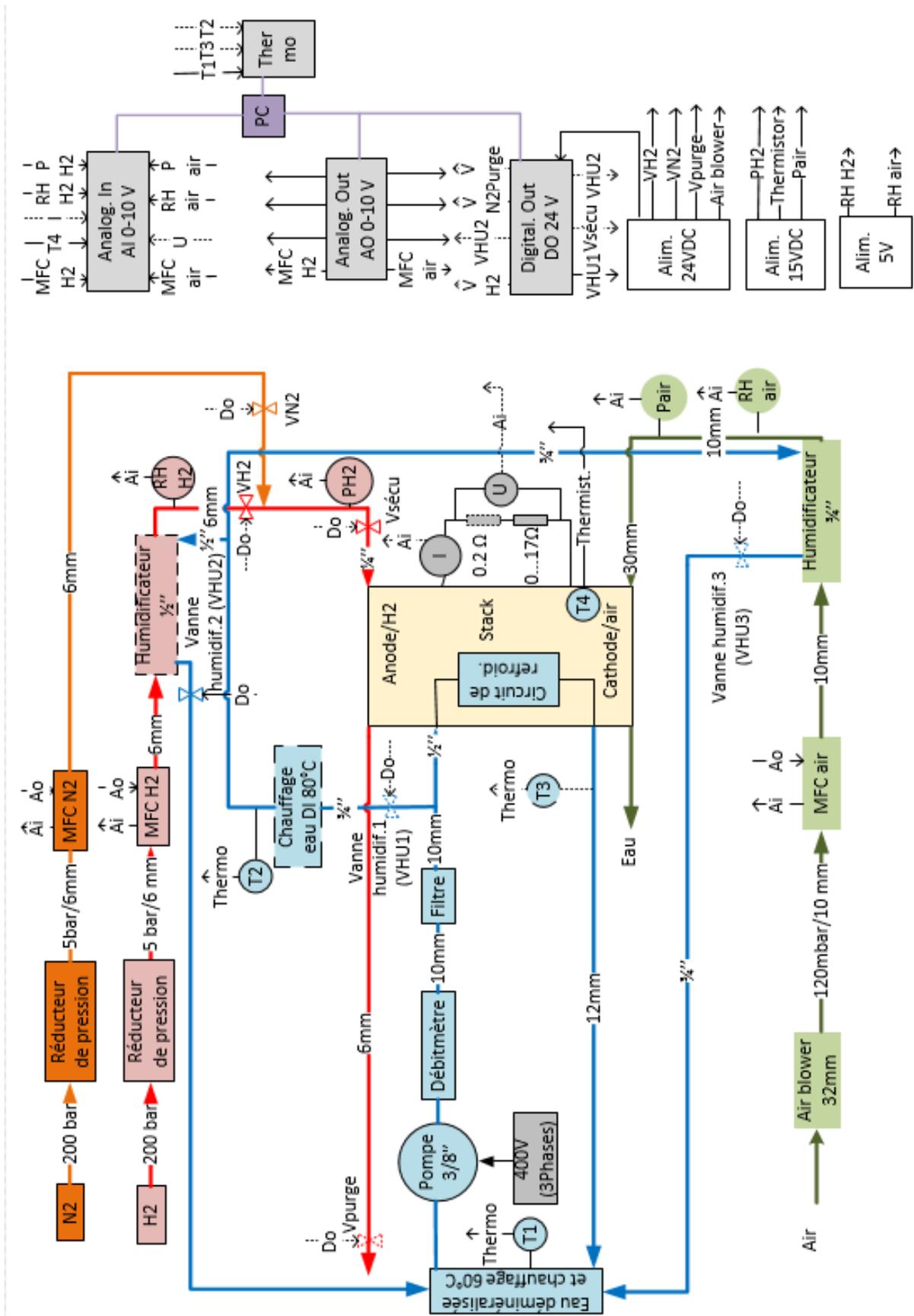


Figure 35: Schéma du banc de test du stack. Au centre le stack lui-même, juste en dessus le circuit d'H<sub>2</sub>, encore en dessus celui de N<sub>2</sub> permettant la purge du système et en dessous le circuit d'air. A gauche le circuit d'eau déminéralisée permettant le refroidissement du système et finalement à droite l'ensemble des cartes d'acquisitions et alimentations permettant le contrôle des différents éléments et le relevé des valeurs des capteurs.

Ces valeurs vont à présent permettre de déterminer le débit d'air et d' $H_2$  maximum qui pourraient être nécessaire lors de l'utilisation du stack aux valeurs limites de stœchiométrie données par le fournisseur (cf Annexe 6 : Fiche technique stack APFCT).

|            |  |       |
|------------|--|-------|
| $S_{Air}$  | <i>Stoichiométrie minimum Air</i>              | 2.8   |
| $S_{H_2}$  | <i>Stoichiométrie minimum <math>H_2</math></i> | 1.2   |
| $I_{max}$  | <i>Courant maximal</i>                         | 100 A |
| $n_{cell}$ | <i>Nombre de cellules dans le stack</i>        | 40    |

Tableau 9: Données générales nécessaires pour déterminer les débits d' $H_2$  et d'air maximum du stack aux valeurs limites de stœchiométrie.

$$Q_{Air} = Q_{Air_{1A}} * I_{max} * S * n_{cell} = 17.5 \frac{cm^3}{A * min} * 100A * 2.8 * 40 = 196 \text{ l/min}$$

$$Q_{H_2} = Q_{H_2_{1A}} * I_{max} * S_{H_2} * n_{cell} = 7 \frac{cm^3}{A * min} * 100A * 1.2 * 40 = 33.6 \text{ l/min}$$

Le débit d'hydrogène calculé est inférieur à celui donné dans la fiche technique, ce qui est cohérent, car ce dernier a été calculé pour une stœchiométrie de 1,6 (cf Annexe 6 : Fiche technique stack APFCT).

Lors de la commande des débitmètres, une valeur plus haute que la valeur maximale calculée ci-dessus sera choisie afin d'avoir une certaine marge afin de pouvoir augmenter la stœchiométrie (250 l/min pour l'air et 45 l/min pour l'hydrogène).

### 7.3.2. Développement du circuit du stack

Afin de se procurer l'ensemble des éléments nécessaires au bon fonctionnement du stack industriel, un schéma de principe détaillé a été effectué (cf Figure 35).

Le temps imparti pour ce projet, le prix et le délai de livraison de certains éléments ont mené à devoir effectuer certains choix, tels que d'effectuer les premiers tests sans humidificateur du côté de l' $H_2$ , de développer un humidificateur pour l'air à l'HES, ou encore de faire des choix par ordre de priorités en ce qui concerne l'instrumentation installée. Ces décisions et en particulier celles d'effectuer les premières mesures à l'aide de résistances variables et d'une pompe de refroidissement déjà disponible à l'HES, ont mené à réduire la plage de fonctionnement testé durant ce travail entre 0 et 40 A.

La Figure 35 représente l'ensemble des éléments électriques, hydrauliques et de gaz permettant de faire fonctionner de manière optimale le stack de piles à combustible. On retrouve le schéma de la monocellule mais avec des éléments supplémentaires venant le compléter et avec des appareils permettant un contrôle automatisé du système. Les éléments en traitsillés sont ceux qui n'ont pas été installés pour ces premiers tests mais qui devraient l'être à long terme afin d'optimiser le fonctionnement du stack.

Des cartes d'acquisitions de données et une interface ont également été mises en place afin de contrôler les différents éléments qui composent ce circuit et de pouvoir lire en direct et enregistrer les informations fournies par les capteurs. Différentes alimentations permettant de faire fonctionner l'ensemble de l'instrumentation ont également été installées et comme pour le circuit de la monocellule des résistances variables vont permettre de balayer la plage de courant souhaitée (0 à 40A dans un premier temps).

Pour ce qui est des circuits d'air et d' $H_2$ , des régulateurs de débit (MFC), des capteurs de pression et d'humidité ont été insérés dans le circuit afin de pouvoir contrôler l'ensemble des facteurs pouvant influencer le fonctionnement du stack comme expliqué dans le point 4.

Un circuit de refroidissement est nécessaire pour ce type de système afin de maintenir une température optimale et ainsi pouvoir améliorer le rendement. (Cf : point 4.6.3). Une pompe de circulation d'eau tout comme un débitmètre sont installés ainsi qu'un filtre permettant de purifier l'eau et de maintenir sa valeur de conductivité dans la plage indiquée par le fournisseur (cf point 7.2). Pour ces premiers tests, une pompe déjà à disposition à l'HES mais ayant un plus faible débit que celui conseillé par le fournisseur va être utilisée étant donné que seule la plage basse de courant va être testée. En effet la diminution de la plage de fonctionnement va permettre de minimiser la hausse de la température du stack.

Des purges étant nécessaires, un circuit a donc été développé afin de pouvoir contrôler le débit de  $N_2$  et de cette manière être sûr de purger le volume conseillé par le fournisseur (cf point 7.3.5).

### 7.3.3. Développement d'un humidificateur

Concernant l'humidificateur du côté de l'air, les prix importants de ces éléments sur le marché et la méconnaissance de l'efficacité des systèmes vendus nous ont menés à développer nous-mêmes un humidificateur. En effet les conséquences d'une faible fuite d'air ne sont pas très importantes ce qui explique ce choix et ce qui permet de tester un humidificateur du marché pour le côté  $H_2$  et de s'en procurer un deuxième si les résultats de ce dernier sont bons.

Pour ce faire une flasque initialement conçue pour le vide a été utilisée et modifiée pour fonctionner de la manière suivante :

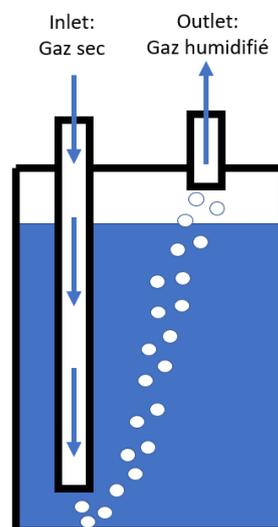


Figure 36: Principe de la technique d'humidification. Passage du gaz dans de l'eau déminéralisée, basée sur le fonctionnement d'un barboteur.

Le choix de cette flasque a été effectué car c'est un élément qui du fait de son utilisation standard pour le vide se doit d'être hermétique, ce qui est un point déterminant pour notre humidificateur. L'idée de son développement est basée sur le principe des barboteurs normalement utilisés en chimie et qui ont servi à humidifier l'air et l' $H_2$  lors des tests sur la monocellule.

#### 7.3.4. Thermistor

Un thermistor est intégré au sein du stack afin de pouvoir contrôler sa température interne. Le thermistor est simplement une résistance variable qui varie en fonction de la température et dont les caractéristiques sont données par le fournisseur (cf Annexe 10 : Fiche technique thermistor). Etant donné que la plage de fonctionnement de la pile se trouve entre la température ambiante de 25 °C et 70 °C (Annexe 6 : Fiche technique stack APFCT), nous avons donc utilisé cette plage avec une certaine marge au niveau de la valeur supérieure afin de prendre quelques précautions pour dimensionner une source de courant. En effet cet élément est nécessaire afin d'obtenir une tension allant de 0 à 10 V de manière à pouvoir convertir ces données grâce à l'automate. Le dimensionnement de cet élément s'est fait de la manière suivante :

Les données fournisseurs du thermistor pour la plage qui nous intéresse sont les suivantes :

- Résistance à 25°C de 10 kΩ
- Résistance à 80 °C 1669 Ω

En sachant que la tension maximale que l'on doit obtenir est de 10V :

$$U = R * I$$
$$10 V = 10000 \Omega * I$$
$$I = \frac{10V}{10000\Omega} = 1mA$$

Ce qui fait donc que la tension donnée pour une température de 80°C sera de :

$$U = 1669\Omega * 1mA = 1.669V$$

Ainsi la plage de tension aux bornes de la résistance du thermistor convient par rapport à la plage de tension d'entrée de l'automate qui est de 0 à 10V.

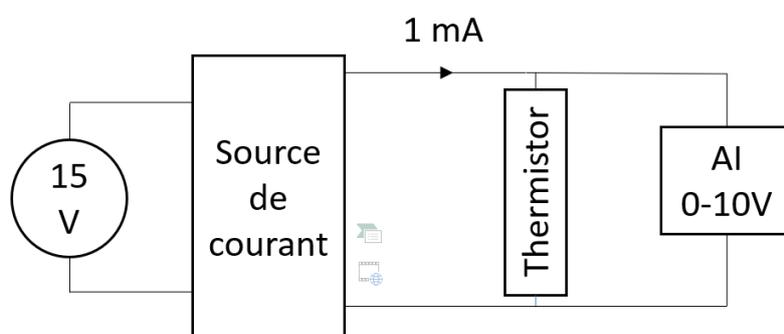


Figure 37: Source de courant. Alimentation 15 V d'un côté et la résistance du thermistor de l'autre. La tension aux bornes de la résistance est ensuite lue sur une entrée 0-10 V du module AI.

#### 7.3.5. Détermination des différents facteurs de la purge

Deux éléments principaux sont à déterminer lorsque l'on parle de purge de pile à combustible, le premier est le temps cyclique après le lequel une purge va être effectuée et le second est la durée de la purge.

Selon la fiche technique du stack, le temps cyclique de purge va dépendre du courant auquel fonctionne la PAC. Cette information s'explique par le fait que si l'on produit plus d'électricité il y aura davantage de réactions qui vont se produire et donc une quantité d'eau plus importante susceptible de causer une inondation de la chambre anodique.

La plage conseillée par le fournisseur est comprise entre 3600 et 4500 As ce qui représente donc une purge toutes les 36 à 45 secondes dans le cas de figure où la pile produit son maximum de courant (100 A car 120 A pas conseillé). Dans le cadre de ce travail, le temps sera calculé en fonction de limite inférieure de cette plage (3600 As) afin que les résultats soient les plus optimaux possible.

L'objectif serait d'automatiser la variation de ce temps cyclique en fonction du niveau de fonctionnement de la pile avec la détermination suivante du temps cyclique de purge :

$$I = \text{Courant produit par la pile en [A]}$$

$$T_{cp} = \text{Temps cyclique de purge en [s]}$$

$$T_{cp} = 3600/I$$

Pour ce qui est de la durée de la purge, ce temps va dépendre du débit de cette dernière ainsi que du volume de la pile en excluant celui du circuit qui l'entoure. Dans le cas du APFCT, le débit de purge conseillé est de 45 l/min et son volume est de 35 ml.

$$T_p = \text{Temps de purge}$$

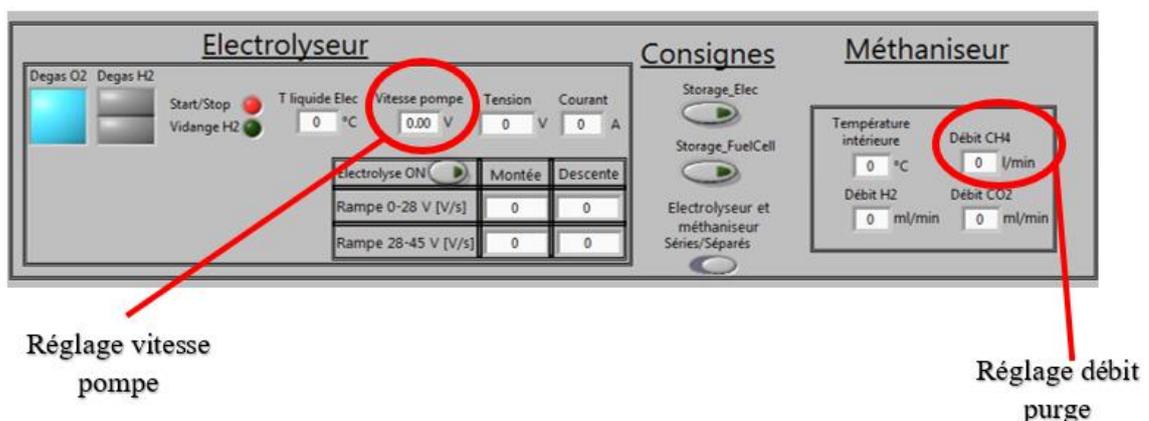
$$T_p = \frac{0.35l}{45 \frac{l}{\text{min}}} = 0.0078 \text{min} \approx 0.5s$$

Ce temps de purge étant très court, il pourra être légèrement prolongé d'un facteur deux par exemple afin d'être sûr que le volume purgé soit suffisant.

Dans un premier temps, ce temps cyclique de purge ne sera pas utilisé étant donné que ce dernier s'applique pour une utilisation en boucle de recirculation (cf point 4.7) de la pile à combustible, or comme il a été dit précédemment les tests effectués dans ce travail se feront en mode fuite continue. Le temps de durée de la purge va cependant être utile car une purge sera effectuée avant chaque démarrage mais avec un débit d' $N_2$  de 1 l/min ce qui augmente ce temps à 21 s.

### 7.3.6. Interface de commande

Une interface de commande a été développée sur le logiciel matlab simulink afin de pouvoir contrôler les différents éléments et de lire les valeurs délivrées par l'instrumentation grâce aux différentes cartes.



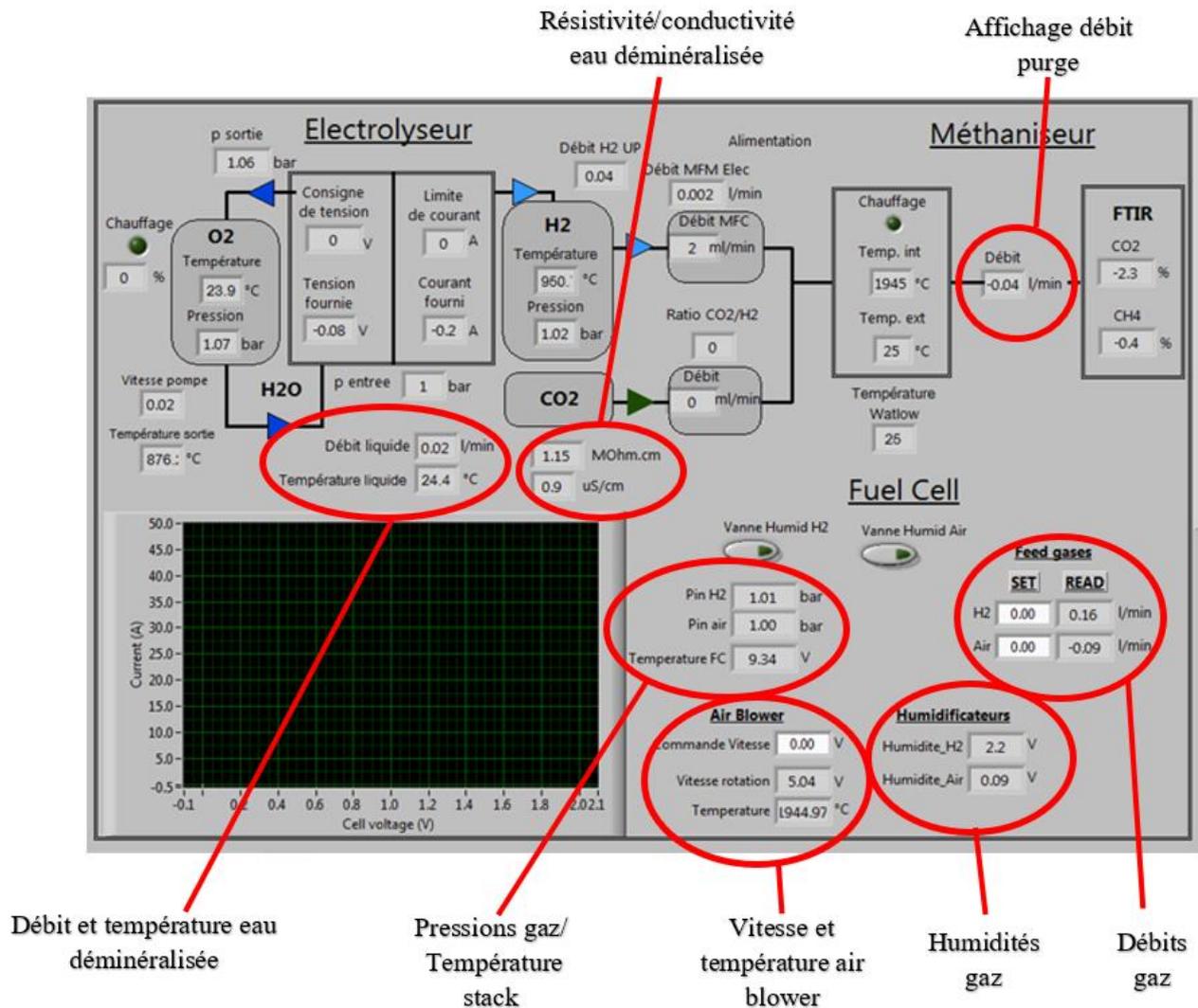


Figure 38: Interface permettant la commande et la lecture des différents éléments d'instrumentation du stack.

## 7.4. Test de l'instrumentation

Avant d'effectuer des tests sur l'ensemble du système, des essais des capteurs de pression, d'humidité et des débitmètres ont été effectués afin de s'assurer que ces éléments fonctionnent correctement.

### 7.4.1. Calibration

La calibration a permis de définir une équation reliant la tension transmise par le capteur en fonction de la pression ou du débit mesuré, ce qui permet de convertir directement la valeur de pression ou de débit au niveau de l'interface.

#### 7.4.1.1. Calibration capteurs de pression

La calibration des capteurs de pression a été effectuée en comparant la tension transmise par le capteur avec la pression affichée par un manomètre.

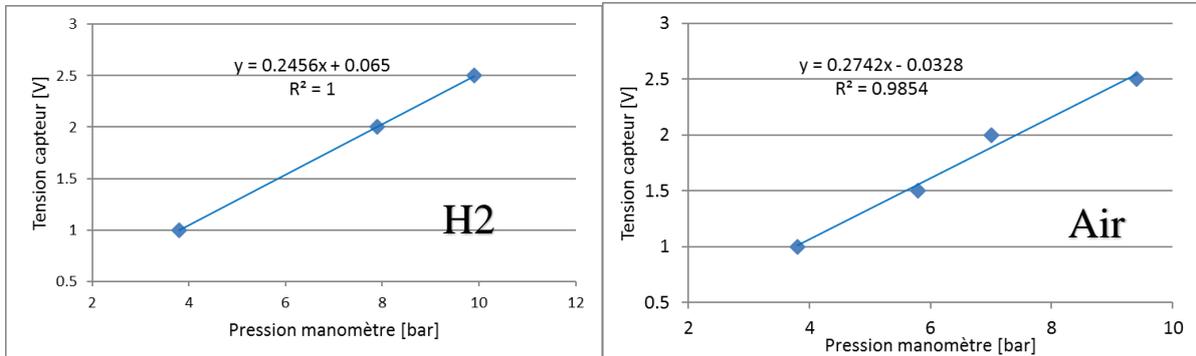


Figure 39: Calibration capteurs de pression. Circuit composé de deux capteurs de pressions afin de calibrer le nouveau débitmètre par rapport à l'ancien qui l'est déjà et cela avec l'air et l'H<sub>2</sub>.

