

Filière Energie et techniques environnementales

Orientation Energies renouvelables

Travail de bachelor Diplôme 2018

Julien Udry

*Electrolyseur PEM en exploitant la
fabrication additive pour ses composants*



■ Professeur
Christoph Ellert

■ Expert
Jan van Herle

■ Date de la remise du rapport
17.08.2018

Filière / Studiengang ETE	Année académique / Studienjahr 2017/18	No TD / Nr. DA er/2018/88
Mandant / Auftraggeber <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution	Etudiant / Student Julien Udry Professeur / Dozent Christoph Ellert	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja ¹ <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes) Jan van Herle EPFL SCI-STI-JVH, Rue de l'Industrie 17, 1951 Sion	

Titre / Titel Electrolyseur PEM en exploitant la fabrication additive pour ses composants
Description / Beschreibung <p>Pour la conversion du surplus d'énergie renouvelable en hydrogène, principalement trois types d'électrolyseurs dominent le marché aujourd'hui. Tandis que tous ont des avantages et inconvénients, la tendance va vers les électrolyseurs du type PEM « Polymère Electrolyte Membrane ». Par contre, pour rendre la technologie économiquement viable sur le marché, les coûts de fabrication élevés doivent être nettement réduits, ce qui exige la modification des stratégies de fabrication. En exploitant les nouvelles possibilités offertes pour la fabrication des pièces métalliques complexes en titane ou en inox (par exemple les plaques bipolaires ou les collecteurs de courant poreux), connues sous le mot-clef « fabrication additive », comme par exemple l'impression 3D au solvant au granule (SG-3DP) ou la fusion sélective au laser (SLM), les perspectives pour une forte réduction de coût de fabrication sont prometteuses.</p> <p>Les buts du projet sont la réalisation et l'optimisation des électrolyseurs de type PEM, fabriqués en partie par ces nouvelles méthodes. Pour les tests des électrolyseurs à une mono ou triple cellule, un banc de tests sera réalisé, qui permettra de comparer plusieurs designs différents.</p> <p>Objectifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Transfert du design d'une cellule PEM pour les systèmes de fabrication additive en identifiant les pièces qui se prêtent bien à la fabrication additive, soit SG-3DP soit SLM selon le matériel – Design d'un « mini-stack » d'électrolyseur PEM, composé de trois cellules en série – Réalisation et test sur un banc de test du laboratoire – Optimisation du design de l'électrolyseur selon les résultats du test – Analyse des coûts pour une éventuelle production en grand nombre.

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum Responsable de l'orientation / filière Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang:  ¹ Etudiant / Student : 	Délais / Termine Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 16.05.2018 Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation 14 – 15.06.2018 Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: 17.08.2018, 12:00 Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten: 29, 30 – 31.08.2018 Défense orale / Mündliche Verfechtung: 04, 05 – 06.09.2018
---	--

¹ 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.

Electrolyseur PEM avec pièces en impression 3D

Diplômant/e Julien Udry

Objectif du projet

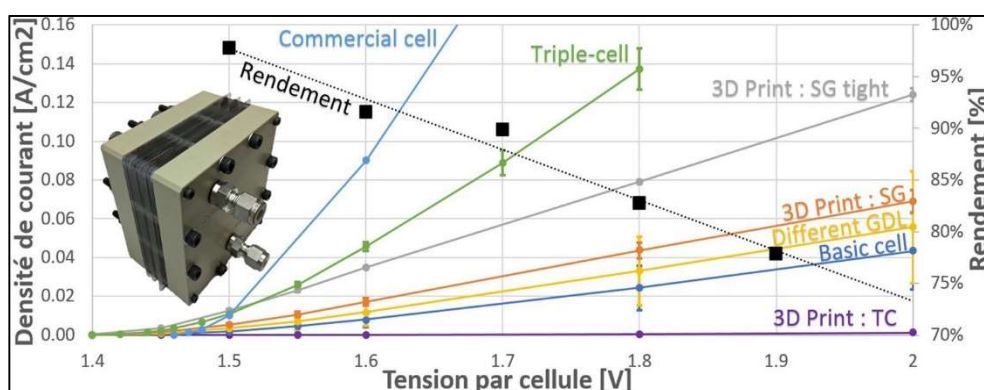
Essai de réduction des coûts par l'impression 3D de pièces et détermination de leurs influences sur les performances de la cellule de la HES. Dessins, fabrication et tests d'un électrolyseur multi-cellules et étude de l'aspect économique.

Méthodes | Expériences | Résultats

Les collecteurs de courant en titane fabriqués à l'aide de différentes méthodes d'impression 3D (tape casting et SG – Solvant on granule) sont insérés dans la cellule de la HES et testés à l'aide d'un banc d'essai monté pour ce travail. Différentes couches GDL (Gas Diffusion Layers) sont également testées. Les performances de la cellule, exprimées par des courbes I-V et de rendement, sont mesurées pour chaque nouvelle configuration. La comparaison des courbes permet d'évaluer l'influence de chaque changement de pièce. Il apparaît que l'épaisseur des composants joue un rôle sur la performance de la cellule.

L'électrolyseur PEM (Proton-Exchange Membrane) multi-cellules, dessiné (voir figure 1) et fabriqué à partir de la littérature et de la cellule de la HES, permet différentes configurations tout en gardant la structure principale intacte. La courbe I-V est meilleure que celles obtenues à l'aide de la cellule HES (voir figure 2).

L'étude financière de l'électrolyseur multi-cellules permet d'identifier les économies réalisables. Modifier les procédés de fabrication et rassembler plusieurs composants en une pièce peut fortement réduire les coûts de production.



Courbe I-V d'électrolyseurs et rendement de conversion d'électricité en hydrogène. Comparaison des performances d'une cellule avec différents composants, d'un électrolyseur triple-cellules et d'une cellule commerciale.

Travail de diplôme
| édition 2018 |

Filière
Energie et techniques
environnementales

Domaine d'application
Energies renouvelables

Professeur responsable
Christoph Ellert
christoph.ellert@hevs.ch

Table des matières

I. Liste des figures.....	2
II. Liste des tableaux.....	4
III. Liste des abréviations.....	4
1. Introduction.....	5
1.1. Motivation.....	5
1.1. Description technique	5
1.2. Buts	6
2. Méthode.....	7
2.1. Setup pour la mesure de performance de l'électrolyseur	7
2.2. Détermination des courbes I-V	8
2.3. Détermination de la porosité des collecteurs de courant	9
2.4. Impression 3D par poudres.....	10
2.5. Montage de l'électrolyseur triple-cellules	12
3. Conception d'un électrolyseur	13
3.1. Mono-cellule [10].....	13
3.2. Multi-cellules	14
4. Design.....	16
4.1. Mono-cellule HES	16
4.2. Electrolyseur triple-cellules.....	20
5. Résultats.....	28
5.1. Etat des matériaux	28
5.2. Performances de la mono-cellule HES	30
5.3. Performances de l'électrolyseur triple-cellules	39
6. Analyse financière.....	41
6.1. Prix de l'électrolyseur triple-cellules	41
6.2. Economies réalisables	41
7. Améliorations et développement prospectif.....	45
8. Conclusion.....	46
9. Bibliographie	48
10. Annexes	50

I. Liste des figures

figure 1 : Circulation des molécules et des électrons dans une cellule d'électrolyseur PEM avec alimentation par énergie photovoltaïque [4].....	6
figure 2 : Montage du laboratoire pour les tests d'électrolyseurs. Montage sans pompe, utilisation de la différence de hauteur pour la circulation de l'eau. Mesures à température ambiante et à pression atmosphérique.	7
figure 3 : Programme pour contrôle et automatisation du TENMA®. Automatisation avec une tension donnée, un courant limite et un temps définis pour chaque mesure (programmation affichée pour l'électrolyseur triple-cellules). Suivi des valeurs en temps réel et suivi graphique pour visualiser la stabilisation du courant	8
figure 4 : Mesures obtenues à l'aide de l'alimentation TENMA® et sélection des mesures (traits verts) pour la détermination de la courbe I-V.....	9
figure 5 : Mesure de masse volumique d'un solide à l'aide de la poussée d'Archimède	10
figure 6 : Différentes couches composant une cellule d'électrolyseur PEM. Illustration des composants électrifiés et des passages de l'eau et des gaz.....	13
figure 7 : Différentes couches composant un électrolyseur PEM triple-cellules. Illustration du passage du courant électrique à travers différentes parties. Potentiel électrique entre l'anode et la cathode identique pour chacune des cellules	14
figure 8 : Fonctionnement électrique d'une plaque bipolaire [11]	15
figure 9 : Schéma explosé de la cellule développée à la HES. Visualisation de toutes les pièces et de leur emplacement dans la cellule	16
figure 10 : Différents collecteurs de courant testés. 1. Pièce de base 2. Tape Casting 3. SG-P1 4. SG-P2 5. SG-T1 6. SG-T2. Cassures sur les pièces 2 et 5 dues à la finesse des pièces qui les rendent fragiles.....	17
figure 11 : Pièce SG-P2 finie. Rétrécissement dû au frittage (SG-P1 identique).....	18
figure 12 : Pièce SG-T1 finie. Rétrécissement dû au frittage. Visualisation des trous artificiels obtenus (SG-T2 identique) [14].....	18
figure 13 : Représentation de la surface couverte par les collecteurs de courant de tailles différentes. Fraisage nécessaire de la plaque d'extrémité côté de l'anode.	18
figure 14 : Représentation de la surface de la zone active de la membrane en fonction de la taille des collecteurs de courant. Surface active définie à 21.7 cm ²	18
figure 15 : Vue de face et coupe vue de côté, agrandissement 4 :1. Placement de la cale de 0.4 mm d'épaisseur (en rouge) dans la cellule HES pour le collecteur de courant SG-3DP	19
figure 16 : Schéma explosé de la triple-cellules. Visualisation de toutes les pièces et de leur emplacement dans l'électrolyseur.....	21
figure 17 : Design du support plastique côté H2 et fonctions des différentes parties usinées	22
figure 18 : Design du support plastique côté O2 et fonctions des différentes parties usinées	23
figure 19 : Design de la plaque bipolaire en titane et fonctions des différentes parties usinées .	23
figure 20 : Designs utilisables pour grille de circulation. Sens de circulation de l'eau (bleu) et des différentes largeurs de section pour le calcul du rayon hydraulique équivalent (orange)	24
figure 21 : Représentation 2D de la circulation de l'eau et des gaz à travers l'électrolyseur triple-cellules en évitant tout mélange de gaz. L'entrée et la sortie du circuit d'eau sont opposées, afin d'homogénéiser la circulation dans les trois cellules. Deux sorties pour le circuit H ₂ évitent les différences de pression dans les cellules.....	25
figure 22 : Résistance hydraulique à travers le circuit de dans l'électrolyseur triple-cellules schématisé.....	26

- figure 23 : Collecteurs de courant au MEB. Comparaison de la taille des pores, des grains et de l'état de surface. a) Tape Casting, surface plane avec grains fins et peu de porosité. b) SG-3DP vue de côté, surface en relief et petite taille de pore. c) Titan frit, utilisé dans l'électrolyseur triple-cellules, grains larges de 300 μ m, peu poreux mais grande taille de pore. d) SG-3DP trouée, surface en relief, affaissement au niveau de la ligne des trous28
- figure 24 : Collecteurs de courant au MEB. Comparaison de la taille des pores et des grains. a) Tape Casting, grains de 20 μ m et taille de pore de 10 μ m. b) SG-3DP, grains formant des amas irréguliers, pores de 40 μ m. c) Titan frit, surface des grains plane et pores de 200 μ m. d) SG-3DP, agrandissement, observation des joints de grain et de l'irrégularité de la surface.29
- Figure 25 : Couches GDL au MEB. Comparaison de la taille de la structure et des pores. a) Toray Paper TGP-H-060, filaments de carbone droits et croisés entre eux. b) ELAT LT 1400 W, tissu tressé. c) Agrandissement de l'image a, pores de 40 μ m non-traversants. d) Agrandissement de l'image b, pores de 20 μ m non-traversants30
- figure 26 : Dégradation non-linéaire des performances de la membrane durant le travail. Utilisation d'une même configuration pour chaque valeur relevée, sur le même banc de test. Aucune mesure de température effectuée lors des tests. L'état de la membrane influe directement sur les résultats de la cellule avec les différentes configurations.31
- figure 27 : Courbe I-V des différentes mesures effectuées sur la cellule HES avec différentes couches GDL. Chaque couche GDL possède des caractéristiques, mais la plus influente semble être son épaisseur32
- figure 28 : Mesures de la cellule avec une couche GDL composée d'un GDL-CT et d'un Toray, pour une épaisseur de 600 μ m, à deux dates différentes. Comparaison des deux performances durant toute la durée de la prise de mesure. Performances similaires jusqu'à 1,8V, puis performance du 18.07 plus faible33
- figure 29 : Influence de l'épaisseur de la couche GDL sur la densité de courant, à différentes tensions. Tendance d'augmentation de la densité de courant en fonction de l'épaisseur de la couche GDL33
- figure 30 : Rendement de la cellule HES pour chaque épaisseur de GDL. Aucune différence notable de rendement entre les multiples configurations34
- figure 31 : Courbe I-V des différentes mesures effectuées sur la cellule HES avec différents collecteurs de courant. Comparaison des différentes compositions avec la composition de base (violet). Plus les éléments sont compressés, plus la densité de courant augmente pour une même tension, jusqu'à une saturation de cet effet36
- figure 32 : Influence de l'épaisseur de la surépaisseur menant à une compression des composants de la cellule, pour différentes tensions. Augmentation de la densité de courant en fonction de la surépaisseur et saturation de cet effet vers les 0.3mm de surépaisseur37
- figure 33 : Rendement de la cellule HES pour chaque collecteur de courant. Aucune différence notable de rendement entre les multiples configurations38
- figure 34 : Courbe I-V et courbe de rendement de l'électrolyseur triple-cellules. Comparaison des courbes obtenues en fonction des jours passés. La densité de courant baisse avec le temps pour la majorité des tensions39
- figure 35 : Courbes I-V moyennes pour chaque types de tests. Comparaison des performances entre les différentes compositions. Dès 1.55V, de la meilleure courbe à la moins bonne : 1. Cellule commerciale (bleue claire) 2. Triple-cellules (verte) 3. Impression SG-3DP avec compression des composants (grise) 4-5-6. Impression SG-3DP, Couches GDL et Cellule de base 7. Impression Tape Casting. En dessous de 1.55V, la cellule commerciale devient moins performante40

figure 36 : Plaque bipolaire en titane, développement version 1. Comprend les fonctions de différentes pièces : 1. Plaque bipolaire 2. Grille de circulation 3. Supports plastiques. Réalisable par usinage ou impression 3D.....	41
figure 37 : Plaque bipolaire en titane, développement version 2. Comprend les fonctions de différentes pièces : 1-2-3. Similaire que la figure 36. 4. Collecteur de courant 5. Place pour le joint plat. Réalisable uniquement par impression 3D.....	43
figure 38 : Plaque bipolaire en titane, développement version 3. Tôle de 0.5mm en inox, estampée et recouverte d'une couche de titane	44

II. Liste des tableaux

tableau 1 : Nomenclature, fonctions et matériaux utilisés pour les différents composants d'une cellule d'électrolyseur PEM	13
tableau 2 : Nomenclature fonctions et matériaux utilisés pour les différents composants d'un électrolyseur PEM multi-cellules.	14
tableau 3 : Nomenclature, fabrication et caractéristiques des différents collecteurs de courant testés. *Dessin de la pièce en annexe 1	17
tableau 4 : Caractéristiques des différentes couches GDL utilisées.*Données transmises par le fournisseur Fuel Cell Store	20
tableau 5 : Différents collecteurs de courant, leur design et leur épaisseur. Utilisation de cales de différentes épaisseurs, ce qui modifie la surépaisseur des collecteurs de courant et la compression des composants de la cellule	35
tableau 6 : Gains financiers réalisables pour le développement version 1. L'utilisation de l'usinage pour cette pièce semble plus intéressante que l'impression 3D (détails à l'annexe 6)	42
tableau 7 : Gains financiers réalisables pour le développement version 2 (détails à l'annexe 6)	43
tableau 8 : Gains financiers réalisables pour le développement version 3 (détails à l'annexe 6)	44

III. Liste des abréviations

Courbe I-V	: Courbe du courant en fonction de la tension
GDL	: Gaz Diffusion Layer
MEA	: Membrane-Electrode Assemblies (Assemblage de la membrane PEM et des catalyseurs)
MEB	: Microscope électronique à balayage
MPL	: Micro Porous Layer
PEM	: Proton Exchange Membrane
SG-3DP	: Solvent on granule 3D printing
SLM	: Selective Laser Melting

1. Introduction

1.1. Motivation

De plus en plus d'installations renouvelables sont montées et permettent l'autoconsommation, mais également une injection du surplus d'énergie sur le réseau. Cette énergie est produite grâce aux éléments naturels (soleil, vent, ...) et dépend des phénomènes météorologiques (ensoleillement, dépressions, ...). De ce fait, la production de ces installations est stochastique et le réseau doit pouvoir recevoir des pics de puissance de plus en plus importants. Afin de réduire ces pics, une solution est le stockage d'énergie sous différentes formes (électrochimique, gaz, ...) à l'aide de méthodes diverses (batteries, power to gaz, ...) [1].

L'une des méthodes en développement est le power to gaz, qui consiste à transformer l'énergie électrique sous forme de gaz. Cette méthode est basée sur un processus chimique appelé électrolyse et permet de séparer les molécules d'eau en dihydrogène (H_2) et dioxygène (O_2) à l'aide d'un électrolyseur. Le gaz d'hydrogène peut être ainsi récupéré et utilisé de différentes manières [2]:

- Retransformation en électricité à l'aide d'une pile à combustible (procédé inverse)
- Transformation en gaz naturel (CH_4), puis injection dans le réseau de gaz
- Injection direct dans le réseau de gaz naturel à hauteur de 4%
- Consommation de l'industrie chimique

Divers types d'électrolyseurs existent et possèdent tous leurs avantages et leurs inconvénients. Les électrolyseurs de type PEM semblent être les plus intéressants. Cependant, l'électrolyseur PEM coûte cher à la production étant donné l'utilisation de certains matériaux et l'usinage de pièces complexes. C'est pourquoi il est nécessaire de réduire les coûts de fabrication en se focalisant sur les pièces les plus onéreuses. Les nouvelles méthodes de fabrication additive (impression 3D) offrent des perspectives prometteuses.

1.1. Description technique

L'électrolyse de l'eau est un processus chimique permettant la séparation des molécules d'eau en hydrogène et en oxygène à l'aide d'un apport d'énergie sous forme électrique. Il s'agit du système inverse d'une pile à combustible (fuel cell).

L'électrolyseur de type PEM permet la réalisation de ce processus à l'aide d'un électrolyte polymère solide, également appelé membrane à échange de protons. L'avantage principal de ce type d'électrolyseur est son fonctionnement à des densités de courant élevées. De plus, ce système requiert un équipement auxiliaire plus simple que les électrolyseurs de type alcalin. En effet, l'apport d'eau déminéralisée et de courant continu suffit au fonctionnement de la cellule, comme représenté sur la figure 1 [3].

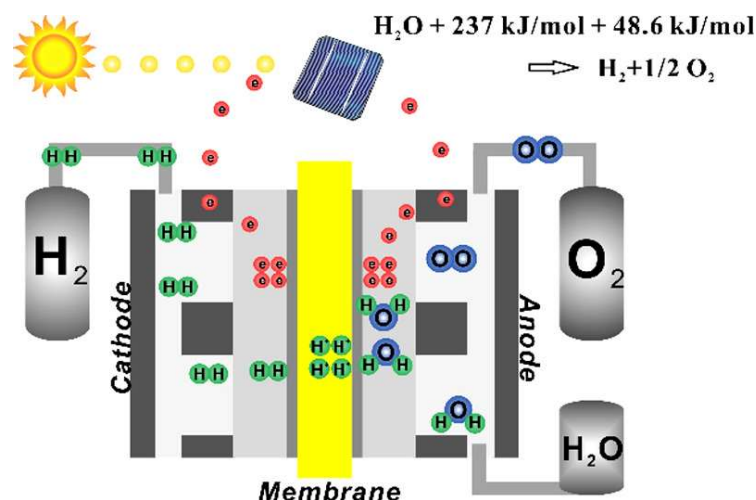


figure 1 : Circulation des molécules et des électrons dans une cellule d'électrolyseur PEM avec alimentation par énergie photovoltaïque [4]

Un courant d'électrons passe de l'anode à la cathode grâce à une tension fournie par une source d'énergie externe. Les protons d'hydrogène sont attirés du côté de la cathode, passent à travers la membrane PEM puis récupèrent les électrons et se combinent en dihydrogène. Du côté de l'anode, les molécules d'oxygène se combinent entre elles et forment ainsi du dioxygène. L'énergie nécessaire à la séparation d'une mole d'eau est de 285.6 kJ, soit 80 Wh.

1.2. Buts

Ce travail consiste dans un premier temps, à utiliser une cellule d'électrolyse développée à la HES pour effectuer différentes manœuvres :

- Créer un banc d'essai pour la mesure de performance d'électrolyseurs
- Mesurer le comportement de la cellule développée à la HES
- Mesurer l'impact de différentes couches GDL
- Fabriquer de nouveaux collecteurs de courant à l'aide de différentes méthodes d'impression 3D afin de réduire les coûts de production et mesurer leur impact sur les performances de la cellule
- Analyser les résultats provenant des différentes mesures

Lorsque la cellule unique a été étudiée, l'objectif suivant est la mise en série de plusieurs cellules. Cela comporte plusieurs étapes :

- Etudier le fonctionnement des électrolyseurs multi-cellules
- Dessiner le système complet en 3D
- Commander et usiner les pièces
- Monter l'électrolyseur
- Tester le fonctionnement et les performances de l'électrolyseur

Le système réalisé permet le montage d'éléments avec des épaisseurs différentes afin de pouvoir tester plusieurs montages et, par la suite, trouver les meilleures caractéristiques de chaque pièce.

Finalement, une analyse des coûts est effectuée grâce aux prix obtenus pour la conception de l'électrolyseur multi-cellules. Cette analyse permet de définir un coût de fabrication de ce produit, mais également d'évaluer les économies réalisables grâce à différentes méthodes de fabrication et à différentes conceptions.

2. Méthode

2.1. Setup pour la mesure de performance de l'électrolyseur

2.1.1. Matériel

- Un réservoir d'eau déminéralisée
- Un support pour le réservoir d'eau
- Une vanne de réglage de débit
- Un récipient pour la mesure d'eau (erreur : ± 0.75 ml)
- Un récipient pour la mesure d'hydrogène (erreur : ± 0.8 ml)
- Une alimentation TENMA® (erreurs : ± 0.01 V et ± 0.001 A)
- Tuyaux et connecteurs pneumatiques
- Câbles et connecteurs électriques

2.1.2. Montage

Le setup permet la mesure de performance et l'étude de caractéristiques de la cellule d'électrolyse HES, mais également de l'électrolyseur multi-cellules composé de trois cellules avec un débit d'eau faible et à pression atmosphérique.

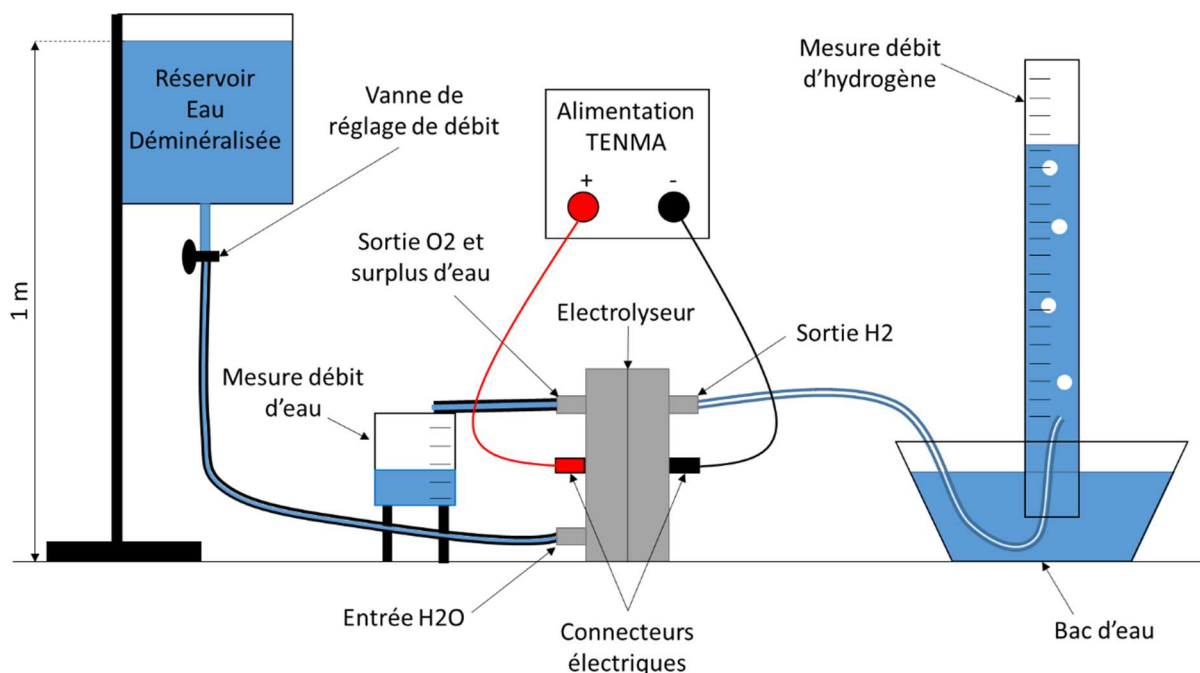


figure 2 : Montage du laboratoire pour les tests d'électrolyseurs. Montage sans pompe, utilisation de la différence de hauteur pour la circulation de l'eau. Mesures à température ambiante et à pression atmosphérique.

Lorsque l'électrolyseur est éteint, toute l'eau entrant dans l'électrolyseur en ressort. Ainsi il est possible de mesurer le débit à la sortie du système.

Pour l'apport en électricité, cette dernière provient de l'alimentation TENMA® programmable permettant une gestion manuelle ou automatisée. Cette alimentation permet de bloquer une tension et laisse le courant s'adapter en fonction de la performance de l'électrolyseur. La tension et le courant sont enregistrés et sont utilisés comme mesures pour dessiner la courbe I-V. L'alimentation utilisée ne permet pas d'obtenir un courant supérieur à 5 A.

Finalement la mesure du volume d'hydrogène permet, par la suite, le calcul du débit d'hydrogène Q_{H_2} et du rendement de l'électrolyseur. La densité énergétique de l'hydrogène ρ_{H_2} utilisée durant ce travail vaut 10.8 [J/ml] [5].

$$\eta_{electrolyseur}[-] = \frac{P_{\text{éle}} [W]}{P_{H_2} [W]} = \frac{I [A] * U [V]}{Q_{H_2} \left[\frac{ml}{s} \right] * \rho_{H_2} \left[\frac{J}{ml} \right]}$$

équation 1: Rendement d'un électrolyseur

2.2. Détermination des courbes I-V

La performance de chacune des combinaisons testées avec la cellule HES ou l'électrolyseur triple-cellules est mesurée à l'aide de la courbe I-V et de la courbe de rendement. La courbe I-V est obtenue grâce aux mesures de l'alimentation TENMA® préprogrammée. Cette alimentation fournit une tension fixe et un courant qui s'adapte en fonction des performances de l'électrolyseur.

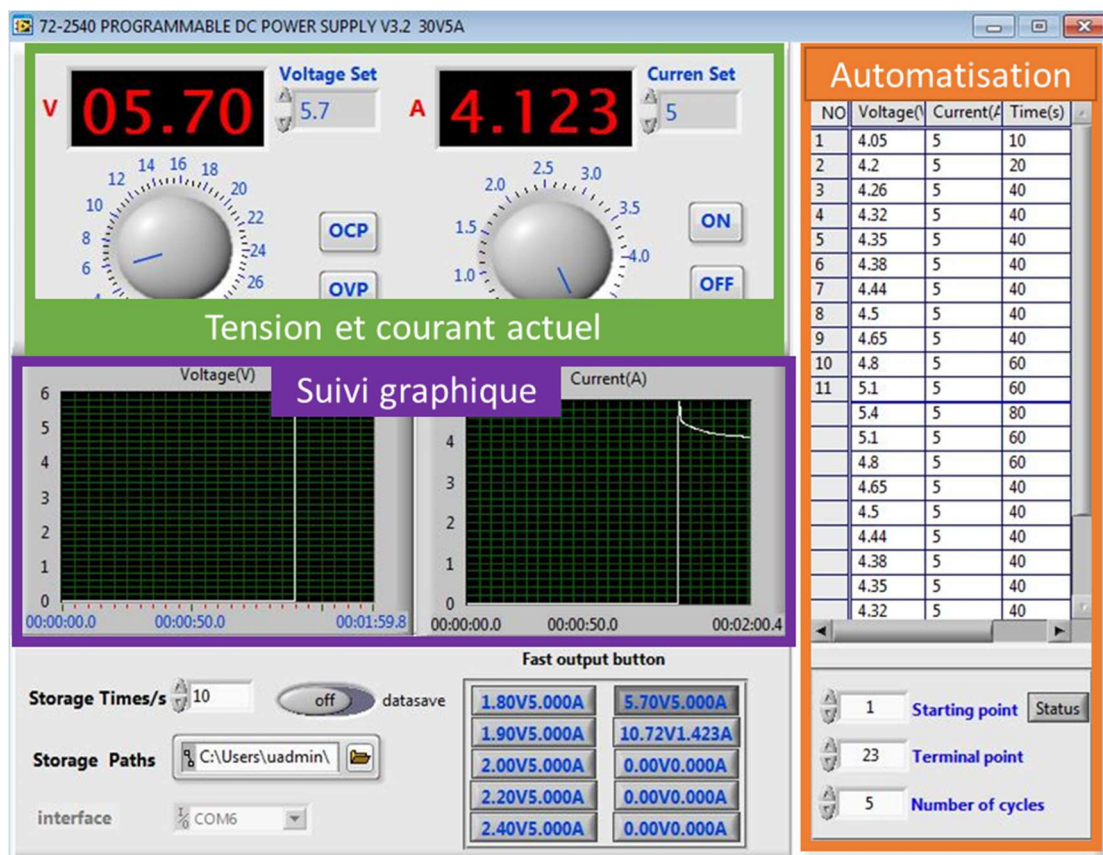


figure 3 : Programme pour contrôle et automatisation du TENMA®. Automatisation avec une tension donnée, un courant limite et un temps définis pour chaque mesure (programmation affichée pour l'électrolyseur triple-cellules). Suivi des valeurs en temps réel et suivi graphique pour visualiser la stabilisation du courant

Les mesures commencent à 1.4 V par cellule, car aucune réaction d'électrolyse n'est obtenue avec des tensions plus petites, dû à l'énergie minimale nécessaire à l'électrolyse de l'eau (1.23 V à condition standard [6]) et à la résistance des composants internes. Concernant la limite supérieure, elle est définie par le courant maximal de 5 A fourni par l'alimentation.

Les durées déterminées avant chaque changement de tension permettent une certaine stabilisation du système. Toutefois, le temps de stabilisation du courant augmente avec la tension, c'est-à-dire que le temps de stabilisation du courant pour une tension de 2.5 V est plus élevé que pour une tension de 1.6 V.

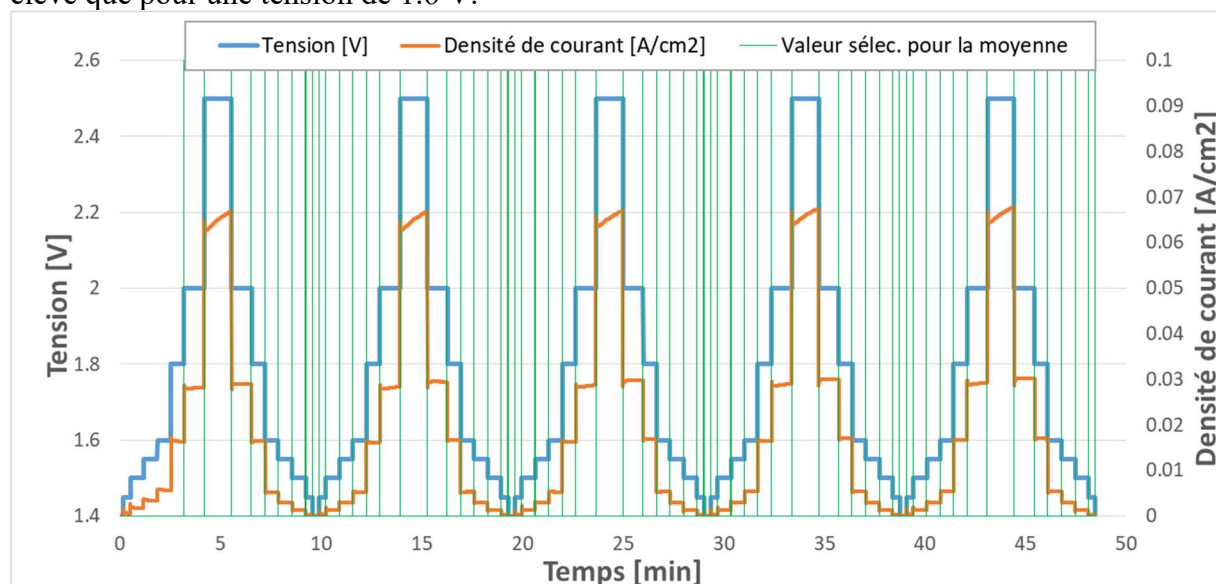


figure 4 : Mesures obtenues à l'aide de l'alimentation TENMA® et sélection des mesures (traits verts) pour la détermination de la courbe I-V.

Chaque seconde, dix valeurs sont enregistrées. Toutes les valeurs obtenues durant la mesure ne sont pas prises en compte pour le dessin de la courbe I-V. Ces valeurs sont sélectionnées dès la 3^{ème} minute de fonctionnement de l'électrolyseur, ensuite il s'agit de la 3^{ème} valeur avant le changement de tension. Cet échantillonnage permet d'obtenir des valeurs durant l'état le plus stable de l'électrolyseur lors de la mesure.

Lorsque la tension fournie à l'électrolyseur est élevée, le temps de stabilisation du courant est plus long. Afin d'obtenir des données avec moins d'erreurs, il est nécessaire d'augmenter le temps avant le changement de tension. Toutefois, il n'est pas possible d'allonger le temps des prises des mesures afin d'obtenir toutes les résultats voulus.

2.3. Détermination de la porosité des collecteurs de courant

2.3.1. Matériel

- Dispositif Mettler pour la mesure de la densité
 - Balance de précision Delta-Range (erreur : ± 0.001 g)
 - Etrier, placé sur le plateau de la balance Mettler
 - Pont, placé au travers du plateau et reposant sur le bâti de la balance
 - Becher de 250 ml, placé sur le pont
 - Porte pierre avec coupelle de suspension à l'étrier
 - Thermomètre

2.3.2. Déroulement

Détermination de la densité d'un solide

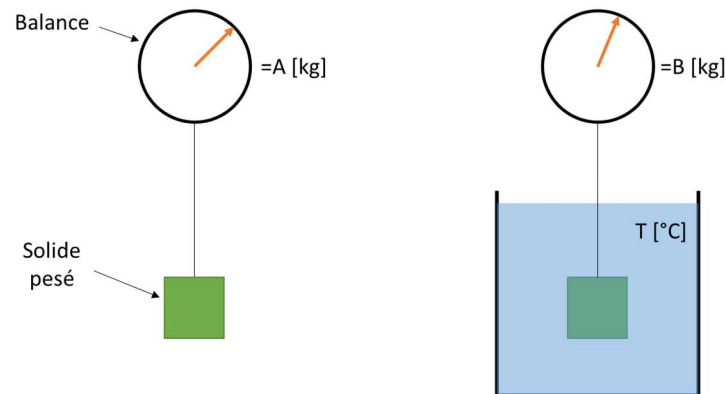


figure 5 : Mesure de masse volumique d'un solide à l'aide de la poussée d'Archimède

La masse volumique d'un solide est déterminée à l'aide de l'eau de masse volumique connue. Pour cela, il faut peser le solide d'abord dans l'air, puis dans l'eau. A partir des deux pesées, la masse volumique du solide ρ_2 peut se calculer, selon la formule suivante :

$$\rho_2 \left[\frac{kg}{ml} \right] = \frac{A [kg]}{A [kg] - B [kg]} * \rho_1 \left[\frac{kg}{ml} \right]$$

équation 2 : Masse volumique d'un solide à l'aide de la poussée d'Archimède

- ρ_2 : masse volumique du solide
- A : poids du solide dans l'air
- B : poids du solide dans le liquide à température T donnée
- ρ_1 : masse volumique du liquide auxiliaire, à la température T

Finalement, la densité du matériau est le résultat du rapport entre la masse volumique obtenue ρ_2 et la masse volumique théorique ($\rho_{\text{titane}} = 4.51 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ [7]). La porosité est obtenue ainsi :

$$\text{Porosité} = 1 - \frac{\rho_2}{\rho_{th}}$$

équation 3 : Porosité d'un matériau par la densité mesurée et théorique

2.4. Impression 3D par poudres

Différentes méthodes permettent une impression 3D par « fabrication additive » à partir de poudres, comme l'impression par SLM qui consiste à utiliser un laser pour faire fondre la poudre et souder les grains localement, la méthode de binder jetting on powder bed qui utilise de la colle pour assembler les grains entre eux et l'impression par SG-3DP qui permet l'assemblage de granulés (composés de plusieurs grains métalliques ou céramiques et d'un liant plastique) grâce à l'utilisation d'un solvant.

