

Filière Systèmes industriels

Orientation Design & Materials

Travail de bachelor Diplôme 2022

Thomas Garofano

*Conception d'un banc d'essai pour piles à
combustibles utilisant de l'hydrogène*

- *Professeur*
Mathieu Soutrenon
- *Expert*
Grégoire Gschwend
- *Date de la remise du rapport*
19.08.2022

SYND	ETE	TEVI
X	X	X

Filière / Studiengang SYND	Année académique / Studienjahr 2021-22	No TB / Nr. BA DM/2022/65
Mandant / Auftraggeber <input type="checkbox"/> HES—SO Valais <input checked="" type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>	Etudiant / Student Thomas Garofano Professeur / Dozent Mathieu Soutrenon	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes)	

Titre / Titel

Conception d'un banc d'essai pour piles à combustibles utilisant de l'hydrogène

Description / Beschreibung

Green GT est une entreprise d'ingénierie suisse travaillant sur la mobilité hydrogène. Green GT est notamment connue pour ses concept-cars pour les 24h du Mans.

Le but de ce projet est de concevoir et construire un banc d'essai pour un des composants des piles à combustible utilisées dans le powertrain des véhicules Green GT. Ce banc d'essai sera principalement fabriqué par impression 3D.

Les principales étapes du projet sont :

- La définition du cahier des charges du banc de test
- La conception du banc de test
- La fabrication du banc de test principalement par fabrication additive
- Le montage du banc de test et l'intégration du potentiostat
- La validation expérimentale du banc de test

Objectifs / Ziele

- Réaliser un banc de test fonctionnel pour une couche d'une pile à combustible type PEM
- Ecrire un white paper présentant le banc de test

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum	Délais / Termine
Responsable de l'orientation / Leiter der Vertiefungsrichtung: 	Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 16.05.2022
¹ Etudiant / Student : 	Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation: 20-21.06.2022
	Remise du rapport final / Abgabe des Schlussberichts: 19.08.22, 12:00
	Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten: 24-26.08.2022
	Défense orale / Mündliche Verfechtung: Semaine/Woche 36 (5-9.09.2022)

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.

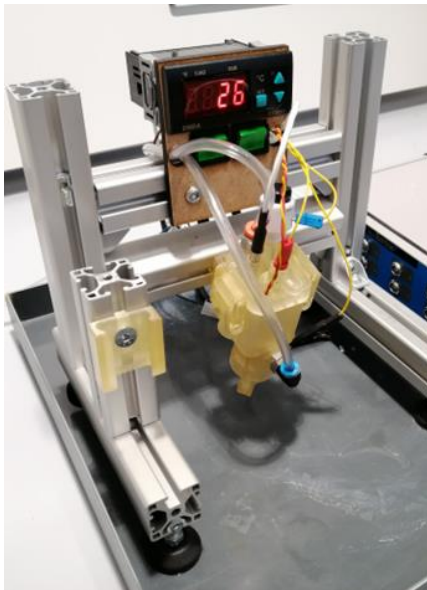


Abbildung 1 : Prüfstand

Konzeption eines Prüfstands für Wasserstoffbrennstoffzellen

Diplomand

Thomas Garofano

Ziel des Projekts

Ziel dieses Projekts ist, einen Prüfstand für einen der Komponenten der Wasserstoff-Brennstoffzellen zu entwickeln und zu bauen, die im Powertrain der GreenGT-Fahrzeuge verwendet wird. Dieser Prüfstand besteht aus acht elektrochemischen Zellen, die an einen Computer angeschlossen sind, der einen Alterungstests an den Elektroden ermöglicht.

Methoden | Experimente | Resultate

Nach der Erstellung eines Pflichtenhefts, in dem die für den Prüfstand erforderlichen Funktionen beschrieben wurden, und nach der Suche einer technischen Lösung wurde eine elektrochemische Zelle (Abb. 2) entworfen und zusammengebaut. Die meisten Elemente der elektrochemischen Zelle wurden mittels 3D-Druck (Stereolithographie) hergestellt und getestet. Diese Arbeit ist iterativ und führt zu kontinuierlichen Verbesserungen. Mit der elektrochemischen Zelle kann ein Strom gemessen werden, der durch eine Redoxreaktion zwischen einem Elektrolyten aus Perchlorsäure und Luft induziert wird. Diese Zelle ist Teil einer Baugruppe, die in 8 Exemplaren nachgebaut werden soll. Diese acht zusammengebauten Exemplare werden den definitiven Prüfstand bilden. Ein Beispiel für ein zyklisches Voltammetrie-Testergebnis (Abb. 3) auf einem ersten Prüfstand (Abb. 1) diente dazu, die Designentscheidungen zu bestätigen.

Diplomarbeit | Fassung 2022 |

Studiengang
Systemtechnik

Anwendungsbereich
Design and Materials

Verantwortliche/r Dzent/in
Mathieu Soutrenon
mathieu.soutrenon@hevs.ch

Parter
GreenGT
Ecole Polytechnique Fédérale
de Lausanne - EPFL
Innovation Park, Bâtiment A
Route J.-D. Colladon
1015 Lausanne
SUISSE

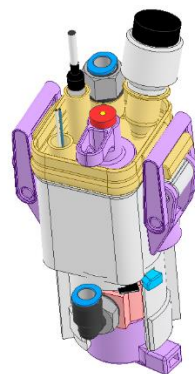


Abbildung 2: Elektrochemische Zelle mit Elektrolytbehälter (weiß), Deckel (gelb) und Befestigungssystem (violett),

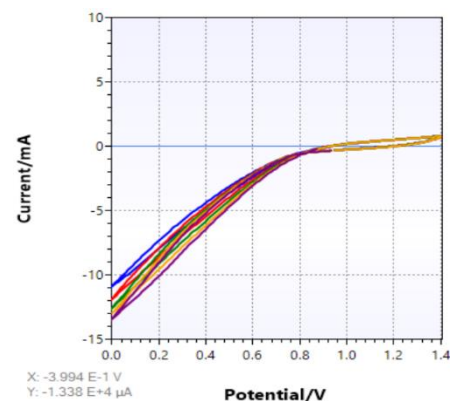


Abbildung 3: Mit dem Prüfstand erstelltes Bild der zyklisches Voltammetrie

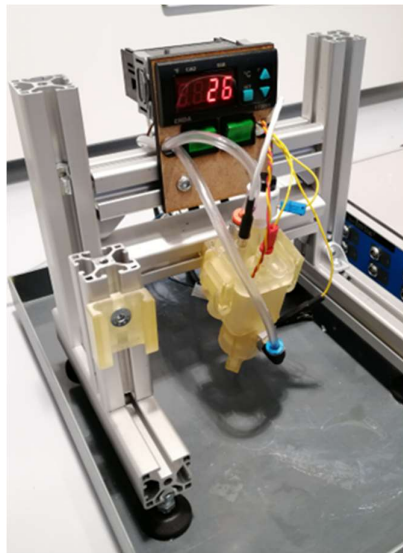


Figure 1: Banc de test

Conception d'un banc d'essai pour piles à combustible utilisant de l'hydrogène

Diplômant

Thomas Garofano

Objectif du projet

L'objectif de ce projet est de concevoir et construire un banc d'essai pour un des composants des piles à combustible à hydrogène utilisées dans le powertrain des véhicules de Green GT. Ce banc d'essai composé de 8 cellules électrochimiques connectées à un potentiostat servira à faire subir des tests de vieillissements à des électrodes.

Méthodes | Expériences | Résultats

Suite à la rédaction d'un cahier des charges décrivant les fonctions nécessaires au banc de test et à la recherche de solution technique, une cellule électrochimique (figure 2) a été conçue et assemblée. La majorité des éléments de la cellule électrochimique ont été fabriqués par impression 3D, plus précisément par stéréolithographie et testés. Ce travail est itératif et débouche sur des améliorations continues. La cellule électrochimique permet de mesurer un courant induit par une réaction d'oxydoréduction entre un électrolyte composé d'acide perchlorique et de l'air. Cette cellule fait partie d'un ensemble destiné à être reproduit en 8 exemplaires. Ces 8 exemplaires assemblés formeront le banc de test définitif. Un exemple de résultat de test de voltamétrie cyclique (figure 3) sur un premier banc de test (figure 1) a permis de valider les choix de conceptions.

Travail de diplôme
| édition 2022 |

Filière
Système industriel

Domaine d'application
Design and Materials

Professeur responsable
Mathieu Soutrenon
Mathieu.soutrenon@hevs.ch

Partenaire
GreenGT
École Polytechnique Fédérale
de Lausanne - EPFL
Innovation Park, Bâtiment A
Route J.-D. Colladon
1015 Lausanne



Figure 2: Cellule électrochimique avec, le réservoir d'électrolyte (blanc), le couvercle (jaune), système de fixation (en violet),

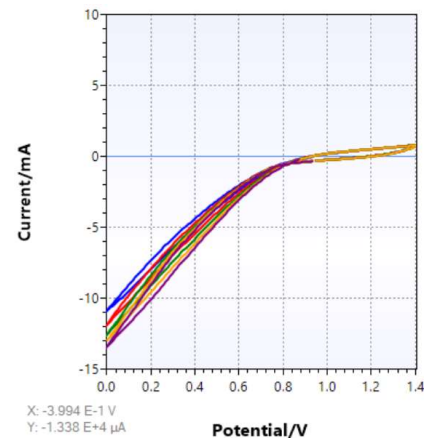


Figure 3: Image de voltamétrie cyclique produite avec le banc de test

Table des matières

1. Introduction.....	3
2. État de l’art.....	4
3. Définition du travail.....	8
4. Outils de travail	10
5. Fonctionnement du banc de test	13
6. Évaluation du fonctionnement.....	20
7. Synthèse	26
8. Conclusion	27
9. Bibliographie.....	29
10. Annexes	30

Table des illustrations

Figure 1: Schéma d'une PEMFC.....	5
Figure 2: Exemple de demi-cellule d'électrode à diffusion gazeuse produite par Gaskatel	6
Figure 3 : Composition d'une membrane échangeuse de proton.....	7
Figure 4 : imprimante SLA Phrozen mighty 4K (à gauche), séchoir UV Anycubic (à droite)	10
Figure 5 : pièces fraîchement sorties d'impression SLA avec leurs supports d'impression	11
Figure 6 : Machine de découpe laser	11
Figure 7 : résultat final du projet, image du banc de test produit	13
Figure 8 : cellule électrochimique du banc de test	14
Figure 9 : fixation de la membrane	14
Figure 10 : cellule, ensemble du réservoir d'électrolyte	15
Figure 11 : Mini Hydroflex Hydrogen Electrode, fabriqué par Gaskatel	16
Figure 12 : Vue en coupe du montage de l'électrode de référence.....	16
Figure 13 : vue en coupe d'une cellule.....	16
Figure 14 : Vue éclatée de la contre-électrode	17
Figure 15: Vue en coupe d'une cellule (gauche)	17
Figure 16 : ensemble du banc de test pour 8 membranes de pile à combustible à hydrogène.....	18
Figure 17 : répartiteur de gaz	19
Figure 18 : image de voltamétrie cyclique sur la cellule V2 du projet	21
Figure 19 : Comparaison de voltamétrie cyclique (source 1) exprimé le courant	22
Figure 20: test de régulation de température.....	22
Figure 21: Résultat du test de compatibilité chimique	24
Figure 22 : matériel préparer à côté du banc de test, dans la chapelle.....	42
Figure 23 : ordinateur portable connecté au potentiostat, éléments de fixation de la membrane.....	43
Figure 24 : montage de l'embase	43
Figure 25 : position de l'embase verrouillée	44
Figure 26: positionnement de la membrane entre les deux joints	44
Figure 27 : la membrane dépasse du montage, le bloc d'entrée d'air coude vers le bas.....	45
Figure 28 : cellule dans le support de montage	45
Figure 29 : Cellule raccordée dans le banc de test.....	46
Tableau 1 : Fonctions du banc de test et spécifications.....	8
Tableau 2 : résumé des fonctions avec évaluation	20
Tableau 3: Calcul de prix du banc de test.....	25

1. Introduction

L'objectif de ce travail de diplôme est de concevoir un banc de test de membrane de pile à combustible à hydrogène. Ce banc de test doit être capable de faire subir des tests de vieillissement à 8 membranes de piles à combustible à hydrogène. Ce projet s'inscrit dans le cadre d'un travail de diplôme à l'haute école d'ingénierie du Valais à Sion pour la filière Design and Materials.

L'entreprise GreenGT collabore au suivi de ce projet. Entreprise d'ingénierie suisse travaillant l'intégration de solutions utilisant de l'hydrogène, elle évolue dans le secteur de la compétition automobile, de la mobilité à forte puissance et du conseil à la création d'infrastructures de production et de distribution d'hydrogène. Conscient que l'hydrogène amènera une pierre à l'édifice de la transition écologique, GreenGT est actif dans l'élaboration de piles à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC). L'objectif de cette entreprise est de rendre ses piles à combustible plus durables et plus performantes. Ce travail de diplôme doit permettre de répondre à cet objectif en construisant un banc de test adapté aux attentes de GreenGT.

Descriptif du contenu des différents chapitres

Chapitre 2 :

- Explication du fonctionnement d'une pile à combustible à hydrogène à membranes échangeuses de protons
- Présentation du matériel permettant de caractériser les performances de ces membranes.

Chapitre 3 :

- Présentation du cahier des charges et des fonctions clés du banc de test

Chapitre 4 :

- Matériel employé pendant le déroulement du projet

Chapitre 5 :

- Description des choix de conceptions répondant au cahier des charges

Chapitre 6 :

- Évaluation et description du fonctionnement du banc de test

Chapitre 7 :

- Conclusion et critique de l'objectif atteint

2. État de l'art

2.1 Contexte

Dans le cadre de la diminution des rejets de gaz à effet de serre liés au domaine des transports, des alternatives aux énergies fossiles sont nécessaires. Les véhicules mus par une source d'énergie électrique sont attrayants, car ils ne produisent pas de gaz à effet de serre pendant leur utilisation. De plus, ils provoquent une faible pollution sonore en l'absence de combustion tout en se basant sur des technologies de moteurs électriques maîtrisées depuis de nombreuses années. Les piles à combustible à hydrogène représentent une technologie de conversion de l'énergie stockée sous forme d'hydrogène, en énergie électrique. Ces piles à combustible peuvent être employées pour alimenter des véhicules à moteur électrique.