#### 7.4.1.2. Calibration débitmètre

La calibration des nouveaux débitmètres a été effectuée en comparant la tension transmise avec la valeur de débit délivrée par un débitmètre connu ayant déjà été calibré. Ces calibrations ont été effectuées avec un flux d'H<sub>2</sub>.

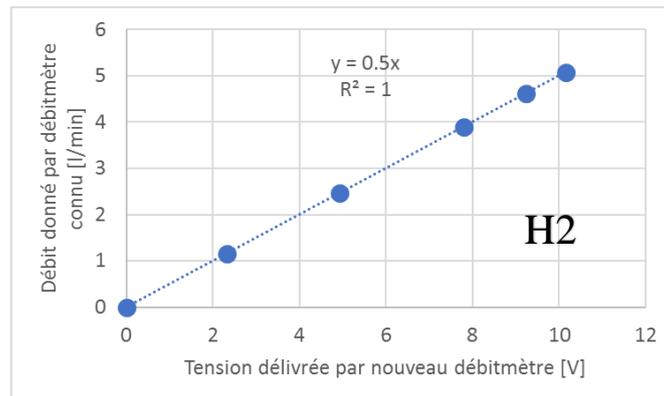


Figure 40: Calibration débitmètre. Un débit d'H<sub>2</sub> est injecté dans un circuit où deux débitmètres sont en série afin de calibrer le nouveau débitmètre grâce à la valeur délivrée par l'ancien qui l'est déjà.

#### 7.4.2. Test air blower

À la suite de tests effectués avec l'air blower en essayant de mesurer le débit fourni par ce dernier en fonction de la tension de commande, une absence de débit à la sortie du MFC est apparue. Il s'est révélé que la pression amont nécessaire au fonctionnement du MFC était trop importante par rapport à celle pouvant être fournie par l'air blower.

La solution adoptée a été l'utilisation du compresseur alimentant le laboratoire en air comprimé pour effectuer les essais.

#### 7.4.3. Test combinaison débitmètre et capteur de pression

Lors de ces tests l'objectif va être d'observer l'évolution des pressions mesurées en fonction du débit et de la résistance en sortie du circuit. Pour se faire une vanne sera placée en sortie et sera ouverte entièrement dans un premier temps puis partiellement (100% ouverte puis 67% ouverte).

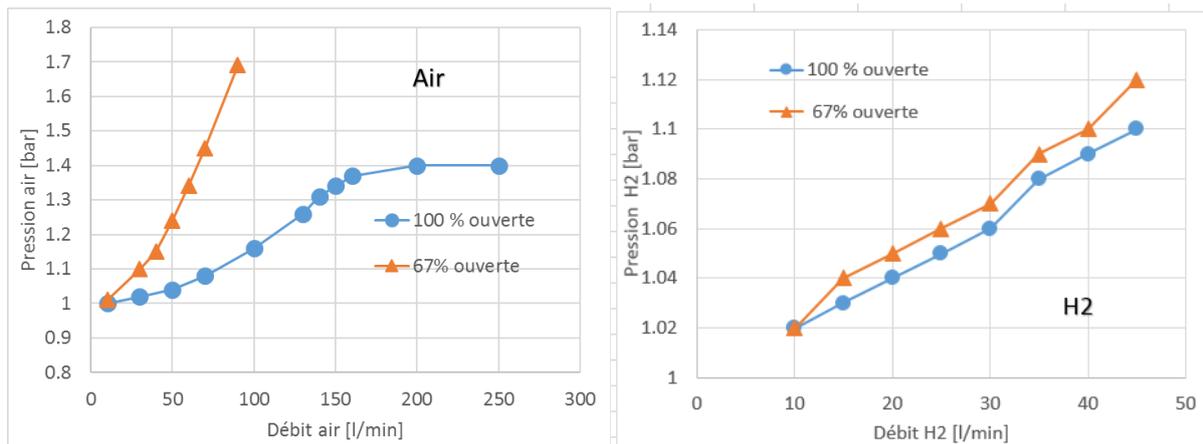


Figure 41: Test instrumentation. L'ouverture de la vanne de sortie est variée afin d'observer l'impact de la résistance en sortie du circuit sur la pression et cela pour l'air et pour l'H<sub>2</sub>.

La valeur limite de pression d'entrée du stack étant de 1,48 bar pour l'H<sub>2</sub> et de 1,35 bar pour l'air (cf point 7.2). On observe que dans la configuration de la vanne totalement ouverte, la valeur est toujours inférieure à cette limite pour l'un et l'autre des gaz. Pour l'H<sub>2</sub> cette limite n'est toujours pas atteinte avec la fermeture partielle alors que pour l'air la valeur limite est dépassée.

On voit que la pression augmente en même temps que le débit et que la faible viscosité de l'H<sub>2</sub> va permettre de réduire considérablement les risques de surpression par rapport au côté alimenté par l'air. La fermeture partielle de la vanne devrait logiquement imposer une résistance plus importante pour les deux gaz que leurs circuits respectifs au sein du stack, ce qui laisse penser que des surpressions ne devraient pas apparaître. Dans les deux cas, une hausse progressive du débit sera effectuée afin de s'assurer de ne pas dépasser ces valeurs maximales en faisant particulièrement attention du côté de l'air.

### 7.5. Protocole de mesure

Comme pour celui de la monocellule, ce protocole de mesure va permettre d'exposer la méthode à utiliser afin de réaliser les tests sur le stack de piles à combustible et ainsi obtenir des résultats similaires à ceux présentés dans le point 7.6.1. Une nouvelle fois, ce protocole prend en compte les observations et problèmes observés dans ce travail.

#### - Mise en route :

- 1) Enclencher de débit d'eau déminéralisée afin que sa conductivité atteigne la valeur limite indiquée par le fournisseur (Cf : 7.2).
- 2) Régler la résistance variable de 17  $\Omega$ /8A sur la valeur maximale et enclencher l'ampèremètre ainsi que le voltmètre en les réglant sur la plage de mesure adéquate.
- 3) Enclencher le débit d'air. Les tests du point 7.4.3 ont démontrés que ce débit d'air était susceptible de causer des surpressions, il est donc important d'augmenter sa valeur progressivement et par pas de 5 l/min jusqu'à la valeur souhaitée afin de pouvoir surveiller l'évolution de la pression.
- 4) Enclencher le débit d'H<sub>2</sub>. Comme l'ont démontré les tests effectués avec la mesure de pression lors de l'augmentation du débit d'H<sub>2</sub>, la valeur ne dépasse jamais la limite conseillée par le fournisseur (cf point 7.2). Aucune précaution n'est donc nécessaire avant d'enclencher ce débit, mais malgré tout il est plus sûr de l'augmenter de manière progressive pour éviter tous problèmes.

- **Mesures :**

- 1) Comme les tests annexés (cf Annexe 1 : Influence de la méthode de variation de R) l'ont démontré, la méthode de variation de la résistance n'impacte pas la qualité des résultats obtenus, ce qui fait que la variation peut s'effectuer au bon vouloir de l'opérateur. Un faible temps de stabilisation d'une dizaine de secondes est nécessaire afin d'être sûr que la valeur relevée soit stabilisée.
- 2) Le changement de la résistance variable est nécessaire dans un second temps avec la mise en place des deux résistances de  $2 \Omega/20A$  en parallèle afin d'atteindre les valeurs de courant jusqu'à 40 A. La variation de la valeur des deux résistances doit se faire de manière symétrique afin d'éviter qu'un courant trop important ne passe pas dans l'une des deux résistances.

- **Mise hors service :**

- 1) Coupure du débit d' $H_2$ .
- 2) Coupure du débit d'air.
- 3) Coupure du débit d'eau déminéralisée si d'autres mesures ne sont pas prévues dans l'immédiat. Dans le cas contraire, le débit d'eau peut être laissé afin de permettre l'augmentation de la valeur de résistivité du liquide.

### 7.6. Tests et résultats

Comme indiqué dans le point 7.3.2, les premiers tests sont effectués avec un circuit minimum permettant la caractérisation du système sur une plage de mesure réduite de 0 à 40 A.

Comme pour les tests sur la monocellule, les débit d'air et d' $H_2$  seront exprimés en l/min ou en  $cm^3/min$  et sont aux conditions standards de température et de pression de 25 °C et 1 bar (souvent respectivement notés slm et sccm).

#### 7.6.1. Résultats expérimentaux

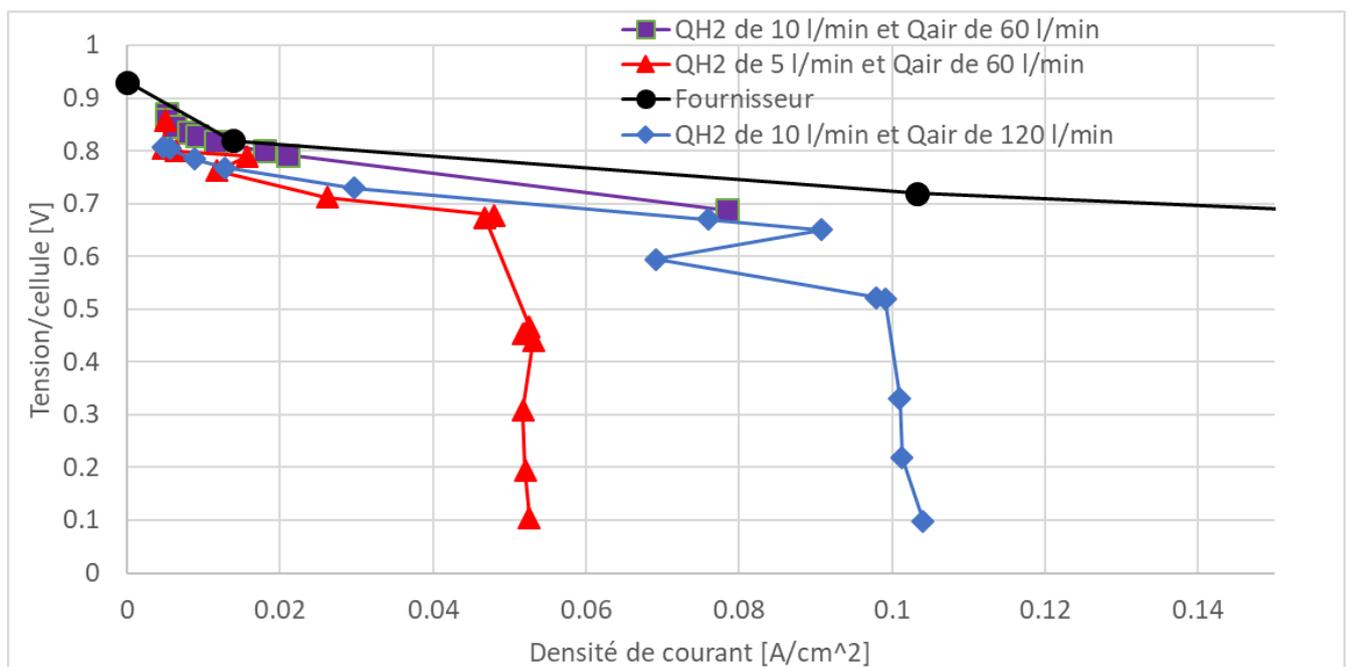


Figure 42: Tension en fonction de la densité de courant pour le stack APFCT comparée avec les données du fournisseur.

Sur la Figure 42, on observe deux limitations de courant différentes pour les débits d'H<sub>2</sub> testés de 5 et 10 l/min. Elles s'effectuent respectivement à des densités de courant d'environ 0.05 et 0.1 A/cm<sup>2</sup>. La tendance des courbes obtenues correspond aux résultats observés pour la monocellule et à la tendance de la courbe du fournisseur. Malgré tout, les résultats expérimentaux restent inférieurs aux données du fournisseur.

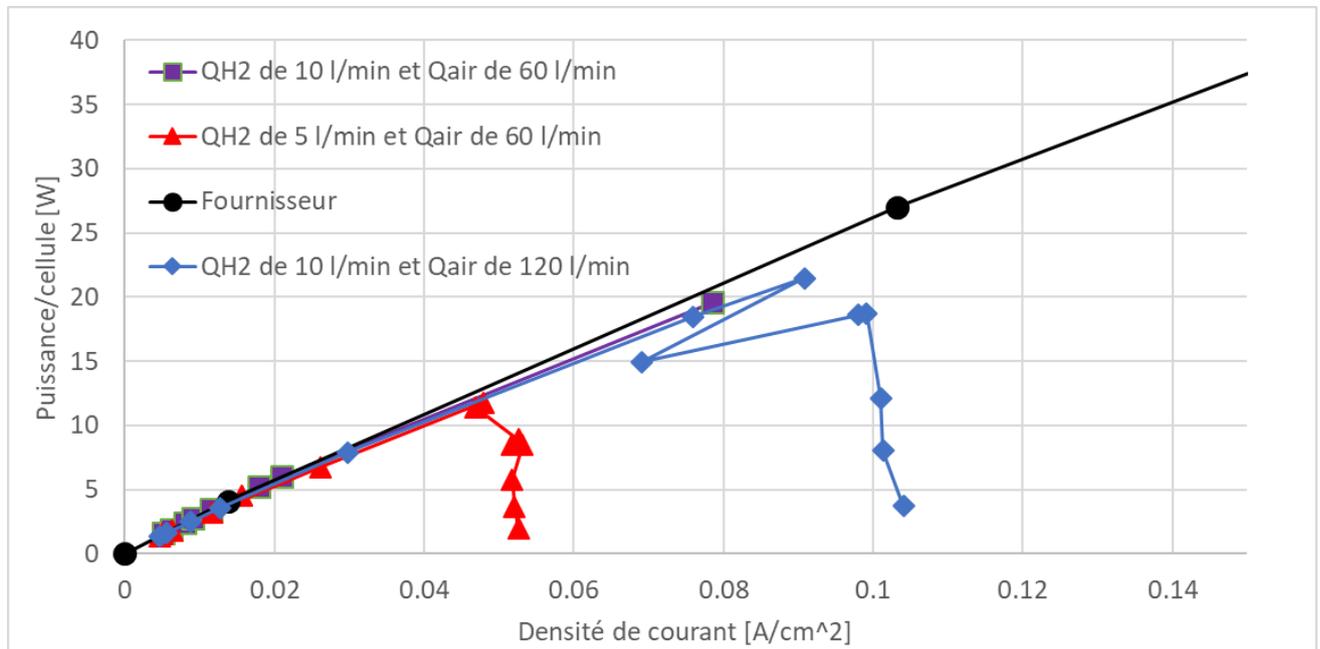


Figure 43: Puissance par cellule en fonction de la densité de courant pour le stack APFCT comparée avec les données du fournisseur.

Au niveau de la puissance par cellule, elle est d'environ 21.5 W pour le débit d'H<sub>2</sub> de 10 l/min alors qu'elle est de 11.8 W pour un débit deux fois moins important.

### 7.6.2. Résultats théoriques attendus

Les limitations de densité de courant et les puissances théoriques maximales déterminées à l'aide des équations 3 et 4 sont les suivantes :

| Débit H <sub>2</sub><br>[l/min] | Limite de densité<br>de courant<br>[A/cm <sup>2</sup> ] | Puissance<br>max/cellule<br>[W] |
|---------------------------------|---|---------------------------------|
| 5                               | 0.05  | 22.5                            |
| 10                              | 0.1   | 45                              |

Tableau 10: Puissance et limites de courant théorique du stack pour des débits donnés.

### 7.6.3. Etude des résultats

Au niveau des limitations de courant, on observe que la théorie converge avec les résultats obtenus de manière expérimentale avec une différence maximum observée d'environ 5 % pour certains points.

Les rendements obtenus sont de 52 % pour le débit de 5 l/min d'H<sub>2</sub> alors qu'il est de 48 % pour le débit de 10 l/min (calculés à partir de l'équation 5). Les rendements sont proches des 40 à 50 % théoriques d'une pile à combustible ce qui confirme que le fonctionnement de la pile durant ces premiers tests est satisfaisant. Cependant les débits utilisés sont loin des débits maximaux de fonctionnement cités précédemment dans ce rapport. Or les résultats obtenus sur la monocellule ont démontré que le rendement baisse quand les débits utilisés augmentent.

Les résultats expérimentaux semblent diverger davantage des données du fournisseur lorsque le courant et donc la puissance produite augmente. La différence entre la valeur maximale de puissance obtenue de manière expérimentale et celle affichée par les spécifications du fournisseur pour la même densité de courant diffère d'environ 10 %.

Cette différence peut s'expliquer par l'absence de l'humidificateur du côté de l'H<sub>2</sub> qui ne fournirait donc pas l'humidification idéale de la membrane et qui augmenterait donc la résistance protonique de cette dernière. La température du stack pourrait être une autre explication, car les temps de tests étant courts, la température ne peut pas augmenter suffisamment pour atteindre la température idéale de fonctionnement de 60 °C (cf point 7.2). Cette dernière hypothèse sera confirmée lors du relevé des mesures prises durant les tests au point 7.6.4 qui montre que la température du stack a varié entre 32 et 39 °C.

Finalement l'écart entre les valeurs mesurées et les chiffres du fournisseur pourrait également s'expliquer par le fait que la tension a été prise au niveau de la résistance et non pas directement à la sortie du stack.

|        |                                    |                             |
|--------|------------------------------------|-----------------------------|
| $S$    | <i>Surface fil</i>                 | 0.785 cm <sup>2</sup>       |
| $\rho$ | <i>Résistivité cuivre</i>          | 17 * 10 <sup>-9</sup> Ω * m |
| $l$    | <i>Longueur du fil</i>             | 2 m                         |
| $I$    | <i>Courant électrique</i>          | 40 A                        |
| $U$    | <i>Chute de tension sur le fil</i> | *                           |
| $R$    | <i>Résistance fil</i>              | *                           |

Tableau 11 : Données générales nécessaires pour déterminer les pertes dues au circuit du stack. Les cases annotées du symbole\* sont les facteurs recherchés.

$$R = \rho * \frac{l}{S} = 17 * 10^{-9} \Omega * m * \frac{2m}{0.785 * 10^{-4} m^2} = 4.33 * 10^{-4} \Omega$$

$$U = R * I = 4.33 * 10^{-4} \Omega * 40A = 17.3mV$$

Cette valeur étant très faible, l'hypothèse d'une chute de tension importante au niveau du circuit électrique peut être écartée.

Les densités de courant semblent faibles, mais cela s'explique aisément par l'estimation de la zone active qui a été maximisée et qui fausse certainement ce résultat.

#### 7.6.4. Relevé des différentes prises de mesures

Comme vu dans le schéma de principe de la Figure 35, une instrumentation assez complète a été installée dans le circuit du stack afin de pouvoir contrôler les facteurs importants pouvant influencer le bon fonctionnement du système. Le programme matlab simulink a permis de sauvegarder l'ensemble des mesures effectuées durant les tests qui sont présentées à la Figure 44.

Comme il a été dit lors du protocole de mesure dans le point 7.5, lorsque les mesures sont terminées c'est le **débit d'H<sub>2</sub>** qui est coupé en premier, c'est donc l'évolution de ce dernier qu'il faut observer pour trouver le moment où les prises ont été effectuées. Si l'on occulte le premier pic de **débit d'air** à 100 l/min, qui est un test effectué lors de la mise en route, on retrouve ensuite les débits de 60 et 120 l/min auxquels les mesures ont été effectuées. De même pour le débit d'H<sub>2</sub> avec les valeurs de 5 et 10 l/min qui coïncident avec les débits d'air correspondants durant les tests.

On voit que le **débit d'eau déminéralisée** est constant sur des durées assez longues, ce qui s'explique par le fait que le débit d'eau n'a pratiquement pas été coupé durant l'ensemble de la journée de test afin de faire passer l'eau dans les filtres et d'augmenter sa résistivité. Durant les tests ce débit est d'environ 1,9 l/min et la valeur maximale de résistivité de l'eau est d'environ 15 M $\Omega$ \*cm.

Pour ce qui est de la tension délivrée par les **capteurs d'humidité**, on remarque qu'elle augmente pour celui placé sur le flux d'air lorsque le débit de ce dernier est enclenché, alors que le même phénomène n'est pas observé du côté de l'H<sub>2</sub>. Cette observation est cohérente étant donné que le flux d'air passe dans un humidificateur alors que ce n'est pas le cas pour celui d'H<sub>2</sub>. La valeur maximale d'humidité relative observée durant les prises de mesures est d'environ 70 % alors que la valeur moyenne est plus proche des 40 %. Les valeurs d'humidités précédentes ont été déterminées à l'aide de la tension fournie par le capteur et à la fiche technique de l'élément (cf Annexe 5 : Fiche technique capteur d'humidité). Pour rappel l'humidité relative minimum conseillée par le fournisseur est de 85 % pour l'H<sub>2</sub> et de 90 % pour l'air, ce qui peut expliquer en partie le niveau de fonctionnement plus faible observé dans le point 7.6.

**Les pressions d'air et d'H<sub>2</sub>** fluctuent également lorsque les débits sont enclenchés et ce pour les deux flux, mais ces valeurs restent faibles comme les valeurs limites de pression d'entrée du fournisseur le demandent. Pour le côté H<sub>2</sub>, la pression relative est très faible (moins de 0,1 bar) lorsque le débit est de 5 l/min et en moyenne d'environ 0,2 bar lorsque le débit est de 10 l/min. Pour l'air cette valeur est également pratiquement nulle pour l'ensemble des mesures avec un débit de 60 l/min et augmente à une valeur d'environ 0,2 bar pour le débit de 120 l/min.