La méthode d'impression par SLM permet une impression de pièce dense, ce qui est intéressant pour certaines pièces de ce travail. Cependant, l'indisponibilité de l'imprimante ainsi que le prix élevé de la poudre de titane incite à l'utilisation de la méthode SG-3DP.

2.4.1. *Impression SG-3DP [8]*

Les granulés utilisés dans l'impression sont composés de poudre d'hydru de titane (TiH_2) ce qui permet d'obtenir un produit final d'une grande pureté, passif et sûr.

L'impression est effectuée en diverses étapes :

1. Étalage d'une couche de granulés
2. Dépôt (Jetting) du solvant
3. Passage de la pièce au four permettant
 - a. Déliaage (Debinding) : enlève les liants plastiques contenus dans les granulés
 - b. Déshydratation (Dehydriding) : enlève l'hydrogène du TiH_2
 - c. Frittage (Sintering): soude les grains de poudre de titane entre eux
4. Finitions (si nécessaire)

Le frittage permet d'obtenir une porosité du matériau en fonction de la granulométrie de la poudre, de la température de frittage et du temps passé dans le four.

Avantages et inconvénients

- + Permet une structure complexe dans les trois axes
- + Porosité modifiable en fonction du frittage et de la taille de grains utilisés
- Volume de pièce maximale limité à 85mm x 65mm x 25mm
- Épaisseur minimale de 1mm conseillée pour le maniement du corps vert
- Rétrécissement de pièces en hydru de titane lors du passage au four incertain, car pas encore étudié (entre 10% et 20%)
- Épaisseur de surface non homogène

2.4.2. *Impression tape casting [9]*

L'impression par tape casting permet la fabrication de feuilles métalliques denses ou poreuses. Le processus de fabrication consiste à former une substance pâteuse à partir de 75% de poudre d'hydru de titane, de solvant, de colle et de plastifiant. Ce mélange est ensuite étalé par bande d'épaisseur entre 0.2 mm et 1.5 mm.

Par la suite, un passage au four permet les mêmes étapes que pour l'impression SG-3DP citées précédemment, c'est-à-dire le délialage, la déshydratation et le frittage.

Finalement, lorsque les feuilles métalliques sont terminées, il est possible d'y découper les formes soit par laser, soit par jet d'eau.

Avantages et inconvénients

- + Rétrécissement de la pièce lors du passage au four avant découpe, puis découpe au laser ou au jet d'eau précis
- Largeur maximale de 100 mm avant frittage
- Impression de feuilles métalliques non complexes (pièces plates)
- Épaisseur de surface non homogène

2.5. Montage de l'électrolyseur triple-cellules

Au vu des résultats obtenus concernant la dégradation de performances de la membrane (figure 26, page 31) et afin d'éviter la contamination des membranes due à l'état des composants ou au dépôt d'impuretés, l'électrolyseur est monté avec les précautions nécessaires. Ainsi, toutes les pièces sont nettoyées à l'isopropanol, puis les éléments les moins imposants (collecteurs de courant, plaques adaptatives, grille de circulation et plaques électriques) sont passés dans un bain à ultrasons avec de l'isopropanol également. Ensuite, toutes les pièces sont plongées et rincées dans de l'eau déminéralisée. Finalement, chaque composant est rincé une dernière fois à l'eau déminéralisée juste avant d'être empilé comme décrit dans l'annexe 4.

L'électrolyseur est serré afin que chaque partie soit étanche et qu'il n'y ait aucune fuite de gaz ou de liquide. Cependant, la force de serrage n'a pas été mesurée.

Lors des tests, l'eau déminéralisée est changée quotidiennement. Au maximum deux tests sont effectués par jour.

3. Conception d'un électrolyseur

3.1. Mono-cellule ^[10]

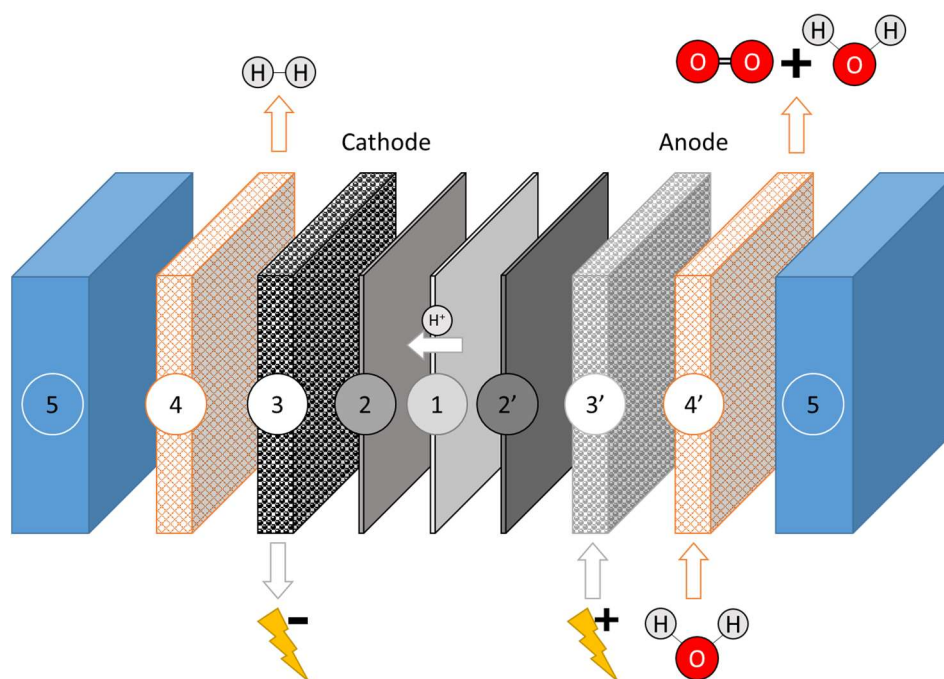


figure 6 : Différentes couches composant une cellule d'électrolyseur PEM. Illustration des composants électrifiés et des passages de l'eau et des gaz

N°	Nom	Fonctions	Matériaux
1	Membrane PEM	Echange les protons (laisse passer les molécules d'hydrogène)	Nafion™
2 2'	Catalyseurs	Electrolyse de l'eau	Platine Iridium
3 3'	Collecteurs de courant et Couche GDL	Distribution du courant aux catalyseurs et passage de l'eau et des gaz produits	Carbone ou Inox Titane
4 4'	Grille de circulation	Favorise la circulation du gaz et du liquide	Inox Titane
5	Plaque d'extrémité	Soutient le tout ensemble et contient les connecteurs pour les entrées et sorties du système	Polycarbonate

tableau 1 : Nomenclature, fonctions et matériaux utilisés pour les différents composants d'une cellule d'électrolyseur PEM

Ce système d'électrolyse permet une injection d'eau d'un côté de la membrane, puis de récupérer dans l'une des sorties le surplus d'eau injecté avec les molécules d'oxygène gazeux, et dans la seconde sortie, uniquement l'hydrogène gazeux.

3.2. Multi-cellules

Le bloc multi-cellules contient plusieurs mono-cellules mises en série. Le design est similaire à la mono-cellule, toutefois, quelques modifications sont apportées afin de permettre le passage du fluide, des gaz et de l'électricité entre les cellules, tout en évitant les mélanges de gaz.

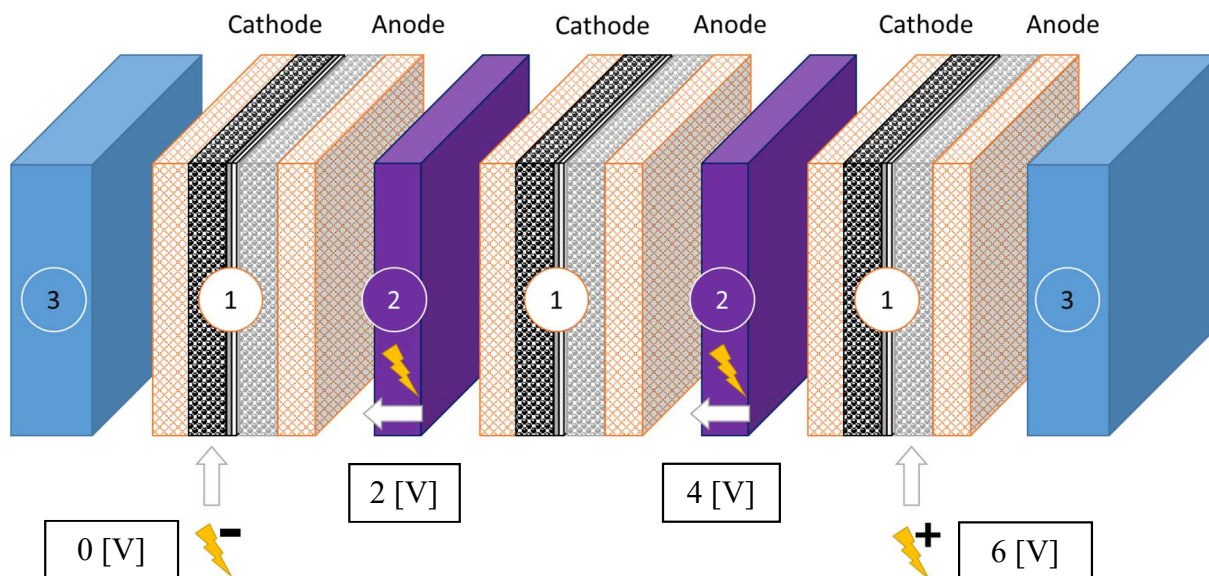


figure 7 : Différentes couches composant un électrolyseur PEM triple-cellules. Illustration du passage du courant électrique à travers différentes parties. Potentiel électrique entre l'anode et la cathode identique pour chacune des cellules

N°	Nom	Fonctions	Matériaux
1	Cellule d'électrolyse	Composée des éléments de 1 à 4 de la figure 6	
2	Plaque bipolaire	Transmet l'énergie électrique d'une cellule à l'autre Evite les échanges de gaz entre deux cellules	Titane
3	Plaque d'extrémité	Soutient le tout ensemble et contient les connecteurs pour les entrées et sorties du système	Polycarbonate

tableau 2 : Nomenclature fonctions et matériaux utilisés pour les différents composant d'un électrolyseur PEM multi-cellules.

Comme représenté sur la figure 7, deux bornes d'électricité permettent d'alimenter la cathode et l'anode aux deux extrémités du bloc multi-cellules. Les autres anodes et cathodes se trouvant au milieu sont alimentées grâce à la conduction d'électricité des plaques bipolaires. Si toutes les cellules sont identiques, le potentiel entre l'anode et la cathode de chacune d'entre elles est égal.

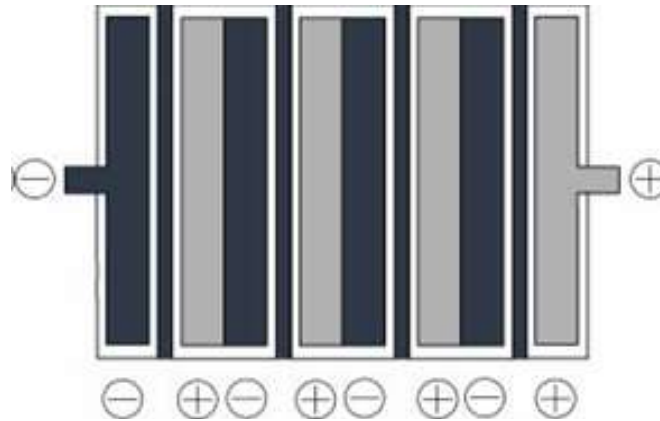


figure 8 : Fonctionnement électrique d'une plaque bipolaire [11]

Les plaques bipolaires sont appelées ainsi, car elles permettent le transfert d'énergie électrique et représentent le pôle positif pour l'anode de la première cellule en contact et également le pôle négatif pour la cathode de la seconde cellule, comme représenté sur la figure 8 ci-dessus.

4. Design

4.1. Mono-cellule HES

Une première cellule a été développée à la HES, basée sur la littérature. Cette dernière est composée des mêmes éléments que ceux représentés sur le schéma de la figure 6.

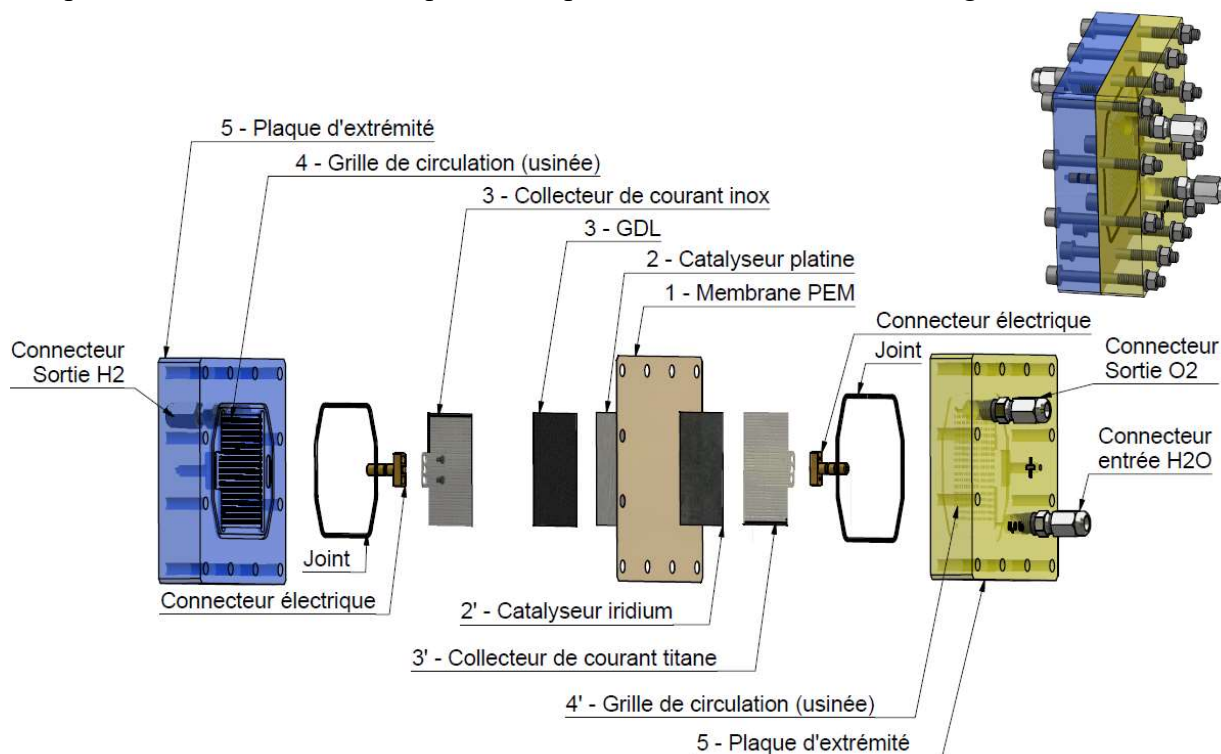


figure 9 : Schéma explosé de la cellule développée à la HES. Visualisation de toutes les pièces et de leur emplacement dans la cellule

Certains éléments sont différemment présentés et d'autres sont ajoutés :

- Les grilles de circulation ne sont pas des pièces à part entière mais sont directement usinées dans les plaques d'extrémités en polycarbonate.
- Le collecteur de courant en inox (n°3) est ajouté afin de pouvoir fixer le connecteur électrique et alimenter la couche GDL en carbone.
- Les joints isolent la partie mouillée de l'électrolyseur de l'extérieur et empêchent les fuites d'eau ou de gaz.
- Les collecteurs de courant en titane et en inox sont troués, car ils ne sont pas poreux. Ces trous permettent le passage des molécules de gaz et d'eau.

4.1.1. Collecteurs de courant

Les collecteurs de courant sont des pièces très importantes et complexes. En effet, comme mentionné dans le tableau 1, elles doivent pouvoir conduire le courant aux catalyseurs, il est donc nécessaire que ce soit un matériau métallique. De plus, cette pièce doit pouvoir laisser passer l'eau et le gaz, depuis la grille de circulation jusqu'aux catalyseurs, de ce fait, la pièce doit être poreuse ou posséder un design comportant des trous. Finalement, les conditions à l'intérieur d'une cellule sont très favorables à l'oxydation, il est donc indispensable d'utiliser des matériaux résistants comme l'acier inox ou le titane.

Du côté de l'anode, le plus favorable à l'oxydation, il est nécessaire d'utiliser du titane. Du côté de la cathode, l'inox est suffisamment résistant à l'oxydation et le prix de ce matériau est plus de trois fois meilleur marché que celui du titane. [12] [13]

Production des collecteurs de courant

L'impression 3D est un moyen de production moderne en évolution qui permet de développer de nouvelles méthodes de fabrication moins coûteuses. Ainsi, des collecteurs de courant sont fabriqués à l'aide de la méthode SG-3DP et tape casting. Les résultats obtenus permettent de définir si ce type de pièce est utilisable dans une cellule d'électrolyse PEM.

Nom de pièce	Origine du matériau	Caractéristique du design	Dimensions finales [mm]	Porosité du matériau [%]
<i>Pièce de base*</i>	Plaque de titane	Trouée	50 x 50 x 0.5	0%
<i>Tape Casting</i>	Tape Casting	Pleine	50 x 50 x 0.409	32%
<i>SG-P1</i>	SG-3DP	Pleine	47.0 x 46.6 x 0.987	57%
<i>SG-P2</i>	SG-3DP	Pleine	46.6 x 46.7 x 0.992	54%
<i>SG-T1</i>	SG-3DP	Trouée	47.3 x 47.3 x 0.987	56%
<i>SG-T2</i>	SG-3DP	Trouée	47.2 x 47.2 x 0.952	56%

tableau 3 : Nomenclature, fabrication et caractéristiques des différents collecteurs de courant testés. *Dessin de la pièce en annexe 1

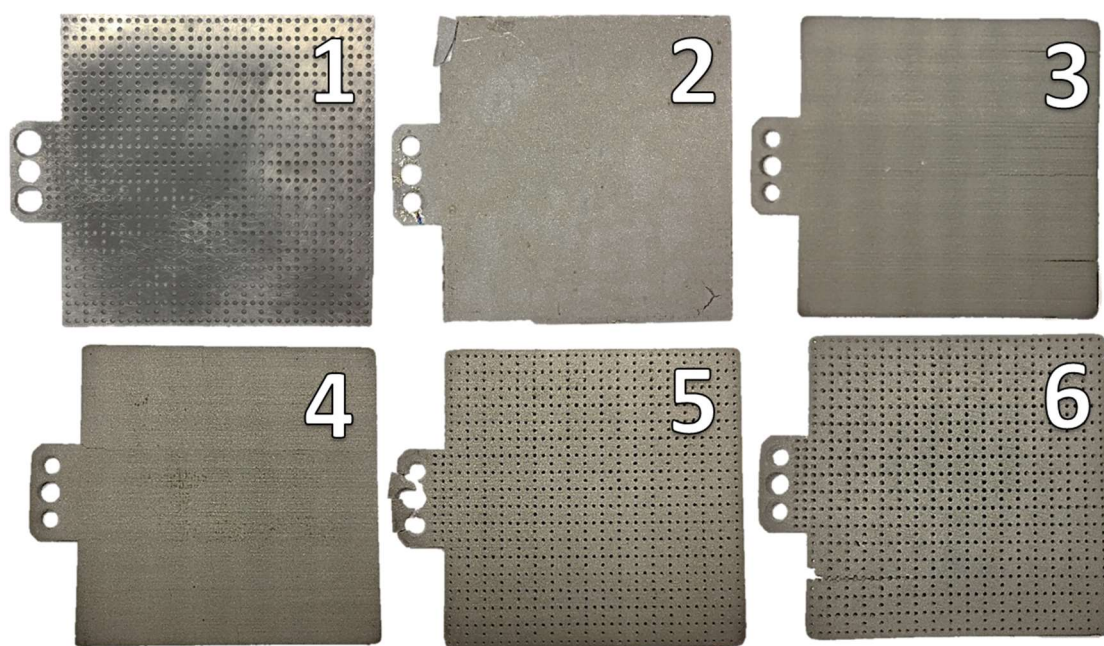


figure 10 : Différents collecteurs de courant testés. 1. Pièce de base 2. Tape Casting 3. SG-P1 4. SG-P2 5. SG-T1 6. SG-T2. Cassures sur les pièces 2 et 5 dues à la finesse des pièces qui les rendent fragiles.

Les pièces SG ont toutes été imprimées avec un agrandissement des dimensions de 10% (annexe 2) afin de prévenir du rétrécissement lors du frittage. Cette estimation de 10% provient des expériences de frittage avec d'autres matériaux. Néanmoins, aucune mesure n'a été faite auparavant avec l'impression SG-3DP de granules en hydrure de titane. Le rétrécissement réel est d'environ 15% pour la majorité des dimensions et 9% pour l'épaisseur. De ce fait, tous les collecteurs de courant obtenus par SG-3DP possèdent une surface plus petite et une épaisseur plus grande. [14]. Les pièces 2 et 5 de la figure 10 ont subi des cassures lors de manipulations. La finesse des pièces les rend fragiles.



figure 11 : Pièce SG-P2 finie. Rétrécissement dû au frittage (SG-P1 identique)

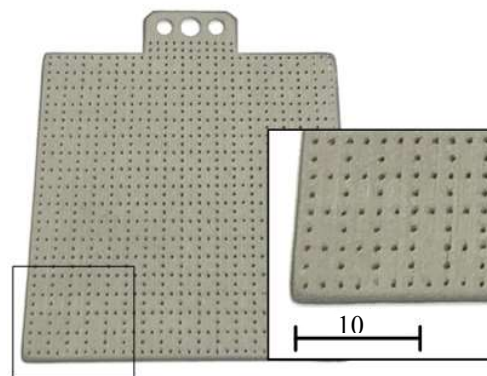
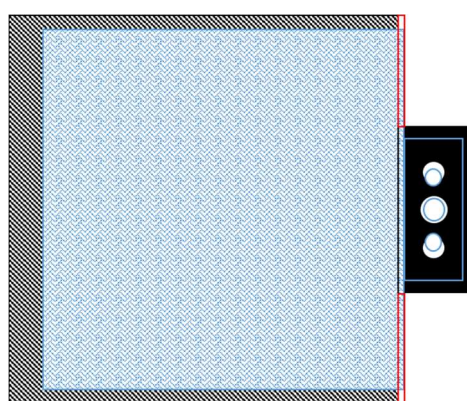


figure 12 : Pièce SG-T1 finie. Rétrécissement dû au frittage. Visualisation des trous artificiels obtenus (SG-T2 identique) [14]

Les pièces dites pleines ne possèdent aucune porosité « artificielle » usinée ou imprimée (figure 11). Cela permet de savoir si la porosité du matériau est suffisante pour laisser échapper les bulles de gaz et laisser pénétrer l'eau jusqu'au catalyseur.

Modifications dues au rétrécissement de surface des collecteurs de courant SG-3DP

Afin de pouvoir insérer les pièces produites par SG-3DP dans la cellule de la HES, il a fallu réuser légèrement la plaque d'extrémité du côté de l'anode, là où les différents collecteurs de courant ont été testés. En effet, les trois grands trous sur la plaque permettent de fixer le connecteur électrique qui est lui-même inséré dans la plaque d'extrémité. Ils doivent donc se trouver au même endroit.






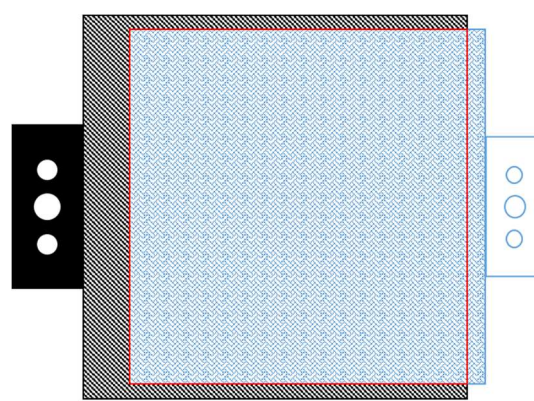
-  Surface active de collecteurs de courant SG-3DP
-  Surface active de collecteurs de courant de base
-  Zone à réuser (sur plaque d'extrémité)

figure 13 : Représentation de la surface couverte par les collecteurs de courant de tailles différentes. Fraisage nécessaire de la plaque d'extrémité côté de l'anode.






-  Zone de la membrane en contact avec le collecteur de courant SG-3DP, côté anode, 22 cm²
-  Zone de la membrane en contact avec le collecteur de courant de base, côté cathode, 25 cm²
-  Zone active de la membrane en contact avec les deux collecteurs de courant, 21.6 cm²

figure 14 : Représentation de la surface de la zone active de la membrane en fonction de la taille des collecteurs de courant. Surface active définie à 21.7 cm²

Le réusinage consiste à fraiser la plaque d'extrémité à l'endroit de la zone rouge représentée sur la figure 13. Cela représente 1 mm de largeur sur toute la longueur de la plaque d'extrémité du côté de l'anode, où les pièces SG-3DP sont testées.

Comme la surface active est plus petite pour les pièces fabriquées à l'aide de la méthode SG-3DP, cela se répercute sur le calcul de la densité de courant. Le collecteur de courant, du côté de l'anode, est directement en contact avec la membrane et c'est elle qui l'électrifie. Cela signifie que la surface active dépend de la surface du collecteur de courant si celle-ci est plus petite que celle de la membrane. De ce fait, la surface active réelle de la membrane se trouve entre 21.6 cm^2 et 22 cm^2 . La surface utilisée pour le calcul de densité de courant [A/cm^2] est de 21.7 cm^2 . Une modification de cette grandeur de $\pm 0.1 \text{ cm}^2$ représente une modification de la densité de courant de $\pm 0.46 \%$.

Modifications dues à l'épaisseur des collecteurs de courant SG-3DP

La cellule de la HES a été fabriquée afin de pouvoir y loger des collecteurs de courant d'une épaisseur de 0.5 mm. Toutefois, les pièces imprimées à l'aide de la méthode SG-3DP nécessitent une épaisseur de 1 mm pour la manipulation du corps vert, comme mentionné dans le point 2.4.1. Après frittage, l'épaisseur des différentes pièces figure entre 0.952 mm et 0.992 mm. Afin d'obtenir un serrage homogène, sans abimer la membrane, une cale a été usinée afin de laisser un espace suffisant pour les collecteurs de courant SG-3DP testés dans le boîtier côté anode.

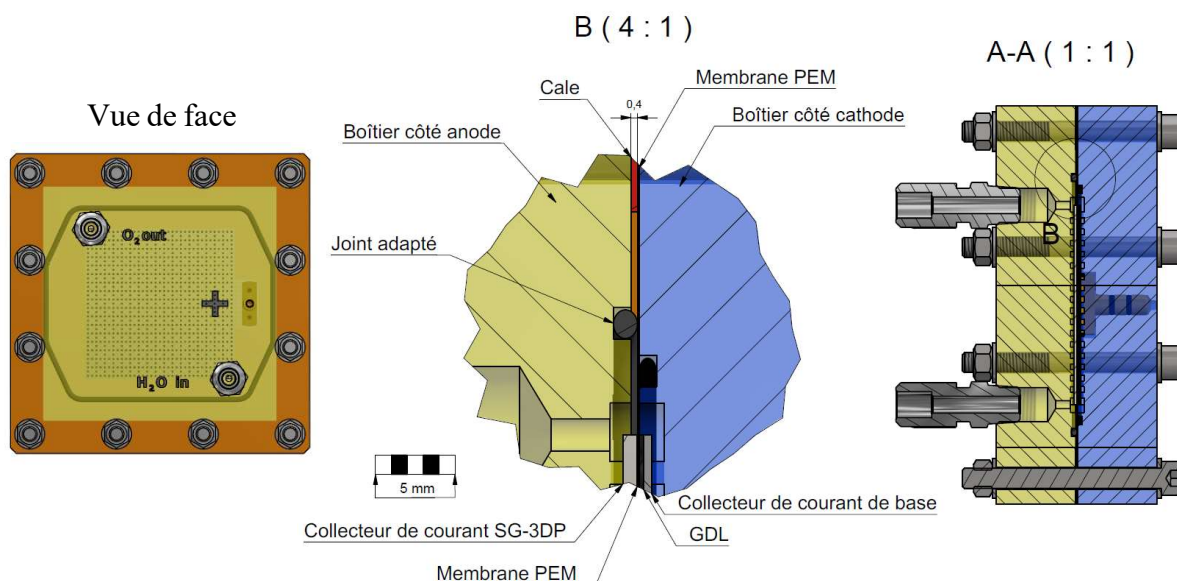


figure 15 : Vue de face et coupe vue de côté, agrandissement 4 : 1. Placement de la cale de 0.4 mm d'épaisseur (en rouge) dans la cellule HES pour le collecteur de courant SG-3DP

La cale se trouve entre le boîtier du côté anode et la membrane, où l'oxygène se forme. La cale est formée de deux parties superposées faisant chacune 0.2 mm d'épaisseur, cela signifie que la cale représentée sur le dessin fait 0.4 mm d'épaisseur et permet ainsi de créer une place de 0.9 mm pour le collecteur de courant. De ce fait, comme les collecteurs de courant sont plus épais que l'espace leur étant réservé, une compression de 0.05 mm à près de 0.1 mm des éléments de la cellule a lieu. Le joint se trouvant du côté de la cale a dû être changé afin d'éviter les fuites. Ce dernier est plus épais que le joint de base.

4.1.2. Couche GDL

La couche GDL, entre le collecteur de courant et la membrane, est placée uniquement du côté de la cathode. Cette couche comporte le même cahier des charges que les collecteurs de courant. Cependant, le GDL composé de carbone doit permettre une diffusion homogène de l'hydrogène et possède un certain taux de compressibilité.

Nom du GDL	Type	Epaisseur [μm]	Résistance à travers le plan [$\text{m}\Omega\text{cm}^2$]	Compression [%]	Porosité [%]
GDL-CT	Tissu	410	< 13	40-50	-
ELAT LT 1400 W	Tissu	454	0.17	40-50	63
Sigracet 25 BC	Papier	235	< 12	19	80
Freudenberg H2315 C2	Papier	255	10	-	-
Toray Paper TGP-H-060	Papier	190	80 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ *	-	78

tableau 4 : Caractéristiques des différentes couches GDL utilisées. *Données transmises par le fournisseur Fuel Cell Store

Les différents GDL cités dans le tableau 4 sont testés sur la cellule HES afin de pouvoir définir l'impact de l'utilisation de cette couche. Toutefois, les paramètres pouvant influencer sur la performance de la cellule sont nombreux et chacun de ces GDL est très différent des autres.

La cellule HES a été fabriquée pour l'utilisation d'un GDL « ELAT LT 1400 W » d'une épaisseur de 454 μm . C'est pourquoi, lors de l'utilisation de GDL plus fin, deux couches sont superposées une sur l'autre, afin d'obtenir une épaisseur proche de celle de la couche de base.

4.2. Electrolyseur triple-cellules

L'électrolyseur multi-cellules réalisé durant ce travail comporte trois cellules en série composées des mêmes éléments que la cellule HES. Les composants principaux sont identiques à ceux énoncés dans le point 3.2 de la page 14. Tous les dessins des pièces réalisées pour cet électrolyseur se trouvent à l'annexe 3.

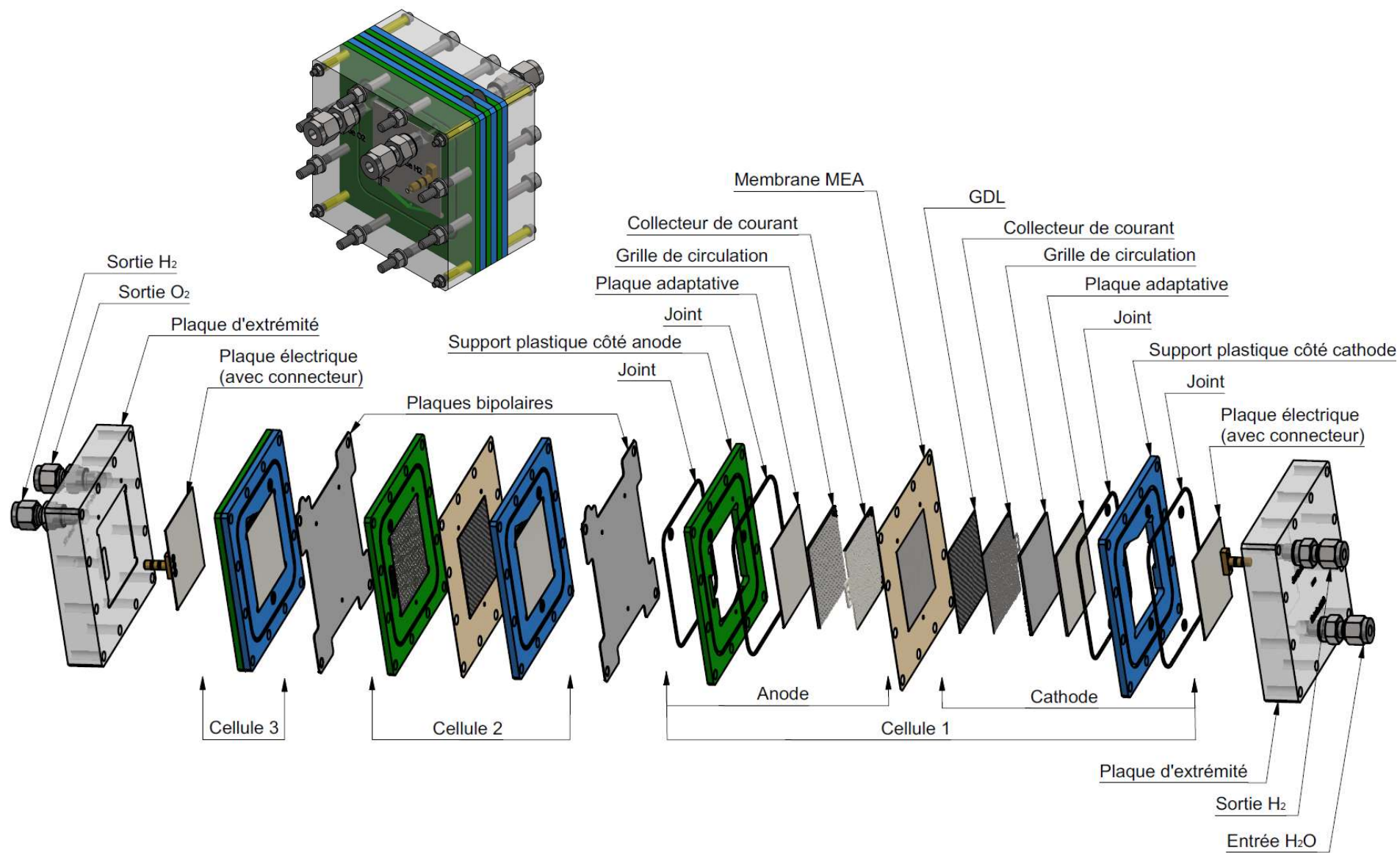


figure 16 : Schéma explosé de la triple-cellules. Visualisation de toutes les pièces et de leur emplacement dans l'électrolyseur

Cet électrolyseur possède deux types de composants, les composants modifiables ou ajustables et les composants formant la structure principale.

Les éléments modifiables et ajustables sont les collecteurs de courant, les couches GDL, ainsi que les grilles de circulation. En effet, ces trois pièces peuvent être remplacées dans l'électrolyseur par d'autres pièces d'épaisseur différente. Toutefois, pour chaque composition, il est nécessaire d'ajuster l'épaisseur des plaques adaptatives. L'épaisseur des couches GDL peut varier entre 190 μm et 410 μm , l'épaisseur des collecteurs de courant peut varier entre 0.2 mm et 1.5 mm et l'épaisseur des grilles de circulation reste la même. Néanmoins, il est possible de modifier le design et la profondeur du circuit jusqu'à 1.8 mm.

Les éléments de la structure principale sont les parties inchangeables de l'électrolyseur. Les composants concernés sont les plaques d'extrémités, les plaques électriques, les supports plastiques, les joints, les plaques bipolaires et les membranes MEA. Les éléments modifiables viennent se loger dans les supports plastiques. Du côté de l'anode, chaque support plastique accueille une plaque adaptative (si besoin), une grille de circulation et un collecteur de courant. Du côté de la cathode, chaque support plastique accueille les mêmes pièces ainsi qu'une couche GDL supplémentaire.

4.2.1. Supports plastiques

Comme expliqué auparavant, les supports plastiques font partie des éléments de la structure principale et logent, en leur centre, les plaques adaptatives, les grilles de circulation, les collecteurs de courant et les couches GDL.