2.2 Problématique

Une pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC) fonctionne sur la base d'une réaction chimique d'oxydoréduction entre de l'hydrogène et de l'air chargé d'oxygène par l'intermédiaire d'une membrane d'échange de protons (PEM). Cette membrane est recouverte d'une couche de catalyseur à base de métaux rares, le plus souvent du platine. Ce matériau est utilisé afin de faciliter les réactions d'oxydation du dihydrogène et de réduction du dioxygène. En l'état, une production de PEMFC à large échelle n'est pas encore viable d'un point de vue économique ¹. Néanmoins, l'énergie insufflée dans la recherche et le développement pour ces membranes est en progression, dopée par de nombreux projets d'achat de véhicule utilisant de l'hydrogène, particulièrement en Suisse. Une part de la recherche chez GreenGT se focalise sur la performance de ces membranes dans le temps, selon différents types d'utilisation, afin de prolonger leurs durées de vie.

2.3 Fonctionnement d'une pile à combustible à hydrogène type PEM

La production d'électricité dans une pile à combustible à hydrogène se fait grâce à l'oxydation de l'hydrogène sur l'anode, couplée à la réduction de l'oxygène sur la cathode. Deux catalyseurs ([Figure 1](#)) s'apparentant à des membranes sont le siège de ces réactions chimiques. Elles sont l'objet de beaucoup de recherches. La réaction chimique produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. La température de fonctionnement varie de 60 à 120°C selon les modèles. L'eau est évacuée sous forme de vapeur ou sous forme d'eau liquide.

Réaction chimique :

- Réduction : $O_2 + 4e^- + 4H^+ \rightarrow 2 H_2O$
- Oxydation : $H^2 \rightarrow 2 H^+ + 2e^-$
- Total : $O_2 + 2 H^2 \rightarrow 2 H_2O$

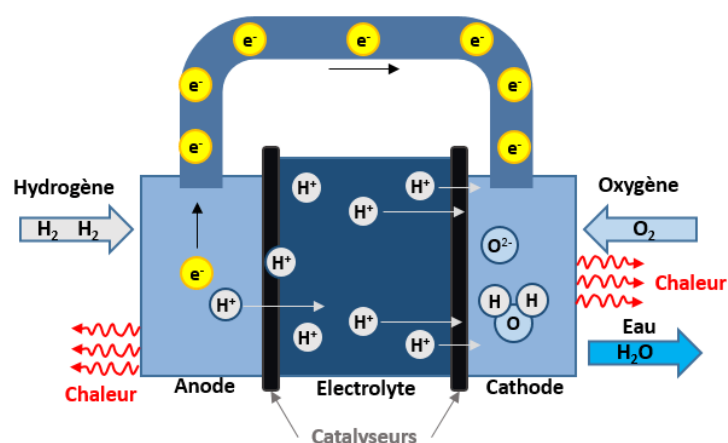


Figure 1: Schéma d'une PEMFC

2.3.1 Membrane échangeuse de proton

Un assemblage membrane-électrode (MEA, *membrane electrode assembly*) est composé d'une membrane d'échange de protons (couche conductrice en Nafion), d'une couche microporeuse, d'une couche de diffusion des gaz (GDL, pour *gas diffusion layer*) et d'une couche servant de catalyseur recouvert d'un métal précieux, le plus souvent du platine. De nouvelles conditions d'utilisation de piles à combustible à hydrogène peuvent être étudiées en laboratoire. La recherche débute sur des installations d'électrode à disque rotatif (RDE, *rotating disk electrode*). Cette méthode permet d'obtenir des résultats simplement ¹. Ces nouvelles membranes ne peuvent cependant pas être transférées à des assemblages membrane-électrode (MEA pour *membrane electrode assembly*). Une MEA permet de simuler des conditions d'utilisation se rapprochant le plus d'une pile à combustible à hydrogène conventionnelle. La composition d'une membrane doit être optimisée pour chaque système de catalyseur individuel ². Cependant, les effets des paramètres de la couche de la membrane sur les performances de la réaction d'oxydoréduction ne peuvent pas être évalués avec la technique RDE. Ceci est dû à une limitation de densité de courant et aux paramètres idéalisés des couches de la membrane ³. Ainsi, les expériences MEA doivent être utilisées pour l'optimisation de la couche de catalyseur. Ce processus permet à terme de trouver les meilleurs paramètres d'exploitations d'une membrane, tout en étant coûteux en temps.

Une technique qui permet d'allier les avantages d'une RDE et d'une MEA est d'utiliser un montage en demi-cellule d'électrode à diffusion gazeuse (GDE pour *gas diffusion electrode*). Ce montage se situe à mi-chemin entre la recherche fondamentale en laboratoire et la recherche appliquée sur les membranes des piles à combustible. Proposer une solution innovante à de tels montages en se basant sur des modèles existants de GDE est l'objectif de ce travail de diplôme. Cette installation permettra à son tour d'optimiser l'exploitation de membrane de pile à combustible à hydrogène.

2.3.2 Système de test existant pour membranes

Le fonctionnement interne du banc de test s'inspire d'une demi-cellule d'électrode à diffusion gazeuse existante sur le marché, voire [Figure 2](#). Les aspects électrochimiques du projet sont abordés en collaboration avec l'entreprise GreenGT.

Un montage en demi-cellule de GDE est une installation permettant de faire des mesures de corrosion pour des électrodes à diffusion de gaz et des électrodes de batterie. Le modèle *Test Cell GlexCell* vendu par l'entreprise Gaskatel a été choisi comme base de discussion pour ce projet.

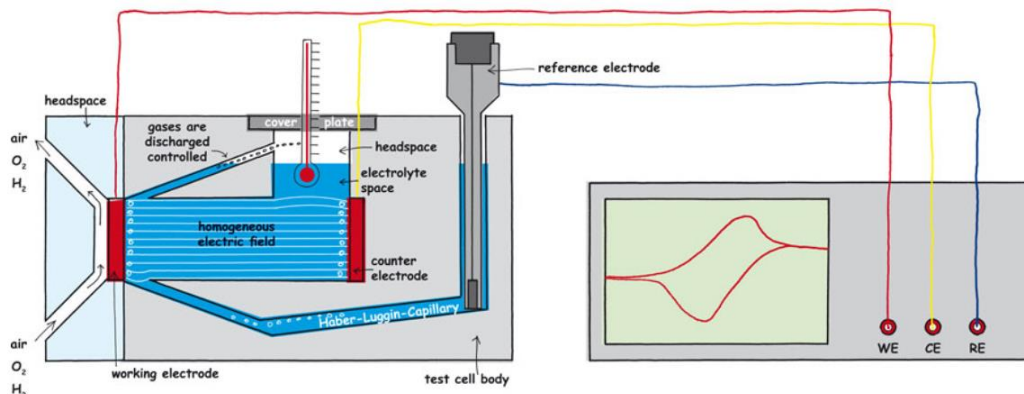


Figure 2: Exemple de demi-cellule d'électrode à diffusion gazeuse produite par Gaskatel

Sur la figure ci-dessus, sont présents les éléments de bases suivants :

- Une électrode de travail
- Une contre électrode
- Une électrode de référence
- Un apport d'oxygène
- De l'électrolyte

Par rapport au schéma montré sur la Figure 1, une demi-cellule représente un demi-système de pile à combustible à hydrogène. Ce système fonctionne sur la base d'une réaction d'oxydoréduction comme pour une de piles à combustible à membrane d'échange de protons. Cependant, l'installation n'a pas besoin d'être alimentée par une source d'hydrogène, les cations H^+ sont fournis par la solution électrolytique, par exemple de l'acide perchlorique ($HClO_4$). En imposant une différence de potentiel entre l'électrode et la contre-électrode, un flux d'électron se forme dans la cellule pour alimenter la réaction d'oxydoréduction. L'électrode de référence permet de mesurer la différence de potentiel entre la solution d'électrolyte et l'électrode de travail. Ce système peut fonctionner, car la membrane est poreuse aux cations.

Test de vieillissement

Un test de vieillissement consiste à faire varier la différence de potentiel dans le système de manière cyclique et d'imposer une température de fonctionnement.

Motivation du montage

Dans une pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEM), la membrane est un empilement de 5 couches, voir [Figure 3](#) :

1. Une couche d'étanchéité
2. Une membrane de diffusion gazeuse
3. Une membrane échangeuse de protons avec catalyseur
4. Une membrane de diffusion gazeuse
5. Seule la moitié d'une membrane conventionnelle est nécessaire.

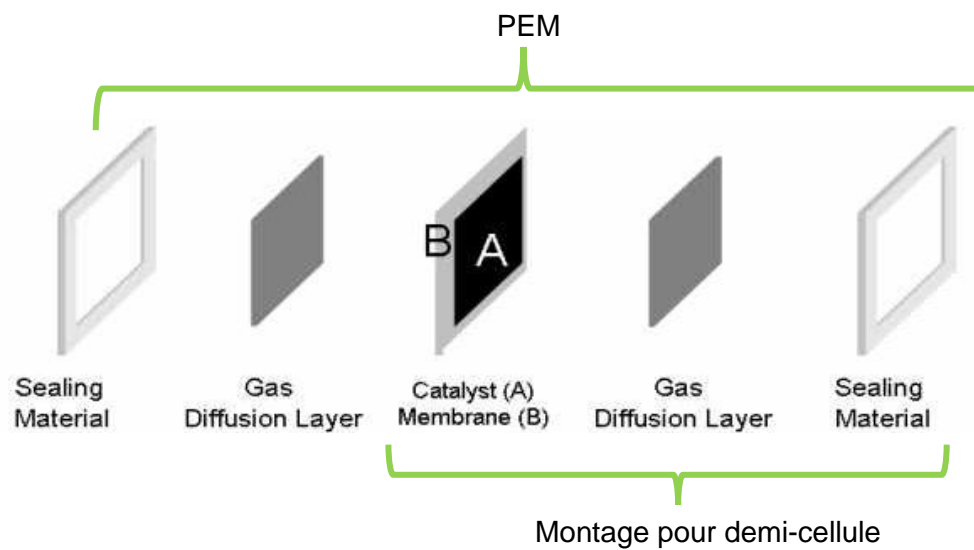


Figure 3 : Composition d'une membrane échangeuse de proton

Dans une demi-cellule, seule une phase gazeuse est présente du côté de l'injection d'air. Les trois premières couches de l'empilement ci-dessus suffisent. Une demi-cellule permet de tester des membranes avec moins de composants et donc à moindre coût.

3. Définition du travail

3.1 Cahier des charges

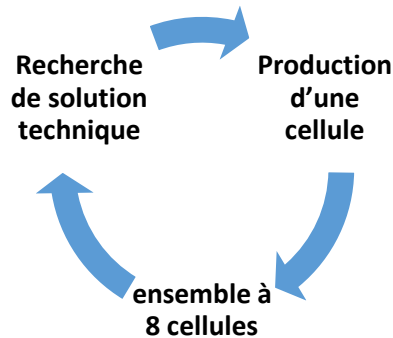
Ce tableau établit les fonctionnalités attendues du banc de test de membranes de pile à combustible à hydrogène. Les spécifications décrivent la façon dont les exigences seront prises en compte.

Numéro	Descriptif	Spécification
Fonction 1	Intégrer 8 électrodes de référence à hydrogène sélectionnées par Green GT, intégrées selon les informations de montage du fournisseur	Pointe de l'électrode placée au plus proche de l'électrode de travail
Fonction 2	Intégrer 8 électrodes de travail (membranes), fourni par Green GT	Surface de travail de 0,033 à 1cm ²
Fonction 3	Intégrer 8 contre-électrodes en platine	Surface de travail supérieur à l'électrode de référence. Distance entre électrode de travail et électrode de référence : 1-2cm
Fonction 4	Réguler la température des bains d'électrolyte	Température de travail 80°C
Fonction 5	Chaque électrode de travail fait face à un bain d'électrolyte individuel	Volume d'électrolyte : 25-30 ml
Fonction 6	Faire simultanément de l'électrochimie sur 8 cellules à 3 électrodes	Montage d'une cellule électrolytique répondant au cahier des charges, reproduite et alignée en 8 exemplaires
Fonction 7	Voir la face immergée de l'électrode de travail pendant un test	Intégrer un hublot en verre
Fonction 8	Faire baisser le taux d'oxygène du réservoir d'électrolyte	Inclure une entrée d'argon
Fonction 9	Les pièces en contact avec l'électrolyte résistent à un PH de 0-1	Procéder un test de compatibilité chimique
Fonction 10	Faire circuler un gaz devant chaque face d'électrode non immergée	Inclure une entrée d'air
Fonction 11	Se nettoyer complètement en démontant chaque pièce	Pas de cavité où peut s'accumuler des dépôts
Fonction 12	Amorcer efficacement un test en plaçant chaque pièce dans l'ensemble	Lancement d'un test en 1h
Fonction 13	Nettoyer efficacement le système	Procéder au nettoyage en 30 minutes
Fonction 14	Crée un ensemble avec le banc de test, le potentiostat, un laptop	Les opérations doivent être exécutées sous une chapelle de laboratoire
Fonction 15	Évacuer les bulles d'air devant l'électrode de travail	Pas de bulle d'air devant l'électrode
Fonction 16	Manipuler la cellule sans risque de perte d'électrolyte	Emploi de joints en silicone

Tableau 1 : Fonctions du banc de test et spécifications

3.2 Démarche

Le projet s'inscrit dans un processus itératif entremêlant les 3 points suivants :



Recherche de solution technique

Un atelier mécanique équipé de machines conventionnelles est à disposition pour le projet en plus d'une imprimante 3D stéréolithographie pour la fabrication des pièces. Le prototypage de solutions techniques est aisé en produisant directement des échantillons de pièces pour un coût restreint. Chaque pièce imprimée pourra être testée et sa maniabilité sera garantie.

Production d'une cellule

Au fur et à mesure que des solutions sont validées, elles sont intégrées à un dessin d'ensemble 3D représentant la cellule. L'état d'avancement de la conception de la cellule est constaté en imprimant régulièrement la dernière version en 3D. L'assemblage est évalué tout au long du processus de conception et permet de faire des adaptations éventuelles.