Finalement pour la **température du stack**, le capteur n'a été installé qu'avant le dernier test qui a été effectué, ce qui explique la valeur légèrement négative et continue observée précédemment. Depuis la mise en place du capteur et à la suite de la dernière prise de mesure effectuée, la température du stack a varié entre environ 32 et 39 °C. Ces valeurs sont loin la valeur optimale de température de 60 °C, une amélioration des performances obtenues lors des tests semble donc possible. Les valeurs de température précédentes ont été déterminées à l'aide de la tension fournie par le capteur et à la fiche technique de l'élément (cf Annexe 10 : Fiche technique thermistor).

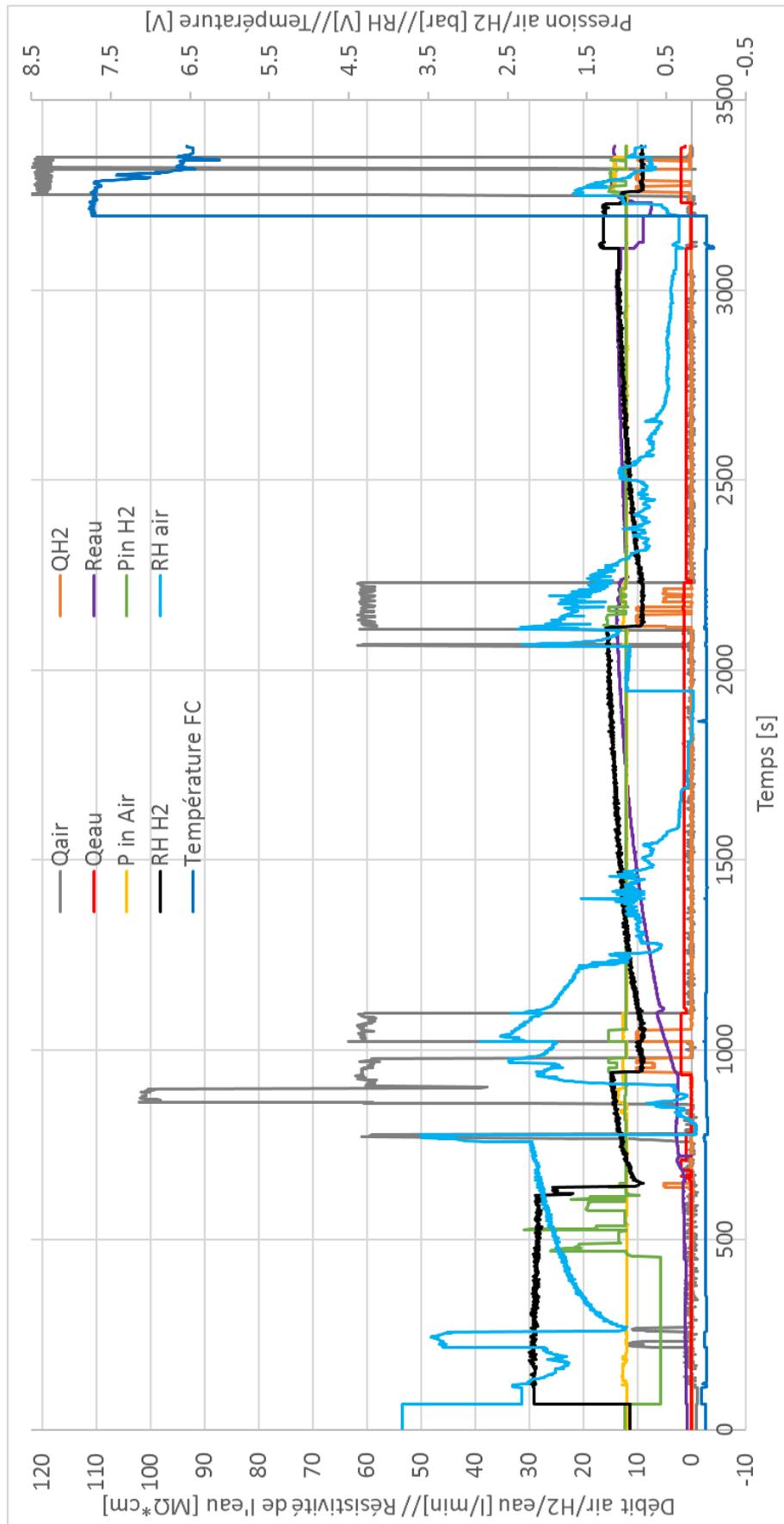


Figure 44: Relevé des mesures transmises par l'instrumentation durant les tests effectués sur le stack de piles à combustible. Les courbes permettent de visualiser l'ensemble des mesures relevées durant les tests ainsi que leurs évolutions dans le temps.

## 7.7. Analyse financière

Cette partie va consister à faire un bilan financier afin d'estimer le coût de l'ensemble de l'installation à différents niveaux d'optimisation (cf Tableau 12). Cette analyse financière va donc prendre en compte le prix du stack lui-même, celui de l'ensemble des éléments composant le circuit, mais aussi les heures de travail des différents ateliers qui ont réalisé des pièces et autres travaux pour ce travail.

Une première estimation va déterminer le coût de l'installation ayant permis d'obtenir les résultats exposés précédemment dans le point 7.67.3.2.

La seconde estimation (type 2), est celle du circuit de la Figure 35, à l'exception que l'humidificateur du côté de l'air qui reste celui développé à l'HES. Les prises de mesures manuelles telles que le voltmètre et l'ampèremètre sont donc remplacés par des sondes de tension et de courant permettant de relever ces valeurs de manière automatique. Les vannes manuelles sont aussi remplacées par des électrovannes afin que l'ensemble du système puisse être automatisé. La pompe utilisée pour les premières mesures est également remplacée par une pompe avec un débit plus important permettant d'atteindre le débit conseillé pour le circuit d'eau déminéralisée. De plus un consommateur (alimentation bidirectionnelle) permettant de tester l'ensemble de la plage de fonctionnement est intégré au circuit.

La troisième (type 3) est l'estimation du circuit exact illustré sur la Figure 35, c'est-à-dire avec les améliorations apportées pour le deuxième type de circuit, avec en plus un humidificateur d'air du commerce venant remplacer celui développé à l'HES.

L'ensemble du coût des éléments composant les différents circuits se trouvent avec leurs prix respectifs dans la liste de matériel (Annexe 3 : Liste de matériel du stack). Du fait qu'une partie du matériel utilisé a été récupérée, il a été difficile de trouver les prix exacts de ceux-ci. Ce qui explique qu'une partie de ces coûts ont dû être estimés. (Éléments annotés avec le symbole suivant (\*)) dans la liste de matériel du stack).

|   | Achats<br>[CHF] | Disponible<br>[CHF] | Usinage<br>[CHF] | Total<br>[CHF] |
|---|-----------------|---------------------|------------------|----------------|
| Installation ayant permis les tests de ce travail   | 9151            | 15977               | 616              | 25744          |
| Installation type 2 (Pompe d'eau déminéralisée, alimentation bidirectionnelle et humidificateur H2)                                 | 25689           | 13265               | 616              | 39570          |
| Installation type 3 (Pompe d'eau déminéralisée, alimentation bidirectionnelle, humidificateur H2 et humidificateur air du commerce) | 28379           | 13352               | 616              | 42347          |

Tableau 12: Différents coûts en fonction du niveau de développements du circuit. Les principales modifications apportées pour le type 2 et 3 sont mentionnées dans le tableau. Il va permettre de rendre compte des dépenses effectuées pour le système actuel et celles à prévoir pour l'optimiser.

Le développement du circuit peut se faire progressivement par la suite, c'est-à-dire d'apporter les modifications du type 2 puis d'aviser par la suite s'il est intéressant d'investir dans un humidificateur du commerce pour l'air ou non (d'un point de vue technique et financier).

## 8. Améliorations possibles

Les suites possibles à donner à ce projet sont multiples, en commençant par un approfondissement de la caractérisation expérimentale du fonctionnement d'une pile à combustible grâce à de nouveaux tests sur la monocellule :

- 1) **Test de l'influence de la température.** Il vise à déterminer la puissance maximale produite à des débits de gaz et des conditions d'humidification fixent, mais à des températures variables, afin de démontrer l'impact de ce facteur sur le rendement du système.
- 2) **Test de l'influence de l'humidification.** Retirer tour à tour les humidificateurs placés en entrée de l'anode et de la cathode, puis les enlever les deux en même temps afin d'observer l'impact sur les performances. Des mesures dans le temps permettraient d'observer l'impact à long terme sur les performances et la dégradation des différents éléments composant la pile.

En ce qui concerne le stack de piles à combustible, des améliorations devraient être faites, permettant le test de l'ensemble de la plage de fonctionnement, l'optimisation des performances et l'automatisation du système :

- 1) Ajout de l'humidificateur au niveau du débit d' $H_2$ .
- 2) Nouveau consommateur en sortie (alimentation bidirectionnelle).
- 3) Installation de la nouvelle pompe avec le débit plus important.
- 4) Prise de mesures et commande du système totalement automatique en développant l'instrumentation du circuit (électrovannes, sondes de tensions/courant et autres capteurs de température).
- 5) Acheter un humidificateur d'air du commerce si une amélioration des performances semble possible grâce à ce dernier.
- 6) Caractérisation expérimentale de son fonctionnement comme effectuée pour la monocellule, ainsi qu'une comparaison avec la théorie et les résultats exposés dans ce travail.
- 7) Optimisation du fonctionnement avec une boucle de recirculation au niveau de l'anode comme présenté dans le point 4.7 pourrait être développé.

## 9. Conclusion

Le travail de recherche et de documentation a permis de déterminer le fonctionnement théorique d'une pile à combustible ainsi que les différents facteurs pouvant influencer ce dernier. Tout au long de ce travail, cette partie a permis de comprendre et de pouvoir analyser les résultats obtenus.

La caractérisation expérimentale du système a été réalisée en plusieurs étapes :

**La cellule éducative** a permis de prendre en main la technologie de pile à combustible et de fournir des résultats qui ont servi de base au moment de la détermination des conditions de fonctionnement de la monocellule.

Les tests sur **la monocellule** ont permis d'observer plus en détail le fonctionnement d'une pile à combustible et de caractériser ce dernier. En effet ces tests ont notamment permis de valider l'évolution de la puissance et de la tension en fonction du courant observées lors des essais sur

la cellule éducative, ou encore de déterminer le facteur 5 reliant le débit d'air et d'H<sub>2</sub> pour que la pile fonctionne correctement. Cette étape de caractérisation a également permis d'observer l'influence des débits des deux gaz, ainsi que la baisse du rendement lors de l'augmentation des puissances produites. La détermination des facteurs permettant l'optimisation d'un tel système, comme la réduction maximale de la résistance du circuit électrique en sortie ou encore l'augmentation des valeurs de débits a été effectuée. Cette optimisation a permis de déterminer la densité de puissance maximale par unité de surface du système qui est de 0,3 W/cm<sup>2</sup> pour un rendement de 32 %. Le point de fonctionnement optimal de la monocellule a été recherché et a été estimé à une densité de puissance de 0,22 W/cm<sup>2</sup> pour un rendement de 47 %. Finalement la comparaison des performances obtenues avec la théorie et avec celles du stack APFCT, ont démontrées que les résultats étaient comparables, ce qui démontre la bonne qualité des tests effectués. La comparaison avec les performances de la pile Energy Procedia a cependant démontré que de meilleures performances étaient possibles avec une augmentation maximum de 20 % de la densité de puissance par unité de surface produite pour une même densité de courant.

En ce qui concerne **le stack de piles à combustible**, un banc de test a été développé et mis en place grâce à l'expérience acquise sur la monocellule. Ce dernier a été développé jusqu'au point permettant d'effectuer une première caractérisation partielle du système (éléments manquants cités dans le point 7.3.2), du fait des délais de livraison importants de certains éléments, une instrumentation complète permettant de contrôler les différents facteurs (pressions, humidités ainsi que les débits des gaz et de l'eau déminéralisée) nécessaires au bon fonctionnement du stack a été mise en place. Ce circuit et son instrumentation ont ensuite été testés afin d'en valider le fonctionnement et sa capacité à être raccordé au stack afin de permettre une production électrique de ce dernier. Finalement une production électrique d'une puissance maximale d'environ 800 W (soit 1/3 de la puissance nominale du stack) avec un rendement de 48 % a été atteinte et la caractérisation de son fonctionnement sur une plage allant de 0 à 40 A a été effectuée. Sur cette même plage, des comparaisons avec les tendances des courbes délivrées par le fournisseur ainsi qu'avec les résultats obtenus de manière théorique ont permis de valider la qualité des résultats obtenus. Les performances obtenues sont tout de fois légèrement inférieures à celles du fournisseur (environ 10 % pour la puissance maximum obtenue lors des essais) ce qui est probablement dû au fait que comme expliqué précédemment, le circuit actuel n'est pas complet ce qui ne permet pas d'optimiser le fonctionnement du stack (humidification, température et plage de mesure trop faibles).

Ce projet fournit une base solide de connaissance et d'expérience permettant de comprendre et de mettre en place un dispositif similaire. Il offre également une perspective positive quant au fait que l'HES puisse dans un futur proche retransformer en grande quantité l'énergie stockée sous forme d'hydrogène par l'électrolyseur grâce aux possibilités d'amélioration proposées dans le point 8.

## 10. Remerciements

Ce travail touchant à sa fin je tiens à remercier l'ensemble des personnes m'ayant accompagné et épaulé tout au long de ce projet de Bachelor.

Tout d'abord mes remerciements vont à M. Christoph Ellert et David Martinet qui grâce à leurs disponibilités, leurs conseils précieux et leurs suivis m'ont permis d'atteindre mes objectifs.

Merci à M. David Berhouzoz et M. Eric Mabillard de l'atelier mécanique pour la réalisation des différentes pièces nécessaires à la mise en place du circuit et du stack lui-même.

Un grand merci également à M. Sylvain Arnold de l'atelier d'électronique pour le développement de la source de courant ainsi que pour les différents travaux réalisés pour la partie instrumentation du circuit.

Finalement je remercie mes proches pour leur soutien tout au long de ce projet ainsi que pour le travail de relecture du rapport qui m'a été précieux.

## 11. Bibliographie

- [1] «RTS info,» 21 09 2018. [En ligne]. Available: <https://www.rts.ch/info/economie/9860032-hyundai-va-lancer-mille-camions-a-hydrogene-sur-les-routes-de-suisse.html>. [Accès le 12 08 2019].
- [2] «TIR transNews,» 22 06 2019. [En ligne]. Available: <https://www.tir-transnews.ch/vertrag-fuer-h2-trucks-steht/>. [Accès le 08 08 2019].
- [3] Alstom, Alstom, 2018. [En ligne]. Available: <https://www.alstom.com/our-solutions/rolling-stock/coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train>. [Accès le 12 08 2019].
- [4] [En ligne]. Available: <https://www.h2sys.fr/fr/technologies/pile-a-combustible/>. [Accès le 10 06 2019].
- [5] P. Bhattacharya, «Water flooding in the proton exchange membrane fuel cell,» Science theearth, 2015.
- [6] B. D. Grisard, «Etude de dispositifs de recirculation d'hydrogène à pompage électrochimique pour systèmes pile à combustible PEM.,» Paris, 2014.
- [7] [En ligne]. Available: [https://moodle.umons.ac.be/pluginfile.php/5918/mod.../1/piles\\_a\\_combustible.pdf](https://moodle.umons.ac.be/pluginfile.php/5918/mod.../1/piles_a_combustible.pdf). [Accès le 06 08 2019].
- [8] V. R. J. M. F. a. H. R. K. Kevin R. Cooper, Experimental Methods and Data Analyses for Polymer Electrolyte Fuel Cells, 2005.
- [9] T. B. H. Tran, «Gestion de l'eau dans les piles à combustible électrolyte polymère : étude par micro-spectroscopie Raman operando. Autre,» HAL, Montpellier, 2017.
- [10] T. Gaumont, «Résistance protonique d'électrodes de piles à combustible à membrane (PEMFC) : effets de l'humidité et des dégradations. Matériaux.,» NNT : 2017LORR0002. Tel-01546366, Université de Lorraine, 2017.
- [11] P. Legrand, «Influence des conditions de fonctionnement de la pile à combustible sur les performances du dispositif et la durabilité de la membrane,» HAL, Grenoble, 2012.
- [12] O. Rallières, «Modélisation et caractérisation de Piles A Combustible et Electrolyseurs PEM,» HAL, Toulouse, 2011.
- [13] E. B. F. a. H. R. Colón-Mercado, «Mass Transport Limitations in Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Electrolyzers,» 2011.
- [14] T. G. R. p. d. d. p. à. c. à. m. (. : , «Résistance protonique d'électrodes de piles à combustible à membrane (PEMFC): effets de l'humidité et des dégradations. Matériaux.,» HAL, 2017.
- [15] S.-C. FeinaXu, «Study of electro-osmotic drag coefficients in Nafion membrane in acid, sodium and potassium forms by electrophoresis NMR. Journal of Membrane Science, Els,» HAL, 2017.
- [16] P. Morosini, «Etude du transport de l'eau dans les membranes Nafion des piles à combustible.,» HAL, 2013.
- [17] b. M. K. A. H. Hamid Kazemi Esfaha, «Temperature Effect on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance Part II: Parametric Study,» ScienceDirect.
- [18] J. D. A. T. S. D. Gaël MARANZANA, «Une pile à combustible au design thermique optimisé».
- [19] V. Reguillet, «Caractérisation d'un système pile à combustible en vue de garantir son démarrage et fonctionnement à température ambiante négative,» HAL, 2013.

## 12. Annexes

Annexe 1 : Influence de la méthode de variation de R

Annexe 2 : Liste de matériel monocellule

Annexe 3 : Liste de matériel du stack

Annexe 4 : Fiche technique capteurs de pression

Annexe 5 : Fiche technique capteur d'humidité

Annexe 6 : Fiche technique stack APFCT

Annexe 7 : Fiche technique MFC H2

Annexe 8 : Fiche technique MFC air

Annexe 9 : Fiche technique air blower

Annexe 10 : Fiche technique thermistor

Annexe 11 : Pièces mécaniques

**Signature :**

---

## Annexe 1 : Influence de la méthode de variation de R

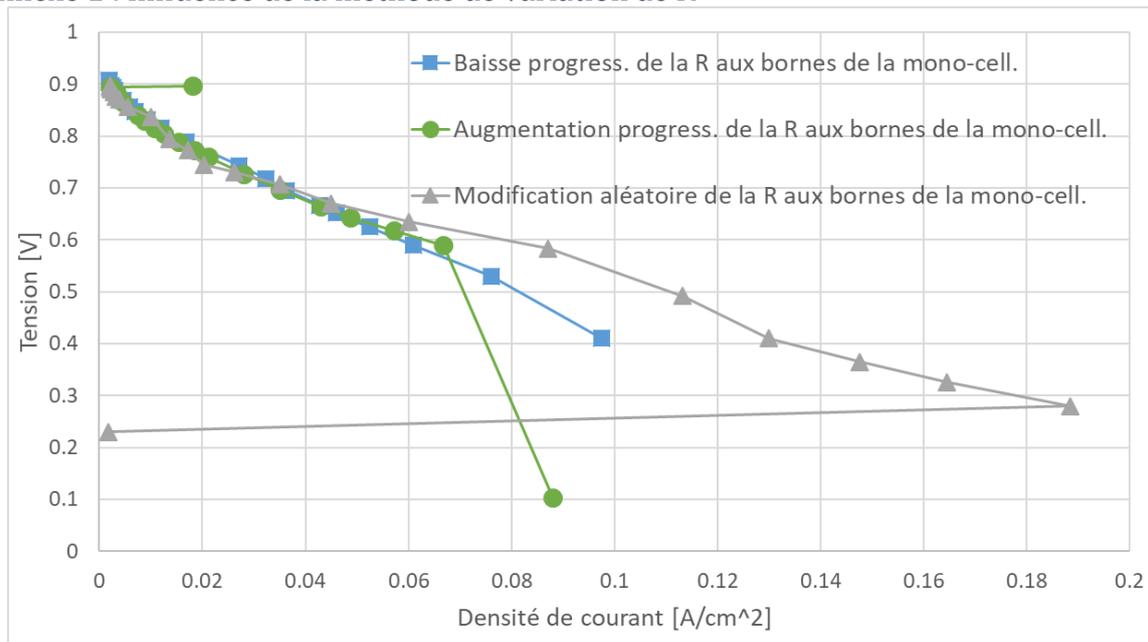


Figure 1: Résultats de l'évolution de la tension en fonction de la densité de courant lors des tests afin d'observer la reproductibilité en fonction de la méthode de mesure. Tests effectués avec uniquement un débitmètre du côté de l'H<sub>2</sub> avec une valeur réglée à 50 cm<sup>3</sup>/min.

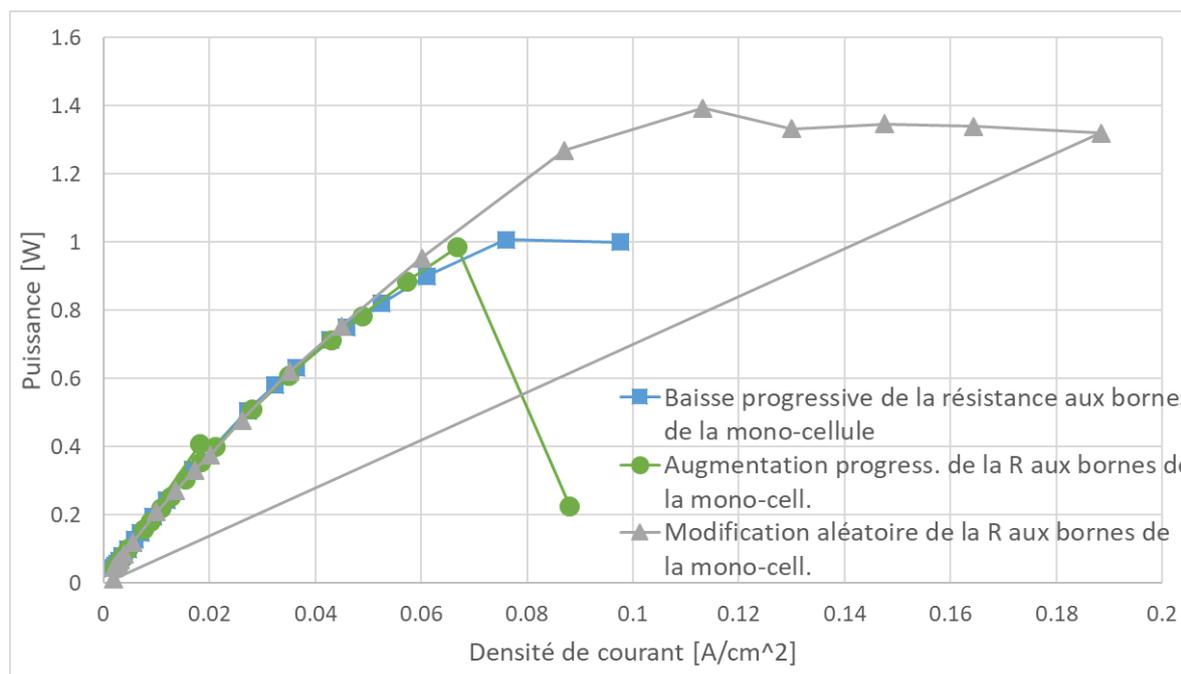


Figure 2: Résultats de l'évolution de la puissance en fonction de la densité de courant lors des tests afin d'observer la reproductibilité en fonction de la méthode de mesure. Tests effectués avec uniquement un débitmètre du côté de l'H<sub>2</sub> avec une valeur réglée à 50 cm<sup>3</sup>/min.