Les supports plastiques se trouvant du côté de l'hydrogène sont différents de ceux du côté de l'oxygène, comme le montrent la figure 17 et la figure 18. Premièrement, l'épaisseur est légèrement différente, à cause de la couche GDL du côté de l'hydrogène uniquement. Ensuite, le passage de l'eau en direction de la surface active de la membrane doit avoir lieu uniquement du côté de l'oxygène.

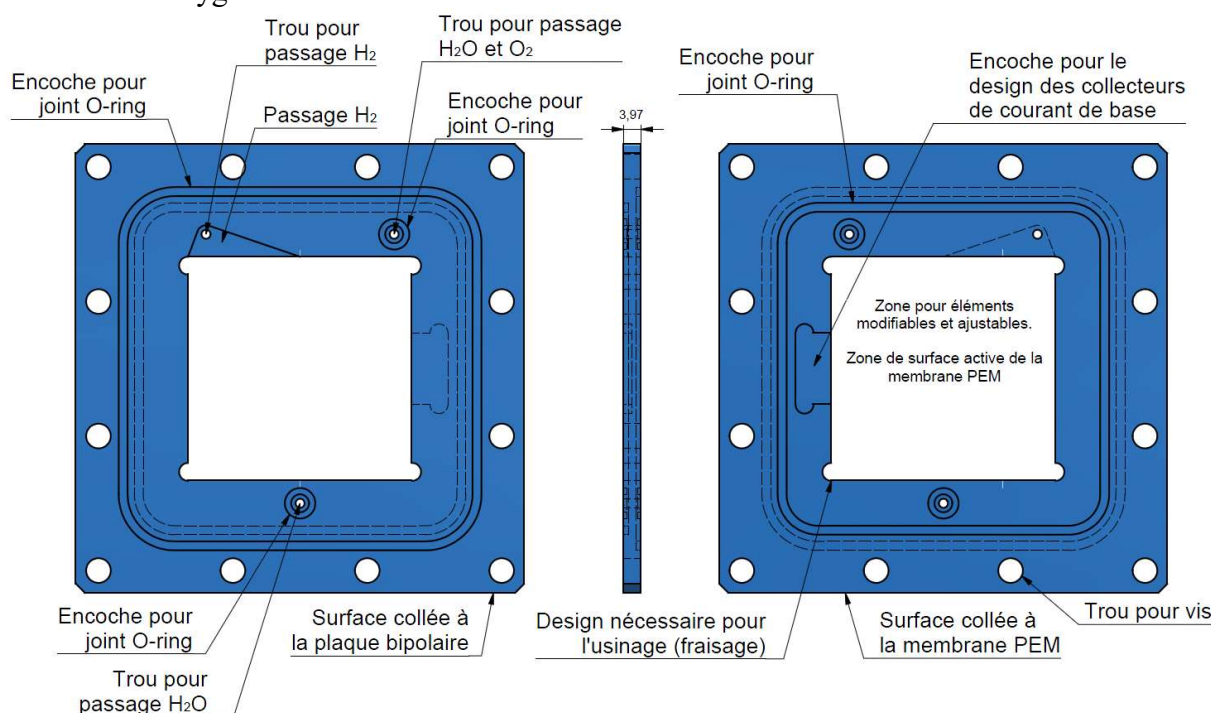


figure 17 : Design du support plastique côté H2 et fonctions des différentes parties usinées

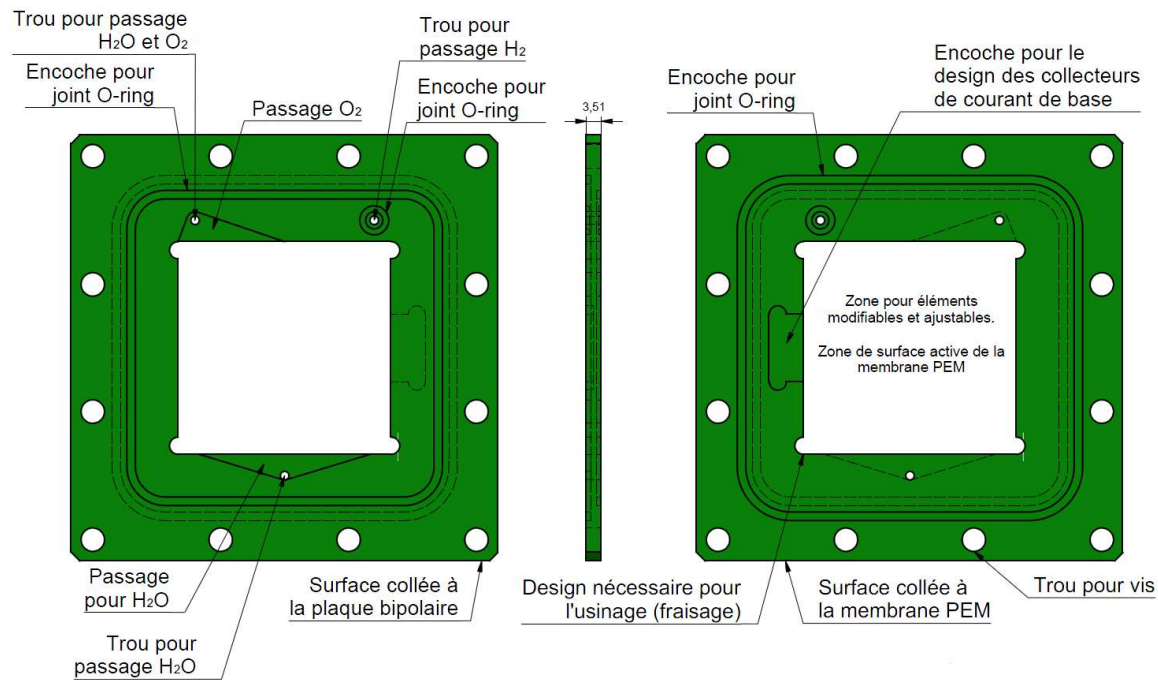


figure 18 : Design du support plastique côté O2 et fonctions des différentes parties usinées

4.2.2. Plaque bipolaire

La plaque bipolaire est un élément important pour la mise en série des cellules d'électrolyseur PEM. En effet, cette dernière est placée entre deux cellules et doit permettre le passage des gaz, sans les mélanger, afin de les amener vers leur connecteur de sortie. Comme mentionné au point 3.2 de la page 14, cette plaque doit permettre le passage du courant d'une cellule à l'autre. De plus elle est en contact avec l'eau déminéralisée, l'oxygène et l'hydrogène, ce qui nécessite qu'elle soit confectionnée à l'aide d'un matériau conducteur d'électricité et très résistant à l'oxydation, comme le titane.

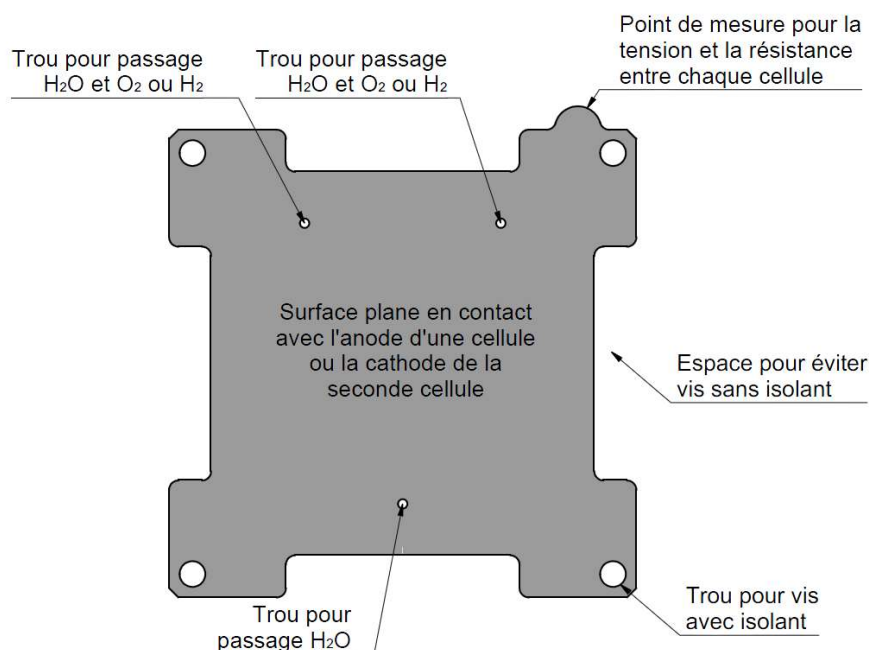


figure 19 : Design de la plaque bipolaire en titane et fonctions des différentes parties usinées

La plaque bipolaire ci-dessus est découpée dans une plaque de titane de 0.5 mm d'épais. Il est possible de tourner la pièce dans le sens qu'on veut lors du montage, tant que les trous de passage des gaz et de l'eau soient placés correctement. Les vis passant par les trous des quatre coins de l'électrolyseur permettent de placer correctement les pièces lors du montage. Ces vis sont des M3 et sont insérées dans un tube plastique afin d'éviter un transfert direct d'énergie électrique. L'espace découpé sur la plaque permet d'éviter les huit autres vis M5 permettant le serrage des pièces à la fin du montage.

4.2.3. Grille de circulation

La grille de circulation permet le passage de l'eau et des gaz sur toute la surface active de la membrane. La grille de circulation de l'électrolyseur triple-cellules est une pièce à part entière, contrairement à celle de la cellule HES. Il s'agit d'une plaque en titane de 2 mm d'épaisseur, fraisée à une profondeur de 0.8 mm.

Plusieurs designs peuvent être fraisés sur les plaques et à des profondeurs différentes afin de pouvoir mesurer l'influence de ces paramètres.

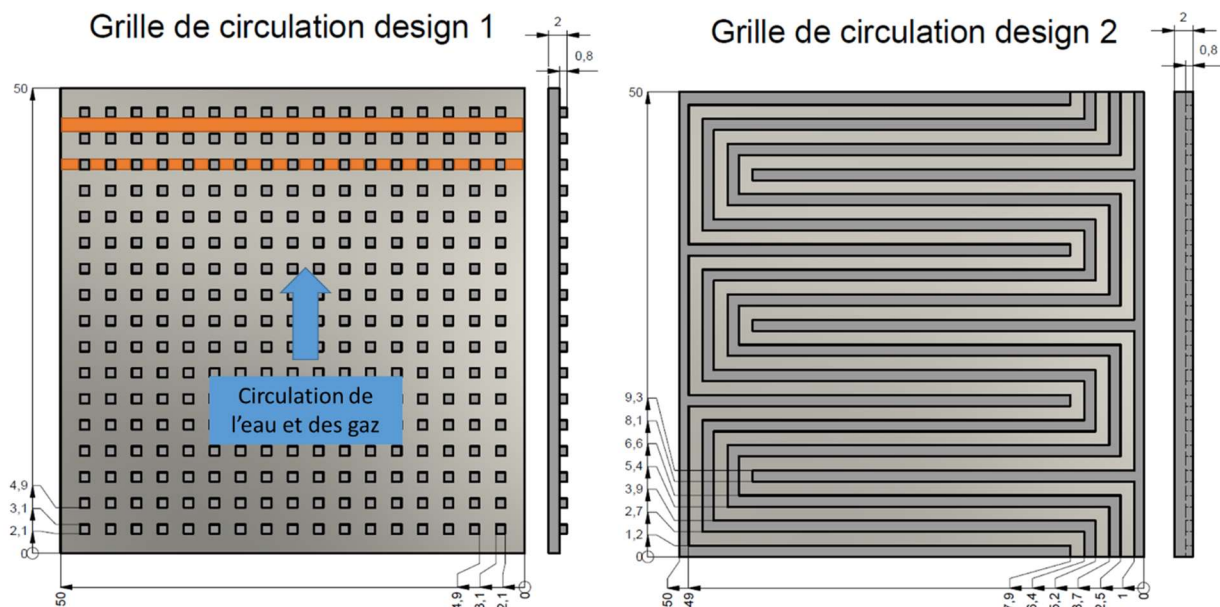


figure 20 : Designs utilisables pour grille de circulation. Sens de circulation de l'eau (bleu) et des différentes largeurs de section pour le calcul du rayon hydraulique équivalent (orange)

La figure ci-dessus représente deux designs potentiels pour la circulation de l'eau et des gaz dans le système de l'électrolyseur. Durant ce travail, seul le design 1 a été usiné et utilisé. Les designs des grilles de circulation peuvent modifier l'homogénéisation de la distribution des gaz et de l'eau ainsi que la résistance hydraulique du circuit. Cette résistance hydraulique peut être calculée grâce à l'équation suivante :

$$R \left[Pa \frac{s}{m^3} \right] = \frac{8 * \eta [Pa s] * l [m]}{\pi * r_h [m]^4}$$

équation 4 : Equation de Poiseuille, résistance hydraulique [15]

- R : résistance hydraulique
- η : viscosité dynamique de l'eau ($1.003 \cdot 10^{-3}$ [Pa s] à 20°C) [16]
- l : longueur de la conduite
- r_h : rayon hydraulique de la conduite

Si la conduite possède une section rectangulaire, le rayon hydraulique peut être calculé ainsi :

$$r_h [m] = \frac{b [m] * h [m]}{b [m] + 2h [m]}$$

équation 5 : Rayon hydraulique équivalent pour une conduite rectangulaire [17]

- b : base de la section
- h : hauteur de la section

Les valeurs obtenues pour les deux designs sont les suivantes :

- Design 1
 - L'eau et les gaz circulent sur les surfaces oranges dessinées sur la figure 20, c'est-à-dire que la base de la section n'est pas égale sur toute la plaque et peut être estimée ainsi : $b = 50 * \frac{1.8}{2.8} + (50 - 17) * \frac{1}{2.8} \cong 44 \text{ mm}$
 - La hauteur de la section correspond à la profondeur du fraisage, c'est-à-dire 0.8 mm. Ces valeurs donnent un rayon hydraulique de 0.77 mm, selon l'équation 5.
 - L'eau doit parcourir le circuit sur toute sa longueur, soit $l = 50 \text{ mm}$. La résistance de ce circuit se monte à $3.6 * 10^8 \text{ Pa s/m}^3$, selon l'équation 4.
- Design 2
 - L'eau circule dans les trois conduits fraisés de 1.5 mm d'épaisseur et 0.8 mm de hauteur, ce qui correspond à un rayon hydraulique de 59 mm.
 - Le circuit possède une longueur $l = 300 \text{ mm}$, ce qui donne une résistance de $6.3 * 10^9 \text{ Pa s/m}^3$ pour ce circuit.

Les équations utilisées ci-dessus permettent une approximation de la résistance hydraulique par simplification du système. Toutefois, le second design possède une résistance près de vingt fois plus élevée que le premier, ce qui demande plus d'énergie pour le passage d'un même débit d'eau.

4.2.4. Connecteurs d'entrée et de sortie

Les entrées et sorties ont été placées tel que représenté sur le schéma explosé de la figure 16 afin de faciliter la circulation des gaz jusqu'aux connecteurs de sortie, tout en homogénéisant le débit dans les trois cellules de l'électrolyseur.

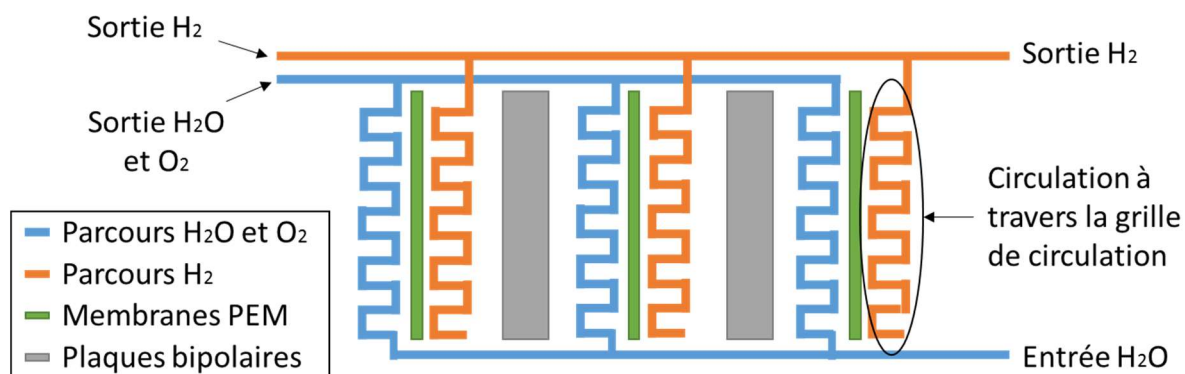


figure 21 : Représentation 2D de la circulation de l'eau et des gaz à travers l'électrolyseur triple-cellules en évitant tout mélange de gaz. L'entrée et la sortie du circuit d'eau sont opposées, afin d'homogénéiser la circulation dans les trois cellules. Deux sorties pour le circuit H₂ évitent les différences de pression dans les cellules

La figure ci-dessus représente le parcours effectué par l'eau, l'oxygène et l'hydrogène à travers les trois cellules de l'électrolyseur. Tous ces éléments doivent passer à travers les membranes PEM ainsi que les plaques bipolaires, sans mélange entre les gaz.

L'oxygène se forme dans le circuit de l'eau, à travers la grille de circulation, car c'est à cet endroit que l'eau est en contact avec la membrane PEM et que l'électrolyse à lieu. L'eau doit forcément passer par une grille de circulation avant de pouvoir sortir de l'électrolyseur.

L'hydrogène se forme dans la même zone que l'oxygène, cependant l'hydrogène passe à travers la membrane PEM. Le circuit d'hydrogène possède deux sorties, une de chaque côté de l'électrolyseur, afin d'homogénéiser la pression et éviter des pressions plus importantes dans une des cellules.

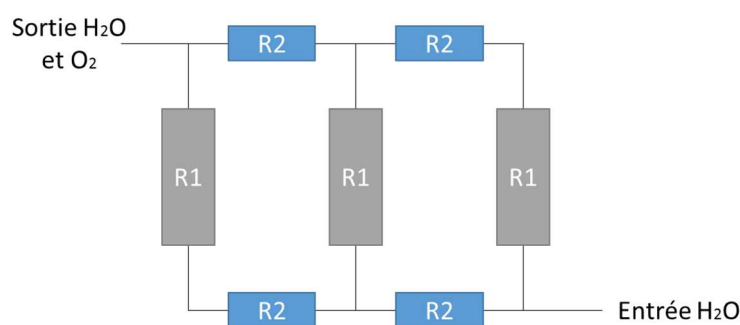


figure 22 Résistance hydraulique à travers le circuit de dans l'électrolyseur triple-cellules schématisé

Les résistances « R1 » représentées sur la figure 22 correspondent au passage de l'eau à travers les grilles de circulation. Les résistances « R2 », correspondent au passage à travers les trous des plaques bipolaires, des membranes PEM et des supports plastiques. Toutes les résistances possédant le même nom sont considérées comme égales, étant donné que toutes les cellules et les pièces les composant ont été usinées et disposées de la même manière.

La résistance « R1 » est déjà calculée au point 4.2.3 et se monte à $3.6 \cdot 10^8 \text{ Pa s/m}^3$. Concernant la résistance « R2 », cette dernière peut être calculée à l'aide de l'équation 4 de la page 24. Il s'agit de faire passer l'eau à travers les trous de passage de 2 mm sur une longueur d'environ 5 mm. Ces paramètres donnent un résultat pour la résistance « R2 » de $1.3 \cdot 10^7 \text{ Pa s/m}^3$, soit près de 30 fois plus petit que la résistance « R1 ».

Ces calculs de résistance hydraulique sont approximatifs et négligent la formation et la circulation de dioxygène (gaz) durant le passage à travers les grilles de circulation. Ces résultats donnent malgré tout un ordre de grandeur de ces résistances et ont permis de définir l'emplacement de la sortie de l'eau et du dioxygène.

4.2.5. *Autres composants*

Les connecteurs électriques sont similaires à ceux de la cellule HES, il s'agit de pièces usinées en laiton et vissées, chacune sur une plaque électrique en titane, ce qui permet de transmettre le courant sur toute la surface active de la cellule.

Les collecteurs de courant utilisés pour la première composition de l'électrolyseur triple-cellules sont commandés chez Fuel Cell Store (article n° 592787). Ces pièces sont fabriquées en titane fritté et font 1.5 mm d'épaisseur. Ces collecteurs sont choisis, car le nombre de pièces fabriquées à l'aide d'impression 3D et le temps de fabrication sont limitants et ne permettent pas la production de six collecteurs de courant supplémentaires.

La couche GDL choisie pour les premiers tests est la Toray Paper TGP-H-060, mentionnée dans le tableau 4 et testée durant ce travail sur la cellule de la HES.

La membrane MEA utilisée dans la triple-cellules est la même que celle utilisée dans la cellule HES. Il s'agit d'une membrane en Nafion 115, avec des catalyseurs en platine et en iridium, commandée chez Fuel Cell Store (article 1141003).

Les plaques adaptatives sont de simples plaques en titane avec une épaisseur entre 0.05 mm et 0.2 mm. Elles sont superposées afin d'obtenir l'épaisseur voulue en fonction des composants intégrés à l'électrolyseur.

5. Résultats

5.1. Etat des matériaux

5.1.1. Collecteurs de courant

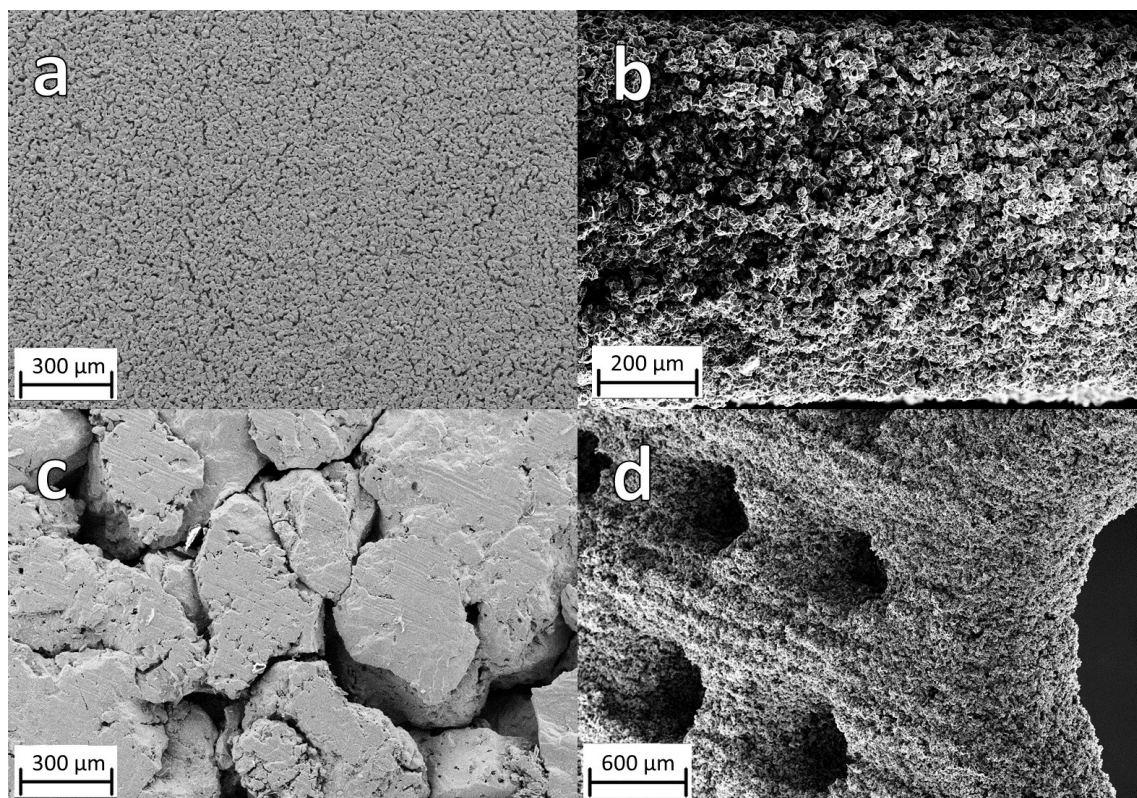


figure 23 : Collecteurs de courant au MEB. Comparaison de la taille des pores, des grains et de l'état de surface. a) Tape Casting, surface plane avec grains fins et peu de porosité. b) SG-3DP vue de côté, surface en relief et petite taille de pore. c) Titan frit, utilisé dans l'électrolyseur triple-cellules, grains larges de 300μm, peu poreux mais grande taille de pore. d) SG-3DP trouée, surface en relief, affaissement au niveau de la ligne des trous

La pièce en tape casting possède la surface la plus lisse des trois différents collecteurs de courant. Cela est dû à la taille des grains utilisé lors de l'impression de la plaque. Cette plaque paraît dense et la taille des pores très petite. La pièce Titan frit est le collecteur de courant choisi pour intégrer l'électrolyseur triple-cellules. Il est composé de très grands grains de plus de 300 μm, la porosité en surface est faible, mais possède une grande taille de pore. La pièce en SG-3DP est fabriquée à l'aide de granules qui offrent une taille de porosité légèrement plus grande que la plaque en tape casting. Cependant la surface n'est pas plane et possède quelques reliefs, comme le montre la dernière image de la figure 23. Des lignes creuses sont formées au niveau des trous et dans le sens de l'impression. Ces lignes peuvent provenir du dosage de solvant diminué vers les trous.

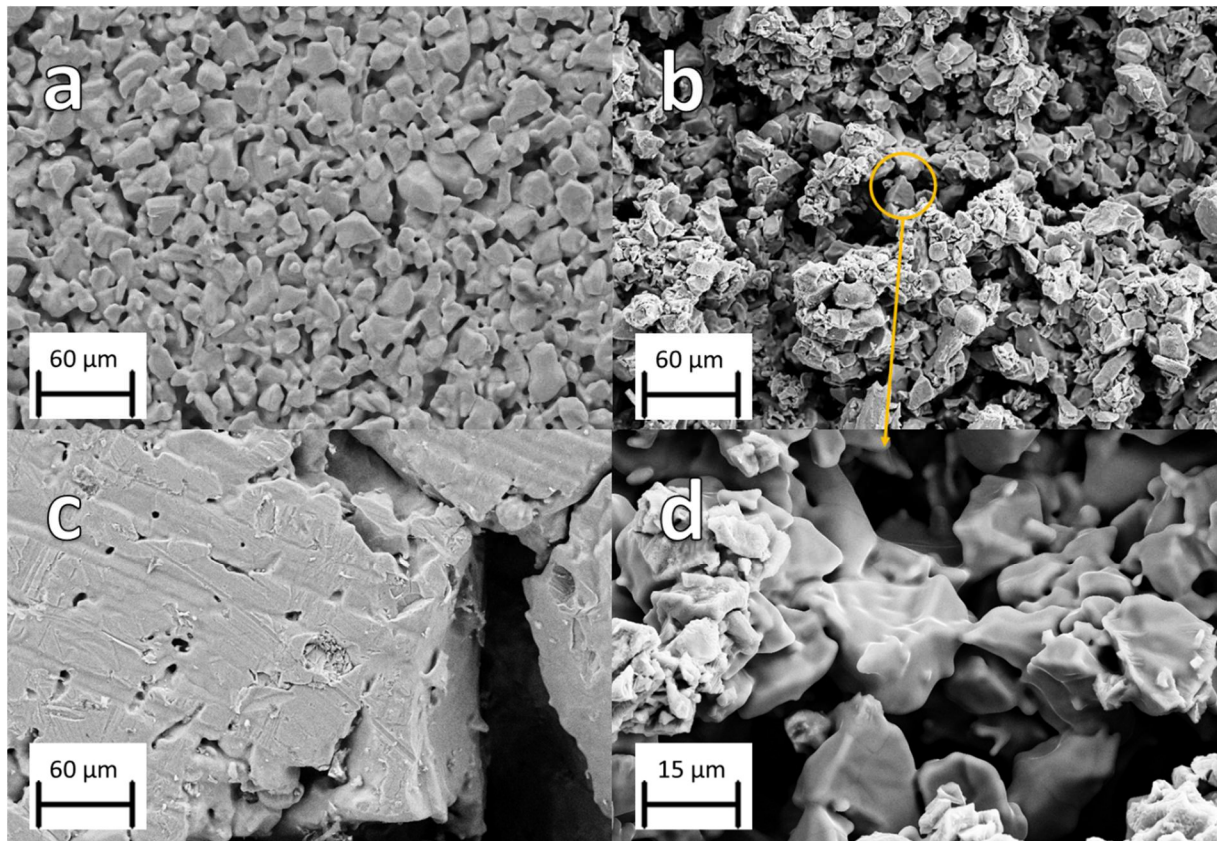


figure 24 : Collecteurs de courant au MEB. Comparaison de la taille des pores et des grains. a) Tape Casting, grains de $20\mu\text{m}$ et taille de pore de $10\mu\text{m}$. b) SG-3DP, grains formant des amas irréguliers, pores de $40\mu\text{m}$. c) Titan frit, surface des grains plane et pores de $200\mu\text{m}$. d) SG-3DP, agrandissement, observation des joints de grain et de l'irrégularité de la surface.

La figure 24 correspond à un agrandissement des images de la figure 23. Cela permet de comparer plus précisément la taille des grains et celle des pores en surface. La pièce Titan frit possède des grains imposants et lisses en surface, mais également des pores de plus de $200\mu\text{m}$. La pièce en tape casting possède des grains très fins de $20\mu\text{m}$, ce qui permet d'obtenir une densité assez élevée et une taille de pores très petite, de l'ordre de $10\mu\text{m}$. La pièce SG-3DP possède la surface la plus irrégulière, avec des pores de $40\mu\text{m}$.

À l'exception des trous dessinés dans le design de certaines pièces SG-3DP, il n'est pas possible de repérer au microscope électronique quelles sont les porosités traversantes et leur taille. Cependant, il s'agit de porosités traversantes qui permettent le transfert d'eau et de gaz à travers le collecteur de courant.

Une étude plus approfondie doit être faite afin d'estimer quelles caractéristiques permettent d'obtenir le collecteur de courant idéal. En effet, l'épaisseur, la taille des grains et la taille des pores jouent un rôle pour le transfert de l'eau et des gaz, mais également pour la résistivité [$\text{m}\Omega\text{cm}$]. Les résultats obtenus dépendent de la densité de courant fournie et de la pression du liquide et des gaz. [18]

5.1.2. Couche GDL

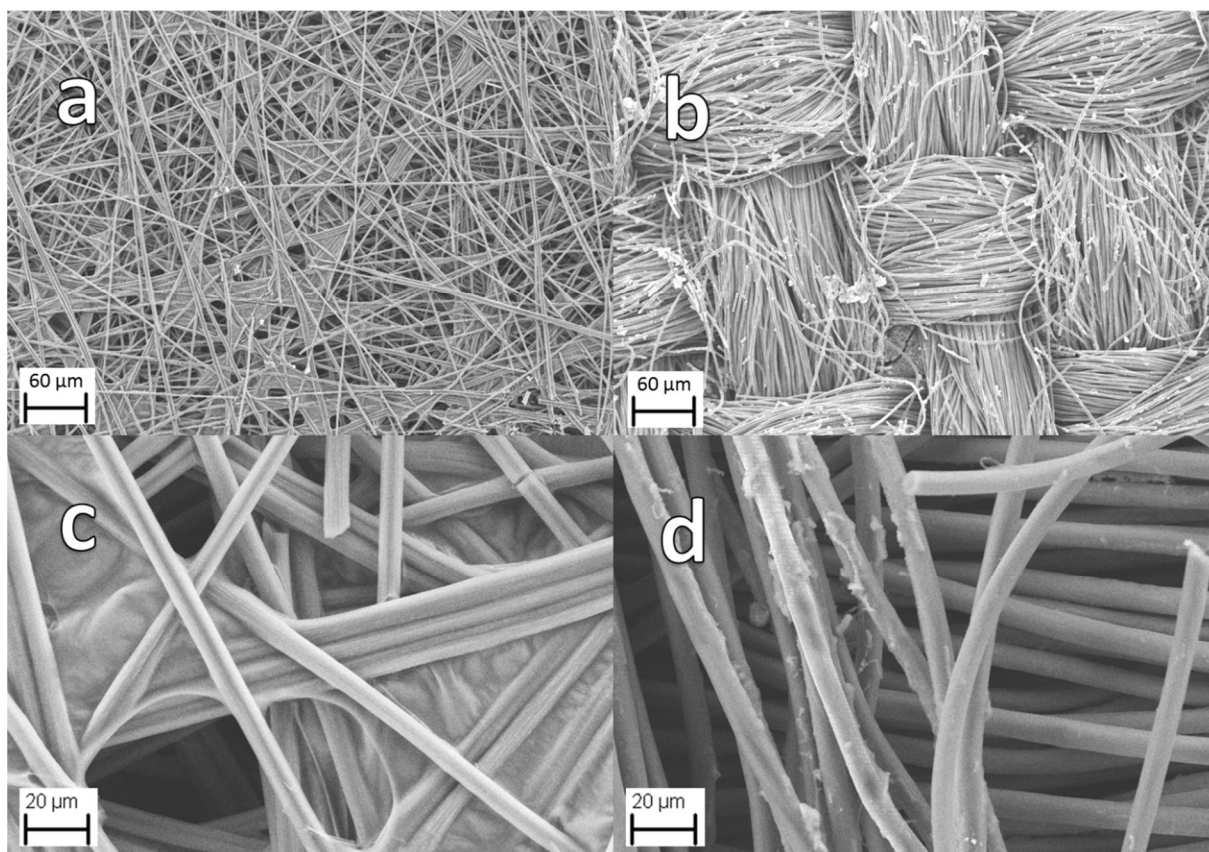


Figure 25 : Couches GDL au MEB. Comparaison de la taille de la structure et des pores. a) Toray Paper TGP-H-060, filaments de carbone droits et croisés entre eux. b) ELAT LT 1400 W, tissu tressé. c) Agrandissement de l'image a, pores de 40μm non-traversants. d) Agrandissement de l'image b, pores de 20μm non-traversants

Les images des couches GDL obtenues au MEB permettent d'identifier les différences de structure et de porosité des matériaux. Le GDL Toray Paper est un papier peu flexible, il est constitué de filaments droits, rigides et entremêlés. Le GDL ELAT est un tissu malléable et possède des fils de carbone souples et tressés.

La surface du GDL Toray est plus plane et possède de nombreuses porosités d'un diamètre entre 20 μm et 40 μm qui ne traversent pas directement toute la couche. Le GDL ELAT a une surface plus bosselée due au tressage et des pores difficiles à définir. Il s'agit d'espaces peu profonds, entre les fils de carbone, d'une largeur de 20 μm. La couche GDL se trouve du côté de la cathode de l'électrolyseur, ce qui signifie que le GDL doit permettre uniquement le passage de l'hydrogène.

5.2. Performances de la mono-cellule HES

Les performances de la cellule HES sont mesurées pour chaque changement de ses composants. Toutes les valeurs mesurées sont similaires et permettent une comparaison des résultats entre les différentes combinaisons, afin de vérifier lesquelles améliorent les performances de la cellule et lesquelles les altèrent. Les deux courbes permettant l'évaluation de la cellule sont la courbe I-V et la courbe de rendement en fonction de la tension appliquée.

5.2.1. Dégradation de la membrane PEM

La membrane a été mesurée à de multiples reprises, au cours du travail, avec les composants de base (collecteur de courant usiné et GDL « ELAT LT 1400 W »), afin d'évaluer sa dégradation durant les différents tests. L'état de la membrane affecte directement les performances de la cellule et donc les résultats obtenus des différentes mesures.

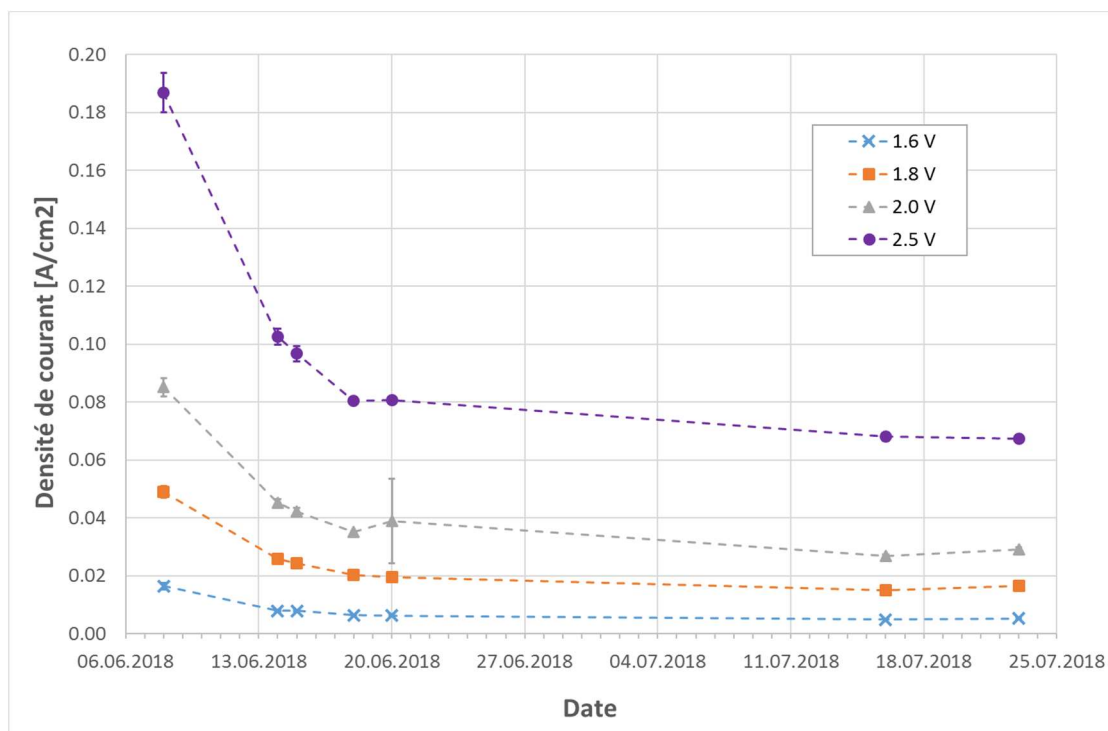


figure 26 : Dégradation non-linéaire des performances de la membrane durant le travail. Utilisation d'une même configuration pour chaque valeur relevée, sur le même banc de test. Aucune mesure de température effectuée lors des tests. L'état de la membrane influe directement sur les résultats de la cellule avec les différentes configurations

La détérioration de la membrane est très importante durant les premiers jours, lors des premières expériences. Après une dizaine de jours, la densité de courant mesurée affiche une perte de performance de plus de 50% pour toutes les tensions. Ensuite, les performances continuent de baisser, mais la dégradation ralentit.