Conception d'un ensemble fonctionnelle à 8 cellules

L'objectif est d'avoir une vue d'ensemble sur le banc de test tout au long du projet. À nouveau, la recherche de solutions ergonomiques est validée par la manipulation des prototypes. L'ensemble une fois monté permet l'intégration des 8 cellules fonctionnelles et du matériel de test à savoir : un ordinateur portable et un potentiostat.

Un tableau montre la succession des versions de la cellule électrochimique (Annexe 9) présente au cœur du banc de test. Chaque version est comparée aux fonctions présentes dans le cahier des charges.

4. Outils de travail

4.1 Matériel de conception

4.1.1 Logiciel de création graphique

Autodesk SketchBook est un logiciel de création graphique dédié à l'illustration et au dessin virtuel. Il a été utilisé pour esquisser les premiers concepts du banc de test.

4.1.2 Logiciel de modélisation 3D

Autodesk Inventor 2021 est un logiciel de dessin 3D. Il a été utilisé pour produire les fichiers de type STL nécessaire pour l'impression 3D et éditer des plans de pièces.

4.2 Outils de productions

4.2.1 Programme d'impression

Chitobox est un logiciel professionnel de prétraitement pour l'impression 3D par stéréolithographie. Il permet de répartir les pièces sur le plateau d'impression, de leur donner une orientation optimale et d'ajouter des supports indispensables pour l'impression.

4.2.2 Imprimante 3D

L'imprimante 3D Sonic Mighty 4K de Phrozen ([Figure 4](#) : imprimante SLA Phrozen mighty 4K (à gauche), séchoir UV Anycubic (à droite)) a été utilisée pour imprimer les pièces du banc de test. Cette imprimante emploie la technologie de stéréolithographie (SLA). Cette technologie utilise des résines photopolymères, composées d'époxy et d'acrylate thermodurcissables. La matière est polymérisée par l'intermédiaire d'un écran UV et la construction de la pièce se fait couche par couche.



Figure 4 : imprimante SLA Phrozen mighty 4K (à gauche), séchoir UV Anycubic (à droite)

Après l'impression :

- Les pièces imprimées sont retirées de la plaque d'impression
- Les supports générés par le programme d'impression sont retirés ([Figure 5](#))
- Rinçage à l'isopropanol

- Bain d'UV entre 10 et 30 minutes (machine sur [Figure 4](#) : imprimante SLA Phrozen mighty 4K (à gauche), séchoir UV Anycubic (à droite))

Une observation à l'œil nu et au microscope permet d'évaluer la qualité du rendu. Les spécifications techniques de l'imprimante, de la résine utilisée, des paramètres d'impression et de post-traitement sont en annexe de ce document ([Annexe 2](#)).



Figure 5 : pièces fraîchement sorties d'impression SLA avec leurs supports d'impression

4.2.3 Découpeuse laser

Une découpeuse laser, la Gravograph LS 100 Ex, ainsi que son programme de prétraitement ont été employés pour produire les joints en silicone du banc de test. La matière brute est un rouleau de silicone de 0,5 mm d'épaisseur.



Figure 6 : Machine de découpe laser

4.3 Régulation thermique

Un logiciel, *Matlab simscape* a été utilisé pour simuler un modèle brut de la cellule chauffée par une cartouche chauffante. Schéma en annexe ([Annexe 1](#)).

4.4 Élément de toxicologie

De l'acide perchlorique est utilisé dilué comme électrolyte dans la cellule. Une attention particulière doit être portée à la manipulation de ce liquide. L'utilisateur ou l'utilisatrice manipulant ce liquide doit être équipé(e) d'habits couvrant la peau, de gants et de lunettes de protection. Les manipulations doivent se faire sous une chapelle ventilée. Il faut également porter certaine attention à la température d'emploi lorsque l'acide perchlorique est concentré à cause de son instabilité.

La fiche technique de l'acide utilisé se trouve en annexe ([Annexe 3](#)).



5. Fonctionnement du banc de test

5.1 Présentation du banc de test

Ce projet a permis de développer un banc de test pour une membrane de piles à combustible à hydrogène (Figure 7). Il est composé d'une cellule électrochimique dans laquelle vient se placer une membrane test. Après plusieurs versions développées et imprimées par stéréolithographie (Annexe 9), un test électrochimique a confirmé le bon fonctionnement du design général. Voir Annexe 14 - Plan d'ensemble cellule électrochimique.

La cellule est remplie d'un électrolyte, un liquide acide fournissant les ions nécessaires à une réaction d'oxydoréduction. Afin de mesurer le courant issu de cette réaction chimique, une électrode de référence et une contre-électrode sont placées dans la cellule. Un potentiostat est connecté à la membrane, à l'électrode de référence et à la contre-électrode. Une cartouche chauffante, une sonde de température intégrée à la cellule permet de réguler la température.

Ci-dessous une nomenclature du banc de test. Le nombre de pièces et donnée pour un banc de test à 8 cellules électrochimique.

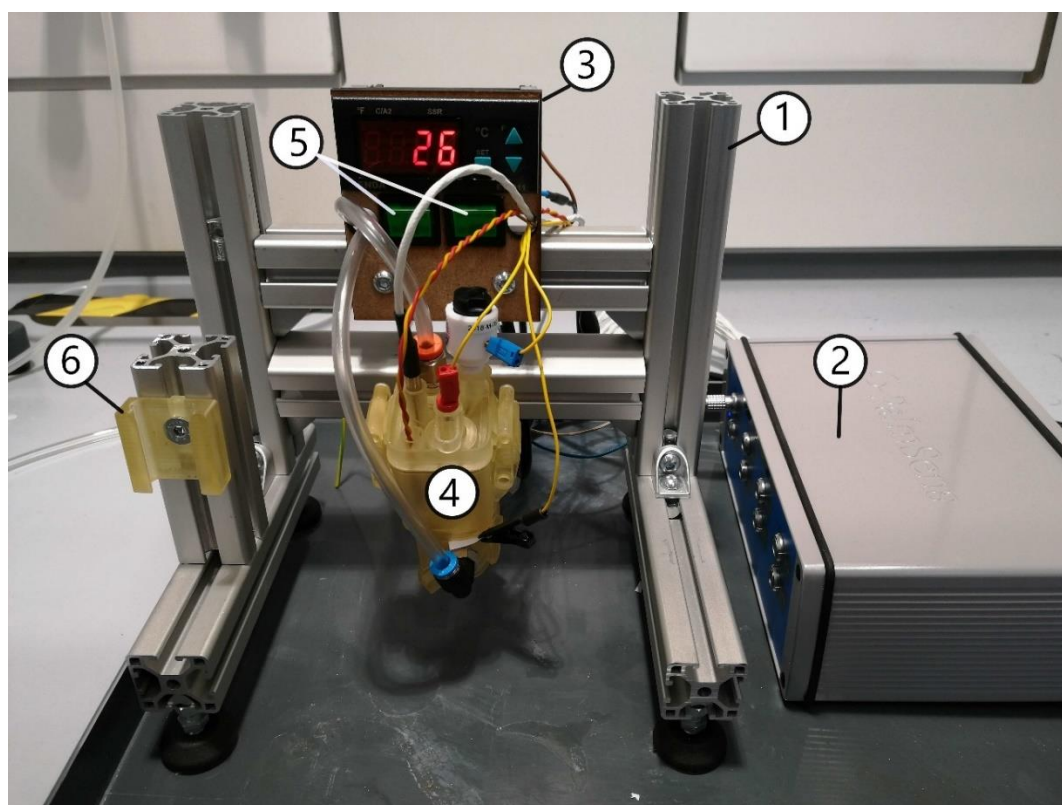


Figure 7 : résultat final du projet, image du banc de test produit

Numéro	Quantité	Nom
1	1	Structure du banc de test
2	1	Potentiostat
3	1	Contrôleur de température
4	8	Cellule électrochimique
5	16	Bouton d'alimentation du contrôleur
6	17	Support de montage

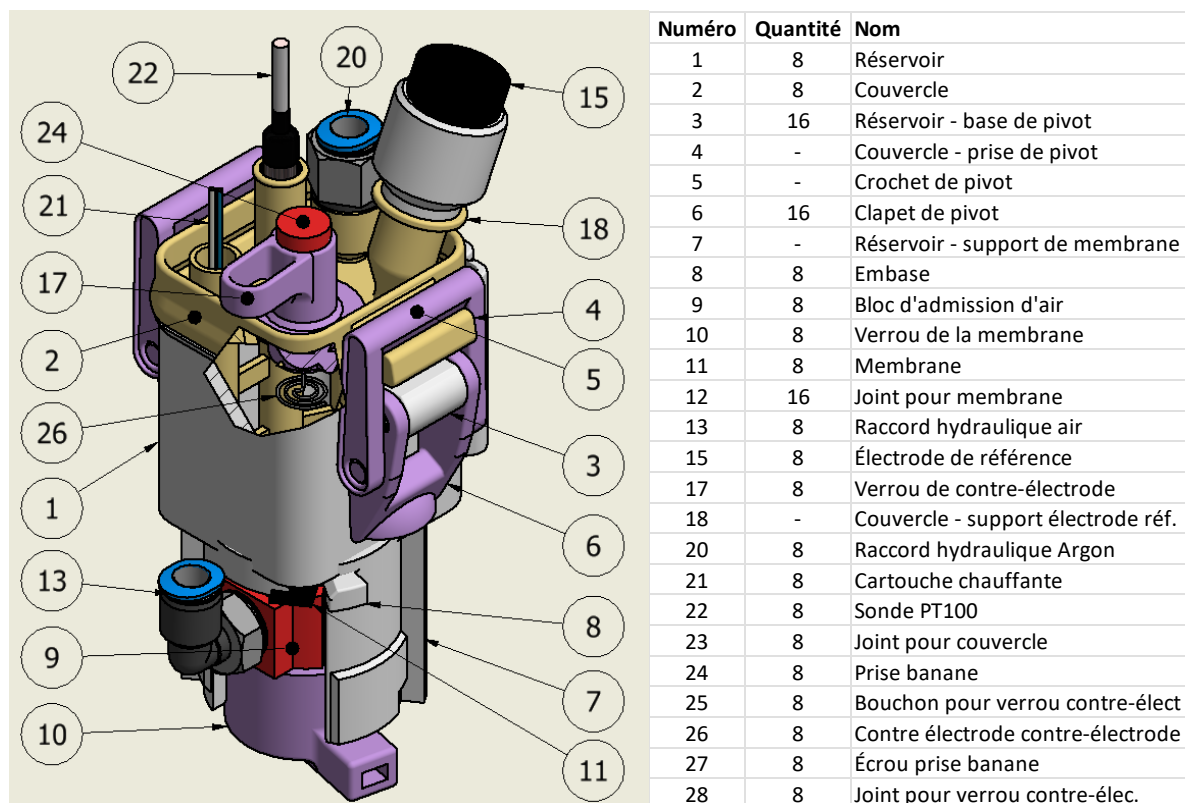


Figure 8 : cellule électrochimique du banc de test

5.2 Éléments de conception et travail effectué

5.2.1 Montage de la membrane

Solution technique développée

Une embase est fixée dans le corps de la cellule (7, Figure 9) par une rotation de 10°. La membrane (11) est montée entre deux joints plats (12) en silicone perforés de la surface de travail désirée. Cet ensemble est placé à son emplacement dans la cellule. Un bloc d'amenée d'air (9) recouvre le dernier joint. Un verrou (10) permet de serrer l'ensemble en effectuant un quart de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre.

Test et validation

L'évaluation du fonctionnement de cette solution a été effectuée expérimentalement en imprimant un modèle de la solution. De l'eau a été placée dans la cellule tandis qu'une feuille de papier bouchait l'orifice de la cellule. Aucune fuite n'a été relevée aux cours des 48 heures suivantes, ce qui valide le fonctionnement.

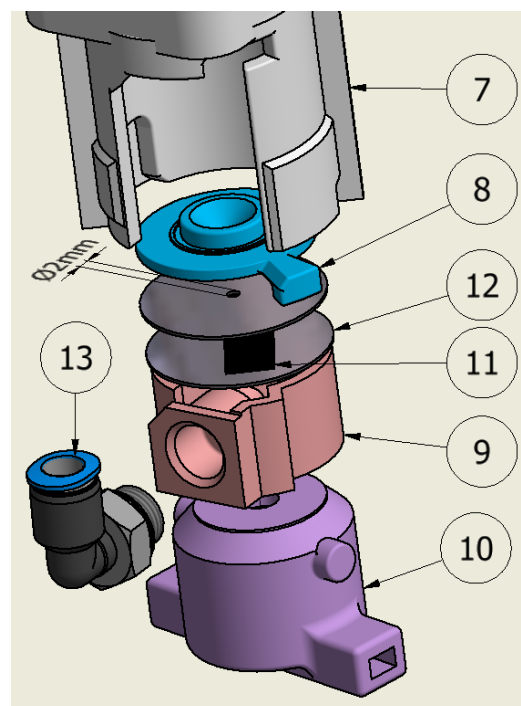


Figure 9 : fixation de la membrane

Fonctions clés

- La membrane doit être en contact sur une face avec l'électrolyte ([Fonction 5](#)), et sur une autre face en contact avec un flux d'air ([Fonction 10](#)).
- Changer l'embase (8), les 2 joints (8 et 12) et le bloc d'amené d'air (9) permet de faire varier la surface de travail. Des pièces supplémentaires sont fabriquées avec les cotes adaptées. La surface de travail correspond à la surface en contact avec l'électrolyte. La cellule permet de tester une surface de travail de 1cm² maximum.
- Une fois montée dans la cellule, la membrane est en position proche de la verticale pour favoriser une évacuation des bulles d'air vers le haut ([Fonction 15](#)).
- Le bloc (10) intègre un raccord hydraulique rapide (13) qui amène de l'air dans une cavité située du côté sec de la membrane. L'air ressort à travers le verrou (voir [Figure 13](#) pour la vue en coupe). En second, elle permet d'appliquer une force purement perpendiculaire aux joints et à la membrane. Ceci évite que les joints ne se déplacent au serrage. De plus, la force de frottement générée au serrage se fait à l'interface de deux matériaux durs, ce qui requiert moins de force que si elle se faisait à l'interface du joint silicone.
- Monter la membrane se fait sans le besoin d'outils ([Fonction 12](#)).