Les résultats de ces tests sont en annexe du fait que les résultats affichés ne peuvent pas réellement être pris en compte pour calculer des rendements ou autre du fait de l'imprécision de ces derniers liée à l'absence de débitmètre du côté de l'air. L'absence de ce débitmètre s'explique par le délai de livraison de ce dernier qui a dû être commandé.

|    | Elément                | Dénomination                                       | Matériaux                 | Dim. [mm] | e [mm] | Plage de fonct.    | Achat       |          |                  |                 |               | Usinage   |            | Prix [CHF] |       |        |        | Situation |
|----|------------------------|--|---------------------------|-----------|--------|--------------------|-------------|----------|------------------|-----------------|---------------|-----------|------------|------------|-------|--------|--------|-----------|
|    |                        |  |                           |           |        |                    | Nbr. Besoin | Nbr. cmd | Prix unit. [CHF] | Fournisseur     | Référence     | Temps [h] | Entreprise | Achat      | Usin. | Dispo. | Total  |           |
| 1  | Mono-cellule           | Interchangeable Test Hardware with graphite plates | -                         | 50*50     | -      | -                  | 1           | 1        | 2 485            | Fuel cell store | 531601        | 0         | -          | 2485       | 0     | 0      | 2485   | OK        |
| 2  | Vanne                  | Vanne à boisseau sphérique monobloc série 40       | Inox                      | 6mm       | -      | -                  | 2           | 3        | 98.75            | Swagelok        | SS-42GS6MM    | 0         | -          | 296.25     | 0     | 0      | 296.25 | OK        |
| 3  | Vanne réglage fin      | Vanne de très fin réglage                          | inox                      | 6         | -      | -                  | 2           | 2        | 197.3            | Swagelok        | SS-SS6MM-VH   | 0         | -          | 394.6      | 0     | 0      | 394.6  | OK        |
| 4  | Débitmètre             | 1200 standard series                               | -                         | 1/4"      | -      | 5-50 cc/min        | 2           | 2        | 240              | Wisag           | 12SOAAN220LSD | 0         | -          | 480        | 0     | 0      | 480    | OK        |
| 5  | Débitmètre*            | 1100 standard series                               | -                         | 6mm       | -      | 10-150 cc/min      | 1           | 0        | 240              | Wisag           | -             | 0         | -          | 0          | 0     | 240    | 240    | OK        |
| 6  | Débitmètre*            | FMA3106 Mass flow sensor                           | -                         | 6mm       | -      | 0-1000 mL/min      | 1           | 0        | 546.88           | Omega           | FMA3106ST     | 0         | -          | 0          | 0     | 546.88 | 546.88 | OK        |
| 7  | Humidificateur*        | Barboteur  | -                         | -         | -      | -                  | 2           | 2        | 20               | -               | -             | 0         | -          | 0          | 0     | 40     | 40     | OK        |
| 8  | Alimentation           | Programmable DC Power supply                       | -                         | -         | -      | 30V /5A            | 1           | 0        | 117              | TENMA           | 72-2540       | 0         | -          | 0          | 0     | 117    | 117    | OK        |
| 9  | PTFE cadre zone active | Feuille PTFE                                       | PTFE                      | 500*300   | 0.05   | -                  | 1           | 1        | 2.27             | APSOparts       | 01.1025.0005  | 0.5       | Interne    | 2.27       | 0     | 0      | 37.27  | OK        |
| 10 |                        | Feuille PTFE                                       | PTFE                      | 500*300   | 0.2    | -                  | 1           | 1        | 8.12             | APSOparts       | 01.1025.0020  | 0.5       | Interne    | 8.12       | 0     | 0      | 43.12  | OK        |
| 11 |                        | Feuille PTFE                                       | PTFE                      | 500*300   | 0.3    | -                  | 1           | 1        | 12.24            | APSOparts       | 01.1025.0030  | 0.5       | Interne    | 12.24      | 0     | 0      | 47.24  | OK        |
| 12 | Ventilateur            | Ventilateur axial SEPA                             | -                         | 40        | 10     | 12V/DC - 152 l/min | 1           | 1        | 12.95            | Conrad          | 5040B2001     | 0         | -          | 12.95      | 0     | 0      | 12.95  | OK        |
| 13 | Membrane H2/Air        | Hydrogen Air MEA-5 layer                           | Nafion212 Carbone Platine | 50*50     | 0.8708 | -                  | 1           | 1        | 80               | Fuel cell store | 590614        | 0         | -          | 80         | 0     | 0      | 80     | OK        |

|                               |                       |   |       |                  |   |                |     |   |        |          |            |   |         |      |         |        |        |    |
|-------------------------------|-----------------------|---|-------|------------------|---|----------------|-----|---|--------|----------|------------|---|---------|------|---------|--------|--------|----|
| 14                            | Bouteille H2          | Hydrogène 4.5                             | -     | -                | - | 50 L<br>200bar | 1   | 0 | 75.5   | PanGas   | 800000210  | 0 | -       | 0    | 0       | 75.5   | 75.5   | OK |
| 15                            | Tubes 6 mm            | PFA Tubing                                | PFA   | 30000            | 1 | -              | 0.1 | 0 | 9.875  | Swagelok | SS-42GS6MM | 0 | -       | 0    | 0       | 0.9875 | 0.9875 | OK |
| 16                            | Connecteur débitmètre | Connecteur mâle inox                      | Inox  | 1/4"<br>-<br>6mm | - | -              | 4   | 4 | 9.2    | Swagelok | SS-6M0-1-4 | 0 | -       | 36.8 | 0       | 0      | 36.8   | OK |
| 17                            | Réducteur de pression | Détendeur en laiton pour bouteille de gaz | -     | -                | - | 0-10.34 bar    | 2   | 0 | 605    | Pangas   | 930001153  | 0 | -       | 0    | 0       | 1210   | 1210   | OK |
| 18                            | Résistance variable   | -   | -     | -                | - | 0-2Ω<br>20A    | 1   | 0 | 50     | Culatti  | 50         | 0 | -       | 0    | 0       | 50     | 50     | OK |
| 19                            | Voltmètre*            | Multimètre numérique                      | -     | -                | - | 600V           | 1   | 0 | 259.95 | Fluke    | F175       | 0 | -       | 0    | 0       | 259.95 | 259.95 | OK |
| 20                            | Ampèremètre*          | Multimètre numérique                      | -     | -                | - | 0.01mA-<br>10A | 1   | 0 | 259.95 | Fluke    | F175       | 0 | -       | 0    | 0       | 259.95 | 259.95 | OK |
| Prix total                    |                       |   |       |                  |   |                |     |   |        |          |            |   | 3808.23 | 0    | 2800.27 | 6608.5 |        |    |
| Prix heure de travail atelier |                       | 70  | Chf/h |                  |   |                |     |   |        |          |            |   |         |      |         |        |        |    |

|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| * | Eléments dont le prix a été estimé |
|---|------------------------------------|

| Elément    | Dénomination                   | Matériaux                            | Dim. [mm]                | e [mm] | Plage de fonct. | Achat        |                  |                   |                  |             |           | Usinage             |            | Prix [CHF] |             |         |            | Situation |                       |                           |
|------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------|-----------------|--------------|------------------|-------------------|------------------|-------------|-----------|---------------------|------------|------------|-------------|---------|------------|-----------|-----------------------|---------------------------|
|            |                                |                                      |                          |        |                 | Nbr. Besoin  | Nbr. cmd. Finale | Nbr. cmd. de base | Prix unité [CHF] | Fournisseur | Référence | Temps [H]           | Entreprise | Achat mini | Achat total | Usinage | Disponible |           | Total circuit de base |                           |
| Général    |                                |                                      |                          |        |                 |              |                  |                   |                  |             |           |                     |            |            |             |         |            |           |                       |                           |
| 1          | Stack                          | DuraPEM W240                         | 239<br>*233.5<br>*170.92 | -      | -               | 1            | 0                | 0                 | 4500             | APFCT       | W240      | 0                   | -          | 0          | 0           | 0       | 4500       | 4500      | OK                    |                           |
| 2          | Pieds de support               | Inox                                 | -                        | -      | -               | 4            | 0                | 0                 | 0                | -           | -         | 0.2                 | int.       | 0          | 0           | 14      | 0          | 14        | OK                    |                           |
| 3          | Vis fixation M4*               | Inox                                 | M4                       | -      | -               | 6            | 0                | 0                 | 0.1              | -           | -         | 0                   | -          | 0          | 0           | 0       | 0.6        | 0.6       | OK                    |                           |
| 4          | Vis fixation 6mm*              | Inox                                 | 6mm                      | -      | -               | 4            | 0                | 0                 | 0.1              | -           | -         | 0                   | -          | 0          | 0           | 0       | 0.4        | 0.4       | OK                    |                           |
| Electrique |                                |                                      |                          |        |                 |              |                  |                   |                  |             |           |                     |            |            |             |         |            |           |                       |                           |
| 5          | Connexion électrique           | Cosse à œillet M6                    | -                        | M6     | -               | 100A         | 2                | 2                 | 2                | 0           | -         | -                   | 0.2        | int.       | 0           | 0       | 14         | 0         | 14                    | OK                        |
| 6          | Câbles                         | Câbles                               | -                        | -      | -               | 100A         | 2                | 0                 | 0                | 0           | -         | -                   | 0.2        | int.       | 0           | 0       | 14         | 0         | 14                    | OK                        |
| 7          | Câbles                         | Câbles                               | -                        | -      | -               | 50A          | 4                | 0                 | 0                | 0           | -         | -                   | 0.2        | int.       | 0           | 0       | 14         | 0         | 14                    | OK                        |
| 8          | Voltmètre*                     | Multimètre numérique                 |                          |        |                 | 600V         | 1                | 0                 | 0                | 259.95      | Fluke     | F175                | 0          | -          | 0           | 0       | 0          | 259.95    | 259.95                | OK                        |
| 9          | Ampèremètre*                   | Multimètre numérique                 |                          |        |                 | 0.01mA-10A   | 1                | 0                 | 0                | 259.95      | Fluke     | F175                | 0          | -          | 0           | 0       | 0          | 259.95    | 259.95                | OK                        |
| 10         | Sonde tension                  | Sonde tension                        | -                        | -      | -               | 50V          | 1                | 1                 | 0                | 282.5       | LEM       | DVL 50-UI           | 0          | -          | 0           | 282.5   | 0          | 0         | 0                     | Pas dans un premier temps |
| 11         | Sonde de courant               | DC capteur de courant                | -                        | -      | -               | 100A         | 1                | 1                 | 0                | 395.5       | LEM       | DK 100 B420         | 0          | -          | 0           | 395.5   | 0          | 0         | 0                     | Pas dans un premier temps |
| 12         | Alimentation* bidirectionnelle | -                                    | -                        | -      | -               | 0-7Ω<br>120A | 1                | 1                 | 0                | 10000       | -         | -                   | 0          | -          | 0           | 10000   | 0          | 0         | 0                     | Pas dans un premier temps |
| 13         | Résistance* variable           | -                                    | -                        | -      | -               | 0-17Ω<br>8A  | 1                | 0                 | 0                | 50          | Culatti   | -                   | 0          | -          | 0           | 0       | 0          | 50        | 50                    | OK                        |
| 14         | Résistance * variable          | -                                    | -                        | -      | -               | 0-2Ω<br>20A  | 2                | 0                 | 0                | 50          | Culatti   | -                   | 0          | -          | 0           | 0       | 0          | 100       | 100                   | OK                        |
| 15         | Connecteur air blower          | Connector                            | -                        | -      | -               | -            | 1                | 1                 | 1                | 36          | micronel  | U100X-008A4         | 0          | -          | 36          | 36      | 0          | 0         | 36                    | OK                        |
| 16         | Connecteur capteurs RH         | Push-pull contact insert, 5 contacts | -                        | -      | -               | -            | 4                | 4                 | 4                | 20.71       | Vacom     | PLUG-MINI-1B-05-P-L |            |            | 82.84       | 82.84   | 0          | 0         | 82.84                 | OK                        |

|     |                            |  |            |             |   |             |   |   |   |       |             |                 |   |      |       |       |     |        |        |   |
|-----|----------------------------|--|------------|-------------|---|-------------|---|---|---|-------|-------------|-----------------|---|------|-------|-------|-----|--------|--------|---|
| 17  | Passage étanche THERMOLOK  | Connector                                    | Acier inox | 1           | - | -           | 3 | 2 | 0 | 43.4  | Thermo coax | MGM 10          | 0 | -    | 0     | 86.8  | 0   | 43.4   | 43.4   | Commandé                                  |
| Gaz |                            |  |            |             |   |             |   |   |   |       |             |                 |   |      |       |       |     |        |        |   |
| 18  | Bouteille N2               | Azote 4.5                                    | -          | -           | - | 50 L,200bar | 1 | 0 | 0 | 63.25 | PanGas      | 800000102       | 0 | -    | 0     | 0     | 0   | 63.25  | 63.25  | OK  |
| 19  | Bouteille H2               | Hydrogène 4.5                                | -          | -           | - | 50 L,200bar | 1 | 0 | 0 | 75.5  | PanGas      | 800000210       | 0 | -    | 0     | 0     | 0   | 75.5   | 75.5   | OK  |
| 20  | Vanne 6mm (VH2,VN2, Vsécu) | Vanne à boisseau sphérique monobloc série 40 | Inox       | 6           | - | -           | 3 | 0 | 0 | 98.75 | Swagelok    | SS-42GS6MM      | 0 | -    | 0     | 0     | 0   | 296.25 | 296.25 | OK  |
| 21  | Humidificateur air         | FC-Series Humidifiers                        | -          | -           | - | 200 l/min   | 1 | 1 | 0 | 2398  | Perma Pure  | FC150-480-7PP   | 0 | -    | 0     | 2398  | 0   | 0      | 0      | Dans un premier temps développé à l'école |
| 22  | Humidificateur H2          | FC-Series Humidifiers                        | -          | -           | - | 45 l/min    | 1 | 1 | 0 | 752   | Perma Pure  | FC125-240-5MP   | 0 | -    | 0     | 752   | 0   | 0      | 0      | 07-14/08                                  |
| 23  | Tube 30 mm                 | Tube pour le vide                            | -          | 30/2000     | - | -           | 2 | 0 | 0 | 50    | -           | -               | 0 | -    | 0     | 0     | 0   | 100    | 100    | OK  |
| 24  | Tubes 6 mm                 | PFA Tubing                                   | PFA        | 30/2000     | - | -           | 1 | 0 | 0 | 25    | Swagelok    | PFA-T6M-1M-30M  | 0 | -    | 0     | 0     | 0   | 25     | 25     | OK  |
| 25  | Tubes 10 mm                | PFA Tubing                                   | PFA        | 30/2000     | - | -           | 1 | 0 | 0 | 30    | Swagelok    | PFA-T10M-1M-30M | 0 | -    | 0     | 0     | 0   | 30     | 30     | OK  |
| 26  | Tubes 3/4"                 | Tube PVC souple                              | PVC        | 3/4"/2m     | - | -           | 1 | 1 | 1 | 43.35 | Swagelok    | PFA-T12-062-50  | 0 | -    | 43.35 | 43.35 | 0   | 0      | 43.35  | OK  |
| 27  | Tube 1/2"                  | PFA Tubing                                   | PFA        | 1/2"/2m     | - | -           | 1 | 1 | 1 | 32.15 | Swagelok    | PFA-T8-062-50   | 0 | -    | 32.15 | 32.15 | 0   | 0      | 32.15  | OK  |
| 28  | Tube 12mm                  | PFA Tubing                                   | -          | 12mm/2m     | - | -           | 1 | 1 | 1 | 41.7  | Swagelok    | PFA-T12M-1M-30M | 0 | -    | 41.7  | 41.7  | 0   | 0      | 41.7   | OK  |
| 29  | Adaptateur 1/2" à 3/4"     | Réducteur union                              | Inox       | 1/2" - 3/4" | - | -           | 2 | 2 | 0 | 48.1  | Swagelok    | SS-1210-6-8     | 0 | -    | 0     | 96.2  | 0   | 0      | 0      | Dans un premier temps                     |
| 30  | Adaptateur 1/4" à 6mm      | Réducteur union                              | Inox       | 1/4" - 6mm  | - | -           | 1 | 0 | 0 | 14.3  | Swagelok    | SS-6M0-6-4      | 0 | -    | 0     | 0     | 0   | 14.3   | 14.3   | OK  |
| 31  | Adaptateur 32 mm à 8 mm    | Réducteur                                    | Alu        | 32mm - 12mm | - | -           | 1 | 0 | 0 | 0     | -           | -               | 2 | int. | 0     | 0     | 140 | 0      | 140    | OK  |
| 32  | Adaptateur 30 mm à 8 mm    | Réducteur                                    | Alu        | 30mm - 12mm | - | -           | 1 | 0 | 0 | 0     | -           | -               | 2 | int. | 0     | 0     | 140 | 0      | 140    | OK  |
| 33  | Adaptateur 10 mm à 1/2"    | Réducteur union                              | Inox       | 1/2" - 10mm | - | -           | 3 | 3 | 0 | 33.5  | Swagelok    | SS-10M0-6-8     | 0 | -    | 0     | 100.5 | 0   | 0      | 0      | OK  |
| 34  | Adaptateur 6 mm à 1/2"     | Réducteur union                              | Inox       | 1/2" - 6mm  | - | -           | 1 | 1 | 0 | 36.1  | Swagelok    | SS-6M0-6-8      | 0 | -    | 0     | 36.1  | 0   | 0      | 0      | OK  |
| 35  | Adaptateur 10 mm à 12mm    | Réducteur union                              | Inox       | 10mm - 12mm | - | -           | 2 | 2 | 2 | 32.1  | Swagelok    | SS-12M0-6-10M   | 0 | -    | 64.2  | 64.2  | 0   | 0      | 64.2   | OK  |

|    |                                       |  |       |                     |   |                                       |    |    |    |        |            |                 |   |   |       |        |   |       |        |                           |
|----|---------------------------------------|--|-------|---------------------|---|---------------------------------------|----|----|----|--------|------------|-----------------|---|---|-------|--------|---|-------|--------|---------------------------|
| 36 | Connecteur 1/2"                       | Connecteur mâle                                    | Inox  | 6mm - NPT mâle 1/2" | - | -                                     | 6  | 6  | 0  | 15.95  | Swagelok   | SS-16M0-1-8     | 0 | - | 0     | 95.7   | 0 | 0     | 0      | OK                        |
| 37 | Adaptateur Té 10 mm avec capteur 1/4" | Adaptateur pour tube femelle                       | Inox  | 10mm-1/4"ISO        | - | -                                     | 1  | 1  | 1  | 19     | Swagelok   | SS-10-MTA-7-4RG | 0 | - | 19    | 19     | 0 | 0     | 19     | OK                        |
| 38 | Adaptateur Té 6 mm avec capteur 1/4"  | Adaptateur pour tube femelle                       | Inox  | 6mm-1/4"ISO         | - | -                                     | 1  | 1  | 1  | 20.85  | Swagelok   | SS-6-MTA-7-4RG  | 0 | - | 20.85 | 20.85  | 0 | 0     | 20.85  | OK                        |
| 39 | Joint étanchéité capteur pression     | Joint RJ PTFE épais 1/4"                           | PTFE  | 1/4"                | - | -                                     | 2  | 2  | 2  | 1.55   | Swagelok   | T-4-RJ-2-T      | 0 | - | 3.1   | 3.1    | 0 | 0     | 3.1    | OK                        |
| 40 | Té 10mm                               | Té union   | Inox  | 10mm                | - | -                                     | 1  | 1  | 1  | 38.35  | Swagelok   | SS-10M0-3       | 0 | - | 38.35 | 38.35  | 0 | 0     | 38.35  | OK                        |
| 41 | Té 6mm                                | Té union   | Inox  | 6mm                 | - | -                                     | 2  | 2  | 2  | 29.1   | Swagelok   | SS-6M0-3        | 0 | - | 58.2  | 58.2   | 0 | 0     | 58.2   | OK                        |
| 42 | Coudes 10 mm                          | Coude union  | Inox  | 10 mm               | - | -                                     | 10 | 10 | 10 | 25.35  | Swagelok   | SS-10M0-9       | 0 | - | 253.5 | 253.5  | 0 | 0     | 253.5  | OK                        |
| 43 | Adaptateur KF to Swagelok             | KF to Swagelok adapters                            | -     | 6mm                 | - | -                                     | 1  | 1  | 1  | 38.87  | Vacom      | KSWA166-316     | 0 | - | 38.87 | 38.87  | 0 | 0     | 38.87  | OK                        |
| 44 | Adaptateur KF to Swagelok             | KF-compressing fitting adapter                     | -     | 10mm                | - | -                                     | 3  | 3  | 3  | 65.53  | Vacom      | KSWA1610-316    | 0 | - | 196.6 | 196.59 | 0 | 0     | 196.59 | OK                        |
| 45 | Adaptateur KF to connecteur           | Push-Pull Compact Power Feedthrough on flange KF16 | -     | -                   | - | -                                     | 2  | 2  | 2  | 364.31 | Vacom      | KF16-VB-1B-05   | 0 | - | 728.6 | 728.62 | 0 | 0     | 728.62 | OK                        |
| 46 | T KF                                  | KF Tees  | -     | -                   | - | -                                     | 2  | 2  | 2  | 55.54  | Vacom      | TE16K-316       | 0 | - | 111.1 | 111.08 | 0 | 0     | 111.08 | OK                        |
| 47 | KF connection                         | KF Clamp rings                                     | Alu   | 16                  | - | -                                     | 6  | 0  | 0  | 3.89   | Vacom      | KF16C           | 0 | - | 0     | 0      | 0 | 23.34 | 23.34  | OK                        |
| 48 | KF joint                              | KF Centering rings                                 | Steel | 16                  | - | -                                     | 6  | 0  | 0  | 4.44   | Vacom      | KF16-SVCR-316   | 0 | - | 0     | 0      | 0 | 26.64 | 26.64  | OK                        |
| 49 | Air blower                            | Air blower   | -     | -                   | - | 200l/min 120mbar                      | 1  | 1  | 1  | 293    | micronel   | U100HL-024KA-4  | 0 | - | 293   | 293    | 0 | 0     | 293    | OK                        |
| 50 | Réducteur de pression                 | Détendeur en laiton pour bouteille de gaz          | -     | -                   | - | 0-10.34 bar                           | 2  | 0  | 0  | 605    | Pangas     | 930001153       | 0 | - | 0     | 0      | 0 | 1210  | 1210   | OK                        |
| 51 | Régulateur pression H2                | Régulateur de pression                             | -     | -                   | - | Pin:5 bar/Pout:0.5 bar/Qnom:4 5 l/min | 1  | 1  | 0  | 223    | Fiorentini | FE6 L           | 0 | - | 0     | 223    | 0 | 0     | 0      | Pas dans un premier temps |
| 52 | Electrovanne (VH2,VN2, Vpurge)        | Electrovanne 2/2 voies                             | -     | 1/2"                | - | 24 VDC                                | 3  | 3  | 0  | 153.8  | Distrelec  | 301-15-911      | 0 | - | 0     | 461.4  | 0 | 0     | 0      | OK                        |