Cette dégradation influence directement les performances de la cellule, c'est pourquoi l'état de la membrane est pris en compte lors de l'analyse des résultats. La détérioration de la membrane provient de différentes sources de contamination :

- Etat de propreté des composants insérés dans la cellule (GDL, collecteurs de courant)
- Dépôt d'impuretés lors de l'ouverture de la cellule
- Réutilisation de la même eau déminéralisée

Cette dégradation ne permet pas de reproduire exactement les résultats obtenus. Il est donc nécessaire d'y pallier si des résultats plus précis doivent être obtenus. De ce fait, les différents procédés doivent être modifiés :

- Zone de travail et outils utilisés stériles
- Nettoyage de toutes les pièces juste avant l'insertion dans la cellule, à l'aide d'alcool, d'eau déminéralisée et de bain d'ultrason
- Utilisation d'habits évitant une contamination de la membrane (gants, masque, ...)
- Rinçage de la membrane dans l'eau déminéralisée à chaque ouverture
- Changement régulier de l'eau déminéralisée

5.2.2. Différentes couches GDL

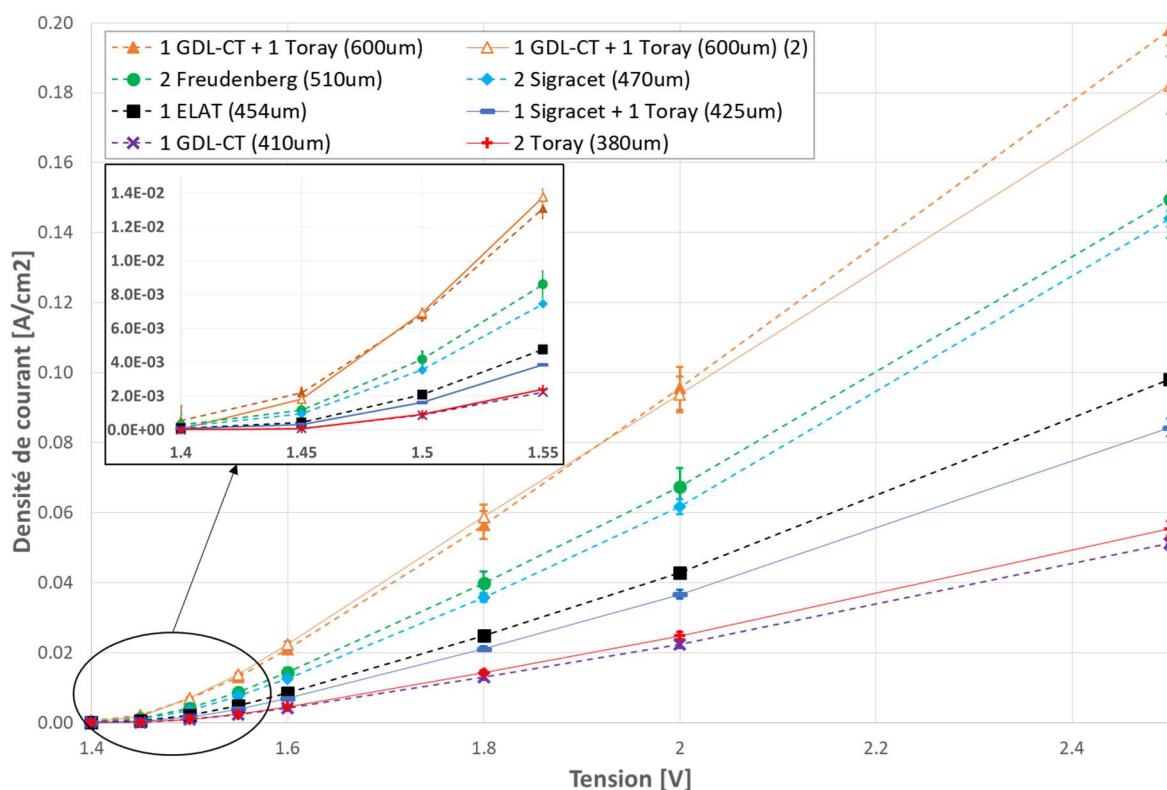


figure 27 : Courbe I-V des différentes mesures effectuées sur la cellule HES avec différentes couches GDL. Chaque couche GDL possède des caractéristiques, mais la plus influente semble être son épaisseur

Les courbes en pointillé correspondent aux mesures effectuées le 20 et le 21 juin 2018, les autres courbes se réfèrent à des mesures du 17 et 18 juillet 2018. De ce fait, différents paramètres peuvent influencer les résultats, comme l'état de la membrane mentionné précédemment ou la température de l'air et de l'eau utilisée. En effet, les performances d'un électrolyseur dépendent, entre autre, de la température du système lors de l'utilisation [19]. Malheureusement, durant cette partie du travail, les températures de l'air et de l'eau n'ont pas été relevées.

Différentes couches GDL ont été combinées, superposées afin d'évaluer l'influence de chacune d'entre elles. Cependant, la majorité des courbes montrent que la densité de courant augmente dès 1.45 V en fonction de l'épaisseur de la couche GDL. Seul la courbe rouge « 2 Toray (380µm) » et la courbe violette « 1 GDL-CT (410µm) » vont à l'encontre de cette hypothèse. Il est possible que la différence de température due au décalage temporel des mesures, puisse augmenter les résultats de la courbe rouge. La courbe violette a été mesurée le 21.06, entre 9h30 et 10h30 et la courbe rouge, le 17.07 entre 15h et 16h, durant une période plus chaude de l'année et de la journée.

La courbe « 1 GDL-CT + 1 Toray (600µm) » a été effectuée à deux reprises, afin de vérifier la reproductibilité des mesures. Les deux courbes obtenues restent très proches jusqu'à 2 V de tension, puis l'écart s'agrandit à 2.5 V.

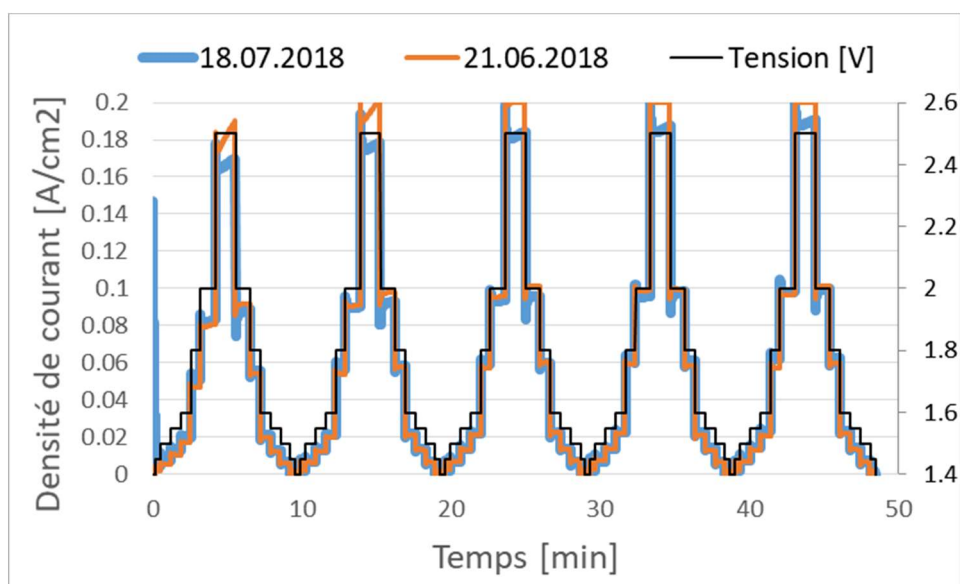


figure 28 : Mesures de la cellule avec une couche GDL composée d'un GDL-CT et d'un Toray, pour une épaisseur de $600\mu\text{m}$, à deux dates différentes. Comparaison des deux performances durant toute la durée de la prise de mesure. Performances similaires jusqu'à $1,8\text{V}$, puis performance du 18.07 plus faible

La raison de l'écart plus important entre les deux courbes provient du temps de stabilisation de la cellule. En effet, lorsque la membrane se dégrade, plus la tension est haute, plus le temps de stabilisation est long et plus les performances régressent. De ce fait, la cellule du 21.06.2018 (orange) arrive à saturation de courant, soit $0.2\text{ [A/cm}^2\text{]}$ pour une surface active de 25 cm^2 après 15 minutes de fonctionnement, tandis que la seconde courbe (bleue) n'y arrive pas après 50 minutes. Cependant, les valeurs de densité de courant obtenues pour les valeurs de tension plus basses restent très proches tout au long de la prise de mesure.

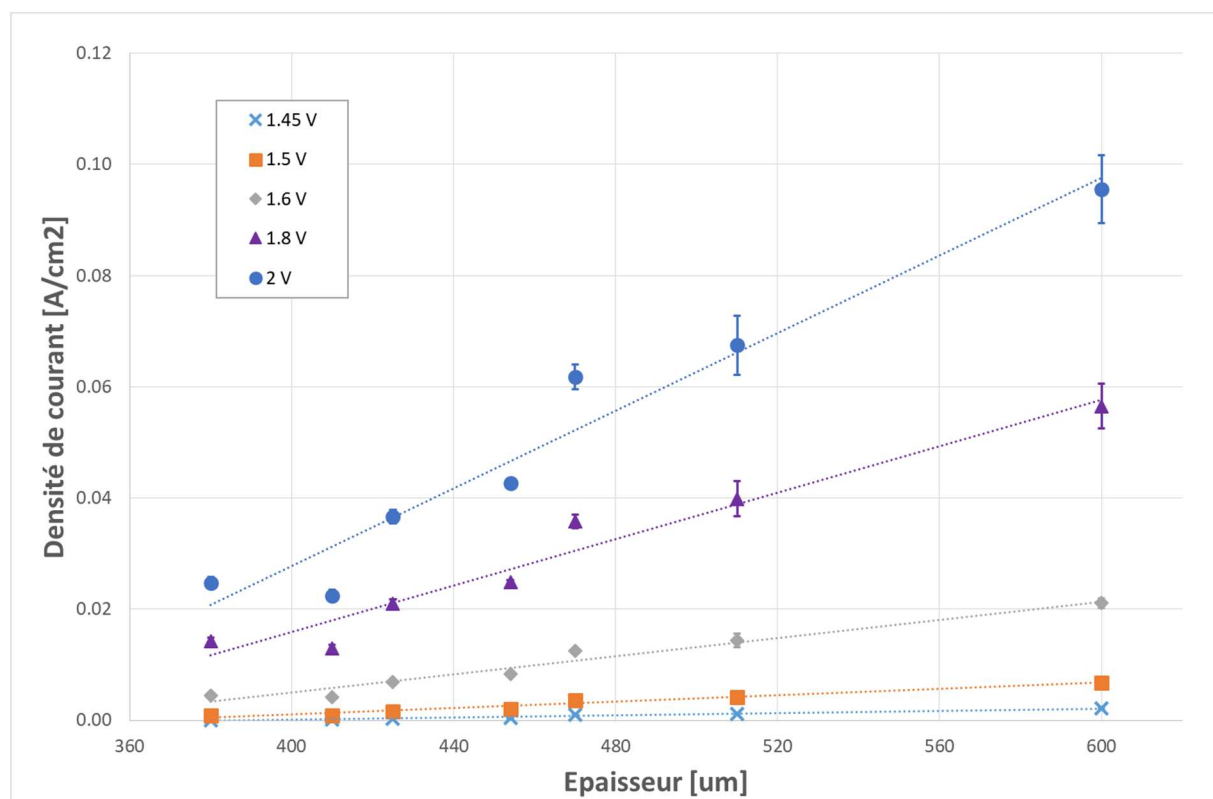


figure 29 : Influence de l'épaisseur de la couche GDL sur la densité de courant, à différentes tensions. Tendance d'augmentation de la densité de courant en fonction de l'épaisseur de la couche GDL

La courbe de tendance montre une augmentation linéaire de la densité de courant en fonction de l'épaisseur de la couche GDL. Certains points vont à l'encontre de cette tendance générale, ce phénomène peut provenir des modifications des performances dues aux autres caractéristiques des couches GDL, à l'état de la membrane ou à la température de fonctionnement. Il n'est pas possible de définir quelle en est la cause uniquement avec ces mesures.

Concernant l'augmentation de l'épaisseur de la couche GDL, elle amène une compression des éléments à l'intérieur de la cellule, ce qui améliore le contact entre les différents composants et facilite le passage d'énergie électrique à travers les multiples couches de la cellule. Toutefois, cette hypothèse nécessite d'autres expériences pour être confirmée.

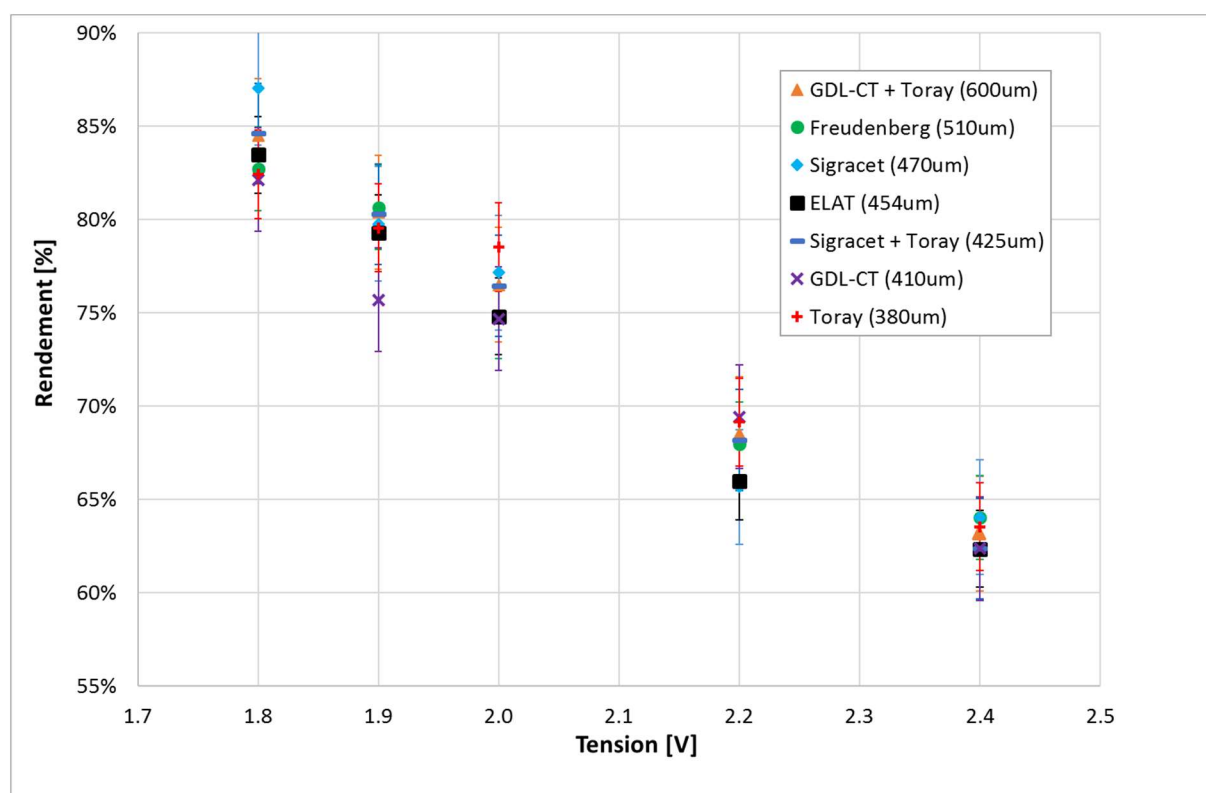


figure 30 : Rendement de la cellule HES pour chaque épaisseur de GDL. Aucune différence notable de rendement entre les multiples configurations

La courbe de rendement de chacune des configurations est comparée aux autres sur ce graphique ci-dessus. En tenant compte de la barre d'erreur, toutes les courbes sont égales, ce qui signifie que la couche GDL n'a aucune influence sur le rendement de la cellule. La tendance générale est une baisse de rendement en fonction de la tension. Le rendement obtenu pour une tension de 1.8 V est proche de 83 %, alors qu'à 2.4 V le rendement n'est plus que de 63 %.

5.2.3. Différents collecteurs de courant

L'utilisation de l'impression 3D n'a pas permis d'obtenir des pièces à coût réduit. Comme il s'agit de premiers tests à l'aide de l'impression de titane par SG-3DP, la mise en place, l'impression et le traitement de la pièce a pris beaucoup de temps. Toutefois, les pièces imprimées permettent de définir si ce genre de fabrication est utilisable pour les pièces d'un électrolyseur PEM.

Les différents collecteurs de courant testés et comparés sont mentionnés et caractérisés dans le tableau 3 de la page 17. Le tableau ci-dessous permet de répéter certaines données et en ajouter d'autres afin de mieux comprendre les courbes obtenues sur la figure 31.

<i>Nomenclature</i>	<i>Design</i>	<i>Epaisseur du collecteur [mm]</i>	<i>Epaisseur de la cale utilisée [mm]</i>	<i>Surépaisseur [mm]</i>
<i>Pièce de base</i>	Trouée	0.50	-	0.00
<i>Tape Casting</i>	Pleine	0.41	-	-0.09
<i>SG-P1</i>	Pleine	0.99	0.40	0.09
<i>SG-P2</i>	Pleine	0.99	0.40	0.09
<i>SG-T1-0.4</i>	Trouée	0.99	0.40	0.09
<i>SG-T1-0.2</i>	Trouée	0.99	0.20	0.29
<i>SG-T1-0.0</i>	Trouée	0.99	-	0.49
<i>SG-T2</i>	Trouée	0.95	0.40	0.05

tableau 5 : Différents collecteurs de courant, leur design et leur épaisseur. Utilisation de cales de différentes épaisseurs, ce qui modifie la surépaisseur des collecteurs de courant et la compression des composants de la cellule

La cellule de la HES a été confectionnée pour utiliser des collecteurs de courant d'une épaisseur de 0.5 mm. La pièce en Tape Casting, plus fine, obtient une surépaisseur négative, c'est-à-dire qu'elle ne crée théoriquement aucun contact avec la membrane. Les pièces SG sont plus épaisses que la pièce de base et nécessitent le placement d'une cale afin de former une place suffisante au collecteur de courant sans trop comprimer les composants. Néanmoins, une surépaisseur entre 0.05 mm et 0.09 mm a lieu lors de l'utilisation d'une cale de 0.40 mm d'épaisseur. La pièce SG-T1 est testée avec différentes épaisseurs de cale, ce qui influe sur la surépaisseur et donc sur la compression des composants à l'intérieur de la cellule d'électrolyse.

Les pièces « pleines » ne possèdent pas de trous afin de visualiser si la porosité du matériau est suffisante pour le passage de l'eau et des gaz. Durant l'expérience, les plaques d'extrémités transparentes de la cellule HES permettent d'observer où passent les bulles de gaz. Pour les pièces « trouées », les bulles de gaz passent par tous les trous dessinés ou usinés sur la pièce. Au contraire, pour les pièces « pleines », aucune bulle de gaz ne s'échappe du collecteur de courant, mais tout le gaz passe par les extrémités de la plaque. De ce fait, la taille des pores peut être considérée comme insuffisamment grande pour les collecteurs de courant en tape casting, mais également en SG-3DP.

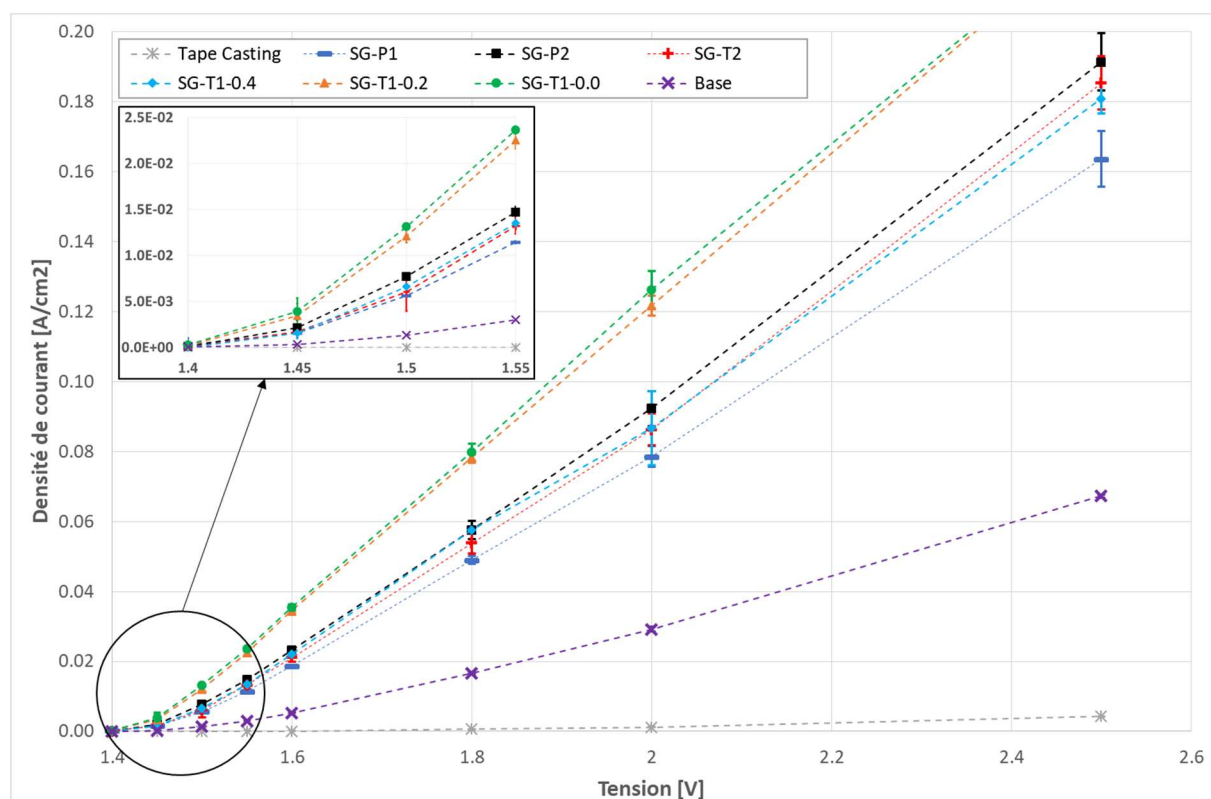


figure 31 : Courbe I-V des différentes mesures effectuées sur la cellule HES avec différents collecteurs de courant. Comparaison des différentes compositions avec la composition de base (violet). Plus les éléments sont comprimés, plus la densité de courant augmente pour une même tension, jusqu'à une saturation de cet effet

Les performances de la cellule avec le collecteur de courant de base correspondent à la courbe violette, avec près de 0.07 A/cm^2 à 2.5 V . Lorsque le collecteur de courant de base est remplacé par la pièce Tape Casting, les résultats obtenus sont nettement moins bons, avec une densité de courant toujours à zéro pour 1.55 V et ne dépassant pas 0.01 A/cm^2 à 2.5 V . Les faibles valeurs obtenues avec la pièce Tape Casting proviennent du mauvais contact entre les différentes pièces dû à une épaisseur de pièce non suffisante, ce qui a pour effet une transmission du courant électrique plus difficile.

Les quatre collecteurs de courant testés avec une cale de 0.4 mm d'épaisseur possèdent une densité de courant jusqu'à cinq fois plus élevée que la cellule de base à 1.5 V . Les quatre pièces possèdent des performances similaires. Seule la pièce SG_PP1 est moins efficace d'environ 10%. Cette différence peut provenir de la température du système lors des tests. En effet, toutes les courbes de la figure 31 sont dessinées avec des mesures effectuées entre le 19 et le 23 juillet. De ce fait l'état de la membrane ne varie pas beaucoup, contrairement aux températures à l'intérieur du labo durant une journée.

Afin de vérifier l'influence de la compression des composants de la cellule, la pièce SG-T1 est testée avec des épaisseurs de cale différentes. La pièce SG-T1-0.2 obtient une densité de courant jusqu'à 9 fois plus importante que la cellule de base pour 1.5 V et la pièce SG-T1-0.0 jusqu'à 10 fois plus importante.

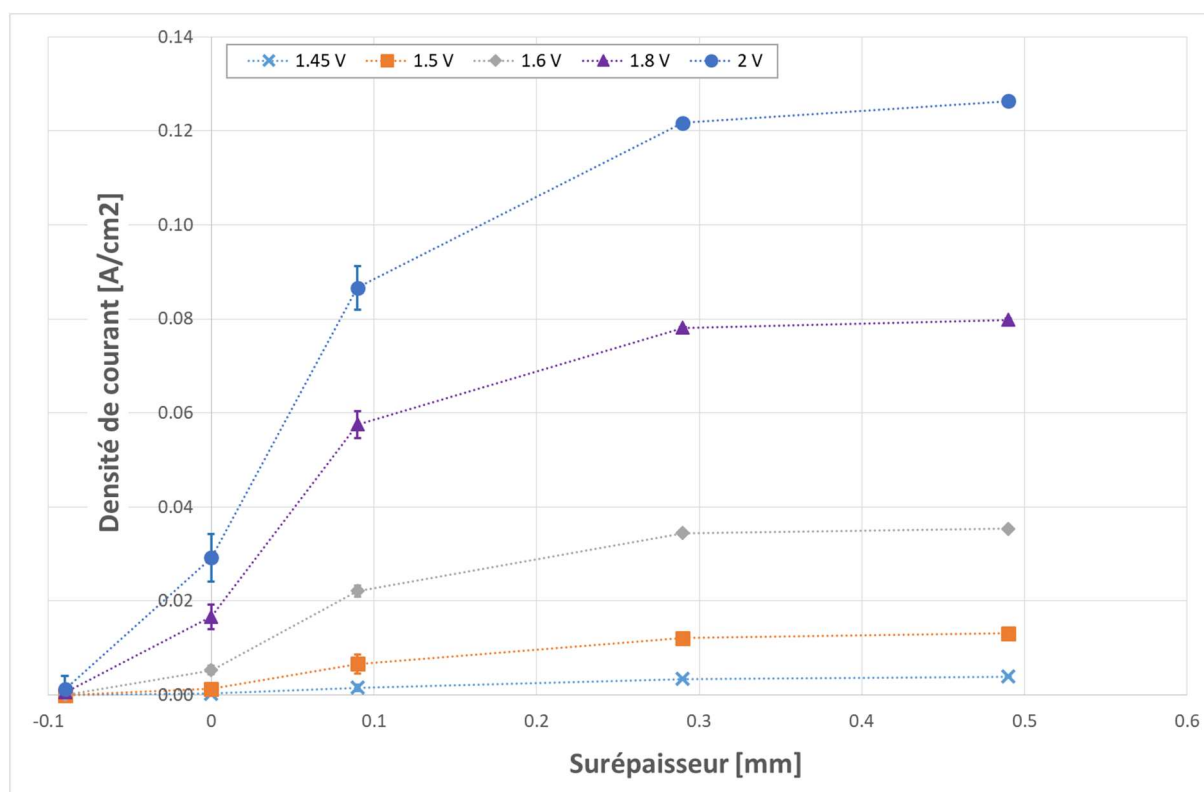


figure 32 : Influence de l'épaisseur de la surépaisseur menant à une compression des composants de la cellule, pour différentes tensions. Augmentation de la densité de courant en fonction de la surépaisseur et saturation de cet effet vers les 0.3mm de surépaisseur

La figure 32 permet d'illustrer l'analyse des résultats obtenus sur la figure 31. La surépaisseur amène à une compression des éléments se trouvant dans la membrane et à une meilleure conductivité électrique, donc à une densité de courant plus importante pour une même tension appliquée. Cet effet de compression atteint une saturation vers les 0.3 mm de surépaisseur pour la cellule de la HES.

Ce résultat rejoint l'hypothèse définie grâce à la figure 29 de la page 33, sur l'épaisseur des couches GDL. Bien qu'aucune influence due aux autres caractéristiques des collecteurs de courant (porosité, taille des pores et design) ne soit releuable avec ces mesures, il est nécessaire que les composants de la cellule soient identiques, afin de comparer l'influence provenant uniquement de la compression des éléments de l'électrolyseur et de confirmer cette hypothèse. Ce type de vérification peut être effectué à l'aide de l'électrolyseur triple-cellules.

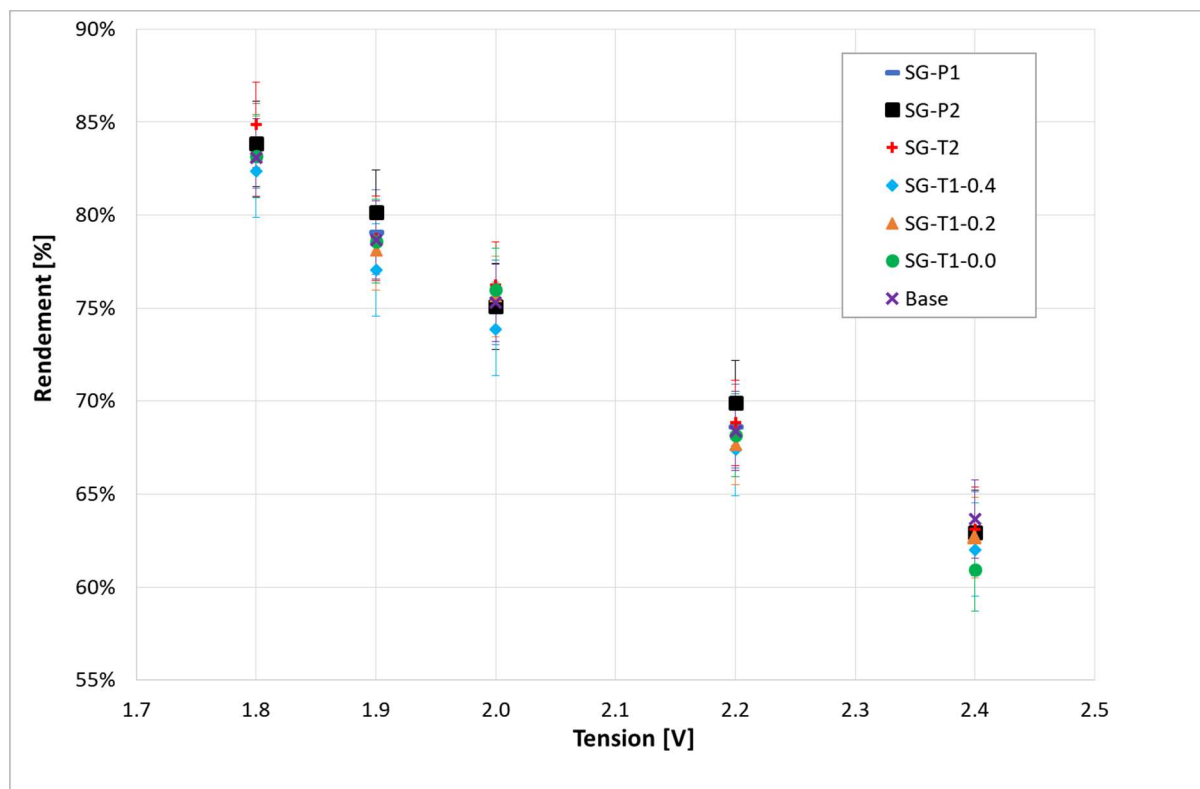


figure 33 : Rendement de la cellule HES pour chaque collecteur de courant. Aucune différence notable de rendement entre les multiples configurations

Le rendement obtenu pour les différentes configurations est similaire. Il se monte à 83% pour 1.8 V et 63% pour 2.4 V, tout comme la figure 30 de la page 34 qui compare le rendement de la cellule avec différentes couches GDL. Cela signifie que le rendement n'est influencé ni par les caractéristiques de la couche GDL, ni par celles des collecteurs de courant. Comme les mesures sur les collecteurs de courant sont effectuées le 20 juillet et celles sur les couches GDL le 20 juin, la figure 26 montre une régression des performances de la cellule due à l'état de la membrane. Pourtant aucune différence n'est observable sur le rendement de la cellule.

5.3. Performances de l'électrolyseur triple-cellules

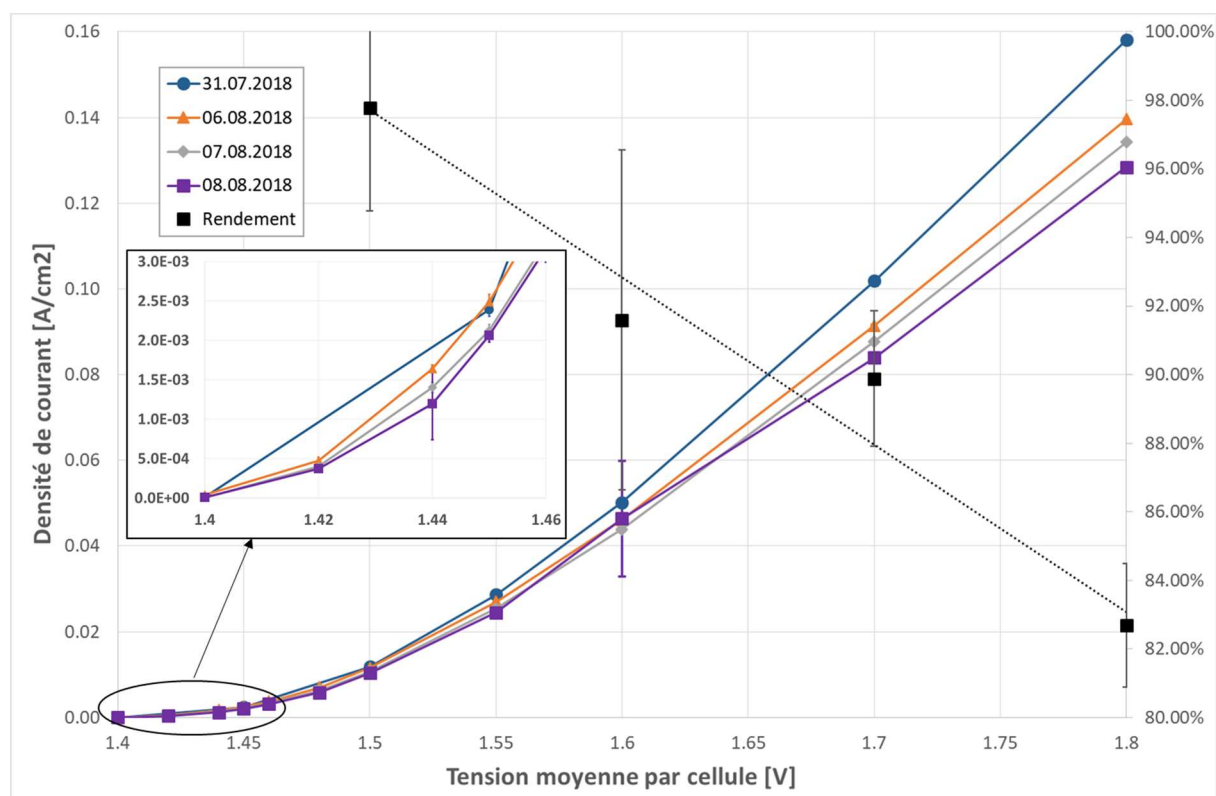


figure 34 : Courbe I-V et courbe de rendement de l'électrolyseur triple-cellules. Comparaison des courbes obtenues en fonction des jours passés. La densité de courant baisse avec le temps pour la majorité des tensions

Les différentes courbes I-V de l'électrolyseur montrent une baisse des performances en fonction du temps dès 1.4 V. La première courbe (31.07.2018) a été effectuée le jour du montage de l'électrolyseur, avec de nouvelles membranes PEM. Entre chacune de ces mesures, de l'eau a été introduite dans le système afin de garder les membranes humides. De plus avant chaque mesure, l'eau déminéralisée du circuit a été changée et aucun démontage n'a été effectué entre ces différentes mesures. Par conséquent, la baisse de performance mesurée par l'électrolyseur PEM provient de l'état de la membrane. Ni les composants, ni le serrage n'ont été modifiés. Cette détérioration de l'état de la membrane peut provenir de différentes sources :

- Des impuretés restées sur les composants qui contaminent la membrane au fil des tests
- L'eau déminéralisée comportant encore trop d'impuretés (conductivité $< 1 \mu\text{S}/\text{cm}$)
- Les changements de densité de courant trop brusques
- L'immersion des membranes inactives entre les tests

Des mesures de températures de l'eau et de l'air sont effectuées durant les tests. Cependant, malgré des deltas de 10°C , aucune réaction due uniquement au changement de température ne peut être observée.