5.2.2 Réservoir d'électrolyte

Solution technique retenue

La cellule ([Figure 10](#)) à la forme générale d'une boîte (1) avec tous ces accessoires placés dans son couvercle (2). Les dimensions du réservoir ont été définies en plaçant les accessoires les uns à côté des autres de la manière la plus compacte. La profondeur est suffisante et évite les trop-pleins (40 ml de capacité).

La boîte se ferme rapidement avec 2 verrous latéraux (5 et 6). Ils sont assemblés sur la cellule directement après l'impression tant que la résine est encore tendre. Cet état laisse suffisamment de souplesse à la matière pour le montage avant le durcissement aux rayons UV. Un joint (23) assure l'étanchéité du couvercle.

Test et validation

La cellule a été remplie d'eau et placée à l'horizontale pendant 48h sans présenter de fuites.

Fonctions clés

- Une cellule doit contenir entre 25 et 30 ml de solution d'acide perchlorique ([Figure 5](#)).
- Toutes les opérations de manipulations de la cellule doivent pouvoir être faites sans risque d'éclaboussure.

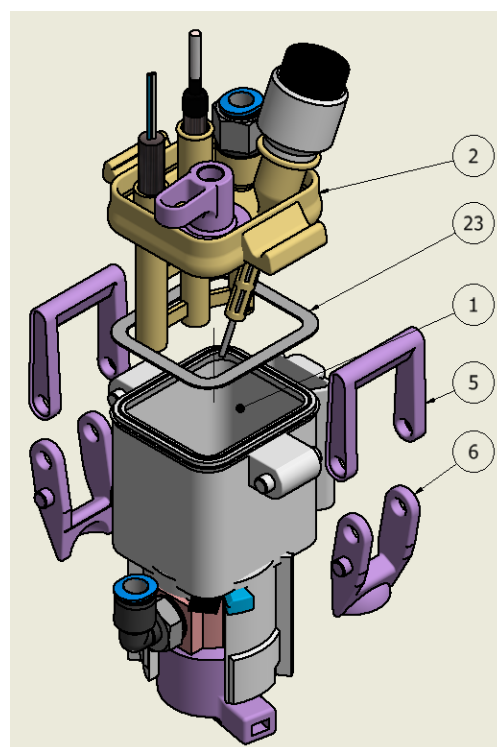


Figure 10 : cellule, ensemble du réservoir d'électrolyte

5.2.3 Montage de l'électrode de référence

Une électrode de référence est une électrode dont le potentiel est constant pendant une mesure électrochimique. Elle permet l'observation, la mesure ou le contrôle du potentiel de l'électrode de travail. Elle est utilisée en électrochimie pour étudier les propriétés d'oxydoréduction. Le modèle vendu par Gaskatel, le *Mini HydroFlex® Hydrogen Reference Electrode* a été retenu pour ce projet

([Figure 11](#)). Cette électrode de référence présente l'avantage d'avoir des côtes d'encombrements restreintes (Annexe 10).

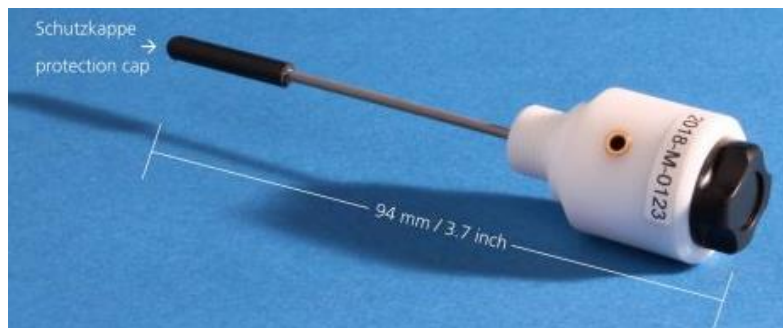


Figure 11 : Mini Hydroflex Hydrogen Electrode, fabriqué par Gaskatel

Une fois l'électrode équipée d'une cellule d'hydrogène, elle doit tremper dans l'eau 24 heures avant son emploi. Elle est montée au plus proche possible de l'électrode de travail. Ceci garantit un relevé de résultat stable. Elle doit aussi être maintenue dans une position proche de la verticale pendant la prise de mesures.

Solution technique développée

L'électrode (15) une fois conditionnée vient montée sur le couvercle de la cellule (18). Le caractère fragile de cette électrode demande de l'attention. Pour éviter toute casse au montage, le couvercle de la cellule présente un orifice avec des angles arrondis facilitant l'insertion de l'électrode. Elle se visse sans l'emploi d'outil une fois arrivé en butée. Un arceau accompagne l'extrémité de l'électrode pour la protéger. Pour un fonctionnement optimal, l'extrémité de l'électrode de référence doit être positionnée au plus proche de l'électrode de travail (A). Le montage ne demande pas de réglage particulier.

Fonctions clés

- Chaque cellule est équipée d'une électrode de référence ([Fonction 1](#)) connectée au potentiostat par l'intermédiaire d'une prise banane bleue
- Le positionnement idéal de la pointe de l'électrode de référence est garanti par le support intégré au couvercle ([Fonction 12](#))

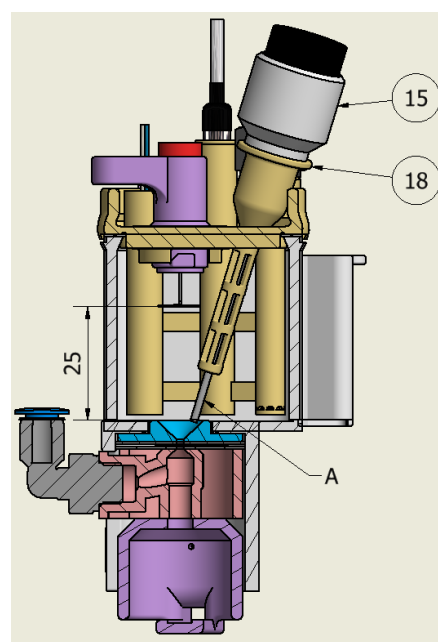


Figure 13 : vue en coupe d'une cellule

Montage de la contre-électrode

La contre-électrode (pièce 26 sur [Figure 14](#)) est montée face à la membrane à une distance de 25-30 mm. La contre-électrode doit avoir une surface en contact avec l'électrolyte supérieur à la surface de travail de la membrane. Ceci permet de garantir un apport suffisant en électron à la réaction d'oxydoréduction.

Solution technique développée

La contre-électrode permet de fournir les électrons nécessaires à la réaction d'oxydoréduction. L'extrémité d'un fil de platine de 0,5 mm de diamètre est enroulée en forme d'escargot (26). L'autre extrémité du fil laissée droite est connectée à une prise banane de 2 mm (24) fixée dans un verrou (17) par un écrou (27). La conductivité électrique est garantie par un pincement mécanique entre la prise banane et un bouchon (25). Le bouchon est collé au verrou, ce qui le rend étanche. L'orifice de passage du fil de platine dans le bouchon est colmaté avec de la colle cyanoacrylate. Le verrou (17) se fixe par une rotation d'un quart de tour via deux ergots (A) sur le couvercle de la cellule (2). 15mm séparent l'escargot de platine du verrou afin que la contre-électrode soit à 25mm de la membrane (voir [Figure 13](#)). L'étanchéité est garantie par un joint silicone de 0,5 mm entre le verrou et le couvercle de la cellule.

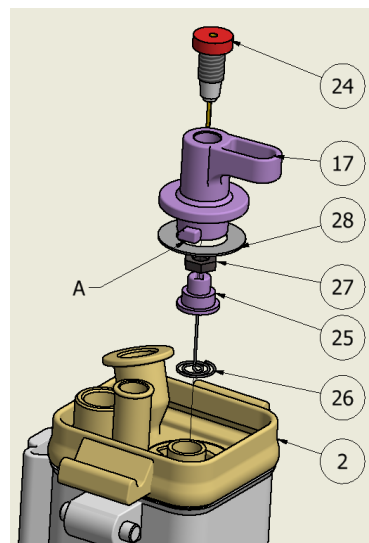


Figure 14 : Vue éclatée de la contre-électrode

Fonctions clés

- La contre-électrode est un fil de platine plongé dans l'électrolyte de chaque cellule du banc de test ([Fonction 3](#))
- L'emploi de platine est de rigueur pour sa résistance en milieu acide ([Fonction 9](#)).

5.2.4 Évacuation de l'oxygène

Le dioxygène doit être évacué de la cellule avant le début d'un test ([Fonction 8](#)). Le dioxygène est un oxydant puissant qui peut interférer, par sa présence dans la cellule, aux réactions d'oxydoréduction à la surface de travail de la membrane. Du dioxygène est présent dans le milieu gazeux de la cellule. Du dioxygène est également dissout dans l'électrolyte. Une méthode de dégazage de laboratoire consiste à faire buller de l'argon à l'intérieur du liquide.

Solution technique développée

Une buse (pièce 20, [Figure 15](#)) intégrée au couvercle (2) de la cellule, plonge jusqu'au fond de l'électrolyte. La buse est perforée en son extrémité (B). Un connecteur hydraulique (20) permet de connecter une source d'argon à l'entrée de la buse. Pendant la procédure de dégazage, le verrou (17) de la contre-électrode doit être déposé dans son orifice sans être serré. Après un temps de dégazage adéquat, le flux d'argon est abaissé au minimum et le verrou de la contre-électrode est fermé. Une légère surpression est maintenue à l'intérieur de la cellule.

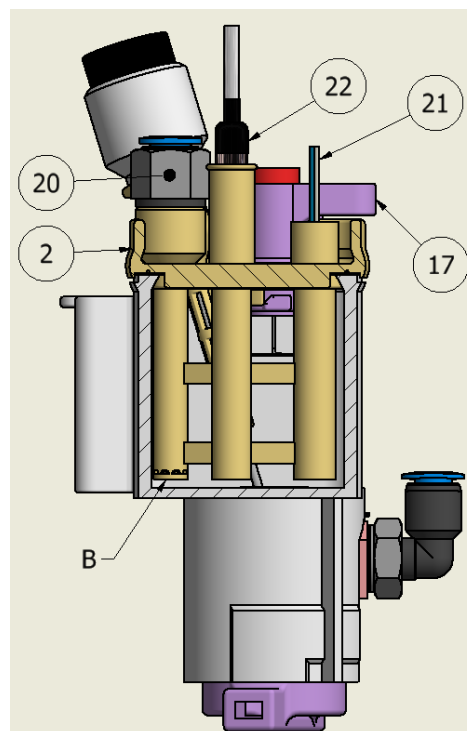


Figure 15: Vue en coupe d'une cellule (gauche)

5.2.5 Régulation thermique

Une température de 80°C doit être maintenue dans une cellule pendant la durée des tests de vieillissement ([Fonction 4](#)). Cette température favorise la conductivité ionique.

Solution technique développée

La régulation thermique se fait au moyen d'un régulateur de température de type PID, d'une sonde PT100 (pièce 22, Figure 15) et d'une cartouche chauffante (21). Employer une sonde PT100 est excessif pour cette application, car sa plage de température de mesure est très large (-50 °C ... 600°C). Une sonde PTC conviendrait à cette application, l'encombrement étant plus réduit et le prix plus bas. L'emploi de matériel disponible sur le site de la HEVS a été favorisé comme ce fut le cas pour cette sonde PT100.

La sonde et la cartouche chauffante sont placées dans deux compartiments dépassant du couvercle de la cellule (2). Une simulation du système sur Matlab Simulink a permis d'analyser le risque que le compartiment de la cartouche chauffante fonde pendant le temps de chauffage.

5.2.6 Montage de la cellule dans le banc de test

Le banc de test est composé de 8 cellules électrochimiques indépendantes ([Figure 16](#)). Si une erreur survient pendant un test avec une des cellules, elle doit pouvoir être démontée sans interférence sur les autres tests en cours.

Solution technique développée

Le banc de test est un support (2) en profilé ITEM qui organise les éléments nécessaires aux cellules (5) pour leur bon fonctionnement. Un support (4) permet de monter/démonter une cellule à l'écart des autres cellules. Chaque cellule est fixée avec un support du même type dans le banc de test. Les cellules sont dominées par un panneau qui supporte les contrôleurs de température (7) et les boutons d'alimentation (3). Des orifices permettent l'amenée des câbles du potentiostat et des tubes (argon, air). Le tout repose sur quatre pieds (10).

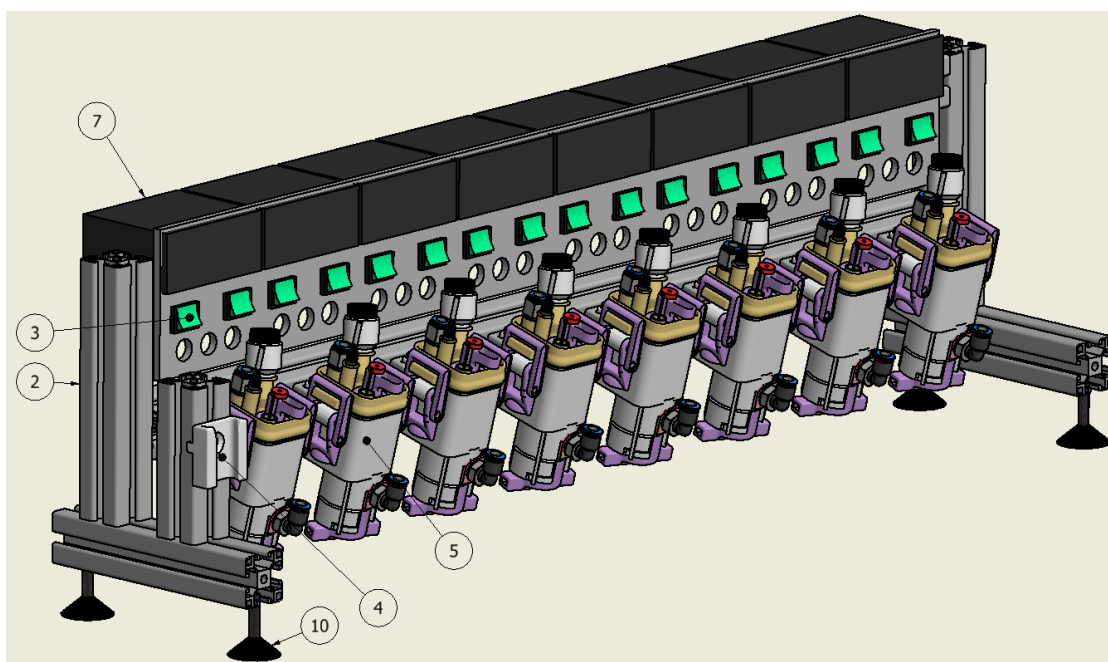


Figure 16 : ensemble du banc de test pour 8 membranes de pile à combustible à hydrogène

Cette version du banc n'a pas été produite. Ce qui a été produit comprend la zone de montage de la cellule, une cellule ainsi que le système de régulation thermique et son support. Cette image montre que le banc de test peut être monté en batterie. Le chiffre 8 correspond au nombre de sorties du potentiostat disponible à l'HEVS. Voir Annexe 13 - Plan d'ensemble banc de test à 8 cellules.