Eau

|        |   |   |      |                   |   |                         |   |   |   |        |                         |                   |   |   |       |        |   |        |        |   |
|--------|---|---|------|-------------------|---|-------------------------|---|---|---|--------|-------------------------|-------------------|---|---|-------|--------|---|--------|--------|---|
| 53     | Pompe eau déminéralisée                 | Pompe centrifuge verticale à plusieurs étages | -    | 3/8 NPT           | - | 2.2kW                   | 1 | 1 | 0 | 2448   | Linn pumpen             | 2.6622E+11        | 0 | - | 0     | 2448   | 0 | 0      | 0      | 3 semaines  |
| 54     | Pompe eau déminéralisée                 | Pompe magnétique série P                      | -    | 1/8 NPT           | - | 239 LPH                 | 1 | 0 | 0 | 800    | Tuthill                 | 1.2               | 0 | - | 0     | 0      | 0 | 800    | 800    | OK  |
| 55     | Variateur de fréquence                  | Convertisseur de fréquence triphasé ABB       | -    | -                 | - | 0.37 kW<br>400V<br>1.2A | 1 | 1 | 0 | 277.2  | ABB                     | ACS355-03E-01A2-4 | 0 | - | 0     | 277.2  | 0 | 0      | 0      | 2 semaines  |
| 56     | Adaptateur 10 mm à 1/2"                 | Réducteur union                               | Inox | 1/2"<br>-<br>10mm |   |                         | 4 | 4 | 0 | 33.5   | Swagelok                | SS-10M0-6-8       | 0 | - | 0     | 134    | 0 | 0      | 0      | OK  |
| 57     | Adaptateur 10 mm à 12mm                 | Réducteur union                               | Inox | 10mm<br>-<br>12mm |   |                         | 1 | 1 | 1 | 32.1   | Swagelok                | SS-12M0-6-10M     | 0 |   | 32.1  | 32.1   | 0 | 0      | 32.1   | OK  |
| 58     | Adaptateur 1/2" à 3/4"                  | Réducteur union                               | Inox | 1/2"<br>-3/4"     |   |                         | 2 | 2 | 0 | 48.1   | Swagelok                | SS-1210-6-8       | 0 | - | 0     | 96.2   | 0 | 0      | 0      | Pas dans un premier temps                           |
| 59     | Adaptateur 1/2" à 3/4"                  | Connecteur mâle                               | Inox | 1/2"NPT-<br>3/4"  |   |                         | 2 | 2 | 0 | 30.95  | Swagelok                | SS-1210-1-8RS     | 0 |   | 0     | 61.9   | 0 | 0      | 0      | OK  |
| 60     | Adaptateur 1/2" à 1/2"ISO               | Connecteur mâle                               | Inox | 1/2"-<br>1/2"ISO  |   |                         | 2 | 2 | 2 | 21.15  | Swagelok                | SS-810-1-8RS      | 0 |   | 42.3  | 42.3   | 0 | 0      | 42.3   | OK  |
| 61     | Coudes 10 mm                            | Coude union                                   | Inox | 10 mm             | - | -                       | 7 | 7 | 2 | 25.35  | Swagelok                | SS-10M0-9         | 0 | - | 50.7  | 177.45 | 0 | 0      | 50.7   | OK  |
| 62     | Té 10mm                                 | Té union                                      | Inox | 10mm              | - | -                       | 2 | 2 | 1 | 38.35  | Swagelok                | SS-10M0-3         | 0 |   | 38.35 | 76.7   | 0 | 0      | 38.35  | OK  |
| 63     | Croix 10 mm                             | Croix union                                   | Inox | 10 mm             | - | -                       | 1 | 1 | 1 | 66     | Swagelok                | SS-10M0-4         | 0 | - | 66    | 66     | 0 | 0      | 66     | OK  |
| 64     | Electrovanne (Vanne humidif. 1, 2 et 3) | Electrovanne 2/2 voies                        | -    | 1/2"              | - | 24 VDC                  | 3 | 3 | 2 | 153.8  | Distrelec               | 301-15-911        | 0 | - | 307.6 | 461.4  | 0 | 0      | 307.6  | OK  |
| 65     | Filtre 60°C                             | B-Pure single holder                          | -    | -                 | - | 60°C                    | 2 | 0 | 0 | 429.24 | Thermo Electro LED GmbH | D4511             | 0 | - | 0     | 0      | 0 | 858.48 | 858.48 | OK  |
| 66     | Filtre 80°C                             | Colonne avec échangeur d'ions                 | -    | -                 | - | 80°C                    | 1 | 1 | 0 | 790    | Christen Galvano SA     | 61819344          | 0 | - | 0     | 790    | 0 | 0      | 0      | Pas dans un premier temps                           |
| 67     | Chauffe eau                             | -   | -    | -                 | - | 80°C                    | 1 | 0 | 0 | 0      | -                       | -                 | 0 | - | 0     | 0      | 0 | 0      | 0      | Pas dans un premier temps et à développer à l'école |
| Mesure |   |   |      |                   |   |                         |   |   |   |        |                         |                   |   |   |       |        |   |        |        |   |

|    |                                  |   |           |               |      |                   |   |   |   |        |                      |                      |   |      |       |        |     |        |        |    |
|----|----------------------------------|---|-----------|---------------|------|-------------------|---|---|---|--------|----------------------|----------------------|---|------|-------|--------|-----|--------|--------|----|
| 68 | Débitmètre H2 (MFC H2)           | Régulateur de débits massique numérique             | Inox 316L | 6mm           | -    | 45 L/min          | 1 | 1 | 1 | 1563.1 | Bronkhorst           | F-201AV-50K-ABD-33-V | 0 | -    | 1563  | 1563.1 | 0   | 0      | 1563.1 | OK |
| 69 | Débitmètre (MFC air)             | Régulateur de débits massique numérique             | Inox 316L | 10 mm         | -    | 250 L/min         | 1 | 1 | 1 | 2516.5 | Bronkhorst           | F-202AV-M20-ABD-HH-V | 0 | -    | 2517  | 2516.5 | 0   | 0      | 2516.5 | OK |
| 70 | Débitmètre eau déminéralisée     | Flowmeter   | -         | 10mm          | -    | 600 L/h           | 1 | 0 | 0 | 960    | Ohmega               | FTB4805              | 0 | -    | 0     | 0      | 0   | 960    | 960    | OK |
| 71 | Capteur humidité (RH H2, RH air) | Humidity sensors, Honeywell                         | -         | 4.17*<br>8.59 | 2.03 | 0 à 100 % RH      | 2 | 2 | 2 | 30.4   | Distrelec (Gems)     | HIH-4000-003         | 0 | -    | 60.8  | 60.8   | 0   | 0      | 60.8   | OK |
| 72 | Capteur pression (Pair, PH2)     | Capteur de pression type A-10                       | -         | 1/4"          | -    | 0 à 2.5 bar       | 2 | 2 | 2 | 146.1  | Distrelec            | 300-73-791           | 0 | -    | 292.2 | 292.2  | 0   | 0      | 292.2  | OK |
| 73 | Capteur température (T1, T2, T3) | Thermocouple type K                                 | -         | 1             | -    | 200°C             | 3 | 2 | 0 | 87.2   | Thermo coax          | 2AB I 10             | 0 | -    | 0     | 174.4  | 0   | 87.2   | 87.2   | OK |
| 74 | Câble extension thermocouple     | Câble d'extension pour thermocouple type K          | -         | 2000          | -    | -                 | 3 | 0 | 0 | 26     | Thermo coax          | FK2                  | 0 | -    | 0     | 0      | 0   | 78     | 78     | OK |
| 75 | Capteur conductivité             | Resistivity high temp monitor controller 414 Series | -         | -             | -    | 20°C - 80°C       | 1 | 0 | 0 | 774.56 | Hydro Check          | 414R-HP-HT Base kit  | 0 | -    | 0     | 0      | 0   | 774.56 | 774.56 | OK |
| 76 | Carte entrées digitales (Di)     | Module d'entrée de tension de la Série C            | -         | -             | -    | -                 | 2 | 1 | 1 | 2120   | National instruments | NI-9220              | 0 | -    | 2120  | 2120   | 0   | 2120   | 4240   | OK |
| 77 | Cartes sorties digitales (Do)    | Module de sortie de tension de la série C           | -         | -             | -    | -                 | 1 | 0 | 0 | 1250   | National instruments | NI-9264              | 0 | -    | 0     | 0      | 0   | 1250   | 1250   | OK |
| 78 | Carte thermocouples (Thermo)     | Module d'entrée de température de la série C        | -         | -             | -    | -                 | 1 | 0 | 0 | 1530   | National instruments | NI-9213              | 0 | -    | 0     | 0      | 0   | 1530   | 1530   | OK |
| 79 | Carte sorties analogiques (Ao)   | Module numérique de la série C                      | -         | -             | -    | -                 | 1 | 0 | 0 | 134    | National instruments | NI-9472              | 0 | -    | 0     | 0      | 0   | 134    | 134    | OK |
| 80 | Source de courant                | Source de courant pour le thermistor                | -         | -             | -    | 1mA               | 1 | 0 | 0 | 0      | -                    | -                    | 4 | int. | 0     | 0      | 280 | 0      | 280    | OK |
| 81 | Alimentation 24 V                | Alimentation stabilisée 230 VAC-24VDC               | -         | -             | -    | 200-240VAC /24VDC | 1 | 0 | 0 | 138.95 | Mean well            | DRP-480-24           | 0 | -    | 0     | 0      | 0   | 138.95 | 138.95 | OK |

|                       |                   |                                       |       |   |   |                   |   |   |   |      |           |           |   |   |      |          |     |          |          |    |
|-----------------------|-------------------|---------------------------------------|-------|---|---|-------------------|---|---|---|------|-----------|-----------|---|---|------|----------|-----|----------|----------|----|
| 82                    | Alimentation 15 V | Alimentation stabilisée 230 VAC-15VDC |       |   |   | 100-240VAC /15VDC | 1 | 0 | 0 | 50.3 | Mean well | DR-100-15 | 0 |   | 0    | 0        | 0   | 50.3     | 50.3     | OK |
| 83                    | Alimentation 5V   | Programmable DC Power supply          | -     | - | - | 30V/5A            | 1 | 0 | 0 | 117  | Tenma     | 72-2540   | 0 | - | 0    | 0        | 0   | 117      | 117      | OK |
| <b>Prix</b>           |                   |                                       |       |   |   |                   |   |   |   |      |           |           |   |   | 9151 | 28379.35 | 616 | 15977.07 | 25744.12 |    |
| Tarif horaire atelier |                   | 70                                    | chf/h |   |   |                   |   |   |   |      |           |           |   |   |      |          |     |          |          |    |



## 3500 Series

### Compact Low Pressure OEM Pressure Transmitters

- ▶ 5 to 600 psi pressure ranges (0.35 to 40 bar)
- ▶ Choice of outputs, electrical connections and pressure ports
- ▶ Operating temperature up to 257°F (125°C)

For OEMs that need consistent high levels of performance, reliability and stability the 3500 Series units offer a small package size with all stainless steel wetted parts at an unbeatable price performance ratio. A wide choice of electrical outputs as well as both electrical and pressure connections means the unit is suitable for most applications without modification. The compact construction of the 3500 Series makes it ideal for installation where space is at a premium.

#### Specifications

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| <b>Input</b>                    |   |
| Pressure Range                  | 5-600 psi (0.35-40 bar)                                   |
| Proof Pressure                  | 2x  |
| Burst Pressure                  | 3X  |
| <b>Performance</b>              |   |
| Long Term Drift                 | <0.2% FS/YR   |
| Accuracy                        | 0.25% FS  |
| Thermal Error, Max.             | ±1% / 176°F (80°C)  |
| Compensated Temperatures        | -4°F to +212°F (-20°C to +100°C)                          |
| Operating Temperatures          | -40°F to +257°F (-40°C to +125°C)                         |
| Zero Tolerance, Max.            | ±0.5% of span   |
| Span Tolerance, Max.            | ±0.5% of span   |
| Fatigue Life                    | Designed for more than 100 M cycles                       |
| <b>Mechanical Configuration</b> |   |
| Pressure Port                   | See under "How to Order," last page                       |
| Wetted Parts                    | 316L Stainless Steel                                      |
| Electrical Connection           | See under "How to Order," last page                       |
| Enclosure                       | IP67  |
| Vibration                       | BSEN 60068-2-6 (FC)<br>BSEN 60068-2-64 (FH)               |
| Shock                           | BSEN 60068-2-27 (Ea)                                      |
| Approvals                       | CE, RoHS  |
| Weight                          | 1.23 to 1.9 ounces (35-53 grams), Configuration dependant |

#### Individual Specifications

|                         |   |
|-------------------------|---|
| <b>Voltage</b>          |   |
| Output                  | 0V min. to 10V max.<br>See under "How to Order," last page                            |
| Supply Voltage (Vs)     | 2 Volts above full scale to 30 Vdc<br>(24 Vdc, max. above 230°F (110°C) applications) |
| Source and Sinks        | 8 mA  |
| <b>Current</b>          |   |
| Output                  | 4-20 mA   |
| Supply Voltage (Vs)     | 10-30 Vdc (24 Vdc, max. above 230°F (110°C) applications)                             |
| Maximum Load Resistance | (Supply Voltage -10) x 50ohms   |
| <b>Ratiometric</b>      |   |
| Output                  | 0.5 to 4.5V   |
| Supply Voltage (Vs)     | 5 Vdc ±10%  |



#### EMC Specifications

Emissions Tests: EN61326-1:2006 and EN61326-2-3:2006

EN55011:2009 + A1 Radiated Emissions

Immunity Tests: EN61326-1:2006 and EN61326-2-3:2006

EN61000-4-2:2009 Electrostatic Discharge

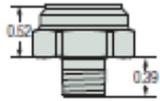
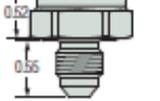
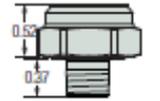
EN61000-4-3:2006 + A2 Radiated Immunity

EN61000-4-4:2012 Fast Burst Transients

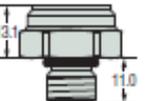
EN61000-4-6:2009 Conducted RF Immunity

**Pressure Ports**

**SAE**

|                      | 1/8"-27 NPT   | 1/4"-18 NPT   | 7/16"-20 UNF with 37° Flare   | 7/16"-20 UNF  | 1/8"-27 NPTF  |
|----------------------|---|---|---|---|---|
| Dimensions in Inches |  |  |  |  |  |
| Fitting Code         | 08  | 02  | 04  | 1J  | 40  |
| Torque               | 2-3 TFFT*   | 2-3 TFFT*   | 15-16 NM  | 18-20 NM  | 2-3 TFFT*   |

**BSP & Metric**

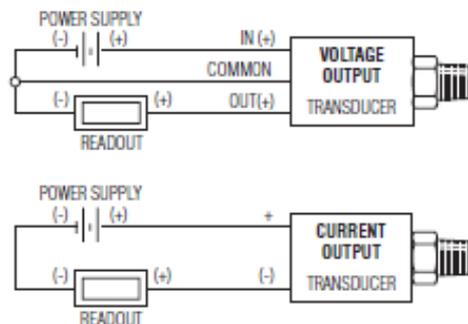
|                  | G1/8" External  | G1/4"-19 External w/O-Ring  | G1/4"-19 A Integral Face Seal   | M12 x 1.5 w/O-Ring  |
|------------------|---|---|---|---|
| Dimensions in MM |  |  |  |  |
| Fitting Code     | 0S  | 01  | 05  | 0L  |
| Torque           | 22-25 NM  | 30-35 NM  | 30-35 NM  | 28-30 NM  |

\* NPT Threads 2-3 turns from finger tight. Wrench tighten 2-3 turns.

**General Notes:**

1. The diameter of all cans is 19 mm (0.748")
2. Hex is 22 mm (0.866") Across Flats (AF) for deep socket mounting

**Wiring Diagram**



## Electrical Connector

| DIN 9.4 mm                     |                      |              | M12 x 1P     |              | Deutsch DT04-4P      |              | DIN 43650A           |              | Packard MetriPack |              |        |                      |  |
|--------------------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|-------------------|--------------|--------|----------------------|--|
| <p>POLARIZING WIDE CONTACT</p> |                      |              |              |              |                      |              |                      |              |                   |              |        |                      |  |
| Code B                         |                      | Code K       |              | Code E       |                      | Code 8       |                      | Code G       |                   | Code 9       |        |                      |  |
| Pin #                          | Voltage Mode         | Current Mode | Voltage Mode | Current Mode | Voltage Mode         | Current Mode | Voltage Mode         | Current Mode | Voltage Mode      | Current Mode | Pin ID | Voltage Mode         | Note   |
| 1                              | $V_{out}$ (pressure) | No Connect   | $V_{supply}$ | Supply       | $V_{supply}$         | Supply       | Ground               | Return       | $V_{supply}$      | Supply       | C      | $V_{out}$ (pressure) | MetriPack connectors may be used with 0.5-4.5V Ratiometric and 4-20 mA only. |
| 2                              | $V_{supply}$         | Supply       | Ground       | Return       | $V_{out}$ (pressure) | No Connect   | $V_{supply}$         | Supply       | Ground            | Return       | A      | Ground               |  |
| 3                              | No Connect           | No Connect   | $V_{out}$    | No Connect   | Ground               | Return       | No Connect           | No Connect   | $V_{out}$         | No Connect   | B      | $V_{supply}$         |  |
| 4                              | Ground               | Return       | No Connect   | No Connect   | No Connect           | No Connect   | $V_{out}$ (pressure) | No Connect   | No Connect        | No Connect   | —      | —                    |  |

## Mating Connectors

| Part Number | Description  | For Use on Elect. Code # |
|-------------|--|--------------------------|
| 557230      | MINI DIN Connector, Strain Relief (with drive screw & gasket)  | B and K                  |
| 557254      | Large DIN 43650A   | G                        |
| 557703-01M0 | M12 Cord Set – 1 Meter (Red 1, Green 2, Blue 3, Yellow 4)  | E                        |
| 557703-03M0 | M12 Cord Set – 3 Meters (Red 1, Green 2, Blue 3, Yellow 4)   | E                        |
| 557703-04M0 | M12 Cord Set – 4 Meters (Red 1, Green 2, Blue 3, Yellow 4)   | E                        |
| 557703-05M0 | M12 Cord Set – 5 Meters (Red 1, Green 2, Blue 3, Yellow 4)   | E                        |
|             | Recommended Mating Parts (Deutsch p/n: Housing Plug DT064S-P012; Wedge W4S-P012; Sockets 4X 0462-201-1631)         | 8                        |
| 224153      | Deutsch Cord Set 3' Long (18 AWG PVC Cable – Black 1, Red 2, Green 3, White 4)                                     | 8                        |
|             | Recommended Mating Parts (Delphi Packard MetriPack p/n: Body 12065286; Seal 12052893. Consult Delphi for Contacts) | 9                        |
| 218760      | Packard Mate Kit   | 9                        |
| 223974      | Packard Cord Set 3' Long (24 AWG PVC Cable – White 1, Black 2, Red 3)  | 9                        |
| 223975      | Packard Cord Set 6' Long (24 AWG PVC Cable – White 1, Black 2, Red 3)  | 9                        |
| 227987      | Packard Cord Set 14.75' Long (22 AWG PVC Cable - White 1, Black 2, Red 3)  | 9                        |
| 220492      | Packard Mate - 12" Flying Leads – 3 Conductor PVC 18 AWG   | 9                        |
| 222976      | Packard Mate - 18" Flying Leads – 3 Conductor PVC 18 AWG   | 9                        |
| 220797      | Packard Mate - 24" Flying Leads – 3 Conductor PVC 18 AWG   | 9                        |

## HIH-4000 Series

**TABLE 1. PERFORMANCE SPECIFICATIONS (At 5 Vdc supply and 25 °C [77 °F] unless otherwise noted.)**

| Parameter  | Minimum  | Typical       | Maximum  | Unit   | Specific Note |
|--|--|---------------|----------|--------|---------------|
| Interchangeability (first order curve)                 | -  | -             | -        | -      | -             |
| 0% RH to 50% RH  | -5   | -             | 5        | % RH   | -             |
| 60% RH to 100% RH                                      | -8   | -             | 8        | % RH   | -             |
| Accuracy (best fit straight line)                      | -3.5   | -             | +3.5     | % RH   | 1             |
| Hysteresis   | -  | 3             | -        | % RH   | -             |
| Repeatability  | -  | ±0.5          | -        | % RH   | -             |
| Settling time  | -  | -             | 70       | ms     | -             |
| Response time (1/τ in slow moving air)                 | -  | 15            | -        | s      | -             |
| Stability (at 50% RH)                                  | -  | 1.2           | -        | % RH   | -             |
| Voltage supply   | 4  | -             | 5.8      | Vdc    | 2             |
| Current supply   | -  | 200           | 500      | µA     | -             |
| Voltage output (1 <sup>st</sup> order curve fit)       | $V_{out} = (V_{max} - V_{min}) / (0.0062(\text{sensor RH}) + 0.16)$ , typical at 25 °C |               |          |        |               |
| Temperature compensation                               | True RH = (Sensor RH) / (1.0546 - 0.00216T), T in °C                                   |               |          |        |               |
| Output voltage temperature, coefficient at 50% RH, 5 V | -  | -4            | -        | mV/°C  | -             |
| Operating temperature                                  | -40[-40]   | See Figure 1. | 85[185]  | °C[°F] | -             |
| Operating humidity                                     | 0  | See Figure 1. | 100      | % RH   | 3             |
| Storage temperature                                    | -50[-58]   | -             | 125[257] | °C[°F] | -             |
| Storage humidity                                       | See Figure 2.  |               |          | % RH   | 3             |

**Specific Notes:**

- Can only be achieved with the supplied slope and offset.  
For HIH-4000-003 and HIH-4000-004 catalog listings only.
- Device is calibrated at 5 Vdc and 25 °C.
- Non-condensing environment.