Le rendement de l'électrolyseur atteint plus de 95% pour une tension de 1.5 V. Néanmoins, pour une tension de 1.8 V, le rendement s'élève à 83%, ce qui correspond exactement aux résultats obtenus par la cellule HES. De ce fait, il est impossible, avec ces mesures, de définir ce qui modifie les performances de rendement d'une cellule ou d'un électrolyseur PEM.

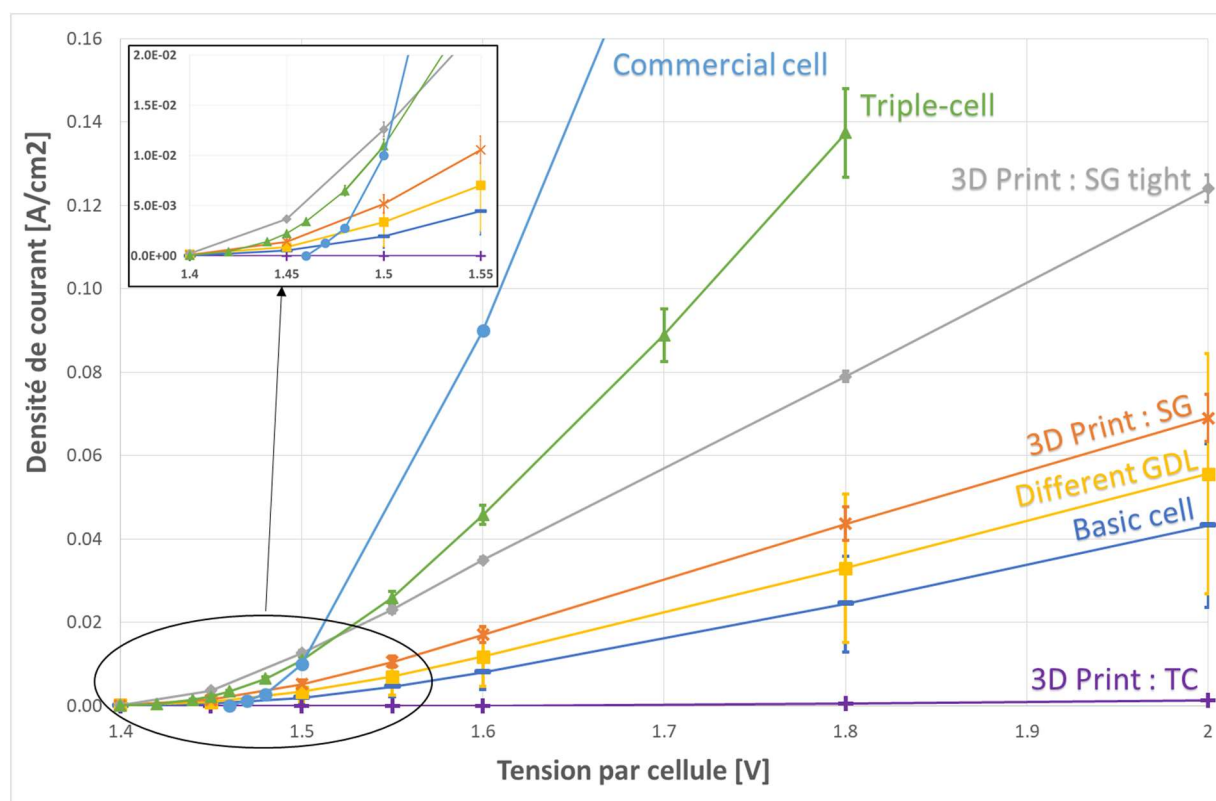


figure 35 : Courbes I-V moyennes pour chaque types de tests. Comparaison des performances entre les différentes compositions. Dès 1.55V, de la meilleure courbe à la moins bonne : 1. Cellule commerciale (bleue claire) 2. Triple-cellules (verte) 3. Impression SG-3DP avec compression des composants (grise) 4-5-6. Impression SG-3DP, Couches GDL et Cellule de base 7. Impression Tape Casting. En dessous de 1.55V, la cellule commerciale devient moins performante

Ce graphique ci-dessus permet de comparer les multiples compositions de la cellule HES entre elles et les différents électrolyseurs testés. Pour les tensions de plus de 1.5 V, la cellule commerciale obtient les meilleures performances de la courbe I-V, l'électrolyseur triple-cellules reste plus performant que toutes les mesures effectuées avec la cellule HES. Les cinq autres courbes concernent les tests effectués sur la cellule HES, avec des résultats toujours en lien avec l'hypothèse de l'amélioration des performances en fonction de la compression des éléments de la cellule.

Pour les tensions les plus faibles, la cellule commerciale ne commence à fonctionner qu'à partir de 1.47 V, alors que la majorité des courbes commencent à monter dès 1.45 V, voir plus tôt. De ce fait, à basse tension, la cellule commerciale obtient des performances moins bonnes que les autres éléments mesurés. Jusqu'à 1.5 V, les meilleurs résultats sont obtenus par la cellule HES avec les pièces SG-3DP avec compression des composants. Puis vient l'électrolyseur triple-cellules et la cellule commerciale reste moins performante.

6. Analyse financière

6.1. Prix de l'électrolyseur triple-cellules

Le prix de l'électrolyseur triple-cellules se monte à CHF 4'800.-. Cette somme se divise en plusieurs parties détaillées dans l'annexe 6 :

- CHF 1'500.- de pièces commandées
- CHF 2'600.- d'usinage de pièces
- CHF 700.- de pièces utilisées et disponibles à la HES

Ce prix équivaut à CHF 2'000.- pour un électrolyseur mono-cellule composé des mêmes éléments et de CHF 1'400.- pour chaque cellule ajoutée.

6.2. Economies réalisables

Le design de l'électrolyseur triple cellule permet de multiples configurations, ce qui permet l'étude de différents effets dus aux caractéristiques des composants. Toutefois, ce principe de design adaptatif oblige la division de certaines pièces en plusieurs composants et limite l'épaisseur minimale d'autres pièces. Dès que tous les éléments de l'électrolyseur sont choisis et possèdent un design fixe, le prix peut devenir plus intéressant. C'est pourquoi, les différents designs dessinés pour les versions antérieures possèdent un design fixe et non adaptatif, car ils remplacent plusieurs pièces en une seule pièce, comportant toutes les fonctions des pièces remplacées.

6.2.1. Développement version 1

Une première version consiste à assimiler les fonctions de la plaque bipolaire, de la grille de circulation ainsi que des supports plastiques en une seule pièce. De ce fait, les pièces comme les joints O-ring ou les plaques adaptatives ne sont plus utiles.

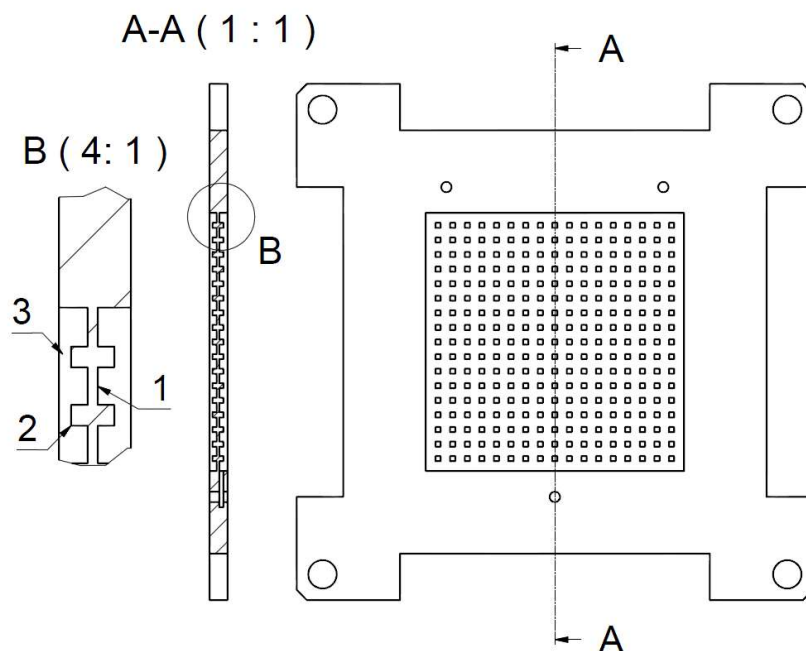


figure 36 : Plaque bipolaire en titane, développement version 1. Comprend les fonctions de différentes pièces : 1. Plaque bipolaire 2. Grille de circulation 3. Supports plastiques. Réalisable par usinage ou impression 3D

La plaque bipolaire dessinée ci-dessus est formée de titane et comprend les fonctions de différentes pièces :

1. Plaque bipolaire : sépare hermétiquement le côté de l'anode d'une cellule avec le côté de la cathode de la seconde cellule en contact avec la plaque, mais permet le transfert de courant.
2. Grille de circulation : extrusions sur lesquelles viennent se coller les collecteurs de courant. L'eau et les gaz circulent à travers le circuit.
3. Support plastique : espace réservé au collecteur de courant et à la couche GDL.

Cette pièce requiert un joint plat de chaque côté, afin d'assurer l'étanchéité entre les différentes parties et l'extérieur. Un schéma plus complet du montage se trouve à l'annexe 7.

Pièces remplacées	CHF 910.00
Pièces de remplacement par impression 3D	CHF 590.00
Pièces de remplacement par usinage	CHF 350.00
Gain par impression	CHF 320.00
Gain par usinage	CHF 560.00

tableau 6 : Gains financiers réalisables pour le développement version 1. L'utilisation de l'usinage pour cette pièce semble plus intéressante que l'impression 3D (détails à l'annexe 6)

Le prix des pièces remplacées provient des prix obtenus pour la fabrication de l'électrolyseur. Celui des pièces de remplacement par impression 3D provient d'une offre de 680€ venant d'une entreprise pour la création d'une seule pièce similaire (dessin à l'annexe 5) avec la méthode d'impression SLM. Cependant le prix unitaire pour une grande production est estimé à 30% plus bas, soit 500€ par pièce. Malheureusement, aucune offre n'est faite pour l'usinage de cette pièce par fraisage, car l'usinage du titane n'est pas facile et peu d'entreprise offre cette prestation. De ce fait le prix estimé est de CHF 40.- pour le bloc de titane et CHF 300.- pour l'usinage par fraisage. Les joints plats doivent être fabriqués sur mesure et sont estimés à CHF 3.- pièce.

Malgré que certains prix soient estimés, l'ordre de grandeur reste juste et l'usinage de cette pièce permet une économie de CHF 560.- par pièce, soit plus du 40% de CHF 1'400.-, le prix d'une cellule supplémentaire, contre 20% d'économie pour l'impression 3D par SLM.

6.2.2. Développement version 2

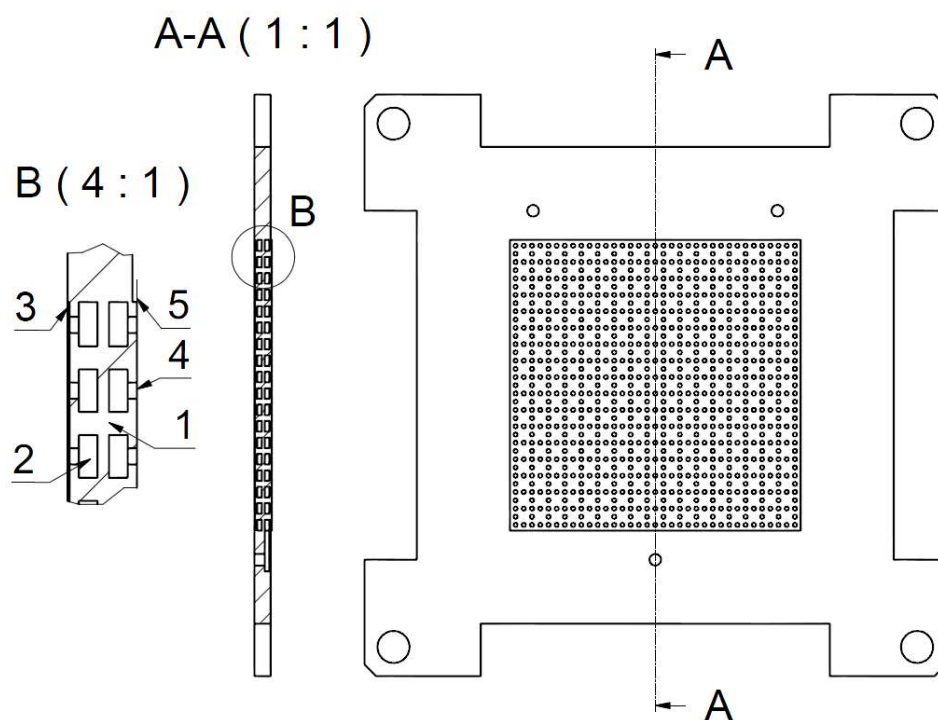


figure 37 : Plaque bipolaire en titane, développement version 2. Comprend les fonctions de différentes pièces : 1-2-3. Similaire que la figure 36. 4. Collecteur de courant 5. Place pour le joint plat. Réalisable uniquement par impression 3D

La version 2 est très ressemblante à la version 1. Cette dernière y inclus les mêmes fonctions, mais possède la fonction du collecteur de courant (dessin à l'annexe 8). En effet, le point 4 indiqué sur la figure 37 représente les trous du collecteur de courant. Le design est repris des collecteurs de la cellule HES et peut être fabriquée à l'aide de l'impression 3D.

Pièces remplacées	CHF	1'020.00
Pièces de remplacement par impression 3D	CHF	590.00
Gain par impression	CHF	430.00

tableau 7 : Gains financiers réalisables pour le développement version 2 (détails à l'annexe 6)

Le prix pour l'impression 3D SLM est le même que la version 1. Le seul changement est l'inclusion des collecteurs de courant dans les pièces remplacées, ce qui permet une économie de CHF 430.-, soit plus du 30% du prix d'une cellule supplémentaire.

6.2.3. Développement version 3

Cette version comprend l'utilisation de tôle de 0.5 mm d'épaisseur en inox, estampée et recouverte d'une couche de titane sur le côté de la plaque en contact avec l'anode d'une cellule.

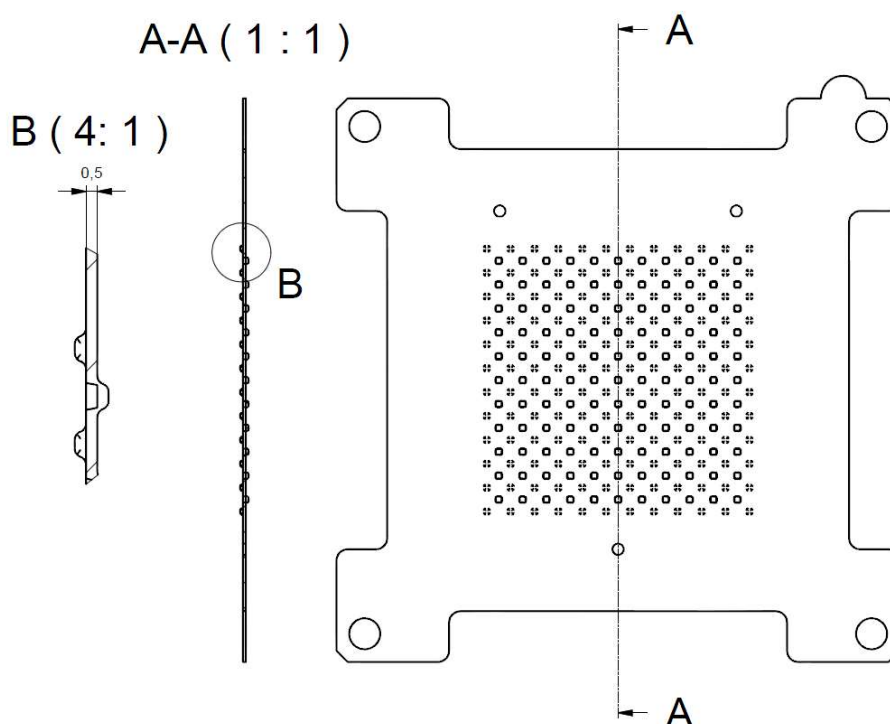


figure 38 : Plaque bipolaire en titane, développement version 3. Tôle de 0.5mm en inox, estampée et recouverte d'une couche de titane

La plaque en elle-même possède les fonctions d'une plaque bipolaire, mais également de la grille de circulation. Les joints plats venant se coller à la plaque de chaque côté (dessin à l'annexe 9) permettent de remplir la fonction des supports plastiques. Cette version remplace le même nombre de pièces que la version 1.

Pièces remplacées	CHF 910.00
Pièces de remplacement par impression 3D	CHF 50.00
Gain par impression	CHF 860.00

tableau 8 : Gains financiers réalisables pour le développement version 3 (détails à l'annexe 6)

La découpe de tôle en inox, le recouvrement d'une couche titane et l'estampage est relativement bon marché. Le prix par pièce est estimé à CHF 40.- et 50.- avec les joints plats. Si cette version est réalisable, elle permet d'économiser CHF 860.- par pièce, soit 62% du prix d'une cellule supplémentaire.

7. Améliorations et développement prospectif

Le nettoyage des pièces lors des démontages et montages de la cellule HES a été négligé, ce qui a porté atteinte à l'état de la membrane. En effet, comme il est possible de voir sur le graphique de la figure 26, à la page 31, la performance de la cellule a fortement chuté en quelques jours. Néanmoins, les tests effectués sur cette cellule restent utilisables et les différentes précautions citées au point 5.2.1 ont été prises en compte lors du montage de l'électrolyseur triple-cellules. Ainsi, la dégradation des membranes est présente dans l'électrolyseur triple-cellules, mais nettement moins importante que pour la cellule HES, comme le confirme la figure 34.

Comme mentionné dans le point 5.2.2, la température de fonctionnement influe directement sur les performances de l'électrolyseur. Cet effet n'a pas pu être étudié pour les différents tests effectués sur la cellule HES, car aucune prise de température n'a été faite. Au contraire, pour l'électrolyseur triple-cellules, les températures de l'eau et de l'air ont été relevées et montraient jusqu'à 10°C de différence de température entre certaines mesures, mais aucune réaction due au changement de température n'a pu être observée.

Lors des tests effectués avec les collecteurs de courant fabriqué à l'aide de l'impression SG-3DP, une cale de 0.4 mm a été utilisée afin de ne pas trop comprimer les éléments de la cellule et de pouvoir comparer les résultats avec le collecteur de courant de base. Cependant, les collecteurs de courant SG-3DP étaient plus épais de 0.09 mm que l'épaisseur attendue. Idéalement, il aurait fallu utiliser une cale de 0.49 mm ou 0.5 mm d'épaisseur, afin de pouvoir comparer les valeurs obtenues avec le collecteur de base. Au contraire, le collecteur de courant tape casting, trop fin, n'exerçait pas un contact suffisant pour bien transmettre le courant. Il n'est pas possible de modifier la cellule HES afin d'améliorer les conditions pour cette pièce, sans le réusinage de la plaque d'extrémité. Toutefois, avec la structure de l'électrolyseur triple-cellules, il est possible de tester des composants de différentes tailles.

Certains tests intéressants n'ont pas pu être effectués durant ce travail par manque de temps, comme la modification de la taille des grains ou un changement de programmation de frittage pour les pièces SG-3DP afin d'obtenir plusieurs porosités et tailles de pores, ou les effets liés uniquement au changement de température ou de pression à l'intérieur de la cellule.

Finalement, l'électrolyseur triple-cellules permet différentes configurations intéressantes afin d'étudier les effets liés au design du collecteur de courant, au design et à la profondeur des grilles de circulation, au type de couche GDL (papier ou tissu). Cet électrolyseur peut également confirmer l'hypothèse relevée durant ce travail sur l'effet de compression des composants à l'intérieur de l'électrolyseur.

8. Conclusion

Le banc monté effectue les mesures à pression atmosphérique, soit 0.95 bar et à température ambiante, entre 20°C et 30°C. La cellule HES, l'électrolyseur triple-cellules et une cellule commerciale y sont testés.

La modification de la couche GDL de la cellule HES entraîne une variation de la densité de courant en fonction de son épaisseur. En effet, la densité augmente linéairement en fonction de l'épaisseur de la couche GDL. Aucun changement de comportement n'est discerné dû aux autres caractéristiques des GDL (matière, compression), ni sur la densité de courant, ni sur le rendement.

L'impression 3D n'a pas permis d'obtenir des prix de pièces plus attractifs pour ce travail car il s'agit d'impression à l'unité et d'un premier test pour l'impression SG-3DP. Cependant les pièces imprimées en 3D sont intégrables dans un système d'électrolyse PEM. Malgré une porosité du matériau ne permettant pas le transfert de gaz et d'eau à travers le collecteur de courant, le design comportant de multiples trous résout ce problème. De plus, tous les collecteurs de courant testés transfèrent le courant électrique comme attendu. D'après les résultats obtenus, la densité de courant dépend de l'épaisseur des collecteurs. Cette densité augmente en fonction de la compression des éléments dans la cellule. Cet effet est similaire à l'hypothèse relevée lors des tests de couches GDL et la renforce.

L'électrolyseur triple-cellules conçu est fonctionnel. Les premiers tests révèlent une densité de courant supérieure à celle obtenue avec les multiples combinaisons de la cellule HES, mais toutefois inférieure à la cellule commerciale. La structure de la triple-cellules permet de remplacer certains composants par d'autres pièces de différentes épaisseurs. Cet électrolyseur permettra de démontrer les effets liés au design du collecteur de courant, au design et à la profondeur des grilles de circulation, au type de couche GDL et de confirmer l'hypothèse relevée durant ce travail sur l'effet de compression des composants à l'intérieur de l'électrolyseur.

Les rendements obtenus selon différentes configurations de la cellule HES, en comparaison avec ceux obtenus par l'électrolyseur PEM, sont identiques et ne varient pas malgré les différentes courbes I-V.

Finalement, l'analyse financière permet de définir un prix à l'électrolyseur triple-cellules réalisé durant ce travail. A partir des prix obtenus pour la triple-cellules, un calcul est effectué afin de définir le prix d'une mono-cellule à CHF 2'000.- et celui pour chaque cellule ajoutée au module de base à CHF 1'400.-. Comme relevé précédemment, cet électrolyseur permet le changement de composants par d'autres pièces d'épaisseurs différentes. Cependant, cette adaptabilité a un coût. C'est pourquoi, des versions non-adaptables sont dessinées et leur prix estimé en fonction de leur méthode de fabrication. L'économie réalisée correspond à 30% pour une impression 3D, de 40% par l'usinage de certaines pièces complexes et s'élève à 60% par l'utilisation de tôles estampées.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier personnellement les personnes qui m'ont appuyé et soutenu que ce soit durant la partie pratique ou durant la rédaction de mon projet de bachelor.

Je tiens à remercier dans un premier temps M. Christoph Ellert et M. David Martinet pour leur suivi et leurs conseils tout au long du travail. Ainsi, j'ai pu obtenir les résultats présentés et atteindre les objectifs demandés.

Un grand merci à M. Efrain Carreño-Morelli, M. Mikel Rodriguez Arbaizar et M. Kevin Cardoso qui se sont occupés de l'impression des pièces 3D, une part importante de ce travail.

J'adresse également mes remerciements à M. Christian Cachelin qui a conçu la cellule HES et m'a offert ses conseils pour la conception de l'électrolyseur triple-cellules.

Merci à M. David Berthouzoz et M. Eric Mabillard de l'atelier mécanique pour leur adaptabilité et leur promptitude lors de l'usinage des pièces de l'électrolyseur.

Merci à toutes les personnes qui ne sont pas mentionnées ci-haut et qui m'ont accordé du temps ou m'ont donné des conseils.

Enfin, je voudrais remercier mes camarades et ma famille qui m'ont prêté main-forte durant la rédaction de ce travail.

9. Bibliographie

- [1] B. Frano, «PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources,» *Solar Energy* 78, pp. 661-669, 2005.
- [2] D. Constantin, «Power to Gaz,» HES-SO Valais-Wallis (TB), Sion, 2015.
- [3] AREVA H2Gen, «Comment fonctionne l'électrolyse de l'eau,» [En ligne]. Available: <http://www.arevah2gen.com/fr/produits-services/technologie>. [Accès le 13 Juillet 2018].
- [4] C. Jun et Y. Hongmei, «Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production,» *Chinese Journal of Catalysis* 39, pp. 390-394, 2018.
- [5] AFHYPAC, «Mémento de l'Hydrogène - Les données de base physico-chimiques sur l'hydrogène,» Mars 2013. [En ligne]. Available: http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche_1.2_donnees_physicochimiques_rev.mars_2013.pdf. [Accès le 19 Juin 2018].
- [6] X. Shang, B. Dong, Y.-M. Chai et C.-G. Liu, «In-situ electrochemical activation designed hybrid electrocatalysts for water electrolysis,» *Science Bulletin* 63, pp. 853-876, 15 Juillet 2018.
- [7] D. R. Lide, CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press Inc, 2009, p. 2804.
- [8] E. Carreño-Morelli, M. Rodriguez-Arbaizar, G. Flueckiger, C. Cachelin, F. Bircher, J. Renner et J. Richard, «Additive Manufacturing by Solvent Jetting on Granules Beds,» chez *World PM 2016 - Powder Bed Based Technologies I*, Hambourg, 2016.
- [9] J.-E. Bidaux, J. García-Gómez, H. Hamdan, D. Zufferey, M. Rodriguez-Arbaizar, H. Girard et E. Carreño-Morelli, «Tape Casting of Porous Titanium Thin Sheets from Titanium Hydride,» chez *Euro PM 2011 - Cellular Materials*, Barcelone, 2011.
- [10] G.-J. Agata, Hydrogen Production by Electrolysis, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015.
- [11] AVS Technology AG, «Bipek Membrane Electrolyzers,» [En ligne]. Available: <http://www.avstechnology.ch/bipek-electrolyzer-technology/>. [Accès le 18 Juin 2018].
- [12] W. & S. Limited, «Cours des métaux,» PHPNET FRANCE, [En ligne]. Available: <http://www.coursdesmetaux.com/titane/>. [Accès le 15 Août 2018].
- [13] W. & S. Limited, «prix-metiaux.net,» [En ligne]. Available: <http://www.prix-metiaux.net/inox.html>. [Accès le 15 Août 2018].
- [14] E. Carreño-Morelli, M. Rodriguez-Arbaizar, K. Cardoso, H. Girard et S. Rey-Mermet, «Additive Manufacturing of Titanium Parts By Solvent Jetting on TiH₂-based Granule Beds,» chez *World PM 2018*, Beijing, 2018.
- [15] University of Sydney, «Fluid Flow Viscosity Poiseuille's Law,» [En ligne]. Available: http://www.physics.usyd.edu.au/teach_res/jp/fluids/viscosity.pdf. [Accès le 7 Août 2018].
- [16] ThermExcel, «Caractéristiques physiques de l'eau (à la pression atmosphérique),» Avril 2002. [En ligne]. Available: https://www.thermexcel.com/french/tables/eau_atm.htm. [Accès le 8 Août 2018].
- [17] The Engineering ToolBox, «Flow Section Channels - Geometric Relationships,» [En ligne]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/flow-section-channels-d_965.html. [Accès le 8 Août 2018].

- [18] S. Grigoriev, P. Millet, S. Volobuev et V. Fateev, «Optimization of porous current collectors for PEM water electrolyzers,» *International Journal Of Hydrogen Energy* 34, pp. 4968-4973, 2009.
- [19] A. S. Tijani, N. A. B. Kamarudin et F. A. B. Mazlan, «Investigation of the effect of charge transfer coefficient (CTC) on the operating voltage of polymer electrolyte membrane (PEM) electrolyzer,» *International Journal Of Hydrogen Energy* 43, pp. 9119-9132, 2018.

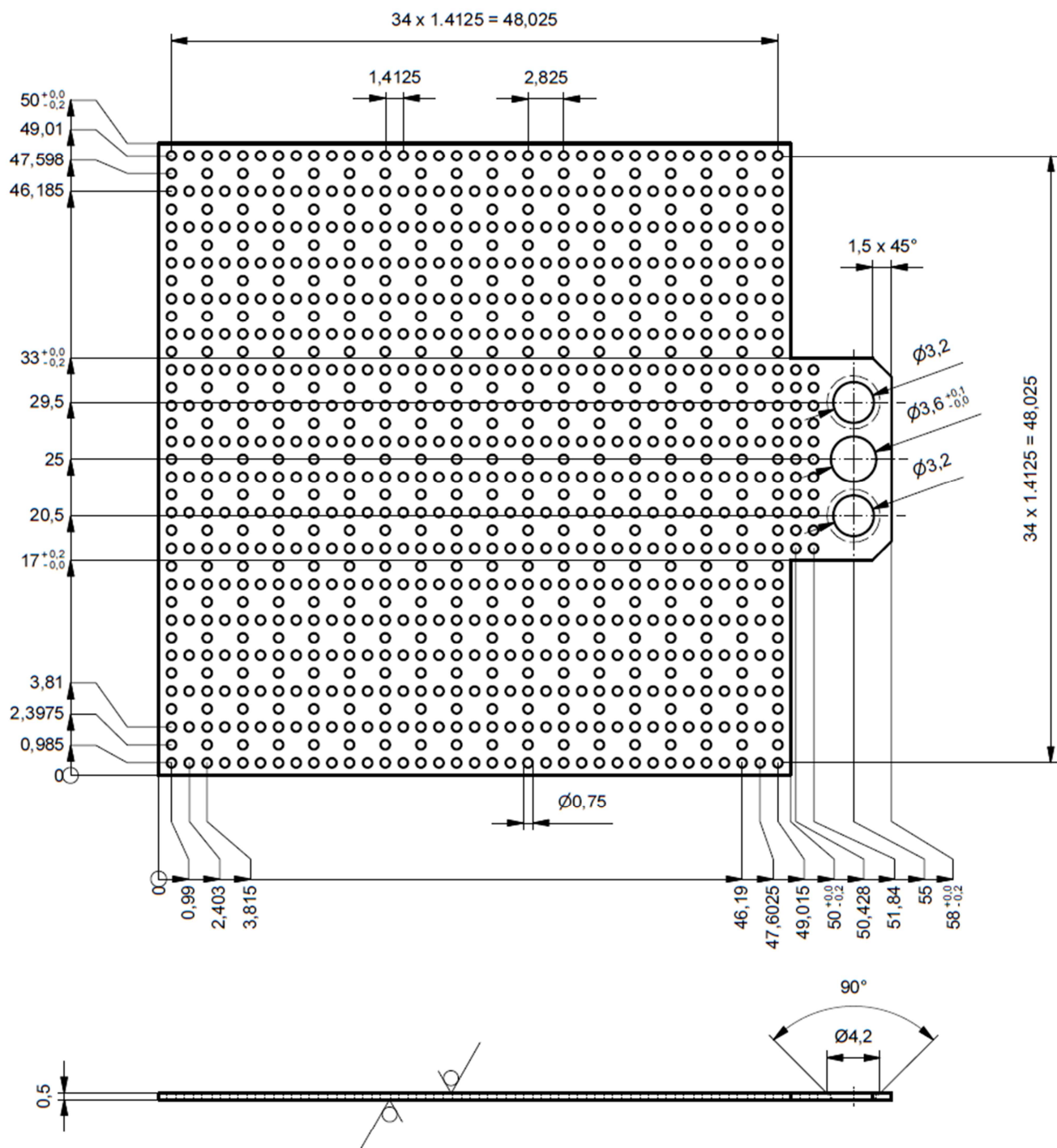
10. Annexes

Liste des annexes

- annexe 1 : Collecteur de courant : pièce de base
- annexe 2 : Collecteur de courant : SG-T 1 et SG-T2
- annexe 3 : Assemblage et composants de la triple-cellules
- annexe 4 : Protocole de montage de l'électrolyseur triple-cellules
- annexe 5 : Schéma de plaque bipolaire transmis pour demande d'offre
- annexe 6 : Liste de matériel pour l'électrolyseur triple-cellules, avec liste de prix détaillée pour analyse financière
- annexe 7 : Plaque bipolaire, développement version 1
- annexe 8 : Plaque bipolaire, développement version 2
- annexe 9 : Plaque bipolaire, développement version 3

Julien Udry

annexe 1 : Collecteur de courant : pièce de base

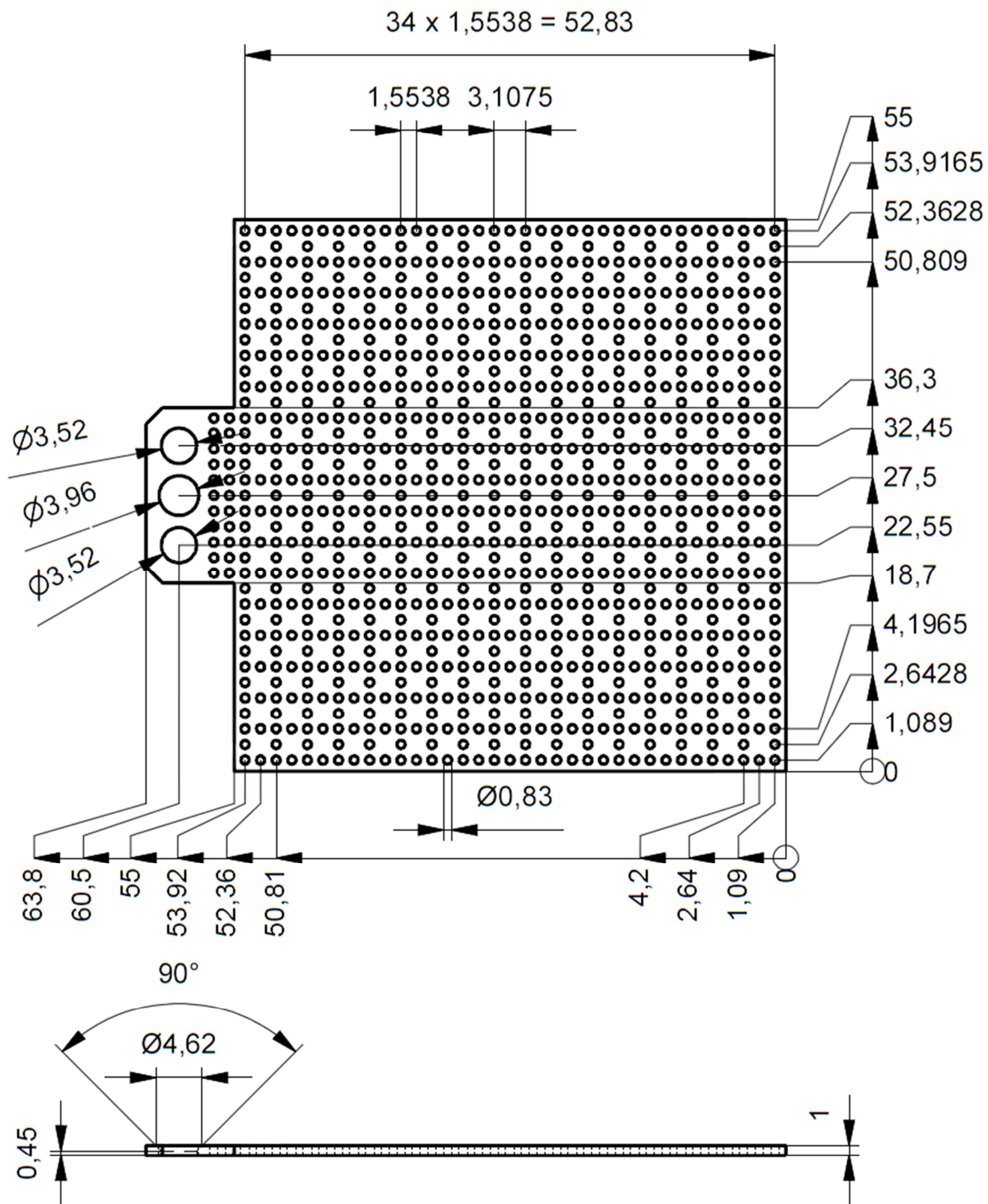


Tolérances générales ± 0.1

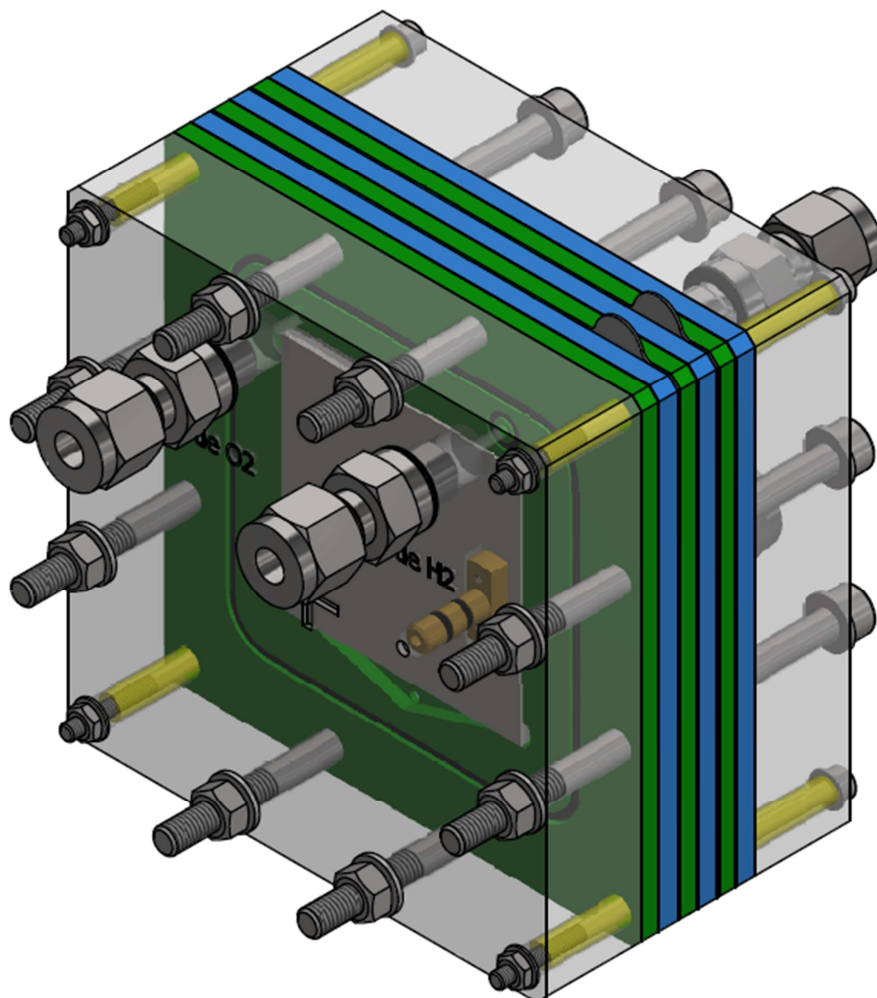
$\sqrt{\text{Ra } 3.2}$ (✓)


découpe au laser (eventuellement au jet d'eau)