Du travail sur la gestion et la répartition des gaz doit encore être accompli. Un ensemble de répartiteur d'air et d'argon doit être fabriqué ou commandé. Une version de répartiteur a été imaginée mais pas produite, voire ci-dessous.



Figure 17 : répartiteur de gaz

6. Évaluation du fonctionnement

6.1 Résumé des fonctions avec évaluation (voire aussi Annexe 9)

Numéro	Descriptif	Évaluation
Fonction 1	Intégrer 8 électrodes de référence à hydrogène sélectionnées par Green GT, intégrées selon les informations de montage du fournisseur	Une électrode de référence intègre le banc de test, son fonctionnement est approuvé ^{*1}
Fonction 2	Intégrer 8 électrodes de travail (membranes), fourni par Green GT	Une membrane est fixée dans la cellule électrochimique du banc de test*
Fonction 3	Intégrer 8 contre-électrodes en platine	La surface de la contre-électrode convient pour une taille de membrane jusqu'à 1 cm ² *
Fonction 4	Réguler la température des bains d'électrolyte	Les composants de la régulation de température fonctionnent. Les premiers tests de régulation ont échoué.
Fonction 5	Chaque électrode de travail fait face à un bain d'électrolyte individuel	L'étanchéité du système est validée
Fonction 6	Faire simultanément de l'électrochimie sur 8 cellules à 3 électrodes	La solution permet de manipuler les 8 cellules indépendamment *. Le fonctionnement électrochimique est validé par un test.
Fonction 7	Voir la face immergée de l'électrode de travail pendant un test	L'électrode de travail n'est pas clairement visible
Fonction 8	Faire baisser le taux d'oxygène du réservoir d'électrolyte	Un test avec de l'argon n'a pas été effectué. Un test avec de l'air a montré des risques de débordement.
Fonction 9	Les pièces en contact avec l'électrolyte résistent à un PH 0-1	Un test de compatibilité valide l'emploi de la résine 3DJack ColorMix
Fonction 17	Faire circuler un gaz devant chaque face d'électrode non immergée	Fonctionnement validé par un test électrochimique.
Fonction 11	Se nettoyer complètement en démontant chaque pièce	Chaque pièce est démontable, toutes les surfaces en contact direct avec l'électrolyte se nettoient facilement après démontage
Fonction 12	Amorcer efficacement un test en plaçant chaque pièce dans l'ensemble	Une membrane est prête pour un en 2,5 minutes
Fonction 13	Nettoyer efficacement le système	La cellule se nettoie en 2 minutes
Fonction 14	Crée un ensemble avec le banc de test, le potentiostat, un laptop	Le potentiostat est placé à côté du banc de test dans la chapelle. Le laptop est posé sur un support à l'extérieur de la chapelle.
Fonction 15	Évacuer les bulles d'air devant l'électrode de travail	Les bulles d'air s'évacuent naturellement en remontant à la surface, car la membrane est proche de la verticale
Fonction 16	Manipuler la cellule sans risque de perte d'électrolyte	Du matériel pour doser l'électrolyte au remplissage est souhaitable

Tableau 2 : résumé des fonctions avec évaluation

¹ (*) La solution proposée fonctionne pour un montage en batterie de 8 cellules.

6.2 Sécurité

Objectif : utilisé le banc de test en sécurité ([Fonction](#))

- Des risques d'éclaboussure sont possibles lors du dosage de l'électrolyte. Utiliser une pipette adaptée au volume désiré serait avantageux.
- La pièce permettant de fixer la cellule à la structure du banc de test demande du doigté pour être utilisée avec fluidité car elle a tendance à bloquer. Les dimensions devraient être modifiées pour éviter l'effet d'arc-boutement et limiter la casse du matériel
- L'opération de dégazage a été simulée avec de l'air au lieu de l'argon, un débit légèrement trop élevé de gaz provoque des débordements. Cette fonction du banc de test devrait être revue et approfondie

6.3 Test électrochimique.

Objectif : Faire de l'électrochimie à 3 électrodes ([Fonction 6](#))

Une image de voltamétrie cyclique a été obtenue avec la cellule électrochimique V2 ([Figure 18](#)) et valide le fonctionnement de la cellule électrochimique. Cette fonction n'était pas encore opérationnelle sur la version V2 testée ([Fonction 8, Annexe 9](#)). Cette image correspond aux résultats attendus, bien que les conditions de test n'étaient pas idéales. L'opération de dégazage de la cellule n'a pas peut-être faite ce qui limite le résultat. Cette fonction n'était pas encore implémentée. Bien que la procédure de test ne rentre pas dans la norme, le résultat obtenu n'est pas aberrant et montre un bon potentiel pour l'obtention de résultats fiables avec ce design de cellule.

La valeur de -13 mA est atteinte à 0 V. Cette valeur est convertie en A/cm² pour être comparée à la littérature, soit -0,41 A/cm² (surface de travail de 0,0314 cm²).

Le graphique de la [Figure 19](#) montre que toutes les installations de demi-électrode obtiennent les mêmes courbes de voltamétrie cyclique après correction de l'IR-drop (valeur de résistance interne du système). Ces installations ont fonctionné avec les mêmes électrodes de travail. Les résultats sont donc indépendants de la surface de travail ainsi que de l'installation de test. La valeur obtenue avec le banc de test de ce projet devrait être comparée à la GDE-S car elles ont des surfaces de travail proche (0,0707 cm² pour la GES-S contre 2,01 cm² pour la GDE-M. Après correction de l'IR-drop du banc de test, le résultat obtenu devrait être situé plus à droite sur le graphique et se superposer aux autres valeurs. Ce travail de comparaison sera fait dans la suite du projet.

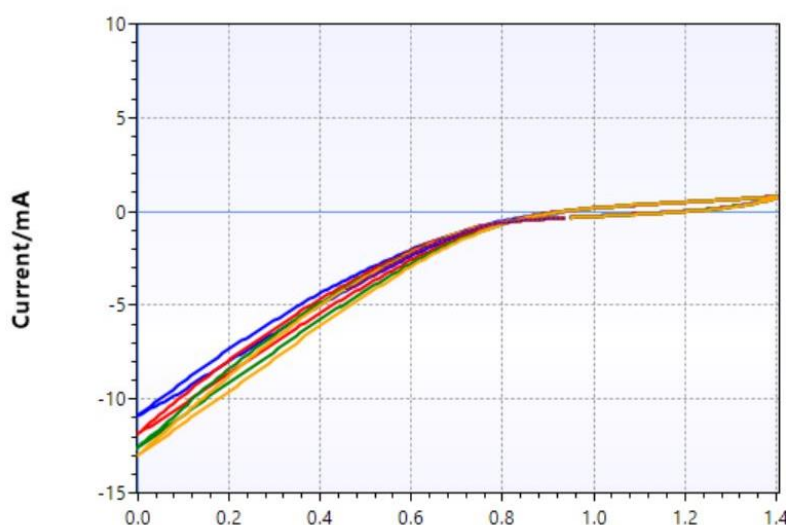


Figure 18 : image de voltamétrie cyclique sur la cellule V2 du projet

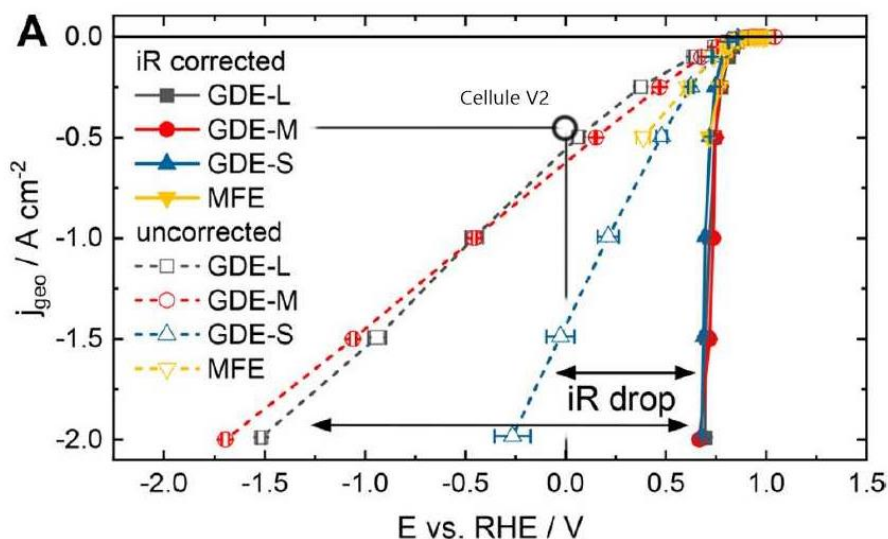


Figure 19 : Comparaison de voltamétrie cyclique (source 1) exprimé le courant

6.4 Régulation thermique

Objectif : Maintenir une température de 80°C dans la cellule (Fonction 4)

Montage :

- Réservoir d'eau de 30 ml
- Cartouche chauffant en contact avec un thermocouple étalon
- Sonde PT100 contrôleur placé au plus loin de la cartouche chauffante

Un régulateur thermique ENDA ET2011 (Annexe 5) est utilisé. Le mode de réglage automatique des paramètres de régulation proposé par le contrôleur n'a pas permis d'obtenir un bon résultat (mode d'emploi : annexe 12). Cette fonction permet d'obtenir la consigne le plus rapidement possible sans limites de puissance. Cependant, la conception de la cellule limite la température maximale de la cartouche chauffante comme elle est en contact avec sa protection en résine (Figure 15).

Des tests ont été effectués avec les paramètres de la simulation thermique Matlab :

- P : 1
- I : 0
- D : 100

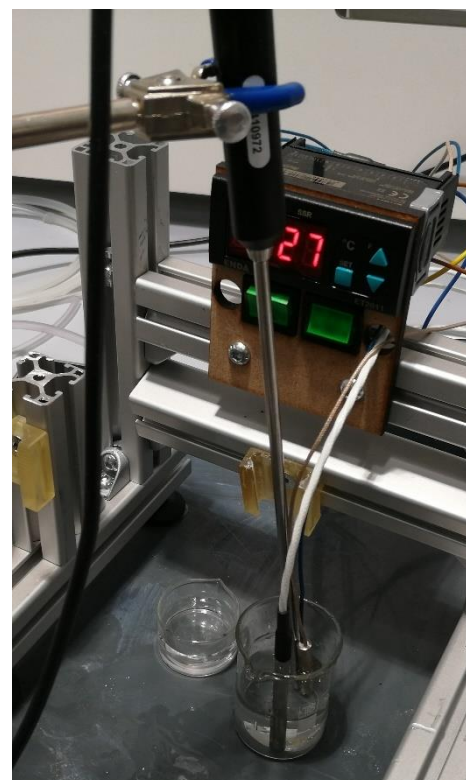


Figure 20: test de régulation de température

Une consigne de 30°C est imposée pour une température de départ de 27°C. Sur les 3 tests, la consigne est atteinte entre 1min30 et 2min par la sonde du contrôleur. Le résultat est satisfaisant lorsque la sonde et la cartouche sont directement en contact avec de l'eau sans être pour autant précis. En remuant le liquide, la température est à chaque fois supérieure à 40°C. Peu de mouvement de convection se forme dans 30ml de liquide et la température n'est pas homogène. Des

signes d'ébullition sont apparus sur 2 des tests réalisés. Ceci démontre une température supérieure à 100°C.

Un essai dans une cellule électrochimique a montré l'apparition rapide de fumée de combustion et a signé l'arrêt des tests.

La fonction de régulation n'est donc pas fonctionnelle en l'état. Une solution technique pourrait être de placer la sonde PT100 et la cartouche chauffante dans le même orifice de protection. Ceci empêcherait la surchauffe de la cartouche provoquée par l'inertie thermique du système et le manque de conduction thermique. En plus, de la pâte thermique devrait être incluse au montage de la cartouche pour améliorer la conductivité thermique et réduire l'inertie thermique du système. Cela rend la cartouche chauffante et la sonde solidaire du couvercle, ce qui voulait être évité pour faciliter l'opération de nettoyage. Un travail sur l'étanchéité des composants doit être réalisé afin de ne pas les endommager au nettoyage.

6.5 Test de compatibilité chimique

Les cellules sont remplies d'acide perchlorique d'une concentration de 2 moles par litre (pH 0-1). Ce liquide est corrosif et doit être manipulé avec précaution. Un test de compatibilité chimique a été réalisé entre la résine d'impression et l'électrolyte prévu pour remplir la cellule ([Fonction 9](#)). Le test effectué selon une procédure de test ([Annexe 6](#)) **confirme la compatibilité entre la résine de ColorMix de 3DJack et l'électrolyte.**

Cinq échantillons ont été immergés dans l'électrolyte pendant une semaine avec un relevé périodique du poids, d'une évaluation visuelle et d'un relevé de l'état de surface après grattage.

Commentaire

- Les 5 échantillons ont perdu en moyenne 0,22% de leur masse après 24 h, sûrement dû à la dissolution de reste de résine non polymérisée ([Figure 21](#)).
- Après une semaine les échantillons ont une masse supérieure de 0,13% en moyenne par rapport à leur masse après 24 heures d'immersion. Les résines plastiques ont tendance à absorber de l'humidité.
- Ces valeurs correspondent à un matériau considéré comme résistant à un acide.