**General Notes:**

- Sensor is ratiometric to supply voltage.
- Extended exposure to ≥90% RH causes a reversible shift of 3% RH.
- Sensor is light sensitive. For best performance, shield sensor from bright light.

**FACTORY CALIBRATION DATA**

HIH-4000 Sensors may be ordered with a calibration and data printout. See Table 2 and the order guide on the back page.

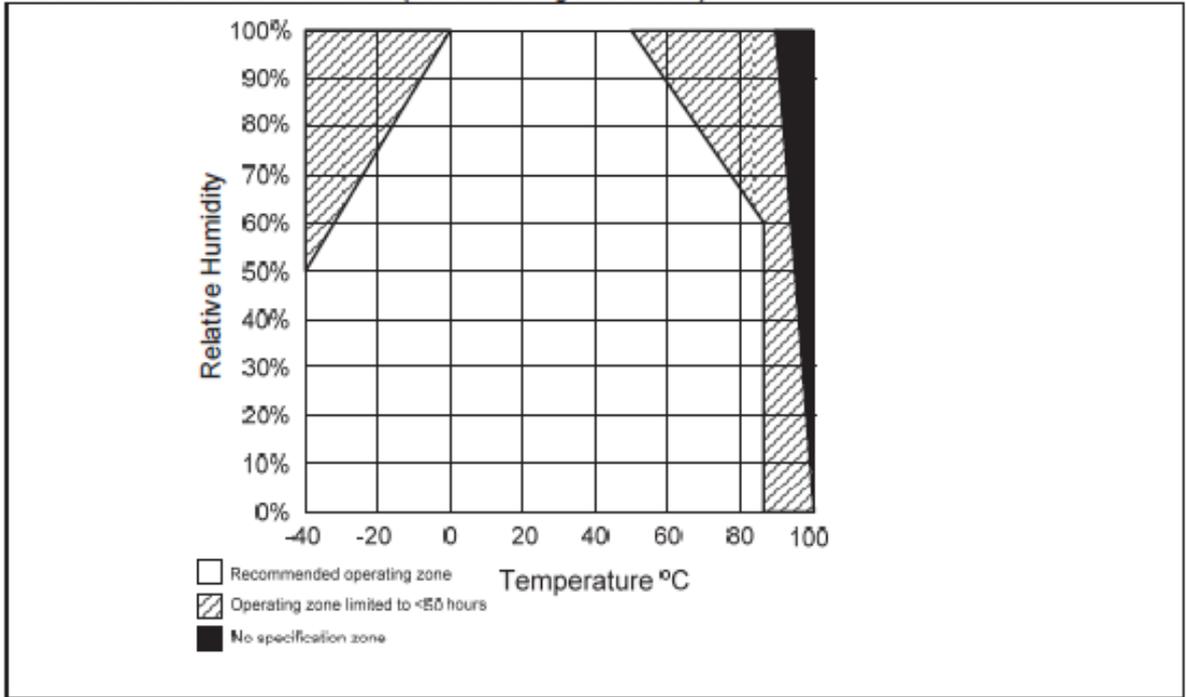
**TABLE 2. EXAMPLE DATA PRINTOUT**

|   |   |
|---|---|
| Model                                       | HIH-4000-003  |
| Channel                                     | 02  |
| Wafer                                       | 030096M   |
| MFP   | 337313  |
| Calculated values at 5 V                    |   |
| $V_{out}$ at 0% RH                          | 0.826 V   |
| $V_{out}$ at 75.3% RH                       | 3.198 V   |
| Linear output for 3.5% RH accuracy at 25 °C |   |
| Zero offset                                 | 0.826 V   |
| Slope                                       | 31.483 mV/%RH   |
| RH  | $(V_{out} - \text{zero offset}) / \text{slope}$<br>$(V_{out} - 0.826) / 0.0315$ |
| Ratiometric response for 0% RH to 100% RH   |   |
| $V_{out}$                                   | $V_{supply} (0.1652 \text{ to } 0.7052)$  |

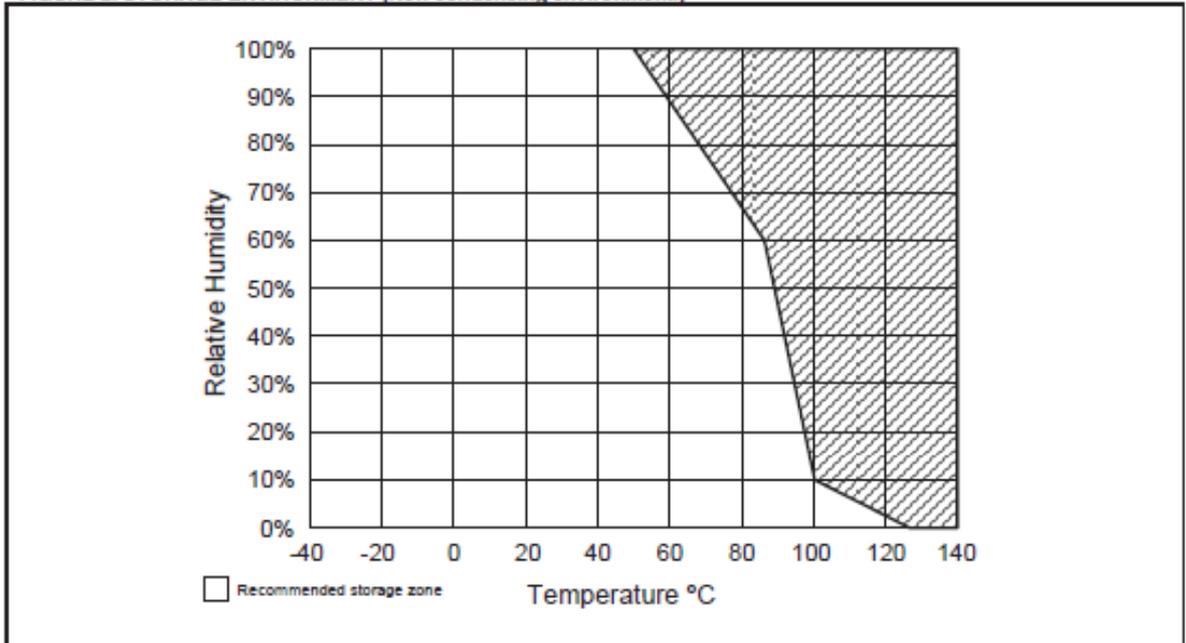


# Humidity Sensors

**FIGURE 1. OPERATING ENVIRONMENT (Non-condensing environment.)**



**FIGURE 2. STORAGE ENVIRONMENT (Non-condensing environment.)**



## HIH-4000 Series

FIGURE 3. TYPICAL OUTPUT VOLTAGE VS RELATIVE HUMIDITY (At 25 °C and 6 V.)

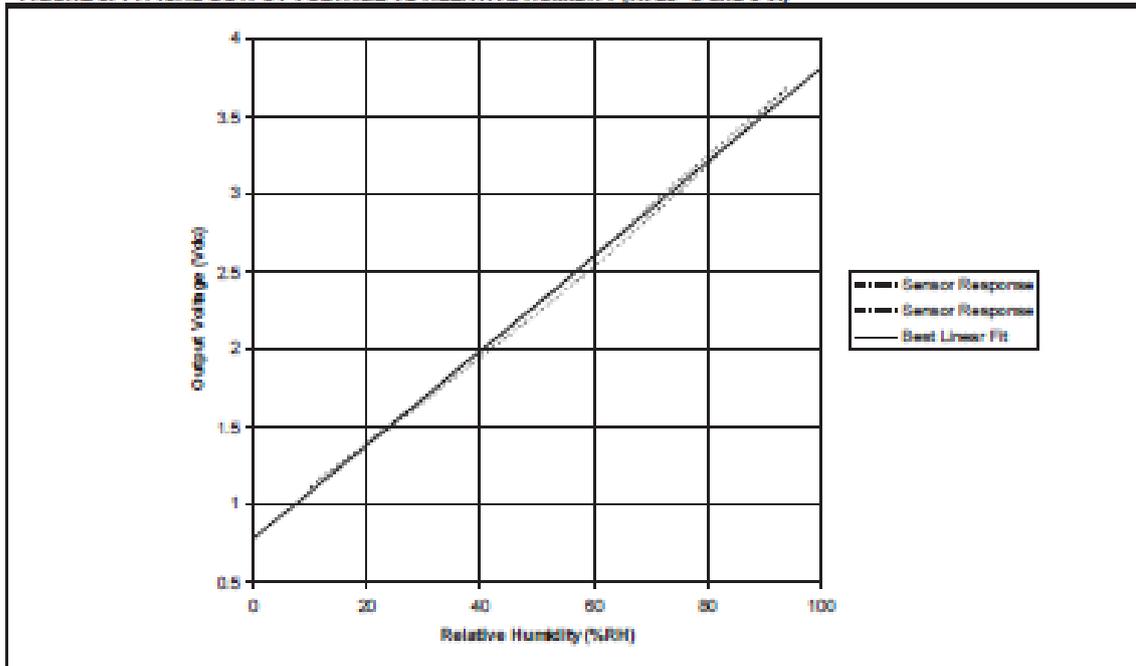
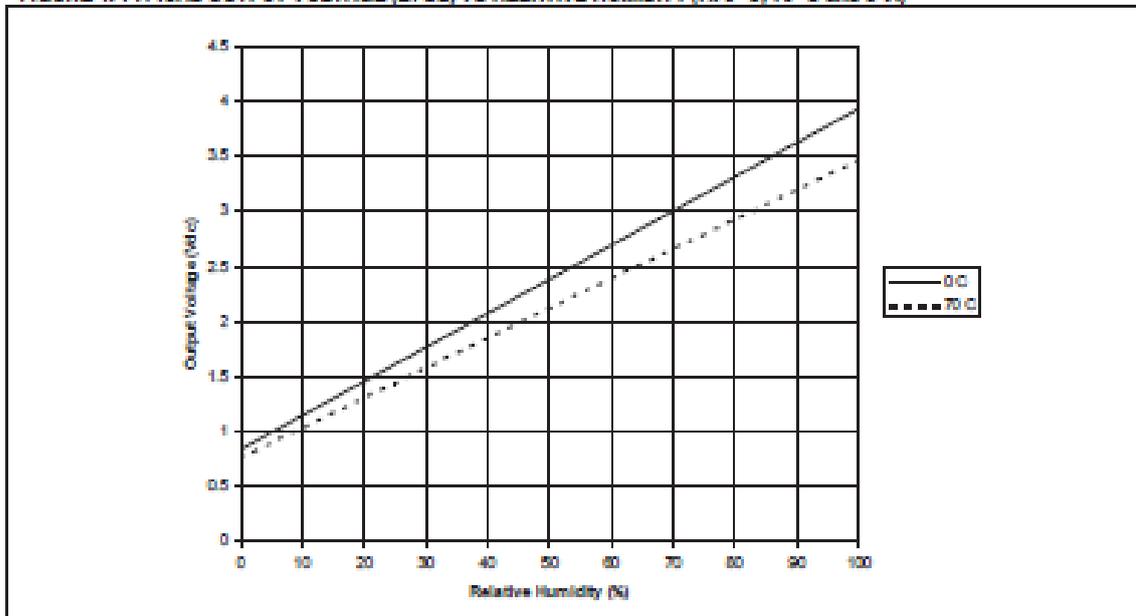
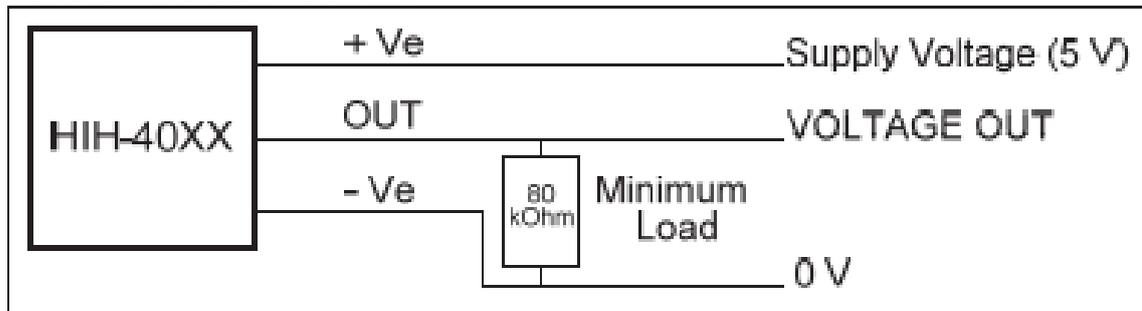


FIGURE 4. TYPICAL OUTPUT VOLTAGE (BFSL) VS RELATIVE HUMIDITY (At 0 °C, 70 °C and 6 V.)



## HIH-4000 Series

FIGURE 6. TYPICAL APPLICATION CIRCUIT



### ORDER GUIDE

| Catalog Listing | Description  |
|-----------------|--|
| HIH-4000-001    | Integrated circuit humidity sensor, 2,54 mm (0.100 in) lead pitch SIP                                |
| HIH-4000-002    | Integrated circuit humidity sensor, 1,27 mm (0.050 in) lead pitch SIP                                |
| HIH-4000-003    | Integrated circuit humidity sensor, 2,54 mm (0.100 in) lead pitch SIP, calibration and data printout |
| HIH-4000-004    | Integrated circuit humidity sensor, 1,27 mm (0.050 in) lead pitch SIP, calibration and data printout |
| HIH-4000-005    | Equivalent to HIH-4000-001   |

### FURTHER HUMIDITY SENSOR INFORMATION

See the following associated literature at [www.honeywell.com/sensing](http://www.honeywell.com/sensing):

- Product installation instructions
- Application sheets:
  - Humidity Sensor Performance Characteristics
  - Humidity Sensor Theory and Behavior
  - Humidity Sensor Moisture and Psychrometrics
  - Thermoset Polymer-based Capacitive Sensors

## Annexe 6: Fiche technique stack APFCT



# DuraPEM W240

## Liquid-cooled PEM Fuel Cell Stack



### Features

- Patented design in thermal and water management for stable operations under dynamic loadings
- Designed for automated production
- The best materials available from leading suppliers
- 3,500 hours of durability testing both on test stands and in light vehicle application under real-life environment
- Professional technology supports

### PRODUCT SPECIFICATION

| Type                                    | PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell stack   |
|---|--|
| Durability / Lifetime                   | Up to 3,500 hrs (dynamic load test) <sup>a</sup>   |
| Rated Power (beginning of life)         | 2.4kW  |
| Rated Current                           | 100 Amps   |
| Rated Voltage                           | 24 volts DC  |
| Cell Efficiency (LHV)                   | 48%  |
| L x W x H                               | 239*152*192 mm   |
| Weight (dry)                            | 10.5 kg  |
| Number of Cells                         | 40   |
| Fuel Composition                        | Hydrogen   |
| Fuel Consumption (max continuous power) | 45 slpm (Stoic 1.6)  |
| Fuel Pressure                           | 5 psi (0.35 bar)   |
| Fuel Pressure Drop                      | 0.3 psi (0.021 bar)  |
| Fuel Humidity                           | ≥RH 85%  |
| Oxidant Composition                     | Air  |
| Oxidant Pressure                        | 0.3 psi (0.021 bar)  |
| Oxidant Pressure Drop                   | 0.3 psi (0.021 bar)  |
| Oxidant Humidity                        | ≥ RH90%  |
| Coolant                                 | De-ionized Water   |
| Optimal operation Temperature           | 60°C   |
| Maximum Coolant Pressure Drop           | 4 psi ( 0.276 bar) @ 10LPM   |
| Ambient Temperature (operating)         | -20°C ~ 60°C <sup>b</sup>  |
| Internal Quality Tests                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• High temperature and humidity accelerated stress test (dynamic tests)</li> <li>• Thermal shock test (static test) / thermal cycle test (dynamic tests)</li> <li>• Vibration test (with &amp; without packaging)</li> <li>• Impact test (without packaging) / storage test (with packaging)</li> <li>• Drop test (with packaging) / overcurrent test</li> <li>• Leakage current test / long-term performance test</li> </ul> |

a. the dynamic load pattern follow APFCT's internal criteria.  
b. if stack operates at rated condition.



**Asia Pacific Fuel Cell Technologies, Ltd.**

4F, No.22, Ke-Dung 3 Road, Chunan, Miaoli 35053, Taiwan /TEL: +886-37-584019 ext. 221  
FAX: +886-37-584020 /E-mail: athenacjin@apfct.com.tw

### 3.2 Operation Condition

Table 3.2 shows operation conditions for DuraPEM W240. It is customers' responsibility to make sure stack is operated within the defined range.

Table 3.2 Operating conditions for DuraPEM W240

|                                  |                           |
|----------------------------------|---------------------------|
| <b>Electrical</b>                |                           |
| Current                          | 0-120A <sup>1</sup>       |
| Voltage                          | 0.5V-1V/cell <sup>2</sup> |
| <b>Fuel</b>                      |                           |
| Composition                      | Hydrogen (grade 4)        |
| Stoic                            | $\geq 1.2$                |
| Inlet pressure                   | $\leq 7$ psi              |
| Pressure drop                    | ~70mbar @ 100A            |
| Anode-Cathode inlet overpressure | <250mbar                  |
| Inlet humidity                   | 85-100% RH                |
| <b>Oxidant</b>                   |                           |
| Composition                      | Ambient Air               |
| Stoic                            | $\geq 2.8$                |
| Inlet pressure                   | $\leq 5$ psi              |
| Pressure drop                    | ~70mbar @ 100A            |
| Inlet humidity                   | 90-100% RH                |
| <b>Coolant</b>                   |                           |
| Composition                      | De-ionized Water          |
| Conductivity                     | <10 $\mu$ S/cm @25 °C     |
| Flow                             | >10L/min                  |
| Inlet temperature                | Target: 60 °C             |

<sup>1</sup>recommended current operating range is 37.5A to 100A.

<sup>2</sup>recommend voltage operating range is 0.55V to 0.8V.

It is recommended to operate DuraPEM W240 at the optimal conditions listed in table 3.3; operation at these conditions will maximize stack lifetime while ensuring stable operation.

Table 3.3 DuraPEM W240 Nominal Operating Conditions

| Operating condition |                 | Stack current(A) |       |       |       |       |
|---------------------|-----------------|------------------|-------|-------|-------|-------|
|                     |                 | 37.5             | 60    | 75    | 100   | 120   |
| <b>Fuel</b>         |                 |                  |       |       |       |       |
| Composition         | %H <sub>2</sub> | 99.99            | 99.99 | 99.99 | 99.99 | 99.99 |
| Stoic <sup>1</sup>  | -               | 1.6              | 1.6   | 1.6   | 1.6   | 1.6   |
| Inlet temperature   | °C              | 60               | 60    | 60    | 60    | 60    |
| Inlet humidity      | %RH             | ≥90              | ≥90   | ≥90   | ≥90   | ≥90   |
| <b>Oxidant</b>      |                 |                  |       |       |       |       |
| Stoic <sup>2</sup>  | -               | 3.0              | 3.0   | 3.0   | 3.0   | 3.0   |
| Inlet temperature   | °C              | 60               | 60    | 60    | 60    | 60    |
| Inlet humidity      | %RH             | ≥95              | ≥95   | ≥95   | ≥95   | ≥95   |
| <b>Coolant</b>      |                 |                  |       |       |       |       |
| Composition         | -               | De-ionized water |       |       |       |       |
| Inlet temperature   | °C              | 60               | 60    | 60    | 60    | 60    |

<sup>1</sup>Stoic for fuel can be reached by either increase hydrogen flow or increase hydrogen internal circulation flow rate.

<sup>2</sup>Stoic for oxidant for current less than 37.5 A should set to a constant flow which is 80 LPM.



## CALIBRATION CERTIFICATE

**FLUID NO. 1 OF 1**

CERTIFICATE NO. BHT178/4489881

Calibration by comparison  
Calibration date: 3 Jul 2019

We hereby certify that the instrument mentioned below has been calibrated in accordance with the stated values and conditions. The calibration standards used are traceable to national standards of the Dutch Metrology Institute VSL.