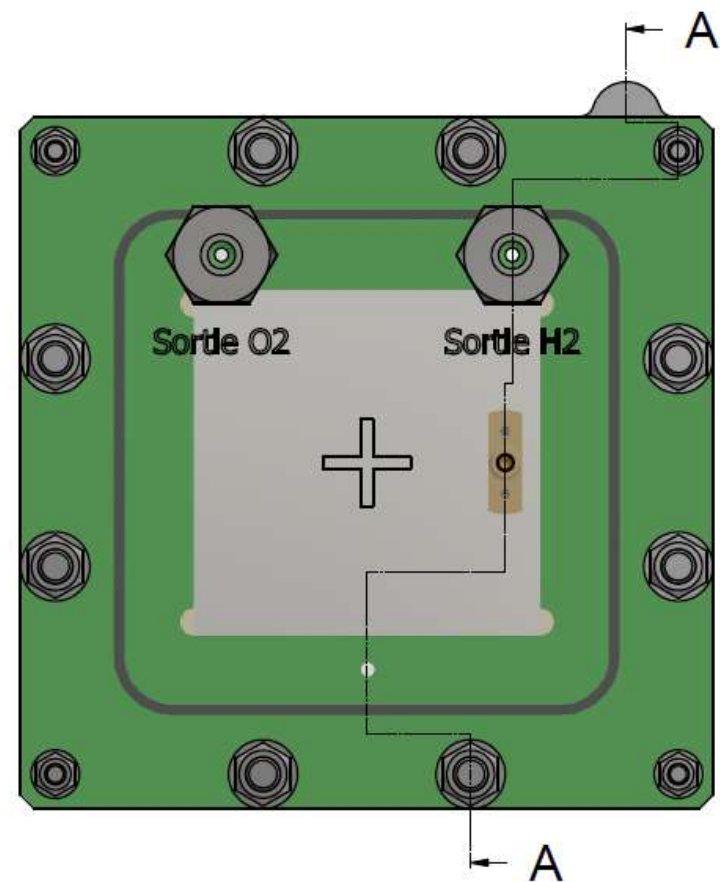
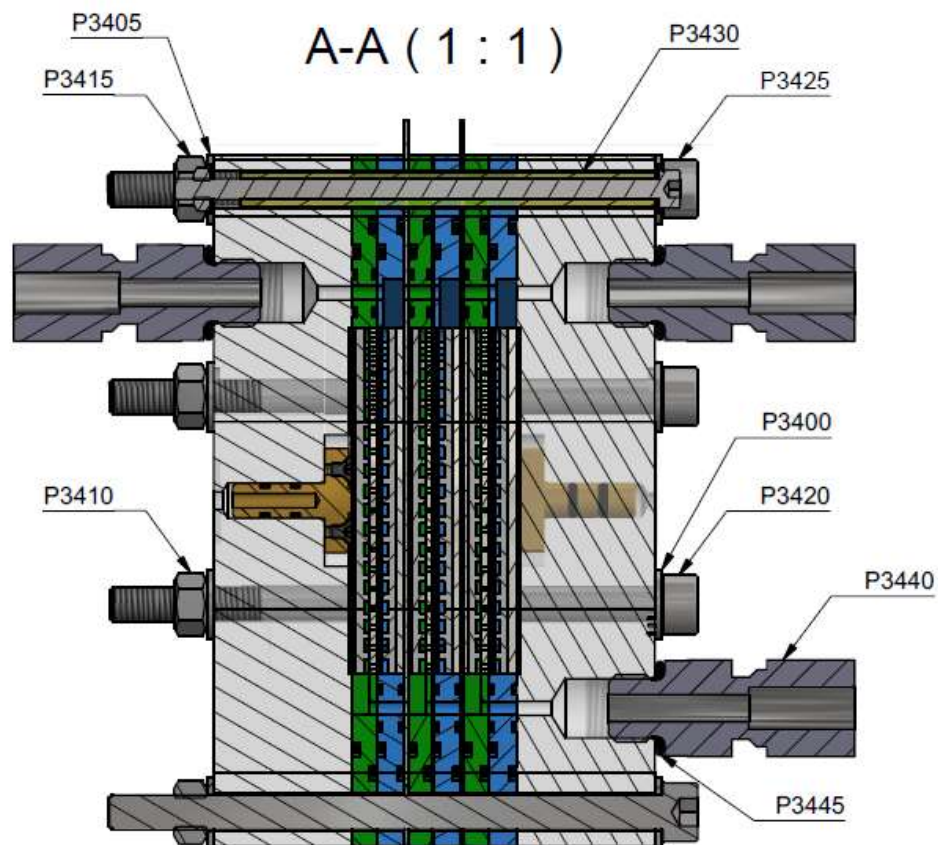
annexe 2 : Collecteur de courant : SG-T1 et SG-T2



annexe 3 : Assemblage et composants de la triple-cellules



P3445	4	Caoutchouc / Gummi	Oring d1=9mm d2=2mm
P3440	4	Acier Inox / Inox Stahl	Raccord_Swagelok_6mm - G 1/8
P3410	8	Stainless Steel, 440C	Ecrou_M5_ ISO 4032
P3415	4	Steel, Mild	Ecrou_M3_DIN 934
P3430	4	PMMA Plastic	Tube isolant pour vis
P3405	8	Steel, Mild	Rondelle_ø3_DIN 125
P3425	4	Steel, Mild	Vis_ M3x0.8 x 70
P3400	16	Steel, Mild	Rondelle_Ø5_DIN 125
P3420	8	Steel, Mild	Vis_ M5x0.8 x 80
P3050	2	Titane / Titan	Plaque en titane bipolaire
A3300	3	Divers	Assemblage membrane MEA
A3210	1	Divers	Assemblage plaque extérieur côté O2
A3200	1	Divers	Assemblage plaque extérieur côté H2
A3100	3	Divers	Assemblage côté O2
A3000	3	Divers	Assemblage côté H2
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale
Boîtier triple-cellule d'électrolyse			Dessiné Gezeichnet
Assemblage final			Julien Udry
			09.07.2018
			Echelle Massstab
			1:1
Fichier Y:\julien.udry\Electrolyseur\A3500_Final.idw			
Datei			
Hes·so  VALAIS WALLIS			A3500



Boîtier triple-cellule d'électrolyse

Assemblage final

Fichier Y:\julien.udry\Electrolyseur\A3500_Final.idw
Datei

Dessiné
Gezeichnet

Julien Udry

09.07.2018

Echelle
Massstab

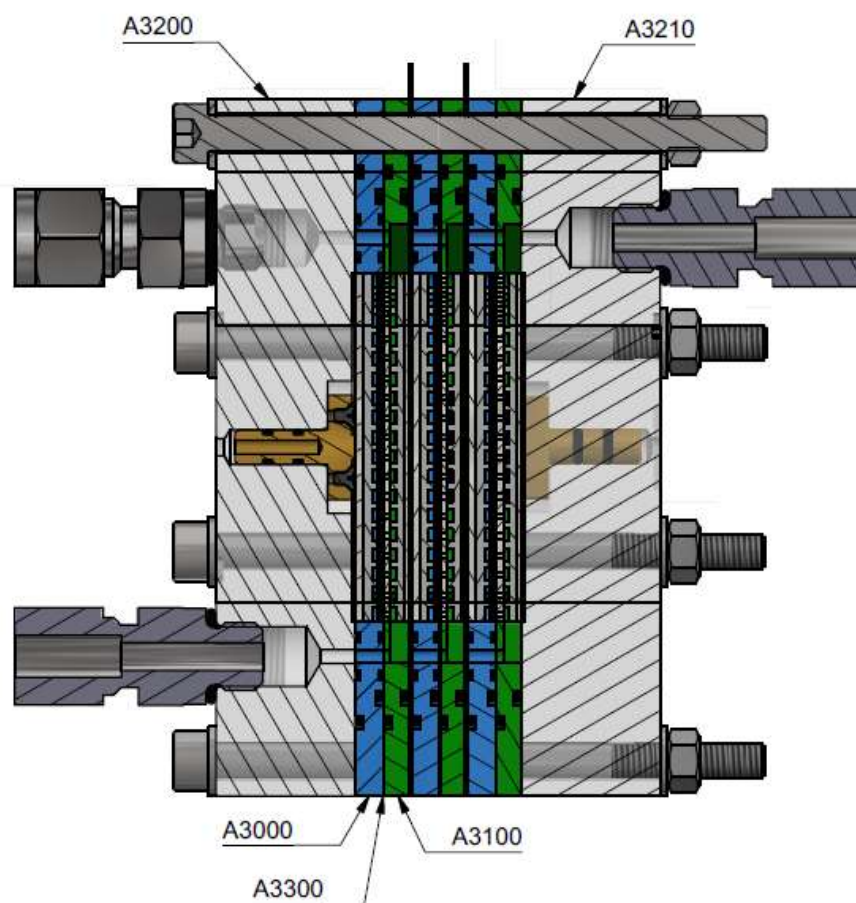
Contrôle
Geprüft

1:1

Hes·so VALAIS
WALLIS

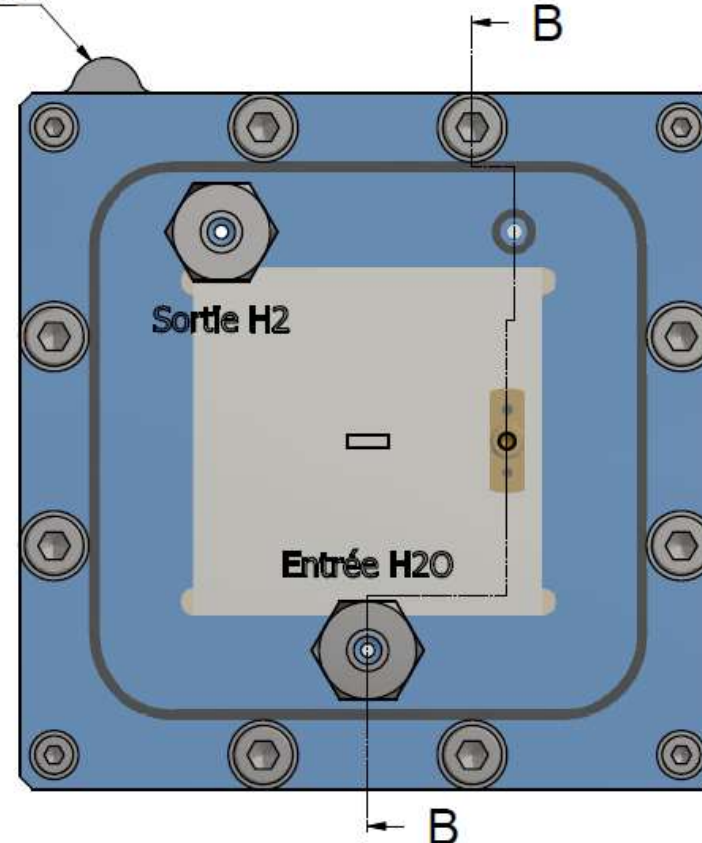
A3500

B-B (1 : 1)



P3050

B



B

Boîtier triple-cellule d'électrolyse

Assemblage final

Dessiné
Gezeichnet

Julien Udry

09.07.2018

Echelle
Massstab

Contrôle
Geprüft

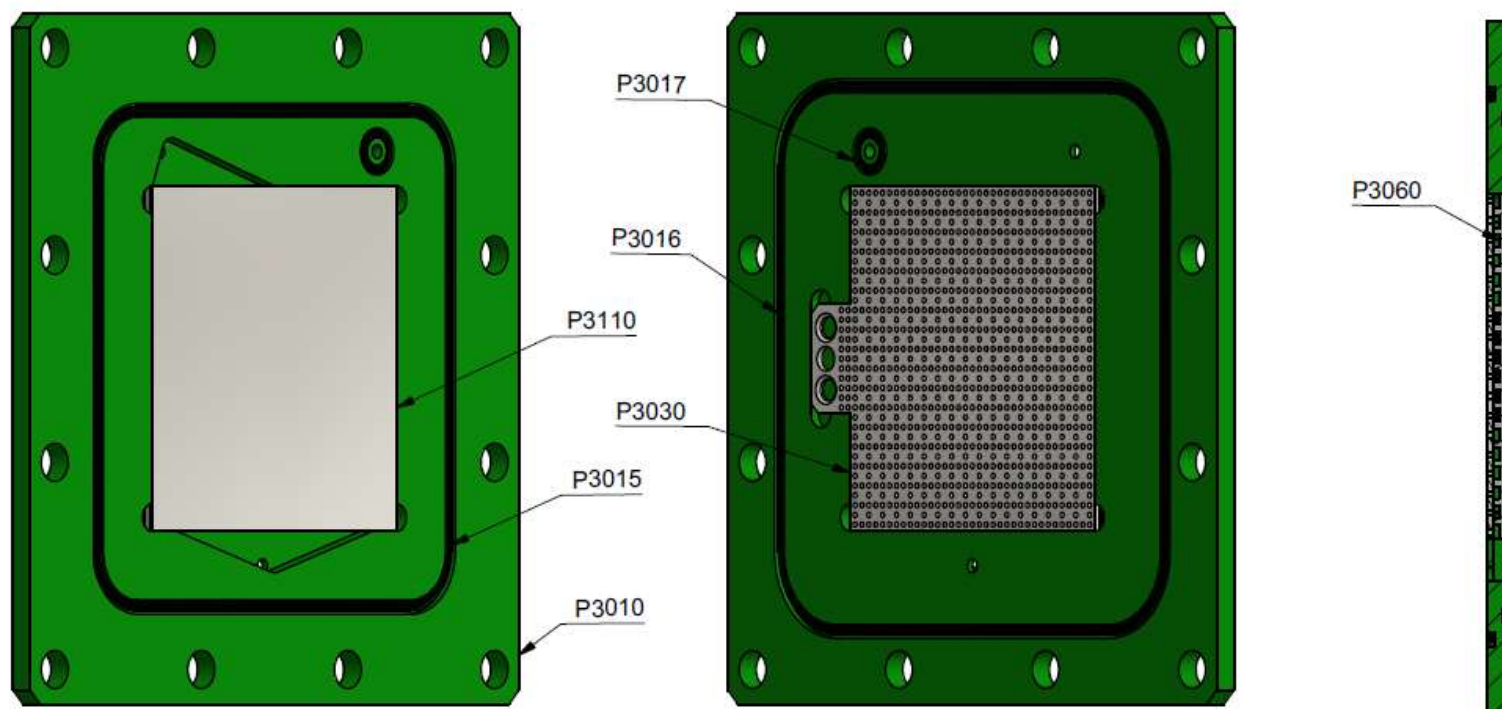
1:1

Fichier Y:\julien.udry\Electrolyseur\A3500_Final.idw
Datei

Hes·so VALAIS
WALLIS

A3500

Coupe centrale (1 : 1)



P3110	1	Titane / Titan	Plaque d'ajustement du côté O2
P3060	1	Titane / Titan	Plaque titane avec circuit
P3030	1	Titane / Titan	Collecteur de courant titane
P3017	2	Caoutchouc / Gummi	Oring d1=4mm d2=1mm
P3016	1	Caoutchouc / Gummi	Oring d1=92mm d2=1.5mm
P3015	1	Caoutchouc / Gummi	Oring d1=85mm d2=1.5mm
P3010	1	Polycarbonate, Clear	Support plastique côté O2
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale

Assemblage côté O2

Anode de la cellule d'électrolyse

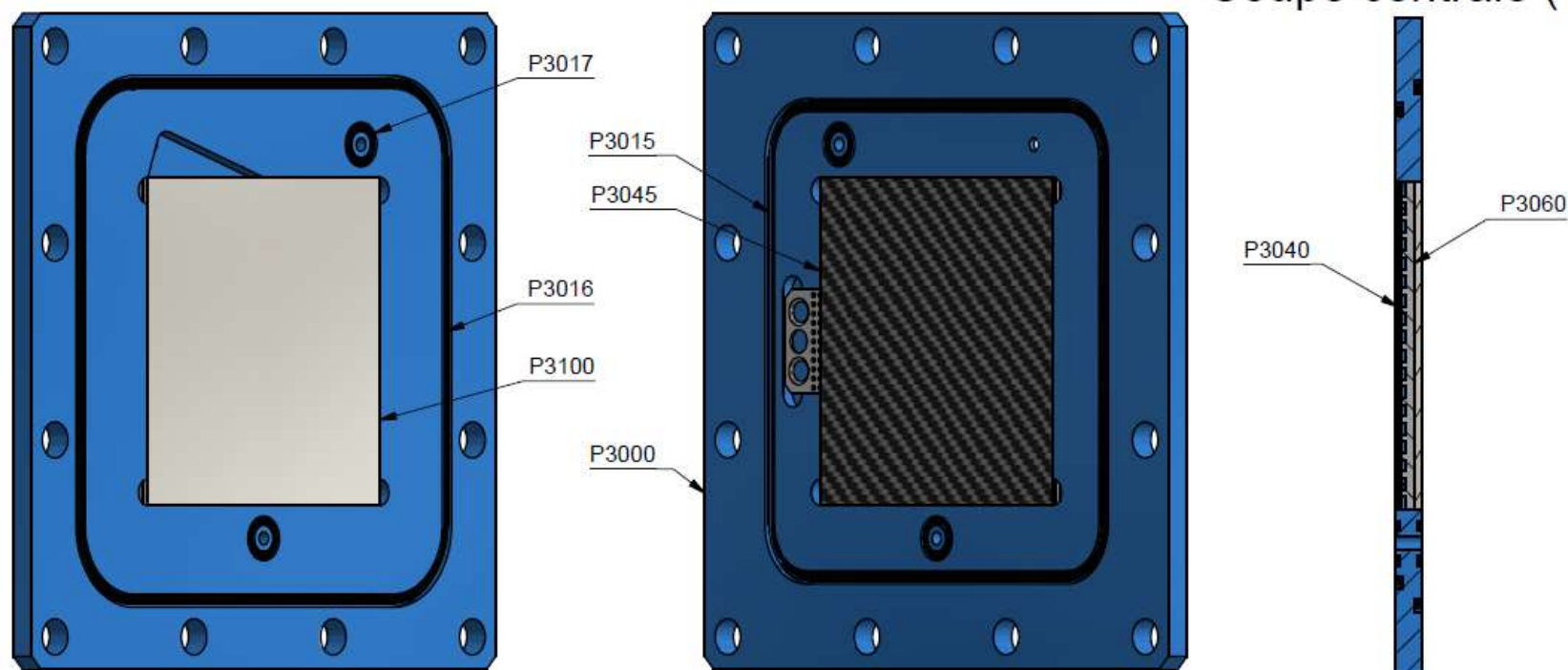
Fichier Y:\julien.udry\Electroyseur\A3100_Cote_O2.idw
Datei

Hes·so  **VALAIS
WALLIS**

Dessiné Gezeichnet	Julien Udry	09.07.2018	Echelle Massstab
Contrôlé Geprüft			1:1

A3100

Coupe centrale (1 : 1)



P3100	1	Titane / Titan	Plaque d'ajustement du côté H2
P3060	1	Titane / Titan	Plaque titane avec circuit
P3045	1	Steel, Carbon	Carbon GDL
P3040	1	Stainless Steel	Collecteur de courant inox
P3017	4	Caoutchouc / Gummi	Oring d1=4mm d2=1mm
P3016	1	Caoutchouc / Gummi	Oring d1=92mm d2=1.5mm
P3015	1	Caoutchouc / Gummi	Oring d1=85mm d2=1.5mm
P3000	1	Polycarbonate, Clear	Support plastique côté H2
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale

Assemblage côté H2

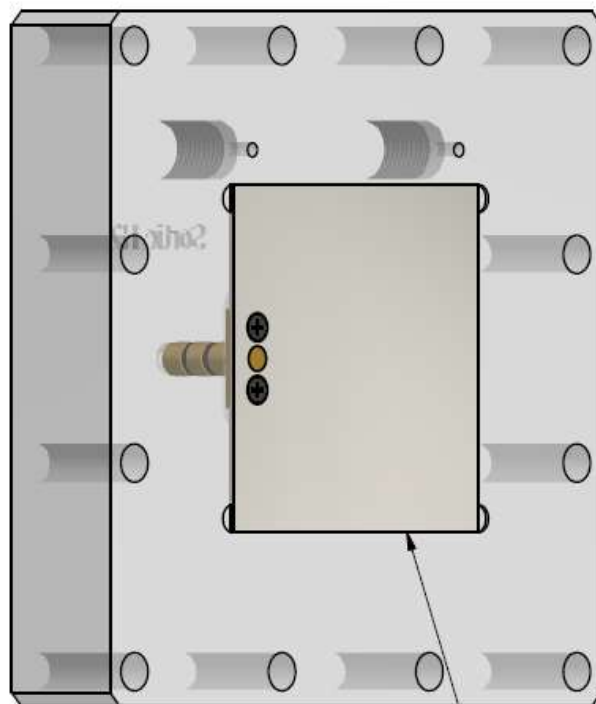
Cathode de la cellule d'électrolyse

Dessiné Gezeichnet	Julien Udry	09.07.2018	Echelle Massstab
Contrôlé Geprüft			1:1

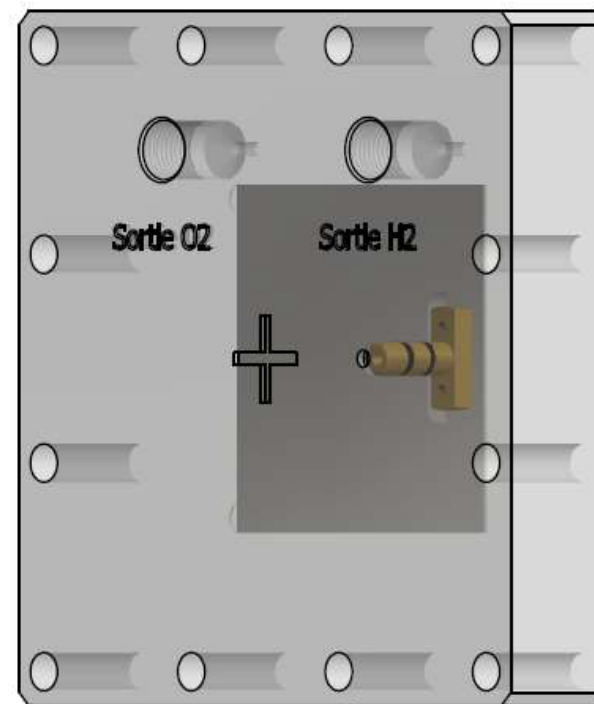
Fichier
Datei Y:\julien.udry\Electrolyseur\A3000_Cote_H2.idw

Hes·so VALAIS
WALLIS

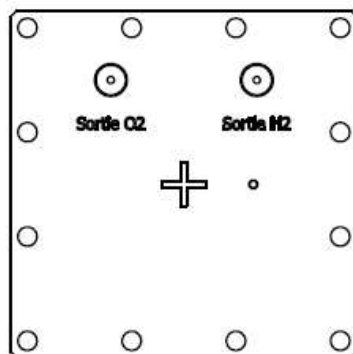
A3000




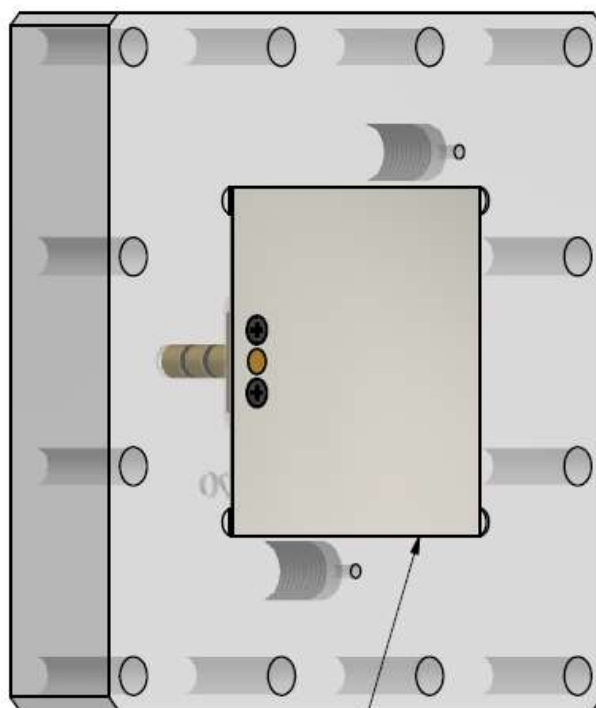
A3150



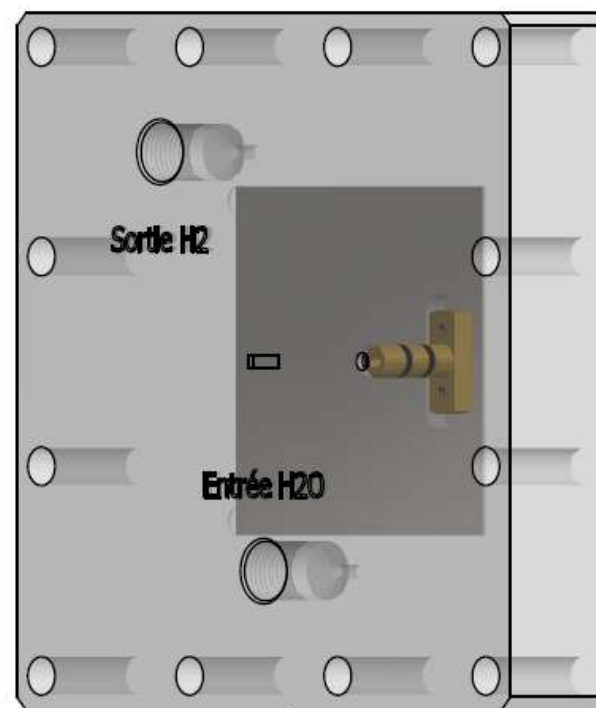
P3210



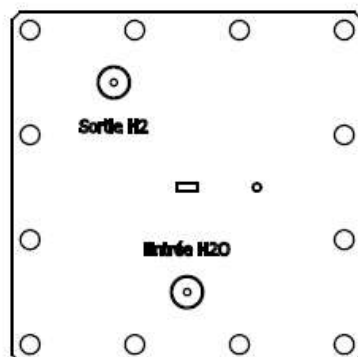
A3150	1	Divers	Assemblage plaque électrique			
P3210	1	PMMA	Plaque de soutien côté O2			
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale			
Assemblage plaque extérieur côté O2			Dessiné Gezeichnet	Julien Udry	09.07.2018	Echelle Massstab
Plaque extérieur côté anode			Contrôle Geprüft			1:1
Fichier Datei	Y:\julien.udry\Electroyseur\A3210_Plaque_Ext_O2.idw					
Hes·so  VALAIS WALLIS			A3210			



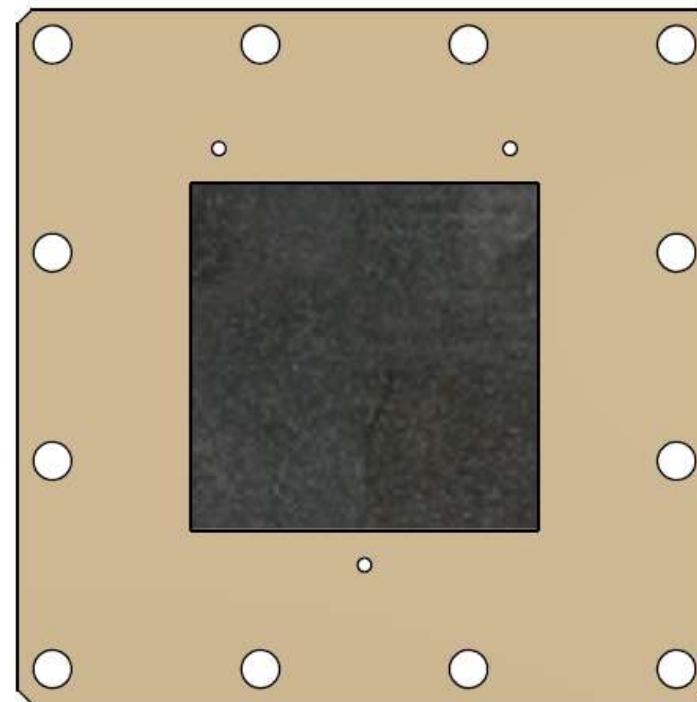
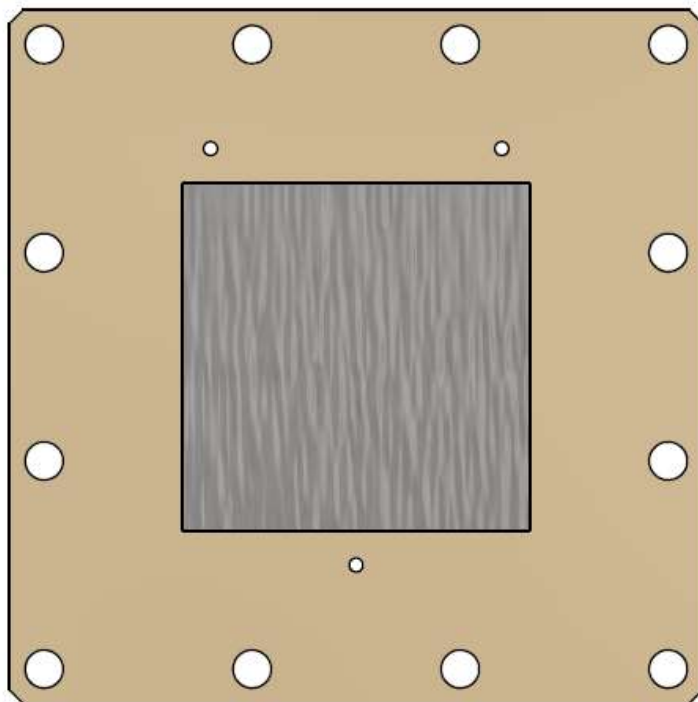
A3150




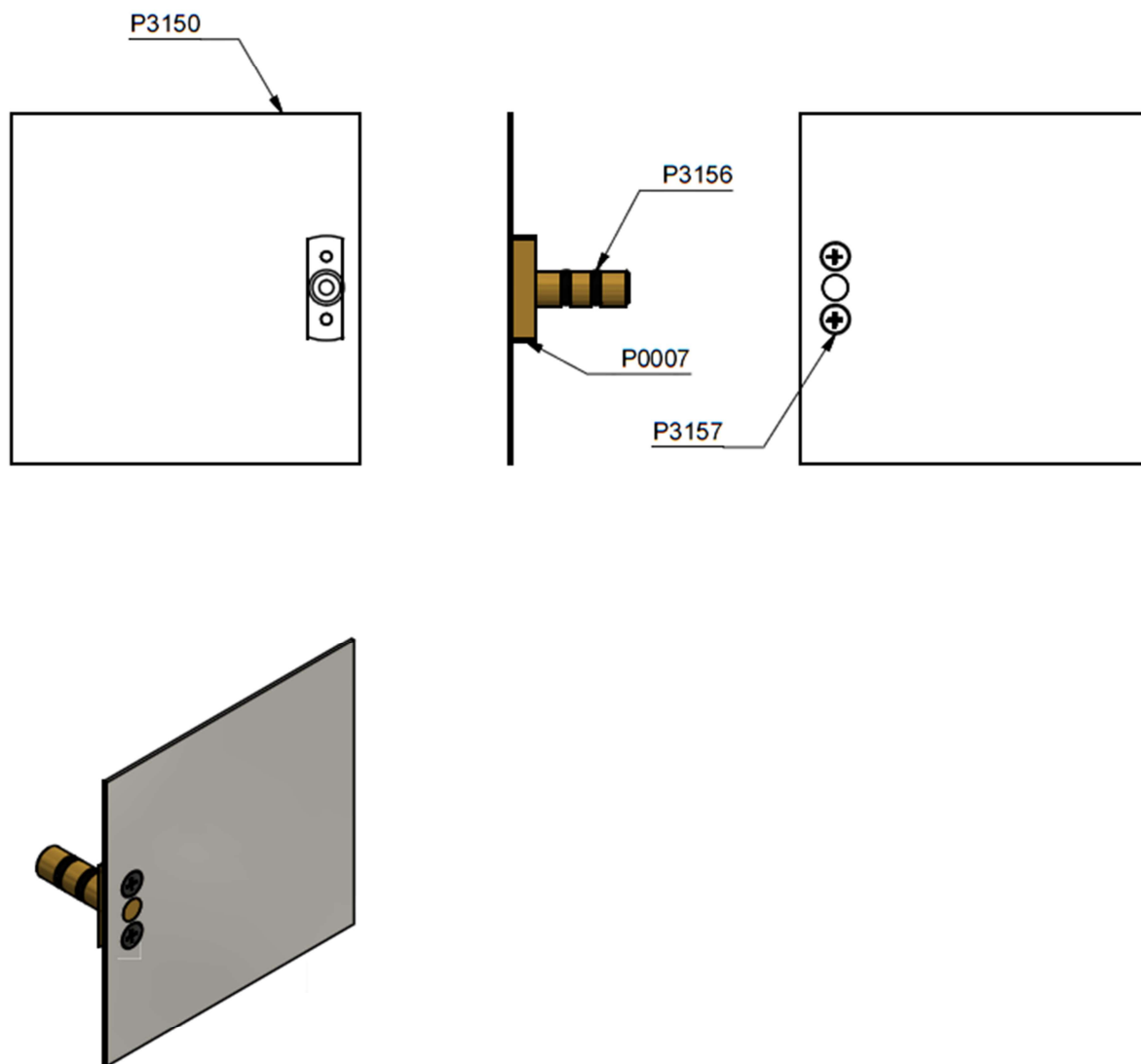
P3200



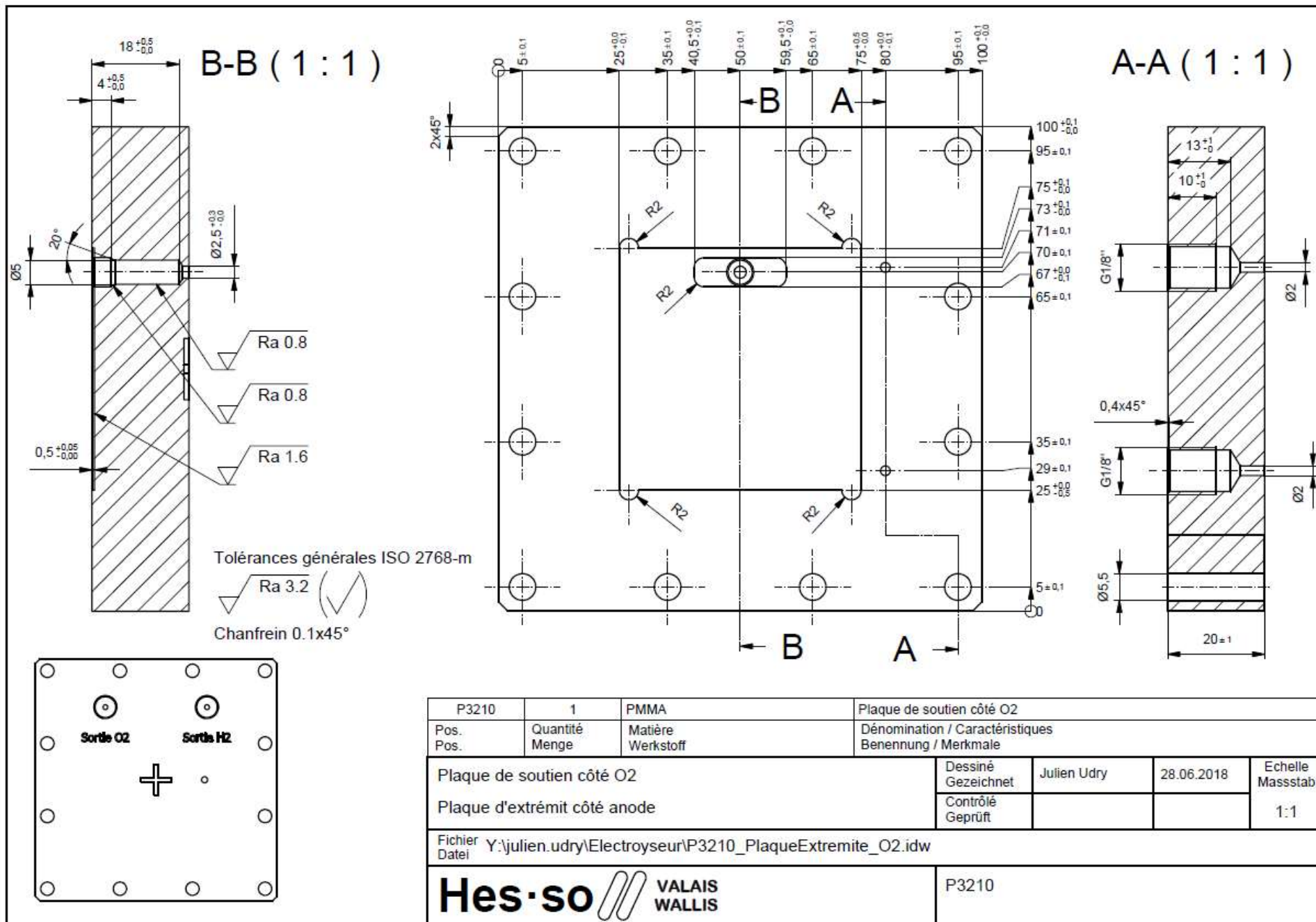
A3150	1	Divers	Assemblage plaque électrique		
P3200	1	PMMA	Plaque de soutien côté H2		
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale		
Assemblage plaque extérieur côté H2			Dessiné Gezeichnet	Julien Udry	09.07.2018
Plaque extérieur côté cathode			Contrôlé Geprüft		
Fichier Datei			Y:\julien.udry\Electrolyseur\A3200_Plaque_Ext_H2.idw		
Hes-so VALAIS WALLIS			A3200		
			Echelle Massstab		
			1:1		