Réserve sur les résultats

Dans le cadre d'une utilisation future du banc de test avec cette résine, des tests de comptabilité chimique à 80°C devraient être considérés. Il serait également important de vérifier que la matière ne rejette pas de substances dans l'électrolyte susceptibles d'interagir avec les réactions chimiques provoquées à l'intérieur du banc de test.

Conclusion

La résine ColorMix vendue par 3DJack représente un choix fiable pour les conditions d'emploi susmentionnées.

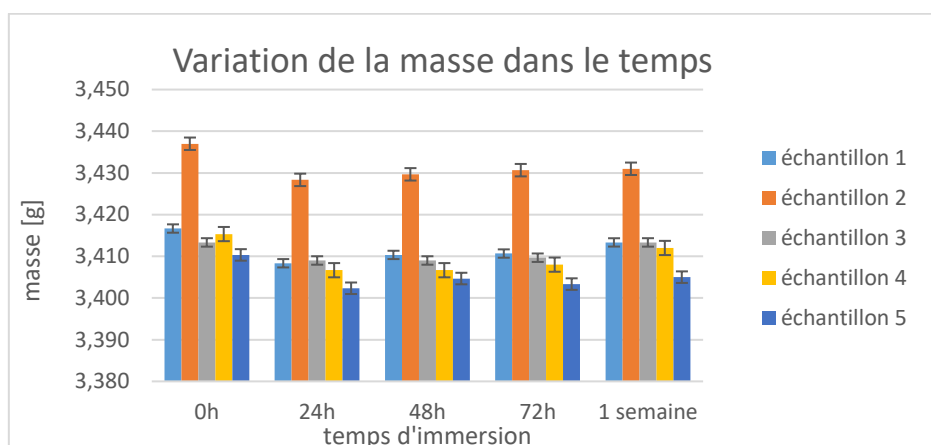


Figure 21: Résultat du test de compatibilité chimique

6.6 Temps de manipulation

Objectif :

Amorcer efficacement un test ([Fonction 12](#)) et nettoyer efficacement le système ([Fonction 13](#))

Un mode d'emploi d'écrit en image le fonctionnement du banc de test ([Annexe 11](#)). Le temps mesuré correspond au temps nécessaire pour effectuer les opérations présentes dans ce mode d'emploi.

Chaque point d'opération a été répété trois fois pour établir une moyenne.

Voici les temps de manipulation obtenus avec le banc de test.

Opération	Testé pour une membrane	Estimé pour 8 membranes
Point 2 : Préparation de matériel	5 minutes	6 minutes
Point 3 : Montage	2,5 minutes	24 minutes
Total intermédiaire	7,5 minutes	30 minutes
Point 6 : Démontage du banc de test et nettoyage	2 minutes	16 minutes
Total	9,5 minutes	46 minutes

Les phases de dégazage et de mise en température ne peuvent pas être quantifiées car ces fonctions ne sont pas utilisables.

Les temps de manipulation conviennent aux objectifs fixés en début de projet.

6.7 Durabilité

Malgré toute l'attention portée aux paramètres d'impression 3D, la résine ColorMix de 3DJack est de nature cassante par sa dureté. La recherche d'une résine plus tendre est souhaitable afin de rendre l'ensemble des pièces moins fragile. Une pièce qui tombe au sol se brise ou se fissure à tous les coups. C'est également le cas pour le couvercle. S'il n'est pas convenablement plaqué au réservoir, des composants des verrous peuvent céder au serrage.

L'impression par stéréolithographie impose une épaisseur de paroi maximale de 3 mm. C'est un facteur limitant pour la conception et impacte la durée de vie des pièces. Le réservoir de la cellule ainsi que le couvercle pourraient être réalisés en POM par usinage conventionnel.

Les moyens de fixation employés pour fixer la membrane et la contre-électrode génèrent du frottement au serrage. La résine ColorMix risque de vite s'user sur ces pièces clés.

6.8 Test d'étanchéité

Toutes les pièces comportant un joint sont étanches à l'écoulement à pression atmosphérique. Si la cellule est trop inclinée lors de son transport entre le banc de test et la zone de nettoyage, du liquide peut s'échapper par l'entrée d'argon.

6.9 Intégration du matériel de test

Le potentiostat est placé à proximité du banc de test dans la chapelle de laboratoire. Il n'a pas été intégré à la structure du banc de test afin de libérer du temps pour la conception de la cellule. L'ordinateur portable est laissé à l'extérieur de la chapelle pour plus de confort et ne fait donc pas partie de la structure du banc de test.

6.10 Estimation du prix pour le banc de test

Élément	Nombre	Unité	Prix unitaire CHF	Montant CHF
Cellule - Résine ColorMix	8	pièces	5	40
Contre-électrode en platine	7	pièces	-	300
Acide perchlorique	1	litre	80	80
Électrode de référence	6	pièces	200	1200
Contrôleur de température	7	pièces	100	700
Cartouche chauffante	9	pièces	20	180
Sonde PT100	9	pièces	30	270
Alimentation électrique	1	lot	300	300
Raccord enfichable droit	8	pièces	5	40
Raccord enfichable coudé	8	pièces	5	40
Robinet Argon	8	pièces	15	120
Robinet Air	8	pièces	15	120
Tube 6mm	10	mètre	3	30
Profilé de montage	2	mètre	15	30
Visserie	1	lot	60	60
			Total TTC :	3510

Tableau 3: Calcul de prix du banc de test

Ce projet se clôt sur l'obtention d'un banc de test pour une électrode de pile à combustible à hydrogène. Dans une perspective de production d'un banc de test pour 8 électrodes ([Figure 16](#)), une estimation du prix du matériel nécessaire a été réalisée. L'HES a déjà en sa possession un potentiostat à 8 canaux, deux électrodes de travail, une contre-électrode et un contrôleur de température. Le prix d'un ordinateur portable n'est pas inclus. **Le prix total estimé est de 3510 CHF.**

7. Synthèse

Ce travail de diplôme a été soutenu par la participation de GreenGT, une entreprise impliquée dans l'intégration de système employant de l'hydrogène. Cette entreprise a pour but de développer un banc de test afin de renforcer leur capacité de recherche sur les piles à combustible à membrane d'échange de protons. Cette collaboration a permis de travailler sur la conception d'un banc de test pour membrane de pile à combustible à hydrogène.

Après une étude de différentes installations électrochimiques présentes sur le marché, un cahier des charges a été établi regroupant les attentes de GreenGT. L'installation désirée est un ensemble de 8 demi-cellules d'électrode à diffusion gazeuse. Elle permet de pratiquer des expériences sur des membranes qui se situent au carrefour de la recherche fondamentale en laboratoire et de la recherche appliquée sur de vraies piles à combustible à membranes échangeuses de protons. Un nombre de tests important va être effectué sur cette installation, elle doit donc être facile et rapide à utiliser.

Une méthode de conception a été établie avec une focalisation sur la validation expérimentale des solutions techniques proposées. Le travail a débuté par l'établissement d'un carnet de solutions composé de croquis. Les différentes solutions ont été évaluées selon leur facilité de maniabilité, leur durabilité, et la rapidité de manipulation. Les meilleures solutions ont été prototype par stéréolithographie. Un travail itératif a permis d'améliorer ces solutions techniques et de les intégrer à la cellule, puis à l'ensemble du banc de test.

8. Conclusion

La première partie de ce document comprend l'état de l'art décrivant le fonctionnement d'une pile à combustible à membrane échangeuse de proton. Ce projet traite exclusivement de ce type de pile à combustible, celle utilisée par l'entreprise partenaire GreenGT. L'objectif de cette entreprise est d'optimiser leurs piles à combustible en utilisant un banc de test de membrane échangeuse de proton. Ce banc de test s'inspire de conceptions existantes de demi-cellules d'électrode à diffusion de gaz, notamment celle produite par l'entreprise Gaskatel.

La seconde partie du document présente le cahier des charges du banc de test, le matériel employé pour la conception et le matériel de production. Toutes les pièces de la cellule électrochimique du banc de test ont été produites par stéréolithographie.

Ensuite vient la présentation du fruit de ce projet. **Le travail obtenu est une cellule électrochimique de test de membrane de pile à combustible à hydrogène.** Elle permet de mesurer un courant induit par une réaction d'oxydoréduction entre un électrolyte composé d'acide perchlorique et de l'air. La surface de travail de la membrane est variable en remplaçant des éléments de la cellule. Les connexions électriques entre le potentiostat et la cellule se font par des prises bananes standard et une pince crocodile pour la membrane. Deux connecteurs hydrauliques rapides accueillent l'entrée d'air et l'entrée d'argon. Une fois la membrane montée dans la cellule, l'électrolyte remplie et l'électrode vissée, la cellule est insérée dans un support fixé à une structure en aluminium de type KANYA. Un système de régulation thermique permet de maintenir une température de 80°C à l'intérieur de la cellule. La cellule est raccordée à un potentiostat, lui-même connecté à un ordinateur portable.

Avec une structure allongée, 8 cellules identiques avec leurs matériels peuvent être alignées et former un banc de test pour 8 membranes de pile à combustible à hydrogène. Tous les éléments nécessaires au fonctionnement des cellules peuvent être regroupés à l'intérieur d'une chapelle de laboratoire.

La dernière partie de ce document analyse le fonctionnement du banc de test et résume ces fonctionnalités.

8.1 Comparaison du travail réalisé avec l'objectif initial

L'objectif de ce projet était de concevoir un banc de test pour membrane de pile à combustible à hydrogène. Le travail effectué répond à cet objectif dans la mesure où le cœur du banc de test, soit la cellule électrochimique, correspond aux attentes de conceptions initiales. Des tests électrochimiques sont réalisables et donnent des résultats probants.

Un second objectif était d'avoir une installation facile à utiliser, intuitive, et sans nécessiter d'outillage spécifique. Le développement de solutions techniques testées et validées a permis de répondre à ces attentes.

Un dernier objectif demandait d'inclure un ordinateur et un potentiostat dans la vision de conception globale du banc de test. Cet objectif est partiellement atteint. La solution retenue est d'avoir le potentiostat à côté du montage de cellule dans une chapelle, mais pas intégré à la structure du banc de test. Ceci a permis de libérer du temps pour se concentrer sur la production d'une cellule fonctionnelle.

8.2 Perspective

Fonction devant être encore remplie :

Sur l'ensemble du banc de test :

- Gérer la répartition de gaz (air et argon) pour 8 cellules
- Ajouter un système d'humidification de l'air
- Intégrer le potentiostat dans la structure en aluminium

Sur la cellule électrochimique :

- Trouver une résine plus tendre, moins cassante
- Terminer la programmation de la régulation thermique
 - o En utilisant le matériel tel qu'il est conçu
 - o En ajoutant de la pâte thermique entre le couvercle et le matériel de régulation thermique.
- Rendre la membrane clairement visible pendant un test
- Repenser l'opération de dégazage à l'argon

Option

- La connexion des éléments électroniques de la cellule au potentiostat pourrait être assurée par action mécanique lorsque la cellule est insérée dans son support sur le banc de test.
- La suite du projet pourrait être d'inclure un circuit de nettoyage de l'intérieur de la cellule avec un travail sur l'automatisation du processus. Ceci permettrait que la cellule ne quitte pas l'ensemble du banc de test.

9. Bibliographie

1. *Benchmarking Fuel Cell Electrocatalysts Using Gas Diffusion Electrodes: Inter-lab Comparison and Best Practices*, ACS Energy Lett. 2022 , 7 , 2 , 816–826,
2. *Effect of Pt and Ionomer Distribution on Polymer Electrolyte Fuel Cell Performance and Durability*, Kobayashi, Aki; Fujii, Takahiro; Harada, Chie; Yasumoto, Eiichi; Takeda, Kenyu; Kakinuma, Katsuyoshi; Uchida, Makoto, ACS Applied Energy Materials (2021), 4 (3), 2307-2317CODEN: AAEMCQ; ISSN:2574-0962. (American Chemical Society)
3. *Activity benchmarks and requirements for Pt, Pt-alloy, and non-Pt oxygen reduction catalysts for PEMFCs*, Gasteiger, Hubert A.; Kocha, Shyam S.; Sompalli, Bhaskar; Wagner, Frederick T. Applied Catalysis, B: Environmental (2005), 56 (1-2), 9-35CODEN: ACBEE3; ISSN:0926-3373. (Elsevier B.V.)
4. Figure 1: Schéma d'une PEMFC Schéma d'une PEMFC, H2SYS Hydrogen to system, <https://h2sys.fr/technologies/pile-a-combustible/>
5. Figure 2 : composition d'une MEA, <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-components/membrane-electrode-assembly>
6. Figure 3 : Composition d'une membrane échangeuse de proton: FlexCell, Voltammetric Test Cell PTFE / PP, Item number 83100, 83200, User Manual Version, www.gaskatel.com

10. Annexes

Annexe 1 - Fiche technique résine	31
Annexe 2 - Fiche technique du matériel d'impression.....	32
Annexe 3 - fiche technique acide perchlorique.....	33
Annexe 4 - Simulation Matlab Simscape de la cellule.....	34
Annexe 5 - Matériel de régulation thermique	35
Annexe 6 - Matériel pour expériences électrochimiques	35
Annexe 7 - Protocole de test de compatibilité chimique	36
Annexe 8 - Test de compatibilité chimique-tableau de valeurs.....	37
Annexe 9 - Suivis des versions de cellules et comparaison aux fonctions du cahier des charges	38
Annexe 10 - fiche technique de l'électrode de référence.....	39
Annexe 11 - Mode d'emploi du banc de test	42
Annexe 12 - mode d'emploi contrôleur ENDA ET2011	
Annexe 13 - Plan d'ensemble banc de test à 8 cellules	
Annexe 14 - Plan d'ensemble cellule électrochimique	

Annexe 1 - Fiche technique résine

Technical Data Sheet

Product name: **3DJAKE Color Mix Basic Resin**

Version: 1.0

Date: 19.10.2020

Physical properties

Description	Typical value	Test method
Density	1,18 g/cm ³	-
Tensile Et	3730 MPa	ISO 527
Tensile strength at Yield	74,4 MPa	ISO 527
Strain at yield	2,5%	ISO 527
Impact strength	12 KJ/m ²	ISO 179-2
HDT A	74 °C	ISO 75
HDT B	121 °C	ISO 75

Printing parameters:

Specimens printed on an Anycubic Photon with 0,05 mm layer height and 10 seconds of exposure time per layer. The specimen was printed at 23 °C and 50% humidity.