### Calibrated instrument

Type Flow controller (D)  
Serial number M18210317A  
Model number F-201AV-50K-ABD-33-V  
Rated accuracy\*  $\pm(0.5\% \text{ Rd} + 0.1\% \text{ FS})$

### Calibration standard

Type Rotor meter  
Serial number M182118368  
Model number FRM R-025-TD  
Certificate no. BCC003/2890058  
Uncertainty  $\pm 0.3\% \text{ Rd}$

### Customer conditions

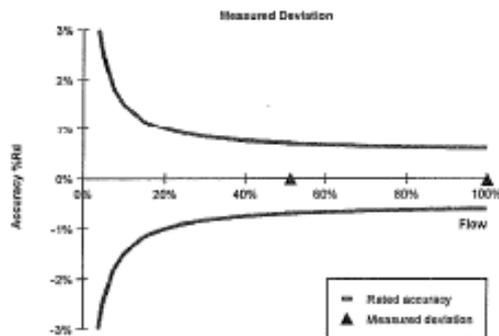
Fluid H<sub>2</sub>  
Flow 45.00 l/min  
Pressure 5.0 bar (a)  
Temperature 20.0 °C

### Calibration conditions

Fluid AIR  
Flow 46.57 l/min (equivalent flow)  
Pressure 5.0 bar (a)  
Temperature 22.3 °C  
Atm. pressure 1023.6 mbar (a)

### Calibration and conversion results

| Output signal | Customer flow**              | Equivalent flow** | Reference flow     | Measured deviation* | Measurement uncertainty* |
|---------------|------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------------|
| 100.23%       | H <sub>2</sub><br>45.1 l/min | AIR<br>46.7 l/min | AIR<br>46.70 l/min | -0.04 % Rd          | 0.4% Rd                  |
| 51.33%        | 23.1 l/min                   | 23.3 l/min        | 23.30 l/min        | -0.01 % Rd          | 0.4% Rd                  |
| 0.00%         | 0.00 l/min                   | 0.00 l/min        | 0.000 l/min        | -                   | -                        |



### Notes

Flow unit l/min is defined at conditions 0.00 °C, 1013.25 hPa (a).

\* Rated accuracy, measured deviation and measurement uncertainty are specified under calibration conditions in digital mode.

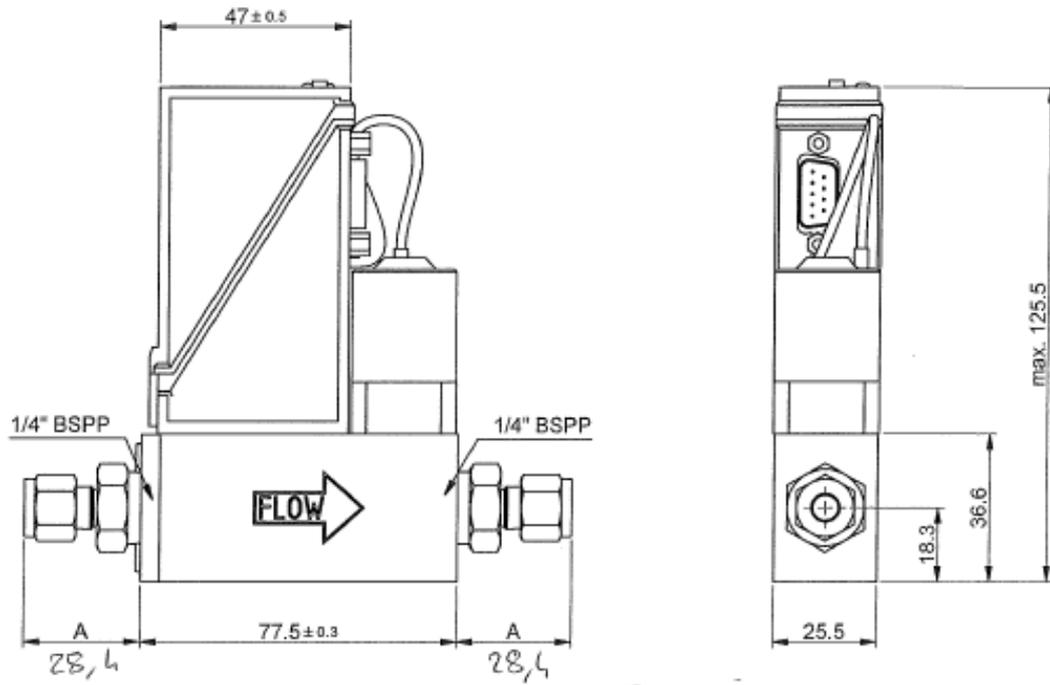
\*\* The customer flow at customer conditions is converted to equivalent flow at calibration conditions using Bronkhorst High-Tech FLUIDAT® software.

Measurement uncertainties are based upon 95% (k=2) confidence limits. Although the item calibrated meets the specifications and performance at the time of calibration, due to any number of factors, this does not imply continuing conformance to the specifications.

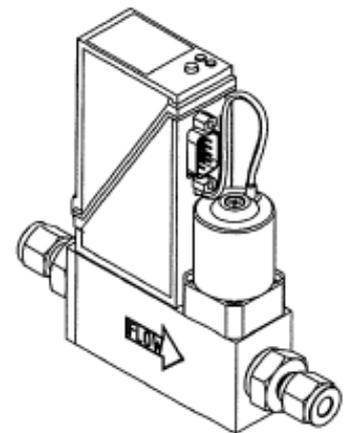
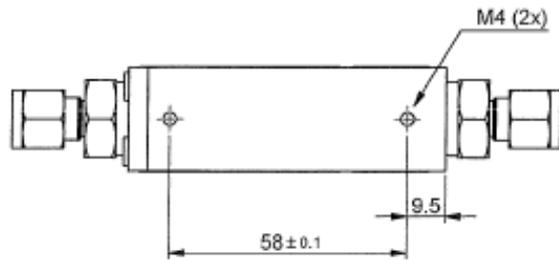
Calibrator D.v.D.

Quality assurance

Quality director

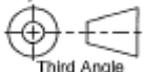


134,3



Check document 7.05.445 for the dimensions of the digital cases.  
 Check document 7.15.117 for dimension A.  
 Dimensions subject to change without notice.

Tolerances  $\pm 0.2$  unless otherwise mentioned

|   |   |                                   |  |               |
|---|---|-----------------------------------|--|---------------|
| Title:<br>Dimensional drawing<br>F-201AV / F-211AV  |   | Drawer : M.W.<br>Date: 11-07-2005 | Revision Description:<br>Because of the EtherCat introduction, the drawing is updated. |               |
| <br>www.BRONKHORST.COM | Projection:<br><br>Third Angle | Checked :                         | Date: 05-09-2012   | Rev. by: M.H. |
|   | Dimensions:<br>Metric (mm)  | Drawing no.: 7.15.020             | Scale: 1:1.5   | A4            |
|   |   | Rev.: C                           | Page: 1-1  |               |



**Bronkhorst®**

**CALIBRATION CERTIFICATE**

**FLUID NO. 1 OF 1**

CERTIFICATE NO. BHT178/4493885

Calibration by comparison  
Calibration date: 3 Jul 2019

We hereby certify that the instrument mentioned below has been calibrated in accordance with the stated values and conditions. The calibration standards used are traceable to national standards of the Dutch Metrology Institute VSL.

**Calibrated instrument**

Type Flow controller (D)  
Serial number M19210317B  
Model number F-202AV-M2D-ABD-HH-V  
Rated accuracy\*  $\pm(0,5\% \text{ Rd} + 0,1\% \text{ FS})$

**Calibration standard**

Type Rotor meter  
Serial number M16211935B  
Model number FRM R-025-TD  
Certificate no. BCC003/2890058  
Uncertainty  $\pm 0,3\% \text{ Rd}$

**Customer conditions**

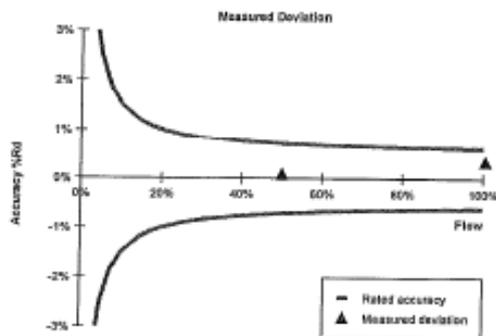
Fluid AIR  
Flow 250,0 In/min  
Pressure 5,0 bar (a)  
Temperature 20,0 °C

**Calibration conditions**

Fluid AIR  
Flow 249,9 In/min (equivalent flow)  
Pressure 5,0 bar (a)  
Temperature 22,2 °C  
Atm. pressure 1024,1 mbar (a)

**Calibration and conversion results**

| Output signal | Customer flow**   | Equivalent flow** | Reference flow      | Measured deviation* | Measurement uncertainty* |
|---------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| 100.51%       | AIR<br>251 In/min | AIR<br>251 In/min | AIR<br>250,3 In/min | 0,34 % Rd           | 0,4% Rd                  |
| 50.06%        | 125,1 In/min      | 125,1 In/min      | 125,00 In/min       | 0,09 % Rd           | 0,4% Rd                  |
| 0.00%         | 0,0 In/min        | 0,0 In/min        | 0,00 In/min         | -                   | -                        |



**Notes**

Flow unit In/min is defined at conditions 0,00 °C, 1013,25 hPa (a).

\* Rated accuracy, measured deviation and measurement uncertainty are specified under calibration conditions in digital mode.

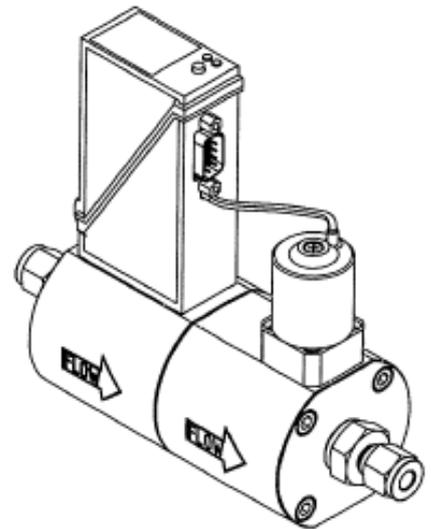
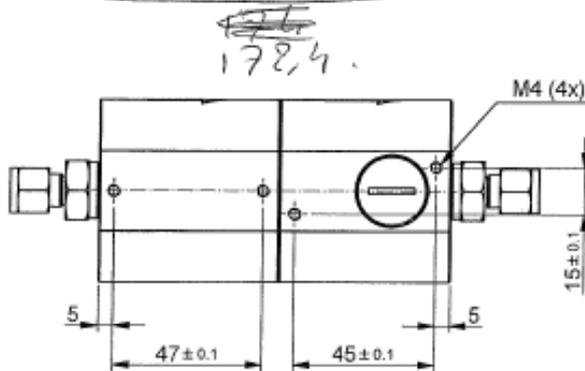
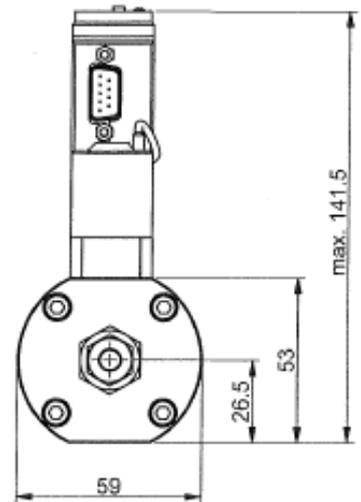
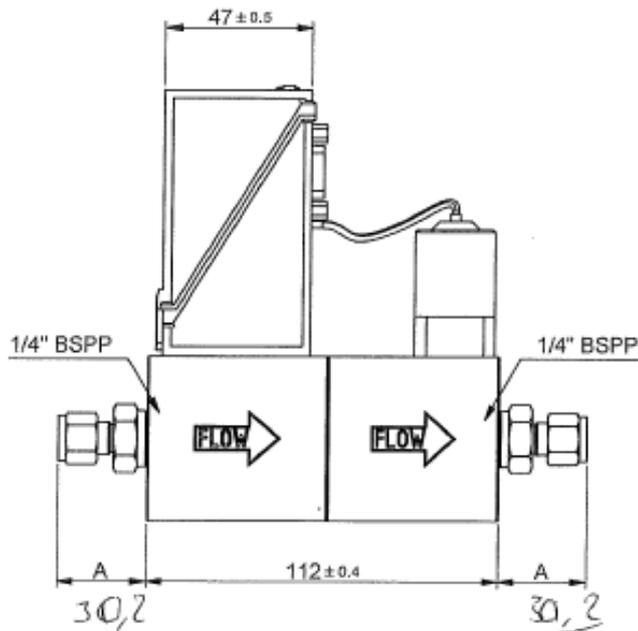
\*\* The customer flow at customer conditions is converted to equivalent flow at calibration conditions using Bronkhorst High-Tech FLUIDAT® software.

Measurement uncertainties are based upon 95% (k=2) confidence limits. Although the item calibrated meets the specifications and performance at the time of calibration, due to any number of factors, this does not imply continuing conformance to the specifications.

Calibrator D.v.D.

Quality assurance

Quality director



Check document 7.05.445 for the dimensions of the digital cases.  
 Check document 7.15.117 for dimension A.  
 Dimensions subject to change without notice.

Tolerances  $\pm 0.2$  unless otherwise mentioned

|   |   |                                   |  |            |    |
|---|---|-----------------------------------|--|------------|----|
| Title:<br>Dimensional drawing<br>F-202AV / F-212AV  |   | Drawer : M.W.<br>Date: 11-07-2005 | Revision Description:<br>Because of the EtherCat introduction, the drawing is updated. |            |    |
| <br><b>Bronkhorst</b> <sup>®</sup><br>WWW.BRONKHORST.COM | Projection:<br><br>Third Angle<br>Dimensions:<br>Metric (mm) | Checked :<br>Date: 05-09-2012     | Rev. by: M.H.  | Scale: 1:2 | A4 |
|   | Drawing no.: 7.15.022   | Rev.: C                           | Page: 1-1  |            |    |



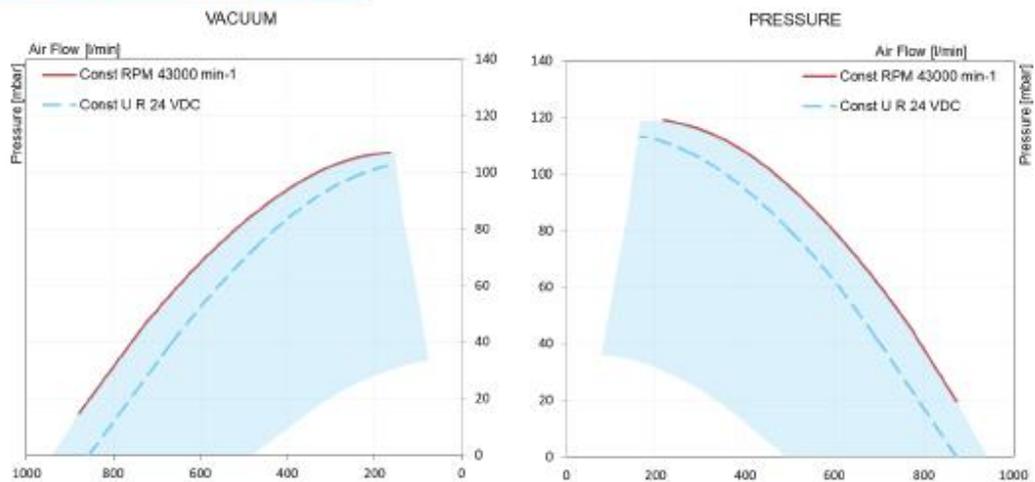
## DATA SHEET U100HL-024KA-4



### DESCRIPTION

Compact vacuum and pressure blower with an efficient motor, all-aluminum housing, IP67, integrated electronics, M16 connector, G3/4 inch pipe thread and 32 mm hose connection.

### PERFORMANCE FIELDS



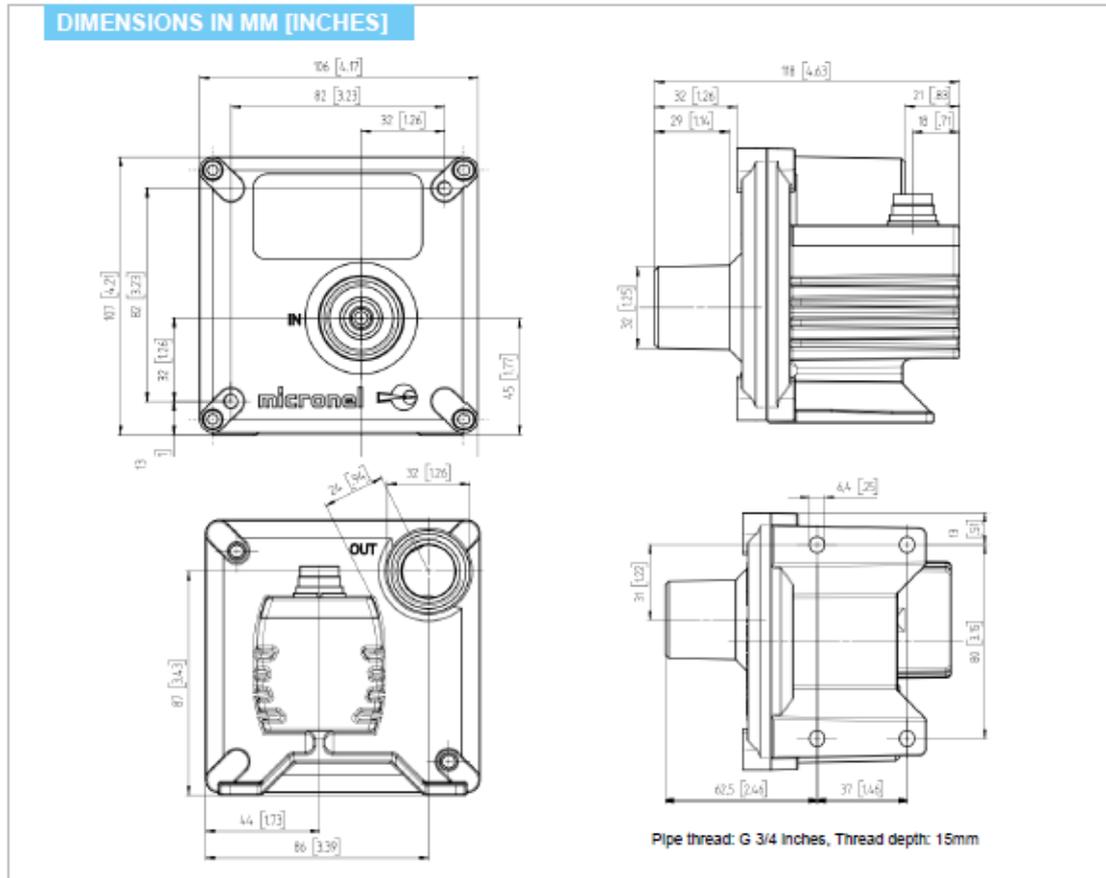
The performance fields apply to continuous operation with air as the conveyed medium at a standard density of 1.2 kg/m<sup>3</sup> and an ambient temperature of 25°C. The working environment is upwardly limited by a characteristic curve at a constant rated speed of 43,000 rpm with tolerances according to ISO 13348 Grade AN4.

[Delta pressure and volume +/- 10%, power consumption + 16%, acoustics + 6dB (A)]

### CERTIFICATE

Conformité Européenne  
Micronel confirms that the product is in compliance with the existing European directives.

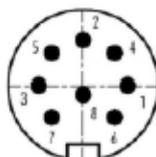




### MATERIALS

| Components |                   |
|------------|-------------------|
| Housing    | Die-cast aluminum |
| Impeller   | Polyamide (PA6)   |
| Label      | Polyester         |

### PIN ASSIGNMENT



Plug M16 / 8-pin  
Binder Series 423

| Function | Pin | Color  | Description   |
|----------|-----|--------|---|
| +24VDC   | 1   | White  | Parallel connection of both contacts<br>(shares current draw) |
|          | 4   | Yellow |   |
| GND      | 2   | Brown  | Parallel connection of both contacts<br>(shares current draw) |
|          | 8   | Red    |   |
| Tacho/FG | 3   | Green  | RPM signal  |
| Set      | 5   | Gray   | Control signal  |
| NTC+     | 6   | Pink   | Temperature-dependent resistance                              |
| NTC-     | 7   | Blue   |   |

**TECHNICAL SPECIFICATIONS**

| Electrical                                    |       | Min                     | Nominal | Max    |
|---|-------|-------------------------|---------|--------|
| Voltage range                                 | VDC   | 13.5                    | 24      | 26.4   |
| Constant power consumption at 43,000 rpm      | W     |                         |         | 190    |
| General power consumption                     | W     |                         |         | 220    |
| Set speed                                     |       |                         |         |        |
| Voltage range                                 | VDC   | 0                       |         | 5      |
| 0% voltage                                    | VDC   |                         |         | 2      |
| 100% voltage                                  | VDC   | 4.2                     |         |        |
| Stop voltage                                  | VDC   | Set speed to GND        |         |        |
| Pneumatic overpressure                        |       |                         |         |        |
| Volume flow (free-blowing)                    | l/min |                         |         | 950    |
| Volume flow at 43,000 rpm                     | l/min | 160 <sup>(1)</sup>      |         |        |
| Pressure                                      | mbar  |                         |         | 119    |
| Pneumatic negative pressure                   |       |                         |         |        |
| Volume flow (free-blowing)                    | l/min |                         |         | 950    |
| Volume flow at 43,000 rpm                     | l/min | 160 <sup>(1)</sup>      |         |        |
| Pressure                                      | mbar  |                         |         | 107    |
| Thermal                                       |       |                         |         |        |
| Ambient temperature                           | °C    | -20                     | 25      | 45     |
| Storage ambient temperature                   | °C    | -20                     | 25      | 65     |
| Measuring range integrated temperature sensor | °C    | -20                     |         | 85     |
| Motor   |       |                         |         |        |
| Rotational speed                              | RPM   | 22'000                  |         | 43'000 |
| Start-up time <sup>(2)</sup>                  | s     |                         |         | 6      |
| Environment                                   |       |                         |         |        |
| Protection class housing <sup>(3)</sup>       |       | IP67                    |         |        |
| Relative humidity                             | %RH   | 10                      |         | 85     |
| Service life                                  |       |                         |         |        |
| L10 <sup>(4)</sup>                            | h     |                         | 20'000  |        |
| L1 <sup>(4)</sup>                             | h     |                         | 5'000   |        |
| Acoustics                                     |       |                         |         |        |
| Sound pressure <sup>(5)</sup>                 | dB(A) |                         | 55      | 61     |
| Mechanical                                    |       |                         |         |        |
| Weight  | kg    |                         | 0.875   |        |
| Dimensions                                    |       | See figure 1 on page 10 |         |        |
| Supply requirements                           |       |                         |         |        |
| Ripple voltage                                | %     |                         |         | 5      |
| Continuous operation                          | A     |                         | 10      |        |
| Starting current                              | A     |                         |         | 20     |

1 Leakage aperture ø6mm

2 Up to 90% operating speed

3 With air circulation closed to the surroundings

4 Calculated at 43,000 rpm and 25°C

 5 Sound pressure level, measured at a distance of 1 m  
with closed suction and pressure discharge sides

**AGI**

ALLGUY INTERNATIONAL CO. LTD.