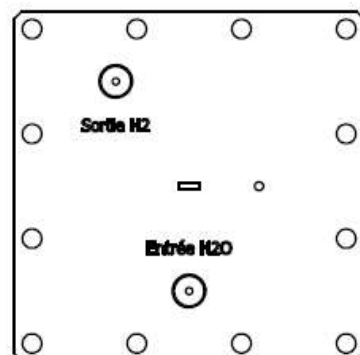


P3320	1	Iridium	Electrode iridium			
P3310	1	Platine	Electrode platine			
P3300	1	Nafion	Membrane Nafion			
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale			
Assemblage membrane MEA Membrane PEM avec électrodes			Dessiné Gezeichnet	Julien Udry	14.08.2018	Echelle Massstab 1:1
			Contrôlé Geprüft			
Fichier Y:\julien.udry\Electroyseur\A3300_MEA.idw Datei						
Hes·so  VALAIS WALLIS			A3300			



P3157	2	Steel	Vis M2x3_ISO 7046
P3156	2	Caoutchouc / Gummi	O-ring d1=3.5mm d2=1mm
P0007	1	Laiton / Messing	Kontaktstueck
P3150	1	Titane / Titan	Plaque de contact électrique
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale
			Dessiné Gezeichnet
			09.07.2018
			Echelle Massstab
			1:1
Fichier Datei Y:\julien.udry\Electroyseur\A3150_Contact.idw			
Hes·so		VALAIS WALLIS	



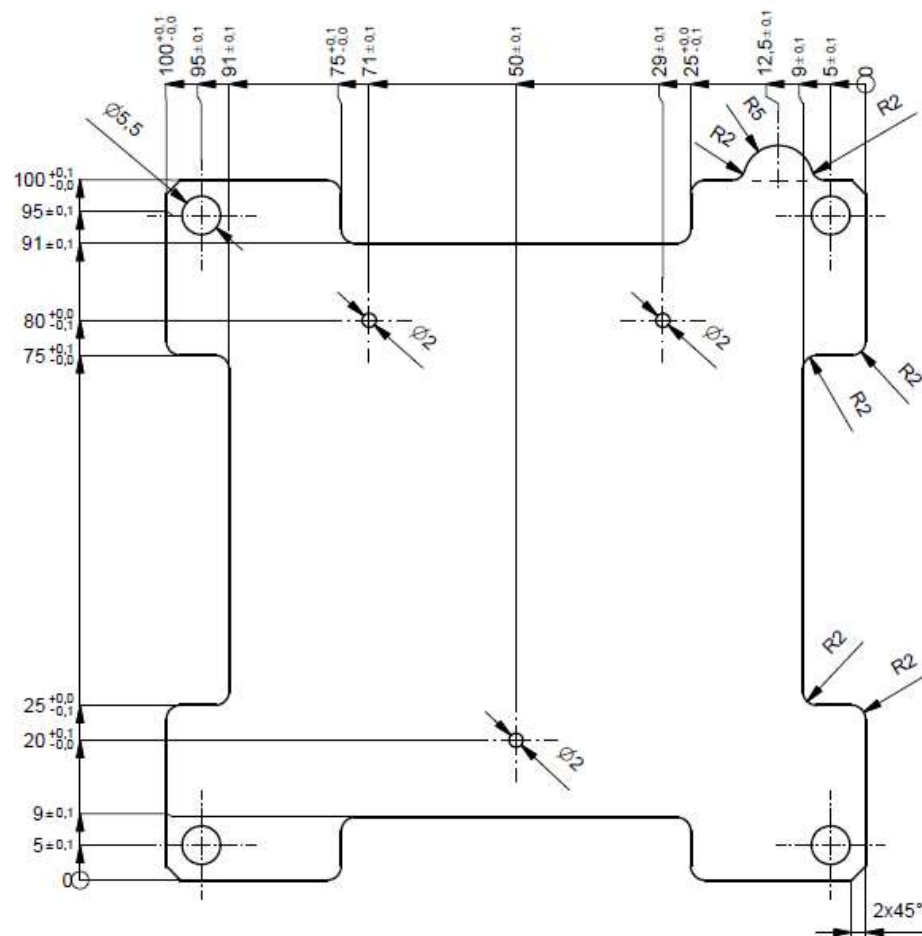



$\sqrt{\text{Ra } 3.2}$ (✓)


A

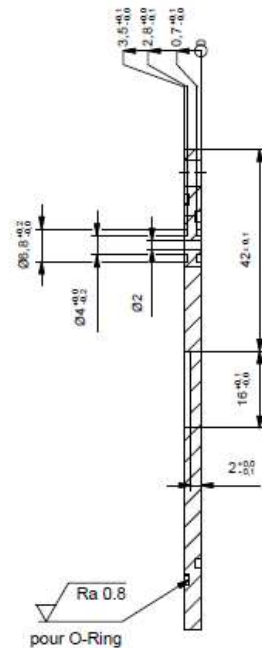
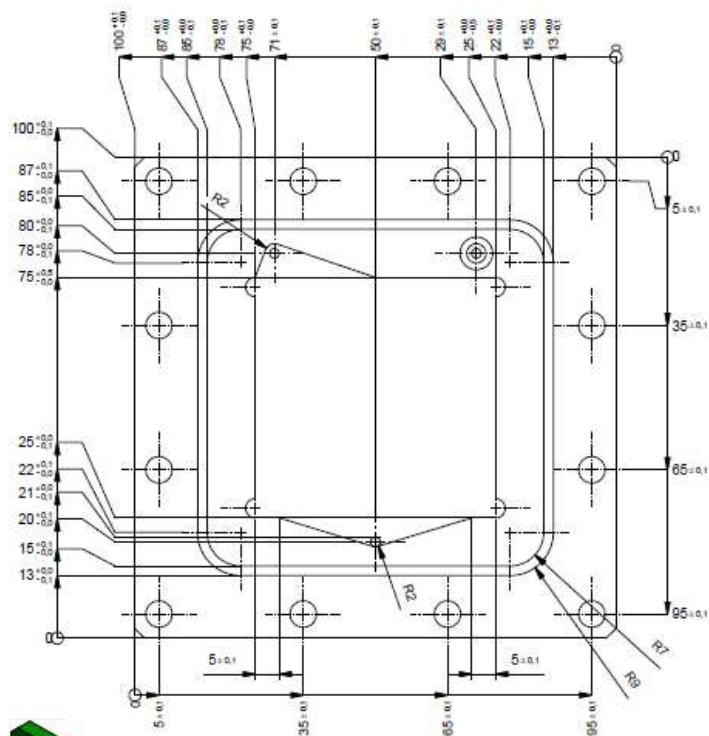
Hes-so  **VALAIS
WALLIS**

P3200

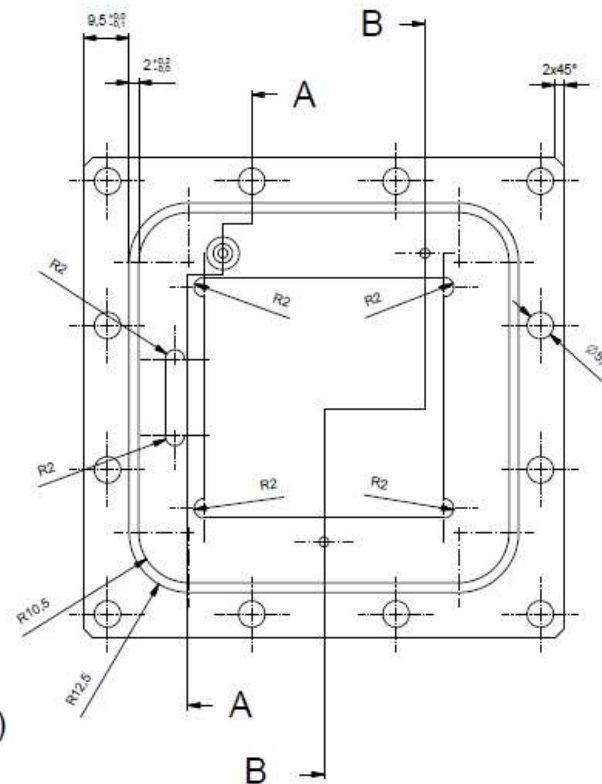


 Ra 3.2

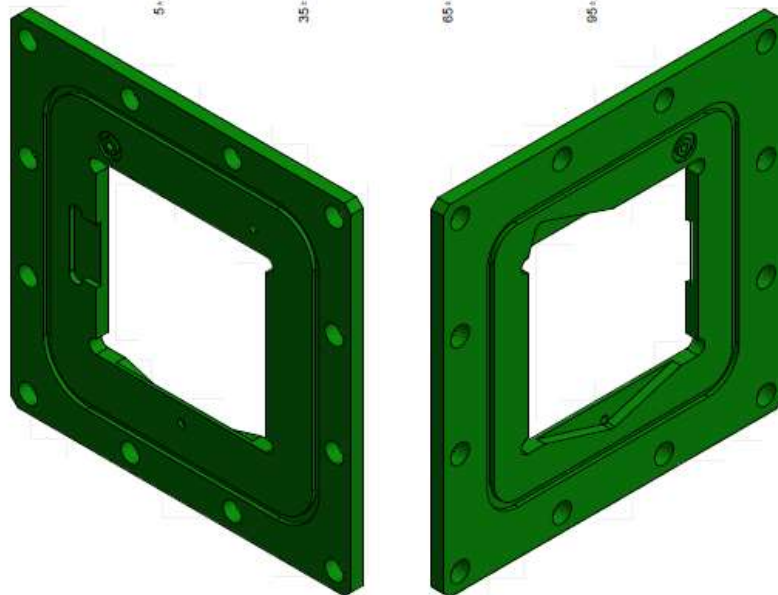
P3050	2	Titane / Titan	Plaque en titane bipolaire			
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale			
Plaque en titane bipolaire			Dessiné Gezeichnet	Julien Udry	09.07.2018	Echelle Massstab 1:1
			Contrôlé Geprüft			
Fichier Y:\julien.udry\Electroyseur\P3050_Plaque_Bipolaire_Titane.idw Datei						
			P3050			



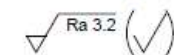
A-A (1:1)



B-B (1:1)

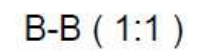
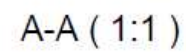
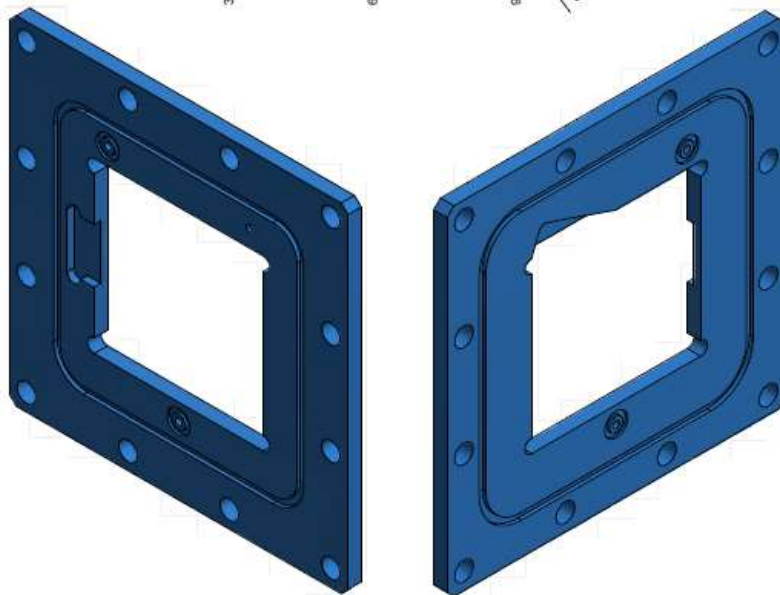




Tolérances générales ISO 2768-m




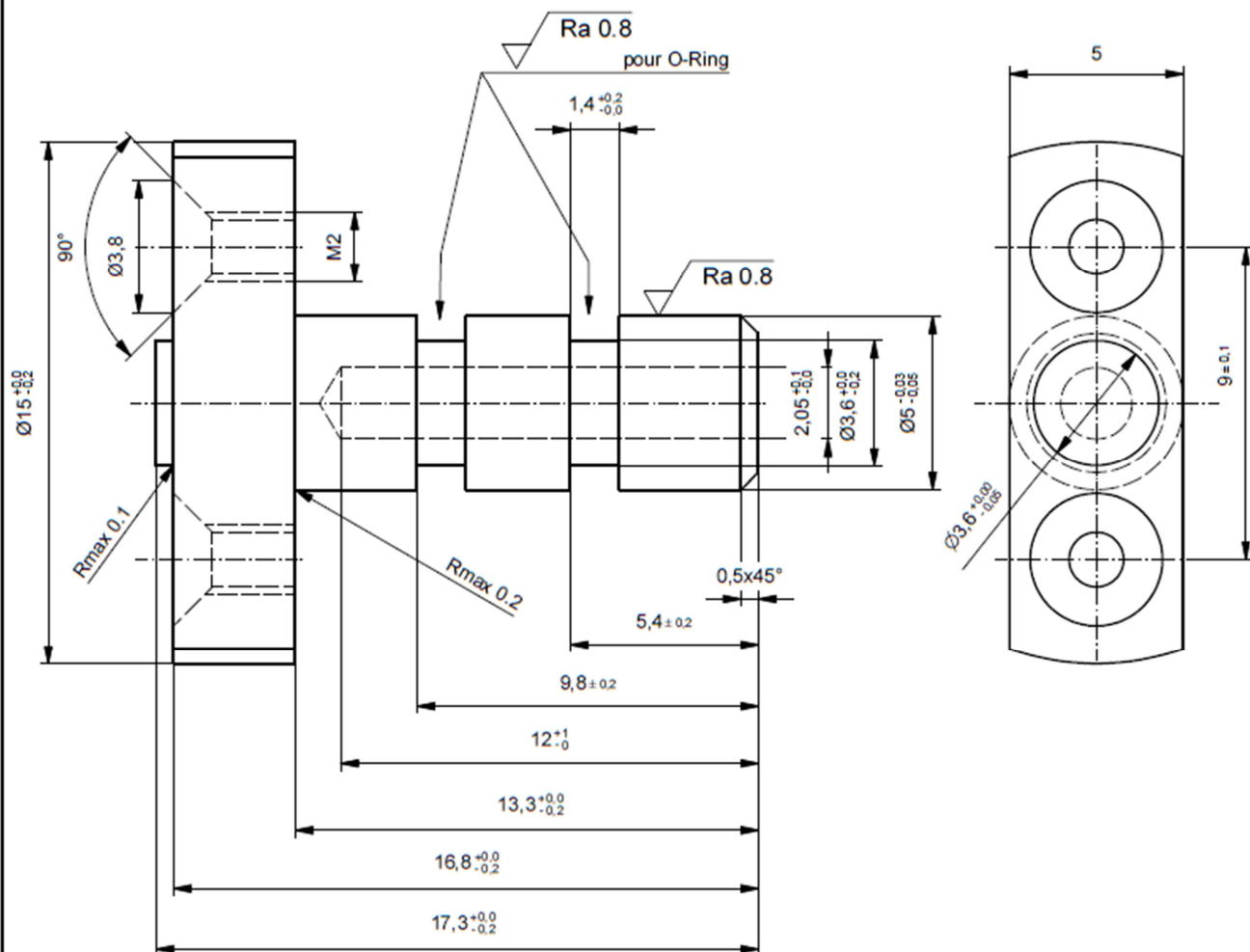
Chanfrein 0.1x45°

P3010	3	Polycarbonate, Clear	Support plastique côté O2			
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale			
Support plastique côté O2			Dessiné Gezeichnet	Julien Udry	28.08.2018	Echelle Massstab 1:1
Anode de la cellule			Contrôle Geprüft			
Fichier Datei Y:\julien.udry\Electrolyseur\P3010_Support_plastique_O2.idw						
Hes·so			VALAIS WALLIS		P3010	



 Ra 3.2 

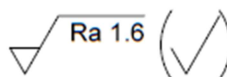
P3000	3	Polycarbonate, Clear	Support plastique côté H2			
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale			
Support plastique côté H2			Dessiné Gezeichnet	Julien Udry	28.06.2018	Echelle Massstab
Cathode de la cellule			Contrôle Geprüft			1:1
Fichier Datei Y:\julien.udry\Electrolyseur\P3000_Support_plastique_H2.idw						
			P3000			



E 1:1



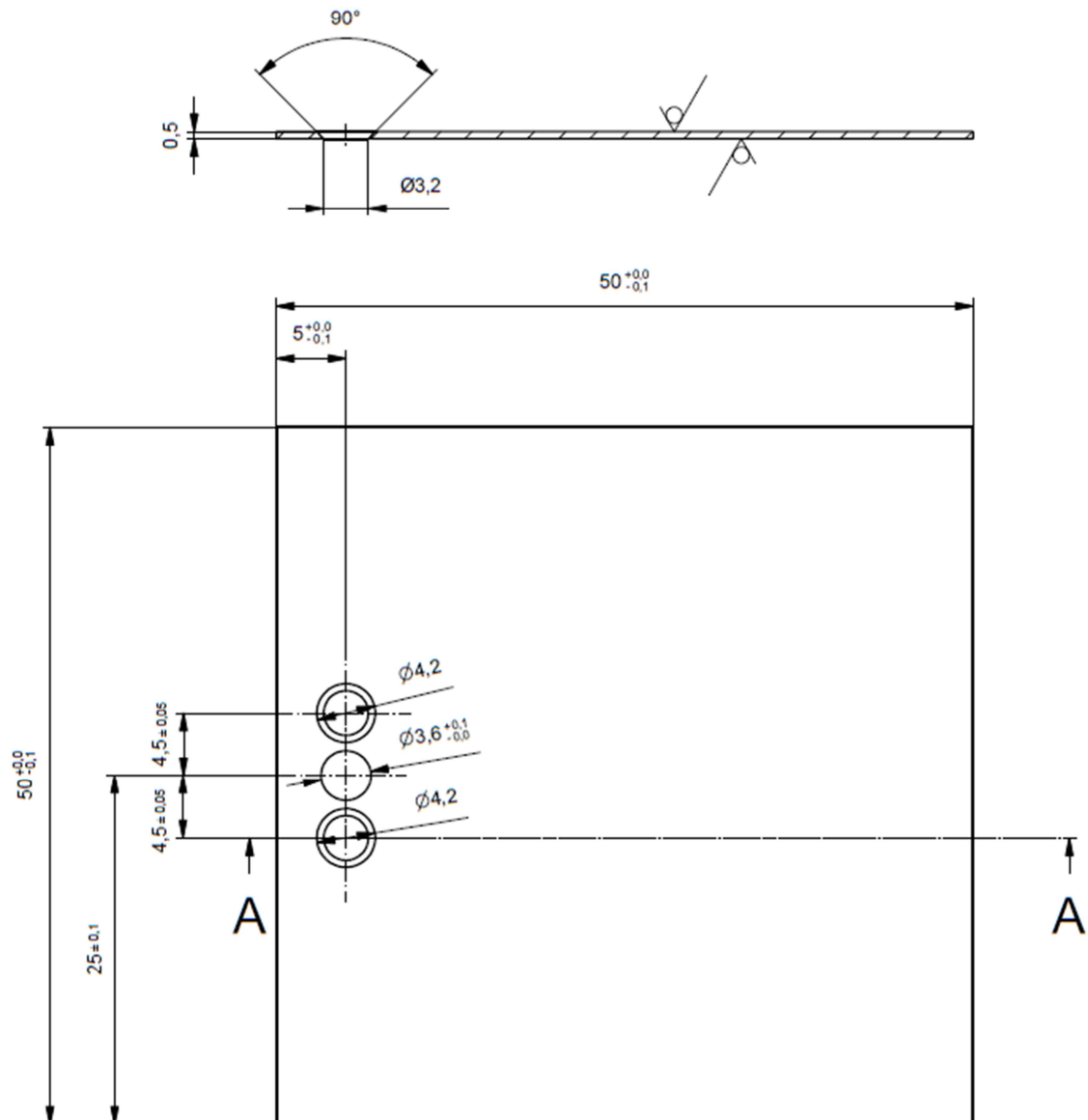
Tolérances générales ISO 2768-m



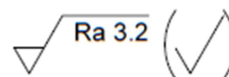
Chanfrein 0.1x45°

P0007	2	Laiton / Messing	Kontaktstueck		
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale		
PEM Electrolyzer			Dessiné Gezeichnet	Christian Cachelin	20.10.2015
Kontaktstück			Contrôle Geprüft		
Fichier Datei			Echelle Massstab 1:1		
Hes·so VALAIS WALLIS			P0007		

A-A (2 : 1)



Tolérances générales ± 0.1

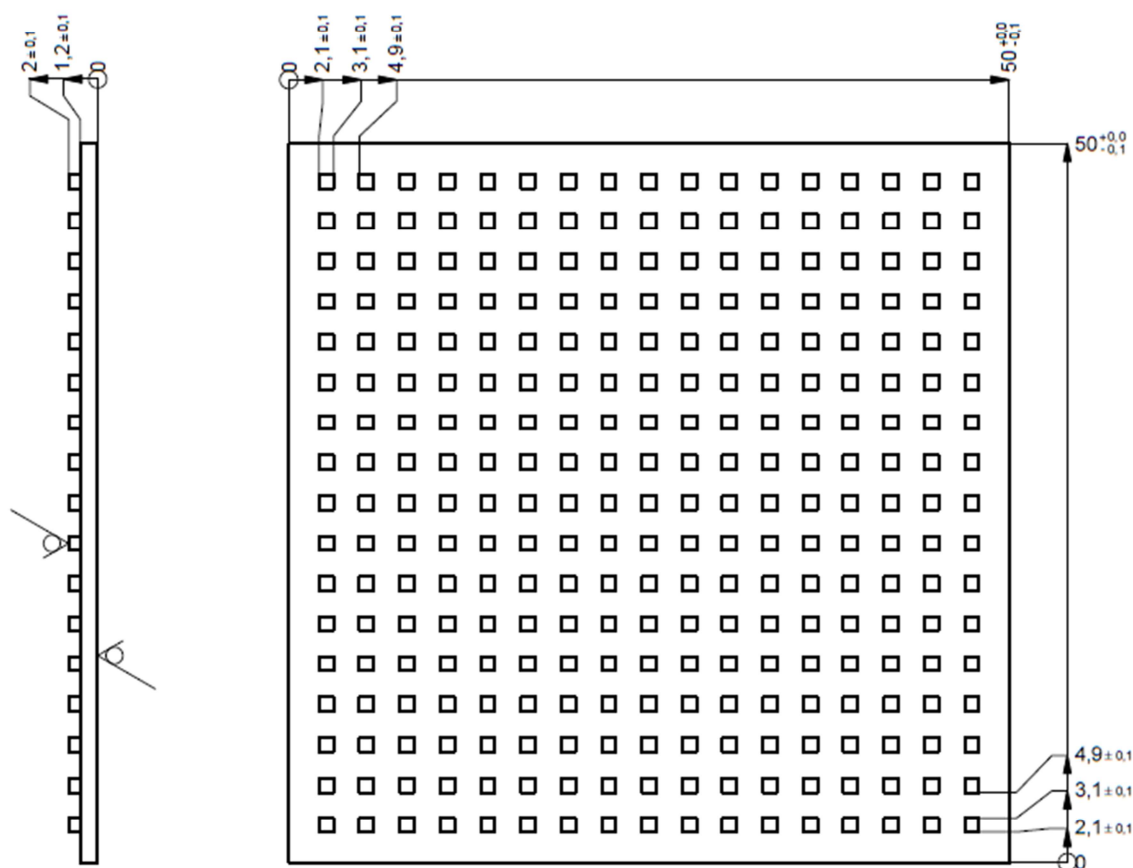


découpe au laser ou jet d'eau

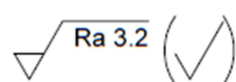
P3150	2	Titane / Titan	Plaque de contact électrique		
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale		
Plaque de contact électrique			Dessiné Gezeichnet	julien.udry	02.07.2018
Plaque de transmission d'électricité			Contrôlé Geprüft		
Fichier Datei Y:\julien.udry\Electroyseur\P3150_PlaqueContact.idw					
Hes·so VALAIS WALLIS			P3150		


Echelle
Massstab

2:1



Tolérances générales ISO 2768-m



P3060	6	Titane / Titan	Plaque titane avec circuit			
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale			
Plaque titane avec circuit			Dessiné Gezeichnet	Julien Udry	09.07.2018	Echelle Massstab
Plaque de circuit d'eau et de gaz			Contrôlé Geprüft			1:1
Fichier Datei	Y:\julien.udry\Electroyseur\P3060_Plaque_Circuit.idw					
Hes·so  VALAIS WALLIS			P3060			

Protocole de montage du stack

Pièces à disposition pour le montage du stack :

3x - A3300 - membranes Nafion	4x - P3156 - Joints Oring d1=3.5mm d2=1mm
2x - P0007 - contact électrique laiton	4x - P3157 - vis M2 x 3mm
3x - P3000 - support plastique côté H2	2x - P3200 - plaque d'extrémité côté H2
3x - P3010 - support plastique côté O2	2x - P3210 - plaque d'extrémité côté O2
6x - P3015 - Joints Oring d1=85mm d2=1.5mm	8x - P3400 - rondelle M5
6x - P3016 - Joints Oring d1=92mm d2=1.5mm	4x - P3405 - rondelle M3
18x - P3017 - Joints Oring d1=4mm d2=1mm	16x - P3410 - écrou M5
6x - P3030 - titan lochblech	8x - P3415 - écrou M3
3x - P3045 - carbon GDL	8x - P3420 - vis M5 x 80mm
2x - P3050 - plaque bipolaire	4x - P3425 - vis M3 x 70mm
6x - P3060 - plaque circuit	4x - P3430 - tube isolant pour vis
6x - P3100 - plaque adaptative inox 0.05 mm	4x - P3440 - raccord Swagelok G 1/8
3x - P3100 - plaque adaptative inox 0.2 mm	4x - P3445 - Joints Oring d1=9mm d2=2mm
2x - P3150 - plaque de contact électrique	

Prérequis avant montage :

- Après usinage des pièces, nettoyage de toutes les pièces afin d'enlever toute trace de graisse ou autre impureté sur les matériaux.
- Utilisation de gants lors de la manipulation des pièces pour le montage.

Montage du stack :

1. Préparer tous les joints sur chacune des pièces :
 - 3x - **P3000** - support plastique côté H2, pour chacune des 3 pièces :
 - 1x - **P3015** - Joints Oring d1=85mm d2=1.5mm
 - 1x - **P3016** - Joints Oring d1=92mm d2=1.5mm
 - 4x - **P3017** - Joints Oring d1=4mm d2=1mm
 - 3x - **P3010** - support plastique côté O2, pour chacune des 3 pièces :
 - 1x - **P3015** - Joints Oring d1=85mm d2=1.5mm
 - 1x - **P3016** - Joints Oring d1=92mm d2=1.5mm
 - 2x - **P3017** - Joints Oring d1=4mm d2=1mm
 - 2x - **P0007** - contact électrique laiton, pour chacune des 2 pièces :
 - 2x - **P3156** - Joints Oring d1=3.5mm d2=1mm
2. Visser les contacts électriques - **P0007** - préparé au point 1 - sur les plaques de contact électrique - **P3150** - à l'aide des vis M2 x 3 - **P3157**.
3. Insérer les contacts électriques - du point 2 - dans les plaques d'extrémité côté H2 et O2 - **P3200** - **P3210**.
4. Insérer une rondelle M3 - **P3405** - dans chacune des 4 vis M3 x 70mm - **P3425** -, puis insérer chaque vis dans un tube isolant pour vis - **P3430**.
5. Insérer les 4 vis M3 - préparée dans le point 4 - dans les 4 trous d'angle du bloc d'extrémité côté H2 - **P3200** - préparé dans le point 3 -, depuis le côté du bloc avec les gravures et le disposer à plat, gravures contre l'établi.

6. Empiler le premier support plastique côté H2 - **P3000** - préparé avec les joints - **au point 1** - de manière à ce que tous les trous soient en face et que la partie extrudée vers un des deux trous supérieurs soit contre le bloc d'extrémité - **P3200**.
7. Insérer dans l'espace intérieur du support plastique - **P3000** - les éléments suivant dans l'ordre indiqué ci-dessous :
 - 2x - **P3100** - plaque adaptative inox 0.05 mm
 - 1x - **P3100** - plaque adaptative inox 0.2 mm
 - 1x - **P3060** - plaque circuit - côté lisse contre la plaque adaptative - **P3100**
 - 1x - **P3030** - titan lochblech
 - 1x - **P3045** - carbon GDL
8. Empiler la première membrane Nafion - **A3300** - avec le catalyseur en platine (partie noire - inscription Pt) en face du carbon GDL - **P3045** - inséré auparavant - **dans le point 7**.
9. Empiler le premier support plastique côté O2 - **P3010** - préparé avec les joints - **au point 1** - de manière à ce que tous les trous soient en face et que les parties extrudées vers un des deux trous supérieurs et vers le trou inférieur soient tournées vers le haut.
10. Insérer dans l'espace intérieur du support plastique - **P3010** - les éléments suivant dans l'ordre indiqué ci-dessous :
 - 1x - **P3030** - titan lochblech
 - 1x - **P3060** - plaque circuit - côté lisse vers le haut
11. Empiler la première plaque bipolaire - **P3050** - de manière à aligner tous les trous.
12. Répéter les points 6 à 11 une seconde fois, puis à nouveau les points 6 à 10 une troisième fois.
13. Empiler le bloc d'extrémité côté O2 - **P3210** - **préparé dans le point 3** -, avec les trous alignés et les gravures vers le haut.
14. Insérer une rondelle M3 - **P3405** - dans chacune des 4 vis M3 x 70mm - **P3425** -, puis serrer avec les écrous M3 - **P3415**.
15. Redresser le bloc, insérer les rondelles M5 - **P3400** - dans les vis M5 x 80 - **P3420** -, puis insérer les vis dans les 8 trous restants (dans le même sens que les vis M3 - **au point 5**). A l'autre bout, remettre des rondelles M5 et ensuite les écrous M5 - **P3410**.
16. Insérer les joints Oring d1=9mm d2=2mm - **P3445** - sur les raccords Swagelok G 1/8 - **P3440** - et visser les raccords sur les deux plaques d'extrémité - **P3200** - **P3210**.