Post-curing parameters:

30min with 200W 405nm UV LED. Conditioned 72h at 23 °C and 50% humidity.

Annexe 2 - Fiche technique du matériel d'impression

Machine d'impression :

Fournisseur :	Phrozen
Modèle :	Sonic mighty 4K
Système :	Phrozen OS
Logiciel de prétraitement :	CHITUBOX
Technologie :	Imprimante 3D en résine - Type LCD
Spécification de l'écran LCD :	9,3" 4K Mono LCD
Source de lumière :	Matrice ParaLED 2.0 405 nm
Épaisseur de la couche :	0,01-0,30 mm
Vitesse d'impression maximale :	80 mm/h
Taille de l'imprimante :	L28 x l28 x H44 cm
Volume d'impression :	L20 x L12,5 x H22 cm

Résine utilisée

Marque :	3DJAKE
Modèle :	Color - Mix
Numéro d'article :	CMR-BASIC-1000
Provenance :	Autriche
Source de lumière :	LCD, DLP
Couleur du filament :	Transparent

Paramètre d'impression utilisé

Épaisseur de couche :	0,05 mm
Temps d'exposition par couche :	10 secondes d'exposition par couche
Nombre de couche de base :	6
Temps d'exposition par couche de base :	60 secondes

Post-traitement

Les supports d'impression des pièces sont retirés.
Rinçage à l'isopropanol : entre 1 et 5 minutes selon

Machine UV

Durcissement sous LED UV pendant 30 minutes

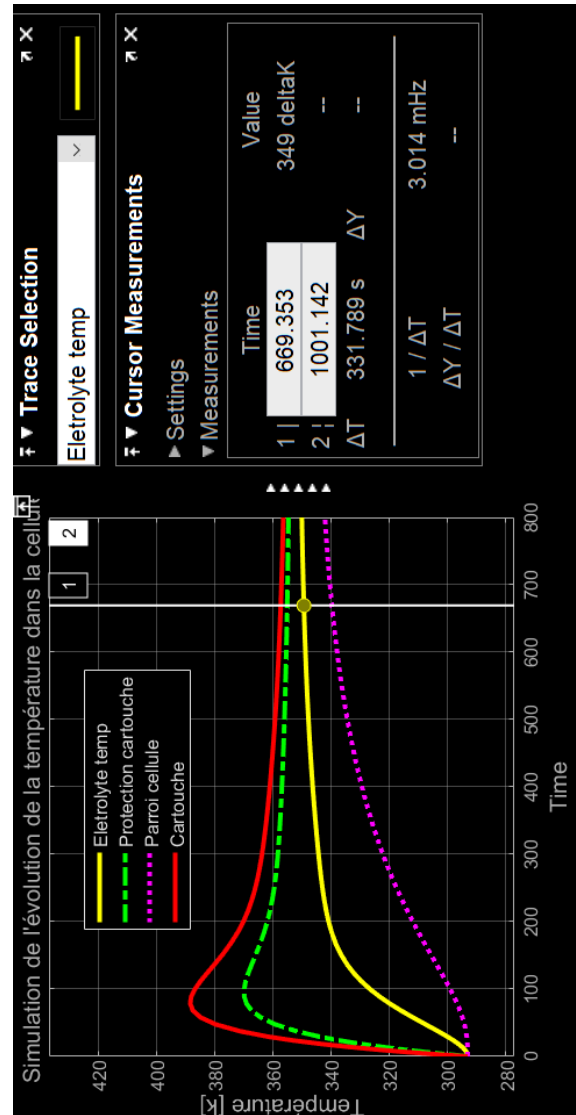
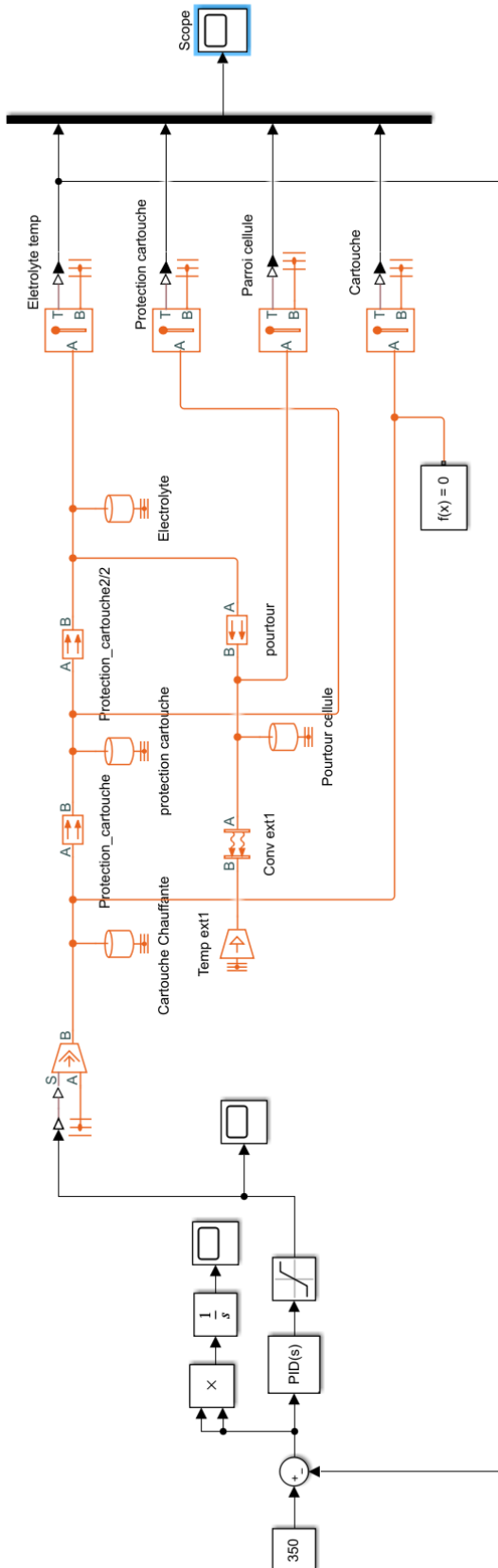
Marque:	Anycubic
Modèle:	Wash and cure 2.0
Numéro :	S010100
Puissance nominale :	25 W
Lampes UV :	405 nm
Taille de lavage :	120 mm (L) * 74 mm (l) * 165 mm (H)

Annexe 3 - fiche technique acide perchlorique

Solution d'acide perchlorique, Honeywell™ Fluka™

Nom chimique ou matériau	Perchloric acid solution
Note relative au nom	Volumetric, 0.01 M HClO ₄ in acetic acid (0.01N), for titration in non-aqueous liquids
CAS	7601-90-3
Formule moléculaire	ClHO ₄
Formule linéaire	HClO ₄
Numéro MDL	MFCD00011325
Numéro UN	UN2920
Synonyme	unii-v561v90bg2, acide perchlorique, perchloric acid acid by mass forbidden, perchloric acid, acs reagent, perchlorsaeure, perchioric acid, ueberchlorsaeure, hyperchloric acid, hclo4
Clé InChI	VLTRZXGMWDSKGL-UHFFFAOYSA-N
SMILES	OCl(=O)(=O)=O
Densité	~1,06 g/cm ³ à 20°C
Nom IUPAC	acide perchlorique
Poids moléculaire (g/mol)	100.454
CID PubChem	24247
ChEBI	CHEBI:29221
Poids de la formule	100.46g/mol
Odeur	Piquant
Conditionnement	Flacon en verre
Solubilité	Complètement miscible dans l'eau
Point d'éclair	40°C (104°F)
État physique	Liquide
Point d'ébullition	119°C (1 013 hPa)
pH	Acide
Couleur	Incolore
Quantité	1 L

Annexe 4 - Simulation Matlab Simscape de la cellule



*Annexe 5 - Matériel de régulation thermique***Régulateur de température**

Fournisseur :	digitec.ch
Marque :	ENDA
Modèle :	ET2011
Numéro de référence :	ET2011-RT-230
Type de régulateur de température :	PID
Tension de fonctionnement :	230 V/AC
Gamme de mesure :	-100 à +600 °C
Sorties (régulateur de température) :	Relais 8 A SSR
Sonde :	Pt 100

Sonde de température

Fournisseur :	HEVS - interne
Type de sonde :	Pt100

Source de chaleur

Fournisseur :	Brütsch Ruegger
Désignation :	Cartouche chauffante
Numéro de référence :	840160.0010
Puissance :	100 W
Dimensions :	Diamètre 6.5mm, longueur 40mm
Câble de raccordement :	Torons en nickel isolés par fibre de verre
Résistance à la température permanente :	600 °C
Brève :	750 °C

*Annexe 6 - Matériel pour expériences électrochimiques***Potentiostat**

Fournisseur :	PalmSens
Numéro de référence :	MES3817186
Nombre de canaux :	8
Logiciel :	PalmSens MultiTrace 4.4

Électrode de référence

Fournisseur :	Gaskatel
Dénomination :	Mini HydroFlex® Hydrogen Reference Electrode
Dimensions :	Tige Ø 1,6 mm, longueur 53,5 ± 0,5 mm
Connecteur :	Douille pour prise de laboratoire Ø 2 mm
Élément capteur :	Électrode à diffusion de gaz palladium-platine
Source d'hydrogène :	Pile à hydrogène remplaçable 80521

*Annexe 7 - Protocole de test de compatibilité chimique***Objectif :**

Caractériser la compatibilité chimique entre la résine d'impression et l'électrolyte par échelle de temps.

Méthode expérimentale :

Immersion d'échantillons dans un bain d'acide perchlorique (concentration 2 Mole/l)

Le résultat est apprécié par pesée, vérification visuelle, résistance de la surface à une opération de grattage par l'ongle de la main

Préparation 5 échantillons, pièce sélectionnée : verrou support de la contre-électrode

- **Machine d'impression :**
 - Fournisseur : Phrozen
 - Modèle : Sonic mighty 4K
- **Résine utilisée :**
 - Marque : 3DJAKE
 - Modèle : Color - Mix
 - Numéro d'article : CMR-BASIC-1000
 - Couleur du filament : Transparent
- **Paramètre d'impression utilisé :**
 - Épaisseur de couche : 0,05 mm
 - Temps d'exposition par couche : 10 secondes d'exposition par couche
 - Nombre de couche de base : 6
 - Temps d'exposition par couche de base : 60 secondes
- **Post-traitement :**
 - Structure support des pièces retirées
 - Rinçage de la résine excédentaire à l'isopropanol
 - Durcissement : 30 min sous 24W de lampe UV (405nm)
 - Conditionner à l'air libre, 30% d'humidité, 25°C, pendant 48 heures
 - Pesée de chaque échantillon

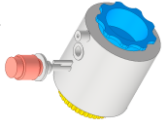
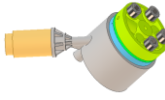
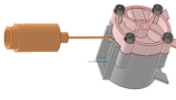
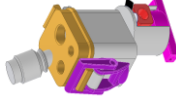
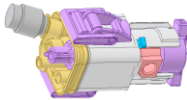
Lancement du test

- 1) Les 5 échantillons sont immergés dans le même récipient en verre propre sous une chapelle de laboratoire
- 2) Lavage :
 - i) Échantillons retirés du bain (le bain est conservé)
 - ii) Échantillons lavés à grande eau 5 secondes, au jet de vapeur 5 secondes, rincée à l'isopropanol, sécher au foehn (température ambiante) 10 secondes
- 3) Mesure :
 - i) Évaluation visuelle de la pièce
 - ii) Échantillons grattés en un point avec l'ongle, évaluation de la trace laissée
 - iii) Pesée : 3 pesées par échantillon au 1000^e de gramme
- 4) Pièce replacée dans le bain d'acide perchlorique pour supplémentaires
- 5) Après 48h, 72h, (1 semaine), à compter à partir du début du test, procéder au point 2. 3. et 4.

Annexe 9 - Suivis des versions de cellules et comparaison aux fonctions du cahier des charges

num	Descriptif	3D				
		Imprimé 3D	Fichier 3D	imprimé 3D	imprimé 3D	Imprimé 3D
Fct1	Intégrer 8 électrodes de référence à hydrogène sélectionnées par Green GT	8	8	10	10	10
Fct2	Intégrer 8 électrodes de travail (membranes), fournies par Green GT	6	6	10	10	10
Fct3	Intégrer 8 contre électrodes en platine	2	2	3	7	10
Fct4	Réguler la température des bains d'électrolyte	3	3	0	0	8
Fct5	Chaque électrode de travail fait face à un bain d'électrolyte individuel	8	8	10	10	10
Fct6	Faire simultanément de l'électro-chimie sur 8 cellules à 3 électrodes	8	8	0	10	10
Fct7	Voir la face immergée de l'électrode de travail pendant un test	0	0	10	0	3
Fct8	Faire baisser le taux d'oxygène du réservoir d'électrolyte	3	3	0	5	8
Fct9	Les pièces en contact avec l'électrolyte résistent à un PH de 0-1	0	0	0	0	10
Fct10	Faire circuler un gaz devant chaque face d'électrode non-immersée	3	3	5	10	10
Fct11	Se nettoyer complètement en démontant chaque pièce	2	2	10	10	10
Fct12	Amorcer efficacement un test en plaçant chaque pièce dans l'ensemble	7	5	5	9	10
Fct13	Nettoyer efficacement le système	0	0	10	8	8
Fct14	Crée un ensemble avec le banc de test, le potentiostat, un laptop	0	0	1	1	8
Fct15	Evacuer les bulles d'air devant l'électrode de travail	2	3	4	5	10

Conçu, testé, validé	10
Conçu, testé	9
Conçu	8
pondération	5
Non conçu	0

V0a	
V0b	
V1	
V2	
V3	

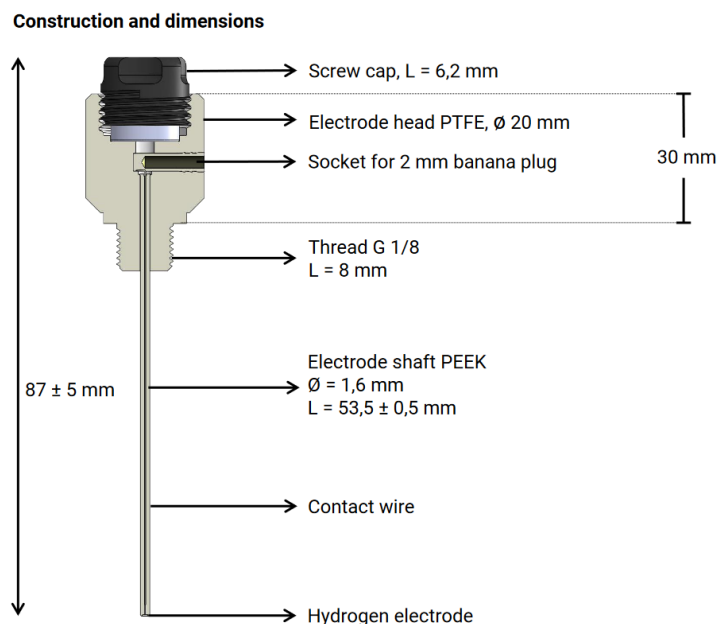
Annexe 10 - fiche technique de l'électrode de référence

Technical data

pH range: pH -2 to pH 16
 Temperature: -20 °C to 120 °C
 HF/Fluoride: Up to 500 000 ppm
 Caustic potash, caustic soda solution: Up to 50 wt%

More information on the website: www.gaskatel.com

- Manual HydroFlex
- Activation of Hydrogen electrode HydroFlex
- Activation Hydrogen electrode HydroFlex
- Complete cleaning of Hydrogen electrode Hydroflex
- Potentials pH Hydrogen electrode HydroFlex as pdf download
- Potentials of Silverchloride electrodes versus Calomel
- Potentials Silverchloride electrodes versus Kalomel as pdf download
- Electrochemical Series
- Electrochemical Series
- Conformity Declaration HydroFlex
-





Properties of the Hydrogen Reference Electrode Mini-HydroFlex

The hydrogen reference electrode is made entirely from plastic. Therefore, it's robust and insensitive to breakage.