Specification of TJ Series Thermistor

Part No. : TJ103F3435F-025HF

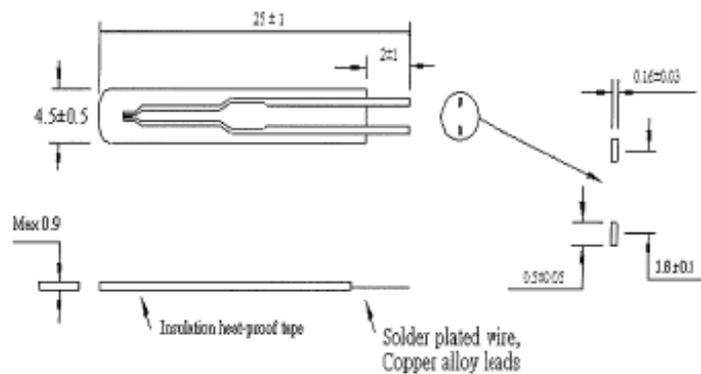
Specification : R<sub>25</sub> 10 KΩ ± 1 %  
B<sub>25/85</sub> 3435 °K ± 1 %

Date : 2011/07/06

1. APPEARANCE

1-1. SHAPE & DIMENSIONS

(unit : mm)



1-2. MARKING

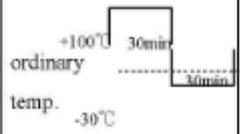
No marking..

## 2. ELECTRICAL RATING

| No. | Item                             | Symbol          | Conditions                                  | Min. | Nor.   | Max.  | Unit |
|-----|----------------------------------|-----------------|---|------|--------|-------|------|
| 1   | Resistance at Ta                 | R <sub>25</sub> | Ta : 25°C                                   | 9900 | 10,000 | 10100 | ohms |
| 2   | B constant                       | B               | 4099 Log(R <sub>25</sub> /R <sub>85</sub> ) | 3400 | 3435   | 3470  | ° K  |
| 3   | Dissipation constant             | C               | Ta : 25                                     | -    | 0.7    | -     | mW/  |
| 4   | Thermal time constant            | T               | Thermal Bath                                | -    | 5      | -     | s    |
| 5   | Rated Electric Power (25°C) (mW) | -               | -   | 3.5  |        |       | mW   |
| 6   | Operating temperature            |                 |   | -40  | -      | 100   | °C   |

\* Rated Electric Power is necessary electric power that Thermistor's temperature rises 5°C by Self heating at 25°C in still air.

## 3. RELIABILITY

| No | Item                     | Condition   | Equipment                     | Test Periodicity | Sampling Size | Performance  |
|----|--------------------------|---|-------------------------------|------------------|---------------|--|
| 1  | High Temperature Storage | 100°C x1000Hrs  | Drying Oven                   | 12 months        | 10            | $\Delta R_{25}/R_{25} \leq \pm 3\%$ ,<br>$\Delta B/B \leq \pm 2\%$ |
| 2  | Low Temperature Storage  | -30°C x 1000Hrs,  | Drying Oven                   | 12 months        | 10            | $\Delta R_{25}/R_{25} \leq \pm 3\%$ ,<br>$\Delta B/B \leq \pm 2\%$ |
| 3  | Humidity                 | 45°C,95%R.H. x 1000Hrs.   | Temperature & Humidity Tester | 12 months        | 10            | $\Delta R_{25}/R_{25} \leq \pm 3\%$ ,<br>$\Delta B/B \leq \pm 2\%$ |
| 4  | Thermal Shock            |  <p>This cycle is repeated 10 times,</p> | Thermal Shock Tester          | 12 months        | 10            | $\Delta R_{25}/R_{25} \leq \pm 3\%$ ,<br>$\Delta B/B \leq \pm 2\%$ |
| 5  | Insulation               | DC 500V   | tester                        | 12 months        | 10            | >50MΩ  |

**AGI**

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_{mA}}$$

7,7  
et 6,1 → 6,5

ALLGUY INTERNATIONAL CO. LTD.

**Resistance-Temperature Characteristics**Part No. : **TJ103F3435F-025HF****R : 10,000 ohms ± 1%****B : 3435 °K ± 1%**

| Temperature (°C) | Resistance (Ω) |        |        | Temp. Coef. (%/°C) | Resist. Tolerance (%) |      | Temp. Tolerance (°C) |      |
|------------------|----------------|--------|--------|--------------------|-----------------------|------|----------------------|------|
|                  | MIN.           | CENTER | MAX.   |                    | MIN.                  | MAX. | MIN.                 | MAX. |
| -40              | 181159         | 188442 | 195998 | -5.41              | -3.86                 | 4.01 | -0.74                | 0.71 |
| -39              | 171739         | 178547 | 185608 | -5.38              | -3.81                 | 3.95 | -0.74                | 0.71 |
| -38              | 162859         | 169224 | 175820 | -5.35              | -3.76                 | 3.90 | -0.73                | 0.70 |
| -37              | 154486         | 160438 | 166602 | -5.32              | -3.71                 | 3.84 | -0.72                | 0.70 |
| -36              | 146587         | 152154 | 157917 | -5.29              | -3.66                 | 3.79 | -0.72                | 0.69 |
| -35              | 139135         | 144343 | 149730 | -5.26              | -3.61                 | 3.73 | -0.71                | 0.69 |
| -34              | 132101         | 136974 | 142012 | -5.22              | -3.56                 | 3.68 | -0.70                | 0.68 |
| -33              | 125460         | 130020 | 134733 | -5.19              | -3.51                 | 3.62 | -0.70                | 0.68 |
| -32              | 119189         | 123457 | 127865 | -5.16              | -3.46                 | 3.57 | -0.69                | 0.67 |
| -31              | 113265         | 117260 | 121384 | -5.14              | -3.41                 | 3.52 | -0.68                | 0.66 |
| -30              | 107666         | 111407 | 115267 | -5.11              | -3.36                 | 3.46 | -0.68                | 0.66 |
| -29              | 102375         | 105878 | 109490 | -5.03              | -3.31                 | 3.41 | -0.67                | 0.65 |
| -28              | 97371          | 100652 | 104034 | -5.05              | -3.26                 | 3.36 | -0.67                | 0.65 |
| -27              | 92639          | 95713  | 98878  | -5.02              | -3.21                 | 3.31 | -0.66                | 0.64 |
| -26              | 88162          | 91042  | 94006  | -4.99              | -3.16                 | 3.26 | -0.65                | 0.63 |
| -25              | 83926          | 86624  | 89400  | -4.96              | -3.11                 | 3.20 | -0.65                | 0.63 |
| -24              | 79916          | 82444  | 85044  | -4.93              | -3.07                 | 3.15 | -0.64                | 0.62 |
| -23              | 76118          | 78488  | 80923  | -4.90              | -3.02                 | 3.10 | -0.63                | 0.62 |
| -22              | 72522          | 74743  | 77024  | -4.87              | -2.97                 | 3.05 | -0.63                | 0.61 |
| -21              | 69115          | 71197  | 73334  | -4.85              | -2.92                 | 3.00 | -0.62                | 0.60 |
| -20              | 65886          | 67838  | 69840  | -4.82              | -2.88                 | 2.95 | -0.61                | 0.60 |
| -19              | 62825          | 64655  | 66532  | -4.78              | -2.83                 | 2.90 | -0.61                | 0.59 |
| -18              | 59922          | 61638  | 63397  | -4.76              | -2.78                 | 2.85 | -0.60                | 0.58 |
| -17              | 57169          | 58779  | 60427  | -4.74              | -2.74                 | 2.80 | -0.59                | 0.58 |
| -16              | 54558          | 56067  | 57612  | -4.71              | -2.69                 | 2.76 | -0.59                | 0.57 |
| -15              | 52079          | 53495  | 54944  | -4.68              | -2.65                 | 2.71 | -0.58                | 0.57 |
| -14              | 49727          | 51054  | 52412  | -4.66              | -2.60                 | 2.66 | -0.57                | 0.56 |
| -13              | 47493          | 48738  | 50012  | -4.63              | -2.56                 | 2.61 | -0.56                | 0.55 |
| -12              | 45371          | 46539  | 47733  | -4.60              | -2.51                 | 2.57 | -0.56                | 0.55 |
| -11              | 43355          | 44452  | 45571  | -4.58              | -2.47                 | 2.52 | -0.55                | 0.54 |
| -10              | 41440          | 42468  | 43518  | -4.55              | -2.42                 | 2.47 | -0.54                | 0.53 |
| -9               | 39620          | 40584  | 41568  | -4.53              | -2.38                 | 2.42 | -0.54                | 0.53 |
| -8               | 37889          | 38794  | 39716  | -4.50              | -2.33                 | 2.38 | -0.53                | 0.52 |
| -7               | 36243          | 37092  | 37957  | -4.47              | -2.29                 | 2.33 | -0.52                | 0.51 |
| -6               | 34677          | 35473  | 36285  | -4.45              | -2.25                 | 2.29 | -0.51                | 0.50 |
| -5               | 33187          | 33934  | 34695  | -4.42              | -2.20                 | 2.24 | -0.51                | 0.50 |



ALLGUY INTERNATIONAL CO. LTD.

|    |       |       |       |       |       |      |       |      |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|
| -4 | 31769 | 32470 | 33183 | -4.40 | -2.16 | 2.20 | -0.50 | 0.49 |
| -3 | 30419 | 31076 | 31745 | -4.37 | -2.12 | 2.15 | -0.49 | 0.48 |
| -2 | 29133 | 29750 | 30377 | -4.35 | -2.07 | 2.11 | -0.48 | 0.48 |
| -1 | 27909 | 28488 | 29075 | -4.32 | -2.03 | 2.06 | -0.48 | 0.47 |
| 0  | 26743 | 27285 | 27836 | -4.30 | -1.99 | 2.02 | -0.47 | 0.46 |
| 1  | 25631 | 26140 | 26656 | -4.28 | -1.95 | 1.98 | -0.46 | 0.46 |
| 2  | 24571 | 25049 | 25532 | -4.25 | -1.90 | 1.93 | -0.45 | 0.45 |
| 3  | 23561 | 24009 | 24462 | -4.23 | -1.86 | 1.89 | -0.45 | 0.44 |
| 4  | 22598 | 23017 | 23442 | -4.20 | -1.82 | 1.85 | -0.44 | 0.43 |
| 5  | 21679 | 22072 | 22470 | -4.18 | -1.78 | 1.80 | -0.43 | 0.43 |
| 6  | 20802 | 21171 | 21543 | -4.16 | -1.74 | 1.76 | -0.42 | 0.42 |
| 7  | 19966 | 20311 | 20660 | -4.14 | -1.70 | 1.72 | -0.42 | 0.41 |
| 8  | 19167 | 19490 | 19817 | -4.11 | -1.66 | 1.68 | -0.41 | 0.40 |
| 9  | 18404 | 18707 | 19013 | -4.09 | -1.62 | 1.63 | -0.40 | 0.40 |
| 10 | 17676 | 17960 | 18246 | -4.07 | -1.58 | 1.59 | -0.39 | 0.39 |
| 11 | 16981 | 17246 | 17513 | -4.04 | -1.54 | 1.55 | -0.38 | 0.38 |
| 12 | 16316 | 16564 | 16814 | -4.02 | -1.50 | 1.51 | -0.38 | 0.37 |
| 13 | 15681 | 15913 | 16147 | -4.00 | -1.46 | 1.47 | -0.37 | 0.36 |
| 14 | 15074 | 15291 | 15509 | -3.98 | -1.42 | 1.43 | -0.36 | 0.36 |
| 15 | 14493 | 14696 | 14900 | -3.96 | -1.38 | 1.39 | -0.35 | 0.35 |
| 16 | 13938 | 14127 | 14318 | -3.93 | -1.34 | 1.35 | -0.34 | 0.34 |
| 17 | 13407 | 13584 | 13762 | -3.91 | -1.30 | 1.31 | -0.33 | 0.33 |
| 18 | 12899 | 13064 | 13230 | -3.89 | -1.26 | 1.27 | -0.33 | 0.32 |
| 19 | 12413 | 12567 | 12721 | -3.87 | -1.23 | 1.23 | -0.32 | 0.32 |
| 20 | 11947 | 12091 | 12235 | -3.85 | -1.19 | 1.19 | -0.31 | 0.31 |
| 21 | 11502 | 11636 | 11770 | -3.83 | -1.15 | 1.15 | -0.30 | 0.30 |
| 22 | 11075 | 11200 | 11325 | -3.81 | -1.11 | 1.11 | -0.29 | 0.29 |
| 23 | 10667 | 10782 | 10898 | -3.79 | -1.07 | 1.08 | -0.28 | 0.28 |
| 24 | 10275 | 10383 | 10491 | -3.77 | -1.04 | 1.04 | -0.28 | 0.28 |
| 25 | 9900  | 10000 | 10100 | -3.75 | -1.00 | 1.00 | -0.27 | 0.27 |
| 26 | 9533  | 9633  | 9733  | -3.73 | -1.04 | 1.04 | -0.28 | 0.28 |
| 27 | 9182  | 9282  | 9382  | -3.71 | -1.07 | 1.08 | -0.29 | 0.29 |
| 28 | 8846  | 8945  | 9045  | -3.69 | -1.11 | 1.11 | -0.30 | 0.30 |
| 29 | 8523  | 8622  | 8721  | -3.67 | -1.15 | 1.15 | -0.31 | 0.31 |
| 30 | 8214  | 8313  | 8411  | -3.65 | -1.18 | 1.19 | -0.33 | 0.32 |
| 31 | 7918  | 8016  | 8114  | -3.63 | -1.22 | 1.22 | -0.34 | 0.34 |
| 32 | 7634  | 7731  | 7828  | -3.61 | -1.25 | 1.26 | -0.35 | 0.35 |
| 33 | 7362  | 7458  | 7554  | -3.59 | -1.29 | 1.30 | -0.36 | 0.36 |
| 34 | 7100  | 7196  | 7291  | -3.57 | -1.33 | 1.33 | -0.37 | 0.37 |
| 35 | 6849  | 6944  | 7039  | -3.55 | -1.36 | 1.37 | -0.39 | 0.38 |
| 36 | 6609  | 6702  | 6796  | -3.53 | -1.40 | 1.40 | -0.40 | 0.40 |
| 37 | 6378  | 6470  | 6563  | -3.51 | -1.43 | 1.44 | -0.41 | 0.41 |
| 38 | 6156  | 6247  | 6340  | -3.49 | -1.46 | 1.48 | -0.42 | 0.42 |
| 39 | 5943  | 6033  | 6125  | -3.48 | -1.50 | 1.51 | -0.43 | 0.43 |
| 40 | 5738  | 5828  | 5918  | -3.46 | -1.53 | 1.55 | -0.45 | 0.44 |



ALLGUY INTERNATIONAL CO. LTD.

|    |      |      |      |       |       |      |       |      |
|----|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|
| 41 | 5542 | 5630 | 5719 | -3.44 | -1.57 | 1.58 | -0.46 | 0.46 |
| 42 | 5353 | 5440 | 5528 | -3.42 | -1.60 | 1.62 | -0.47 | 0.47 |
| 43 | 5172 | 5258 | 5345 | -3.40 | -1.63 | 1.65 | -0.49 | 0.48 |
| 44 | 4998 | 5082 | 5168 | -3.39 | -1.67 | 1.69 | -0.50 | 0.49 |
| 45 | 4830 | 4913 | 4998 | -3.37 | -1.70 | 1.72 | -0.51 | 0.50 |
| 46 | 4669 | 4751 | 4834 | -3.35 | -1.73 | 1.75 | -0.52 | 0.52 |
| 47 | 4514 | 4595 | 4677 | -3.33 | -1.77 | 1.79 | -0.54 | 0.53 |
| 48 | 4365 | 4445 | 4526 | -3.32 | -1.80 | 1.82 | -0.55 | 0.54 |
| 49 | 4221 | 4300 | 4380 | -3.30 | -1.83 | 1.86 | -0.56 | 0.56 |
| 50 | 4083 | 4161 | 4239 | -3.28 | -1.86 | 1.89 | -0.58 | 0.57 |
| 51 | 3950 | 4027 | 4104 | -3.27 | -1.90 | 1.92 | -0.59 | 0.58 |
| 52 | 3823 | 3898 | 3974 | -3.25 | -1.93 | 1.96 | -0.60 | 0.59 |
| 53 | 3699 | 3773 | 3848 | -3.23 | -1.96 | 1.99 | -0.62 | 0.61 |
| 54 | 3581 | 3654 | 3728 | -3.22 | -1.99 | 2.02 | -0.63 | 0.62 |
| 55 | 3467 | 3538 | 3611 | -3.20 | -2.02 | 2.05 | -0.64 | 0.63 |
| 56 | 3357 | 3427 | 3499 | -3.18 | -2.05 | 2.09 | -0.66 | 0.65 |
| 57 | 3251 | 3320 | 3390 | -3.17 | -2.09 | 2.12 | -0.67 | 0.66 |
| 58 | 3149 | 3217 | 3286 | -3.15 | -2.12 | 2.15 | -0.68 | 0.67 |
| 59 | 3050 | 3117 | 3185 | -3.14 | -2.15 | 2.18 | -0.70 | 0.68 |
| 60 | 2956 | 3021 | 3088 | -3.12 | -2.18 | 2.22 | -0.71 | 0.70 |
| 61 | 2864 | 2929 | 2995 | -3.10 | -2.21 | 2.25 | -0.72 | 0.71 |
| 62 | 2776 | 2840 | 2904 | -3.09 | -2.24 | 2.28 | -0.74 | 0.72 |
| 63 | 2691 | 2753 | 2817 | -3.07 | -2.27 | 2.31 | -0.75 | 0.74 |
| 64 | 2609 | 2670 | 2733 | -3.06 | -2.30 | 2.34 | -0.77 | 0.75 |
| 65 | 2530 | 2590 | 2652 | -3.04 | -2.33 | 2.37 | -0.78 | 0.77 |
| 66 | 2453 | 2513 | 2573 | -3.03 | -2.36 | 2.40 | -0.79 | 0.78 |
| 67 | 2380 | 2438 | 2497 | -3.01 | -2.39 | 2.44 | -0.81 | 0.79 |
| 68 | 2309 | 2366 | 2424 | -3.00 | -2.42 | 2.47 | -0.82 | 0.81 |
| 69 | 2240 | 2296 | 2354 | -2.98 | -2.45 | 2.50 | -0.84 | 0.82 |
| 70 | 2174 | 2229 | 2285 | -2.97 | -2.47 | 2.53 | -0.85 | 0.83 |
| 71 | 2110 | 2164 | 2219 | -2.95 | -2.50 | 2.56 | -0.87 | 0.85 |
| 72 | 2048 | 2101 | 2155 | -2.94 | -2.53 | 2.59 | -0.88 | 0.86 |
| 73 | 1988 | 2040 | 2094 | -2.92 | -2.56 | 2.62 | -0.90 | 0.88 |
| 74 | 1930 | 1982 | 2034 | -2.91 | -2.59 | 2.65 | -0.91 | 0.89 |
| 75 | 1875 | 1925 | 1977 | -2.89 | -2.62 | 2.68 | -0.93 | 0.90 |
| 76 | 1821 | 1870 | 1921 | -2.88 | -2.65 | 2.71 | -0.94 | 0.92 |
| 77 | 1769 | 1817 | 1867 | -2.87 | -2.67 | 2.74 | -0.95 | 0.93 |
| 78 | 1718 | 1766 | 1815 | -2.85 | -2.70 | 2.77 | -0.97 | 0.95 |
| 79 | 1670 | 1717 | 1765 | -2.84 | -2.73 | 2.80 | -0.98 | 0.96 |
| 80 | 1623 | 1669 | 1716 | -2.82 | -2.76 | 2.82 | -1.00 | 0.98 |
| 81 | 1577 | 1622 | 1669 | -2.81 | -2.78 | 2.85 | -1.02 | 0.99 |
| 82 | 1533 | 1577 | 1623 | -2.80 | -2.81 | 2.88 | -1.03 | 1.01 |
| 83 | 1490 | 1534 | 1579 | -2.78 | -2.84 | 2.91 | -1.05 | 1.02 |
| 84 | 1449 | 1492 | 1536 | -2.77 | -2.87 | 2.94 | -1.06 | 1.03 |
| 85 | 1409 | 1451 | 1494 | -2.76 | -2.89 | 2.97 | -1.08 | 1.05 |



ALLGUY INTERNATIONAL CO. LTD.

|     |      |      |      |       |       |      |       |      |
|-----|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|
| 86  | 1371 | 1412 | 1454 | -2.74 | -2.92 | 3.00 | -1.09 | 1.06 |
| 87  | 1333 | 1374 | 1415 | -2.73 | -2.95 | 3.02 | -1.11 | 1.08 |
| 88  | 1297 | 1337 | 1378 | -2.72 | -2.97 | 3.05 | -1.12 | 1.09 |
| 89  | 1262 | 1301 | 1341 | -2.70 | -3.00 | 3.08 | -1.14 | 1.11 |
| 90  | 1228 | 1267 | 1306 | -2.69 | -3.02 | 3.11 | -1.15 | 1.12 |
| 91  | 1195 | 1233 | 1272 | -2.68 | -3.05 | 3.14 | -1.17 | 1.14 |
| 92  | 1164 | 1200 | 1238 | -2.67 | -3.08 | 3.16 | -1.19 | 1.15 |
| 93  | 1133 | 1169 | 1206 | -2.65 | -3.10 | 3.19 | -1.20 | 1.17 |
| 94  | 1103 | 1138 | 1175 | -2.64 | -3.13 | 3.22 | -1.22 | 1.18 |
| 95  | 1074 | 1109 | 1145 | -2.63 | -3.15 | 3.25 | -1.23 | 1.20 |
| 96  | 1046 | 1080 | 1115 | -2.62 | -3.18 | 3.27 | -1.25 | 1.22 |
| 97  | 1019 | 1052 | 1087 | -2.60 | -3.20 | 3.30 | -1.27 | 1.23 |
| 98  | 992  | 1025 | 1059 | -2.59 | -3.23 | 3.33 | -1.28 | 1.25 |
| 99  | 967  | 999  | 1033 | -2.58 | -3.25 | 3.35 | -1.30 | 1.26 |
| 100 | 942  | 974  | 1007 | -2.57 | -3.28 | 3.38 | -1.32 | 1.28 |

## Annexe 11 : Pièces mécaniques