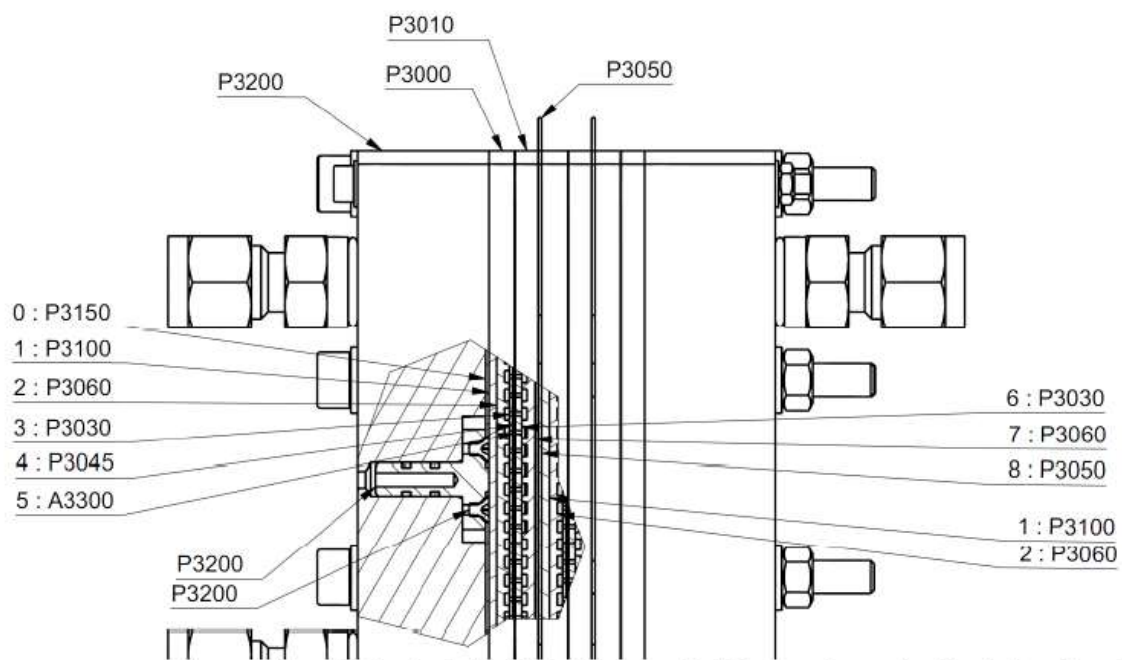
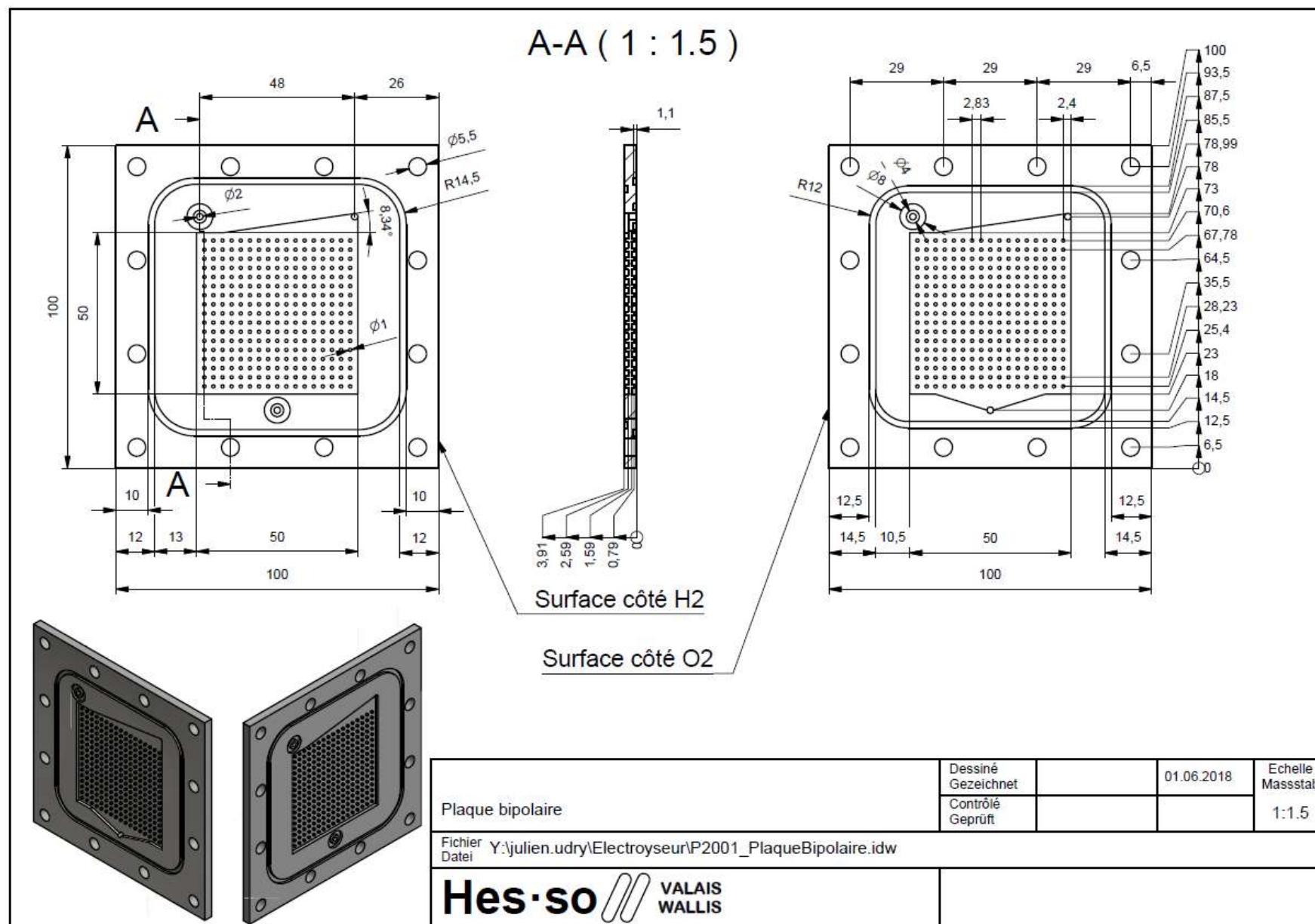


Figure 1 : Représentation du stack avec numérotation des pièces en fonction de l'empilement

La numérotation représente la position lors de l'empilement du stack. Cette vue permet également de visualiser l'orientation des différentes pièces P3060.



annexe 6 : Liste de matériel pour l'électrolyseur triple-cellules, avec liste de prix détaillée pour analyse financière

Liste de pièces pour Stack

Julien Udry

13.08.2018

Nombre de cellules

3

N°	Pièce	Matériaux	Ep [mm]	Dim. [mm]	Achat					Usinage		Prix [CHF]				Livraison	Livré	Prêt usinage	Fin
					Nbr bes.	Nbr Cmd	Prix unit.	Devise	Entreprise	N° article	Temps [h]	Entreprise	A acheter	Usinage	Disponible	Total			
A3300	Electrolyseur MEA	Nafion®	-	100x100	3	4	203.00	\$	Fuel Cell Store	1141003	0	Interne	fr. 803.88	fr. -	fr. -	fr. 803.88	7 jours	-	-
P3000	Support plastique côté H2	Polycarbonate	4	100x100	3	5	25.00	CHF	Angst + Pfister	01.2410.1200	8	Interne	fr. -	fr. 560.00	fr. 75.00	fr. 635.00	-	-	OUI
P3010	Support plastique côté O2	Polycarbonate	4	100x100	3	5	25.00	CHF			8	Interne	fr. -	fr. 560.00	fr. 75.00	fr. 635.00			OUI
P3200	Plaque d'extrémité côté H2	PMMA	20	100x100	1	3	35.00	CHF			4	Interne	fr. -	fr. 280.00	fr. 35.00	fr. 315.00			OUI
P3210	Plaque d'extrémité côté O2	PMMA	20	100x100	1	3	35.00	CHF			4	Interne	fr. -	fr. 280.00	fr. 35.00	fr. 315.00			OUI
P3030	Titan lochblech	Titane	0.254	50x50	0	0	55.00	\$	Fuel Cell Store	592779	0	-	fr. -	fr. -	fr. -	fr. -	-	-	-
			1.02	50x50	0	0	67.00	\$	Vici AG	surmesure	0	-	fr. -	fr. -	fr. -	fr. -	-	-	-
			1.5	100x100	4	4	67.00	\$	Fuel Cell Store	592787	0	Interne	fr. -	fr. -	fr. 265.32	fr. 265.32	-	-	-
P3045	Carbon GDL	Carbone	0.19	50x50	3	8	10.00	\$	Fuel Cell Store	590236	0	-	fr. 79.20	fr. -	fr. 9.90	fr. 89.10	6 jours	-	-
			0.235	50x50	0	0	14.00	\$	Fuel Cell Etc	298C	0	-	fr. -	fr. -	fr. -	fr. -	-	-	-
			0.454	50x50	0	0	14.00	\$	Fuel Cell Etc	ELAT1400	0	-	fr. -	fr. -	fr. -	fr. -	-	-	-
P3150	Plaque contact électrique	Titane	0.5	50x50	2	5	27.80	GBP	GoodFellow	401-947-94	0	metoforme	fr. -	fr. 110.00	fr. 72.84	fr. 182.84	-	-	OUI
P3050	Plaque bipolaire	Titane	0.5	100x100	2	0	27.80	GBP	GoodFellow	125-412-50	0	metoforme	fr. -	fr. 110.00	fr. 72.84	fr. 182.84	-	-	OUI
P3060	Plaque circuit	Titane	2	50x50	6	10	20.90	GBP	GoodFellow	922-100-04	7	Interne	fr. 273.79	fr. 490.00	fr. -	fr. 763.79	5 jours +	-	OUI
P3110	Plaque adaptative	Titane	0.02	50x50	0	0	47.60	GBP	GoodFellow	013-347-08	0	-	fr. -	fr. -	fr. -	fr. -	-	-	-
			0.05	50x50	0	0	17.60	GBP	GoodFellow	809-628-92	0	-	fr. -	fr. -	fr. -	fr. -	-	-	-
			0.2	50x50	0	0	20.30	GBP	GoodFellow	580-405-24	0	-	fr. -	fr. -	fr. -	fr. -	-	-	-
			1	50x50	0	0	16.60	GBP	GoodFellow	125-412-50	0	-	fr. -	fr. -	fr. -	fr. -	-	-	-
P3100	Plaque adaptative	Inox	0.02	50x50	0	0	35.60	GBP	GoodFellow	138-664-97	0	-	fr. -	fr. -	fr. -	fr. -	-	-	-
			0.05	50x50	6	10	4.70	GBP	GoodFellow	314-736-48	0	-	fr. 61.57	fr. -	fr. -	fr. 61.57	-	-	-
			0.2	50x50	3	5	4.60	GBP	GoodFellow	290-736-41	0	-	fr. 30.13	fr. -	fr. -	fr. 30.13	-	-	-
			0.5	50x50	0	0	9.40	GBP	GoodFellow	592-931-98	0	-	fr. -	fr. -	fr. -	fr. -	-	-	-
P0007	Contact électrique	Laiton	-	-	2	2	4.00	CHF	-	-	3	Interne	fr. 8.00	fr. 210.00	fr. -	fr. 218.00	-	-	OUI
F0016	Raccord serto	Inox	Swagelok G 1/8	d = 6	2	3	14.70	CHF	Swagelok	SS-6MO-1-2RP	0	-	fr. 44.10	fr. -	fr. 29.40	fr. 73.50	5 jours	-	-
P3430	Tube isolant pour vis	PMMA	dext = 5 dint = 3	L = 200	1	1	2.19	CHF	Angst + Pfister	01.2420.0001	0	-	fr. -	fr. -	fr. 2.19	fr. 2.19	-	-	-
P3420	Vis M5 x 80mm	Inox	BN 8 - DIN 912	M5 x 80	8	100	0.76	CHF	Bossard AG	1007467	0	-	fr. 76.00	fr. -	fr. -	fr. 76.00	En stock	-	-
P3425	Vis M3 x 70mm	Inox	BN 8 - DIN 912	M3 x 70	4	100	0.49	CHF	Bossard AG	3646022	0	-	fr. 48.50	fr. -	fr. -	fr. 48.50	En stock	-	-
P3157	Vis M2 x 3mm	Inox	BN 661 - DIN 965A	M2 x 3	4	100	0.13	CHF	Bossard AG	1412558	0	-	fr. 12.60	fr. -	fr. -	fr. 12.60	En stock	-	-
P3400	Rondelles M5	Inox	BN 342 - DIN 125A	M5	16	100	0.05	CHF	Bossard AG	1077619	0	-	fr. -	fr. -	fr. 0.80	fr. 0.80	-	-	-
P3405	Rondelles M3	Inox	BN 342 - DIN 125A	M3	8	100	0.05	CHF	Bossard AG	3646176	0	-	fr. -	fr. -	fr. 0.40	fr. 0.40	-	-	-
P3410	Ecrous M5	Inox	BN 115 - DIN 934	M5	8	100	0.10	CHF	Bossard AG	1089021	0	-	fr. -	fr. -	fr. 0.80	fr. 0.80	-	-	-
P3415	Ecrous M3	Inox	BN 115 - DIN 934	M3	4	200	0.04	CHF	Bossard AG	1088998	0	-	fr. 7.80	fr. -	fr. -	fr. 7.80	En stock	-	-
P3156	Joints O-ring - NBR 70 Shore	Caoutchouc	d1 = 3.5mm	d2 = 1mm	4	10	1.50	CHF	Kubo Tech	0101-001101	0	-	fr. 15.00	fr. -	fr. -	fr. 15.00	EXW	-	-
P3017	Joints O-ring - NBR 70 Shore	Caoutchouc	d1 = 4mm	d2 = 1mm	18	25	0.40	CHF	Kubo Tech	0101-001106	0	-	fr. -	fr. -	fr. 7.25	fr. 7.25	-	-	-
P3445	Joints O-ring - NBR 70 Shore	Caoutchouc	d1 = 9mm	d2 = 2mm	4	10	0.17	CHF	Kubo Tech	0101-001170	0	-	fr. -	fr. -	fr. 0.67	fr. 0.67	-	-	-
P3015	Joints O-ring - NBR 70 Shore	Caoutchouc	d1 = 85mm	d2 = 1.5mm	6	10	1.57	CHF	Kubo Tech	0101-003088	0	-	fr. 15.70	fr. -	fr. -	fr. 15.70	EXW	-	-
P3016	Joints O-ring - NBR 70 Shore	Caoutchouc	d1 = 92mm	d2 = 1.5mm	6	15	1.99	CHF	Kubo Tech	0101-001663	0	-	fr. 29.82	fr. -	fr. -	fr. 29.82	EXW	-	-
Total													fr. 1'506.09	fr. 2'600.00	fr. 682.41	fr. 4'788.50			

Taux \$	0.99
Taux €	1.16
Taux GBP	1.31

Interne CHF/heure	70
-------------------	----

Prix pour un électrolyseur mono-cellule

N°	Pièce	Nbr bes.	Prix unit.	Devise	Temps [h]	Entreprise	A acheter	Usinage	Total
A3300	Electrolyseur MEA	1	203	\$	0	-	fr. 200.97	fr. -	fr. 200.97
P3000	Support plastique côté H2	1	25	CHF	3	Interne	fr. 25.00	fr. 210.00	fr. 235.00
P3010	Support plastique côté O2	1	25	CHF	3	Interne	fr. 25.00	fr. 210.00	fr. 235.00
P3200	Plaque d'extrémité côté H2	1	35	CHF	2	Interne	fr. 35.00	fr. 140.00	fr. 175.00
P3210	Plaque d'extrémité côté O2	1	35	CHF	2	Interne	fr. 35.00	fr. 140.00	fr. 175.00
P3030	Titan lochblech	2	55	\$	0	-	fr. 108.90	fr. -	fr. 108.90
P3045	Carbon GDL	1	10	\$	0	-	fr. 9.90	fr. -	fr. 9.90
P3150	Plaque contact électrique	2	27.8	GBP	0	metoforme	fr. 72.84	fr. 110.00	fr. 182.84
P3050	Plaque bipolaire	0	27.8	GBP	0	metoforme	fr. -	fr. -	fr. -
P3060	Plaque circuit	2	20.9	GBP	2	Interne	fr. 54.76	fr. 140.00	fr. 194.76
P3110	Plaque adaptative Titane	0	327.5	GBP	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3100	Plaque adaptative Inox	3	4.7	GBP	0	-	fr. 18.47	fr. -	fr. 18.47
P0007	Contact électrique	2	4	CHF	2	Interne	fr. 8.00	fr. 140.00	fr. 148.00
F0016	Raccord sert	4	14.7	CHF	0	-	fr. 58.80	fr. -	fr. 58.80
P3430	Tube isolant pour vis	4	2.19	CHF	0	-	fr. 8.76	fr. -	fr. 8.76
P3420	Vis M5 x 80mm	8	0.76	CHF	0	-	fr. 6.08	fr. -	fr. 6.08
P3425	Vis M3 x 70mm	4	0.485	CHF	0	-	fr. 1.94	fr. -	fr. 1.94
P3157	Vis M2 x 3mm	4	0.126	CHF	0	-	fr. 0.50	fr. -	fr. 0.50
P3400	Rondelles M5	8	0.05	CHF	0	-	fr. 0.40	fr. -	fr. 0.40
P3405	Rondelles M3	4	0.05	CHF	0	-	fr. 0.20	fr. -	fr. 0.20
P3410	Ecrous M5	8	0.1	CHF	0	-	fr. 0.80	fr. -	fr. 0.80
P3415	Ecrous M3	4	0.039	CHF	0	-	fr. 0.16	fr. -	fr. 0.16
P3156	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 3.5mm d2 = 1mm	4	1.5	CHF	0	-	fr. 6.00	fr. -	fr. 6.00
P3017	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 4mm d2 = 1mm	6	0.403	CHF	0	-	fr. 2.42	fr. -	fr. 2.42
P3445	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 9mm d2 = 2mm	4	0.168	CHF	0	-	fr. 0.67	fr. -	fr. 0.67
P3015	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 85mm d2 = 1.5mm	2	1.57	CHF	0	-	fr. 3.14	fr. -	fr. 3.14
P3016	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 92mm d2 = 1.5mm	2	1.988	CHF	0	-	fr. 3.98	fr. -	fr. 3.98
-	Montage	1	0	CHF	4	Interne	fr. -	fr. 280.00	fr. 280.00
Total							fr. 687.68	fr. 1'370.00	fr. 2'057.68

Prix par cellule supplémentaire

N°	Pièce	Nbr bes.	Prix unit.	Devise	Temps [h]	Entreprise	A acheter	Usinage	Total
A3300	Electrolyseur MEA	1	203	\$	0	-	fr. 200.97	fr. -	fr. 200.97
P3000	Support plastique côté H2	1	25	CHF	3	Interne	fr. 25.00	fr. 210.00	fr. 235.00
P3010	Support plastique côté O2	1	25	CHF	3	Interne	fr. 25.00	fr. 210.00	fr. 235.00
P3200	Plaque d'extrémité côté H2	0	35	CHF	2	Interne	fr. -	fr. -	fr. -
P3210	Plaque d'extrémité côté O2	0	35	CHF	2	Interne	fr. -	fr. -	fr. -
P3030	Titan lochblech	2	55	\$	0	-	fr. 108.90	fr. -	fr. 108.90
P3045	Carbon GDL	1	10	\$	0	-	fr. 9.90	fr. -	fr. 9.90
P3150	Plaque contact électrique	0	27.8	GBP	0	metoforme	fr. -	fr. -	fr. -
P3050	Plaque bipolaire	1	27.8	GBP	0	metoforme	fr. 36.42	fr. 110.00	fr. 146.42
P3060	Plaque circuit	2	20.9	GBP	2	Interne	fr. 54.76	fr. 140.00	fr. 194.76
P3110	Plaque adaptative Titane	0	327.5	GBP	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3100	Plaque adaptative Inox	3	4.7	GBP	0	-	fr. 18.47	fr. -	fr. 18.47
P0007	Contact électrique	0	4	CHF	2	Interne	fr. -	fr. -	fr. -
F0016	Raccord sert	0	14.7	CHF	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3430	Tube isolant pour vis	0	2.19	CHF	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3420	Vis M5 x 80mm	0	0.76	CHF	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3425	Vis M3 x 70mm	0	0.485	CHF	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3157	Vis M2 x 3mm	0	0.126	CHF	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3400	Rondelles M5	0	0.05	CHF	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3405	Rondelles M3	0	0.05	CHF	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3410	Ecrous M5	0	0.1	CHF	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3415	Ecrous M3	0	0.039	CHF	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3156	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 3.5mm d2 = 1mm	0	1.5	CHF	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3017	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 4mm d2 = 1mm	6	0.403	CHF	0	-	fr. 2.42	fr. -	fr. 2.42
P3445	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 9mm d2 = 2mm	0	0.168	CHF	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3015	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 85mm d2 = 1.5mm	2	1.57	CHF	0	-	fr. 3.14	fr. -	fr. 3.14
P3016	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 92mm d2 = 1.5mm	2	1.988	CHF	0	-	fr. 3.98	fr. -	fr. 3.98
-	Montage	1	0	CHF	3	Interne	fr. -	fr. 210.00	fr. 210.00
Total							fr. 488.95	fr. 880.00	fr. 1'368.95

Interne CHF/heure	70
Taux \$	0.99
Taux €	1.16
Taux GBP	1.31

Plaque bipolaire future V1 (impression 3D ou usinage)

Pièces remplacées

N°	Pièce	Nbr bes.	Prix unit.	Devise	Temps [h]	Entreprise	A acheter	Usinage	Total
P3000	Support plastique côté H2	1	25	CHF	3	Interne	fr. 25.00	fr. 210.00	fr. 235.00
P3010	Support plastique côté O2	1	25	CHF	3	Interne	fr. 25.00	fr. 210.00	fr. 235.00
P3030	Titan lochblech	0	55	\$	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3050	Plaque bipolaire	1	27.8	GBP	0	metoforme	fr. 36.42	fr. 110.00	fr. 146.42
P3060	Plaque circuit	2	20.9	GBP	2	Interne	fr. 54.76	fr. 140.00	fr. 194.76
P3100	Plaque adaptative Inox	3	4.7	GBP	0	-	fr. 18.47	fr. -	fr. 18.47
P3017	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 4mm d2 = 1mm	6	0.403	CHF	0	-	fr. 2.42	fr. -	fr. 2.42
P3015	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 85mm d2 = 1.5mm	2	1.57	CHF	0	-	fr. 3.14	fr. -	fr. 3.14
P3016	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 92mm d2 = 1.5mm	2	1.988	CHF	0	-	fr. 3.98	fr. -	fr. 3.98
-	Montage	1	0	CHF	1	Interne	fr. -	fr. 70.00	fr. 70.00
Total							fr. 169.18	fr. 740.00	fr. 909.18

Pièces de remplacement par impression 3D

P4000	Plaque bipolaire impression SLM	1	500	€	0	Citim GmbH	fr. 580.00	fr. -	fr. 580.00
P4100	Joint plat	2	3	CHF	0	-	fr. 6.00	fr. -	fr. 6.00
-	Montage	1	0	CHF	0.01	Interne	fr. -	fr. 0.70	fr. 0.70
Total							fr. 586.00	fr. 0.70	fr. 586.70

Pièces de remplacement par usinage

P4000	Plaque bipolaire usinage	1	40	CHF	0	???	fr. 40.00	fr. 300.00	fr. 340.00
P4100	Joint plat	2	3	0	0	0	fr. 6.00	fr. -	fr. 6.00
-	Montage	1	0	CHF	0.01	Interne	fr. -	fr. 0.70	fr. 0.70
Total							fr. 46.00	fr. 300.70	fr. 346.70

Plaque bipolaire future V2 (impression 3D)

Pièces remplacées

N°	Pièce	Nbr bes.	Prix unit.	Devise	Temps [h]	Entreprise	A acheter	Usinage	Total
P3000	Support plastique côté H2	1	25	CHF	3	Interne	fr. 25.00	fr. 210.00	fr. 235.00
P3010	Support plastique côté O2	1	25	CHF	3	Interne	fr. 25.00	fr. 210.00	fr. 235.00
P3030	Titan lochblech	2	55	\$	0	-	fr. 108.90	fr. -	fr. 108.90
P3050	Plaque bipolaire	1	27.8	GBP	0	metoforme	fr. 36.42	fr. 110.00	fr. 146.42
P3060	Plaque circuit	2	20.9	GBP	2	Interne	fr. 54.76	fr. 140.00	fr. 194.76
P3100	Plaque adaptative Inox	3	4.7	GBP	0	-	fr. 18.47	fr. -	fr. 18.47
P3017	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 4mm d2 = 1mm	6	0.403	CHF	0	-	fr. 2.42	fr. -	fr. 2.42
P3015	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 85mm d2 = 1.5mm	2	1.57	CHF	0	-	fr. 3.14	fr. -	fr. 3.14
P3016	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 92mm d2 = 1.5mm	2	1.988	CHF	0	-	fr. 3.98	fr. -	fr. 3.98
-	Montage	1	0	CHF	1	Interne	fr. -	fr. 70.00	fr. 70.00
Total							fr. 278.08	fr. 740.00	fr. 1'018.08

Pièces de remplacement par impression 3D

P4010	Plaque bipolaire impression SLM	1	500	€	0	Citim GmbH	fr. 580.00	fr. -	fr. 580.00
P4100	Joint plat	2	3	CHF	0	-	fr. 6.00	fr. -	fr. 6.00
-	Montage	1	0	CHF	0	Interne	fr. -	fr. -	fr. -
Total							fr. 586.00	fr. -	fr. 586.00

Plaque bipolaire future V3 (tôle)

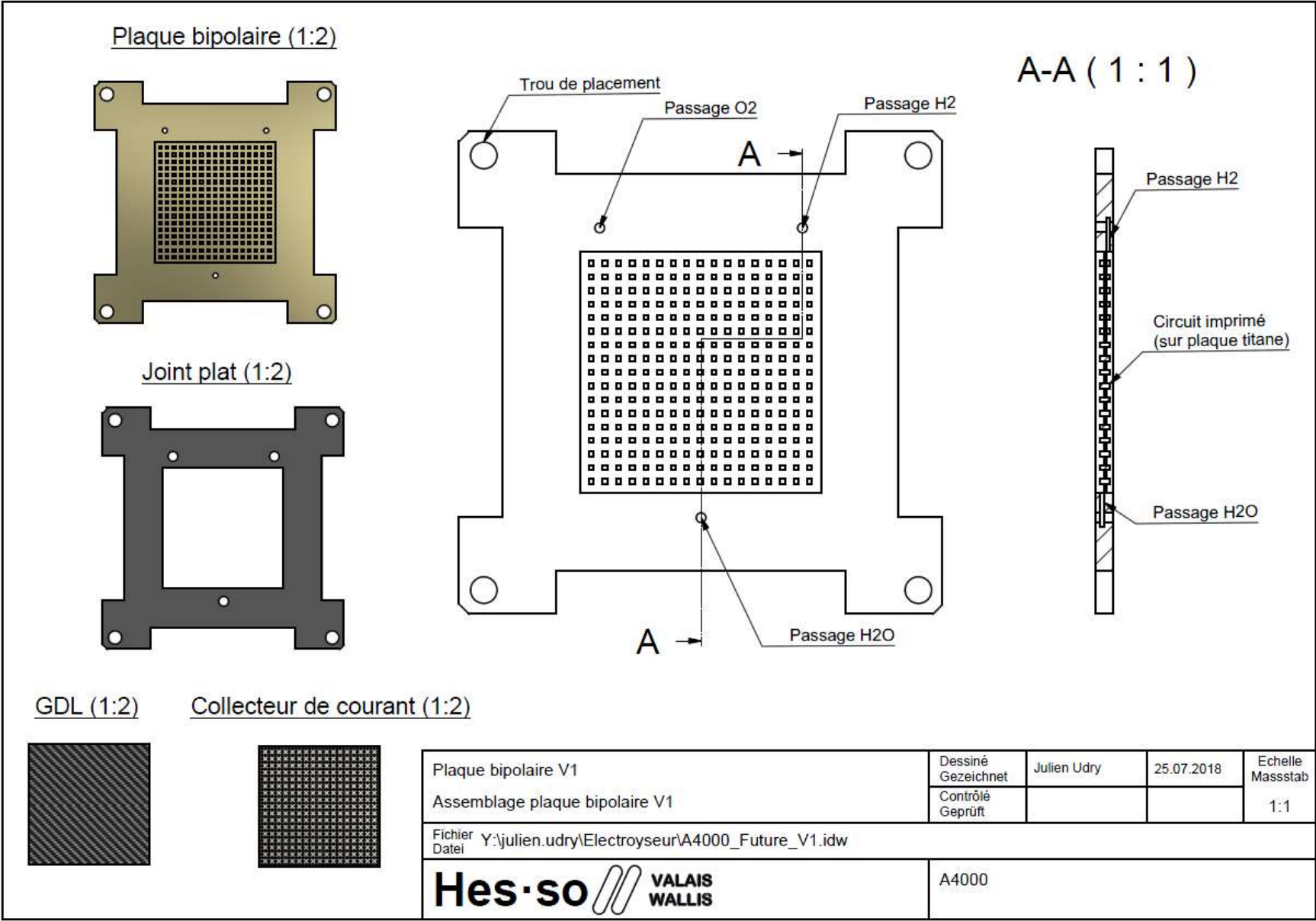
Pièces remplacées

N°	Pièce	Nbr bes.	Prix unit.	Devise	Temps [h]	Entreprise	A acheter	Usinage	Total
P3000	Support plastique côté H2	1	25	CHF	3	Interne	fr. 25.00	fr. 210.00	fr. 235.00
P3010	Support plastique côté O2	1	25	CHF	3	Interne	fr. 25.00	fr. 210.00	fr. 235.00
P3030	Titan lochblech	0	55	\$	0	-	fr. -	fr. -	fr. -
P3050	Plaque bipolaire	1	27.8	GBP	0	metoforme	fr. 36.42	fr. 110.00	fr. 146.42
P3060	Plaque circuit	2	20.9	GBP	2	Interne	fr. 54.76	fr. 140.00	fr. 194.76
P3100	Plaque adaptative Inox	3	4.7	GBP	0	-	fr. 18.47	fr. -	fr. 18.47
P3017	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 4mm d2 = 1mm	6	0.403	CHF	0	-	fr. 2.42	fr. -	fr. 2.42
P3015	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 85mm d2 = 1.5mm	2	1.57	CHF	0	-	fr. 3.14	fr. -	fr. 3.14
P3016	Joints O-ring - NBR 70 Shore d1 = 92mm d2 = 1.5mm	2	1.988	CHF	0	-	fr. 3.98	fr. -	fr. 3.98
-	Montage	1	0	CHF	1	Interne	fr. -	fr. 70.00	fr. 70.00
Total							fr. 169.18	fr. 740.00	fr. 909.18

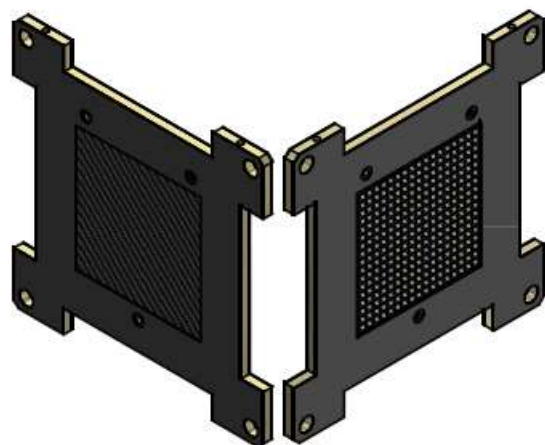
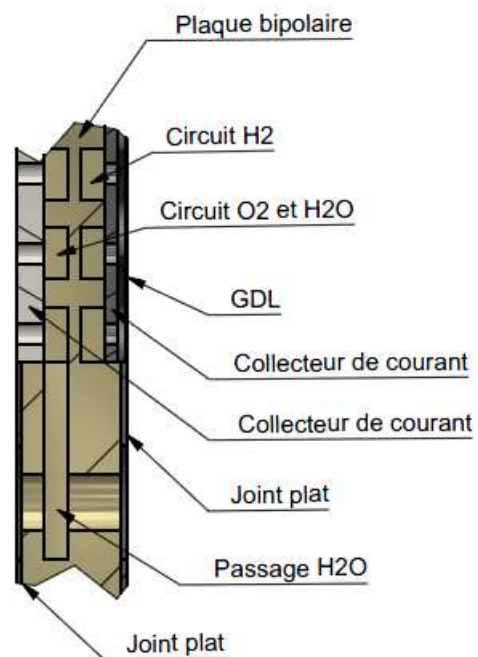
Pièces de remplacement par impression 3D

P4010	Plaque bipolaire tôle imprimée	1	20	CHF	0	Citim GmbH	fr. 20.00	fr. 15.00	fr. 35.00
P4100	Joint plat	2	5	CHF	0	-	fr. 10.00	fr. -	fr. 10.00
-	Montage	1	0	CHF	0	Interne	fr. -	fr. -	fr. -
Total							fr. 30.00	fr. 15.00	fr. 45.00

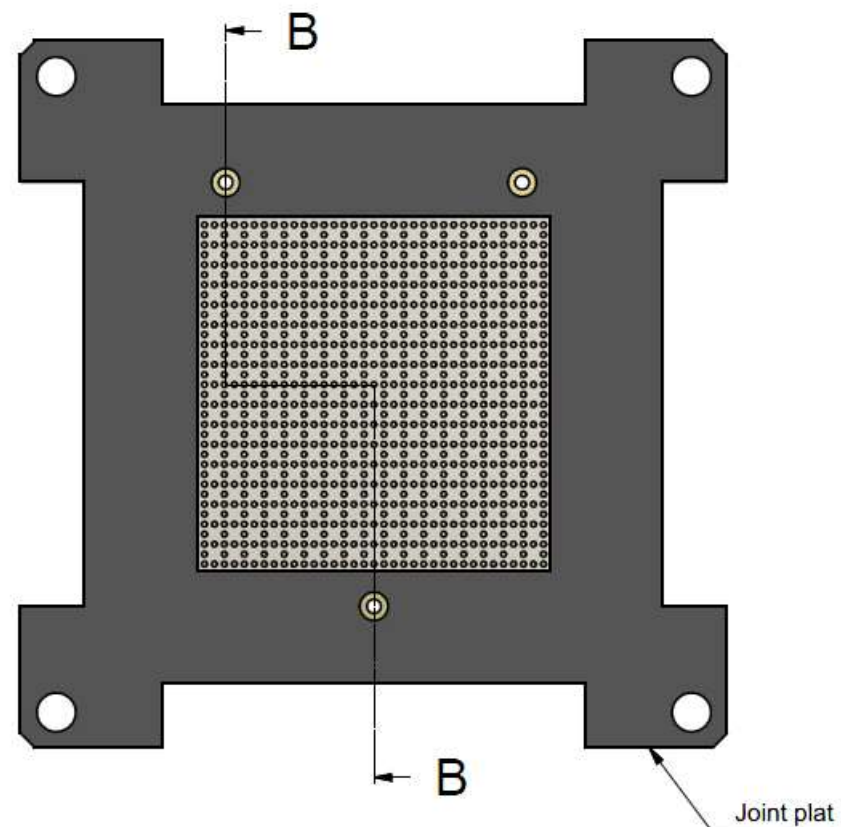
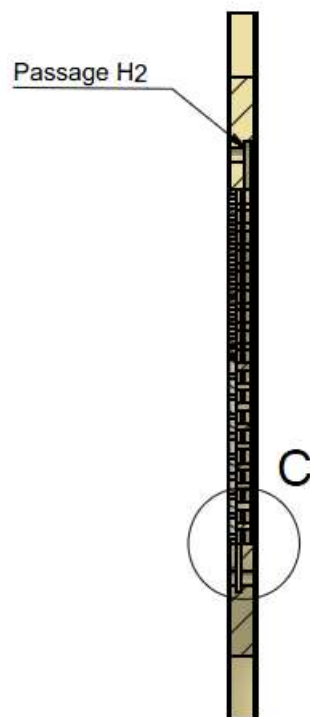
Gain par solution	
V1 - impression	fr. 322.48
V1 - usinage	fr. 562.48
V2	fr. 432.08
V3	fr. 864.18



C (4 : 1)



B-B (1 : 1)



Plaque bipolaire V1

Assemblage plaque bipolaire V1

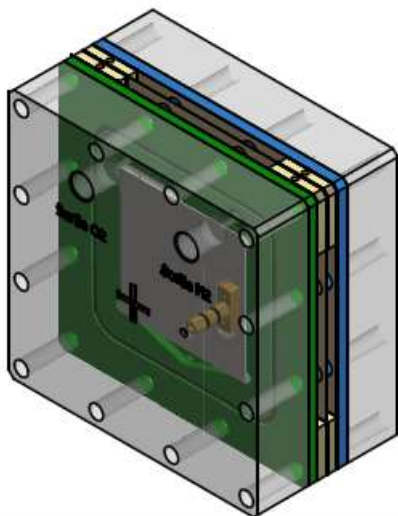
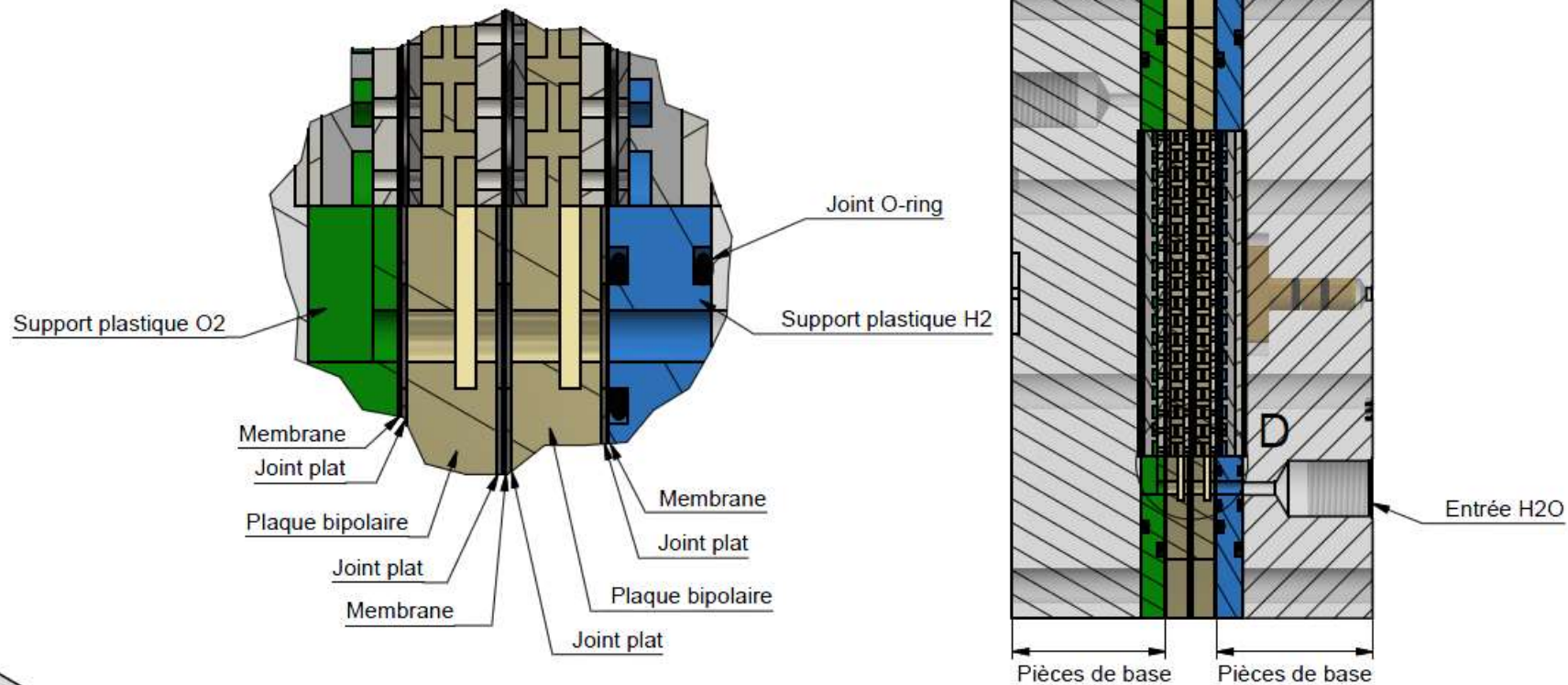
Fichier Y:\julien.udry\Electroyseur\A4000_Future_V1.idw
Datei

Dessiné Gezeichnet	Julien Udry	25.07.2018	Echelle Masstab
Contrôlé Geprüft			1:1

Hes·so VALAIS
WALLIS

A4000

D (4 : 1)



Plaque bipolaire V1

Assemblage plaque bipolaire V1

Fichier Y:\julien.udry\Electroyseur\A4000_Future_V1.idw
Datei

Dessiné Gezeichnet	Julien Udry	25.07.2018	Echelle Massstab
Contrôlé Geprüft			1:1

Hes-so VALAIS
WALLIS

A4000

annexe 8 : Plaque bipolaire, développement version 2