It can be used in **highly concentrated alkaline solutions** as well as in **concentrated acids**, even in **hydrofluoric acid or fluoride-containing media**.

Of course, Mini-HydroFlex is **free of mercury and silver**.

Operation

1. Commissioning



Unscrew the screw cap and remove the hydrogen cell.



Take the replacement hydrogen cell and remove the protective foil. There are two openings visible. If any adhesive residue remains, remove it by rubbing with a cloth.



Insert the hydrogen cell with these two openings down into the recess.



Turn the screw cap back in.



Mark month and year on the label. Attach the sticker to the electrode head.



Remove the protective cap from the electrode carefully.



Place Mini-HydroFlex in water for 24 hours.

Please do not remove the labelling with the serial number and the sticker with the activation date.

2. Storage of Hydrogen Reference Electrode Mini-HydroFlex

After the measurements, rinse the electrode thoroughly with water. Place the hydrogen electrode in a liquid (such as measuring solution, 1 mol / l hydrochloric acid, 1 mol / l sodium hydroxide solution, water) to keep it functional.



As soon as the running time of 12 months is reached, the hydrogen cell must be replaced immediately (see 4. Maintenance). Otherwise, a negative pressure will build up in the capillary so that liquid can get into the capillary.

Annexe 11 - Mode d'emploi du banc de test

Mode d'emploi

Utiliser du matériel de protection adapté



Infrastructure nécessaire :

- Chapelle de laboratoire
- Un lavabo
- Air comprimé
- Argon
- Solution d'acide perchlorique avec une concentration de 2 mol/l

24 heures avant un test :

- Préconditionner l'électrode de référence selon indication du constructeur (Annexe 10)
- Faire tremper la membrane dans de l'eau déionisée

1. Préparation du matériel dans la chapelle (Figure 22) :

- Électrode de référence preconditionnée
- Structure du banc de test
- Couvercle de la cellule électrochimique
- Potentiostat + câblage connecté
- Préparer un récipient à côté du lavabo pour déposer le couvercle de la cellule



Figure 22 : matériel préparé à côté du banc de test, dans la chapelle

2. Préparation du matériel, optionnellement hors de la chapelle (Figure 23)

- Ordinateur portable, software *MultiTrac 4.4* lancer, potentiostat connecté à l'ordinateur
- Membrane dans l'eau déionisée
- Le reste de la cellule : réservoir, bloc d'amenée d'air, embase avec joint, deux joints pour la membrane.



Figure 23 : ordinateur portable connecté au potentiostat, éléments de fixation de la membrane

3. Mise en route du test :

- 1) Monter la membrane dans la cellule
 - a) Embase perforée de la surface de travail désirée avec joint vers le bas :
 - i) Mettre (A) dans (B) puis plaquer l'embase au fond du de son logement pour quel soit à plat (Figure 24)

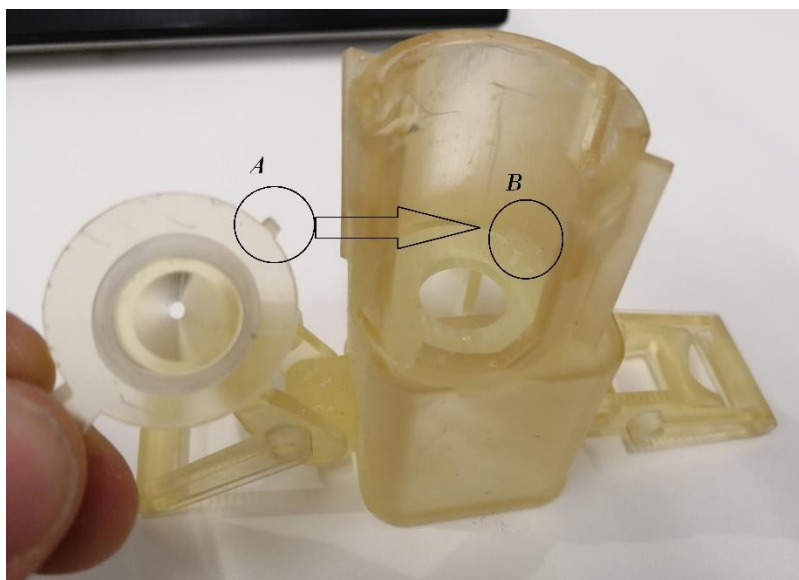


Figure 24 : montage de l'embase

- ii) Tourner l'embase de quelque degré pour la verrouiller à sa place

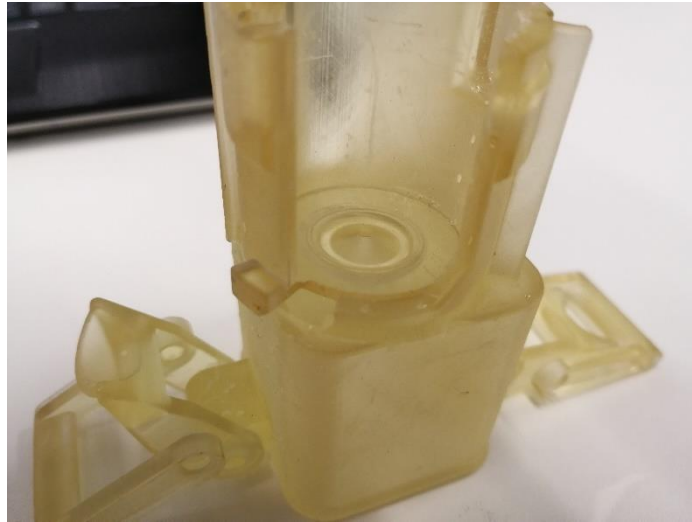


Figure 25 : position de l'embase verrouillée

- b) Mettre le 1er joint rond perforé de la surface de travail désirée sur l'embase
- c) Membrane : la membrane doit couvrir l'orifice du réservoir est dépassé suffisamment sur l'autre extrémité pour être pincée par la pince crocodile (Figure 26)
- d) Mettre le 2e joint :

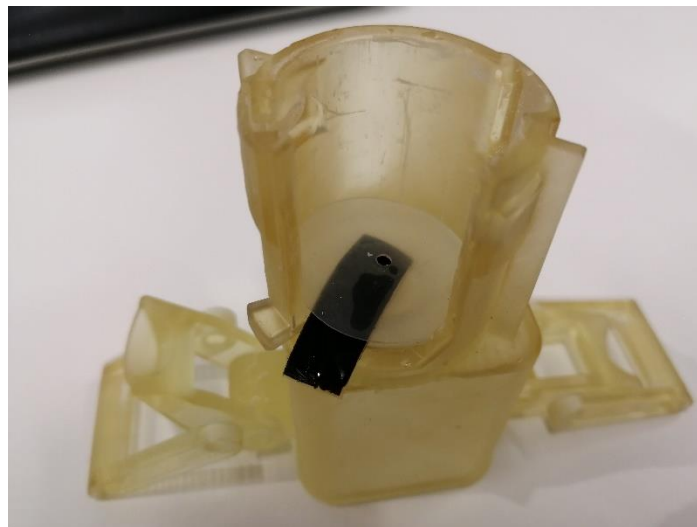


Figure 26: positionnement de la membrane entre les deux joints

- e) Rondelle d'admission d'air : coude de l'entrée d'air vers le bas (Figure 27)
- f) Insérer la vis à ergot : appuyer et tourner



Figure 27 : la membrane dépasse du montage, le bloc d'entrée d'air coude vers le bas

- 2) Mettre cellule dans le support de montage (Figure 28)
 - a) Remplir la cellule d'électrolyte
 - b) Clipper le couvercle
 - c) Monter l'électrode de référence
 - d) Monter la contre-électrode

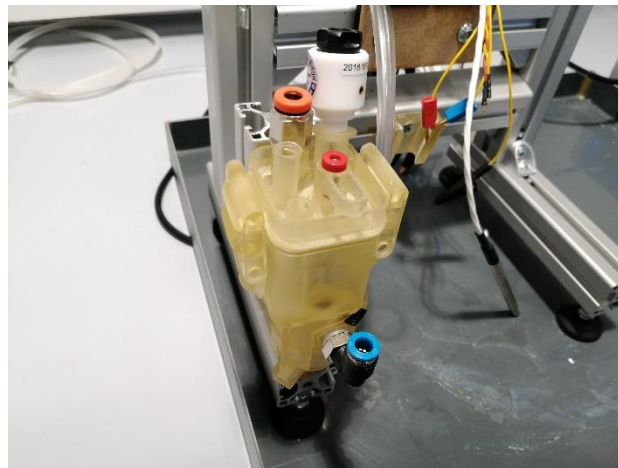


Figure 28 : cellule dans le support de montage

- 3) Mettre la cellule dans le banc de test (Figure 29)
 - a) Monter la sonde dans son emplacement
 - b) Monter la cartouche chauffante dans son emplacement
 - c) Connecteur bleu : électrode de référence
 - d) Connecteur noir : contre-électrode
 - e) Connecteur rouge : membrane
 - f) Connecter le tube d'argon (orange)
 - g) Connecter le tube d'air (bleu)

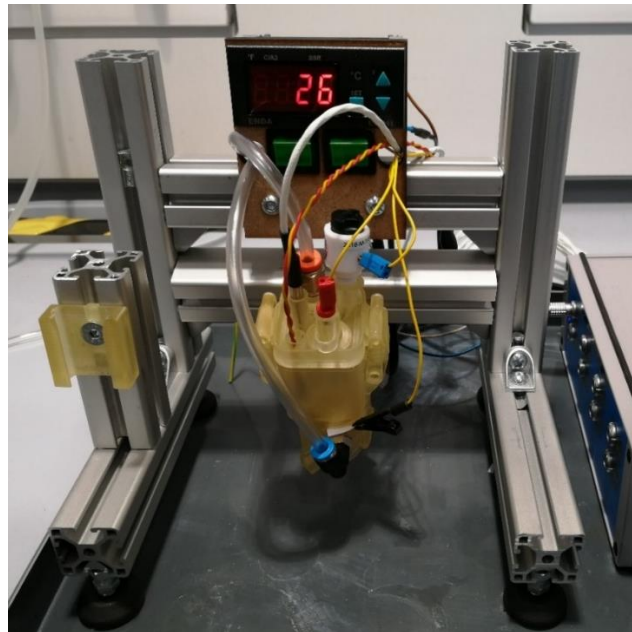


Figure 29 : Cellule raccordée dans le banc de test

4. Dégazage

- 1) Desserrer le support de la contre-électrode
- 2) Ouvrir l'arrivée d'argon jusqu'à la formation de petite bulle dans la cellule, laisser buller 3 minutes
- 3) Arrêter l'arrivée d'argon
- 4) Serrer le support de la contre-électrode

5. Contrôle de la température

- 1) Allumer le contrôleur de température, bouton vert de gauche vers le bas (la température cible enregistrée et de 80°C, voire le mode d'emploi du contrôleur pour modifier la température)
- 2) Activer le chauffage, bouton vert de droite vers le bas

6. Démontage :


- a) Éteindre la cartouche chauffante en appuyant sur le bouton vert de droite vers le haut
- b) Attendre que le contrôleur de température affiche une température inférieure à 50°C
- c) Éteindre le contrôleur de température en appuyant le bouton vert de gauche vers le bas
- d) Déconnecter les fils et les tubes de la cellule du potentiostat
- e) Retirer la sonde de température et la cartouche chauffante
- f) Enlever la cellule du support et la tenir en dessus du lavabo
 - i) Ouvrir le couvercle de la cellule
 - ii) Vider le récipient d'électrolyte
 - iii) Déposer le couvercle sur la surface préalablement préparée
- g) Rincer le récipient d'électrolyte
- h) Démontez la membrane
- i) Sur le couvercle, retirez l'électrode de référence et la contre-électrode
- j) Rincer le couvercle
- k) Rincer l'électrode de travail et la contre-électrode
- l) Conditionner l'électrode selon indicatives du constructeur pour une future utilisation



Read this document carefully before using this device. The guarantee will be expired by damaging of the device if you don't attend to the directions in the user manual. Also we don't accept any compensations for personal injury, material damage or capital disadvantages.

ENDA ET2011 PID TEMPERATURE CONTROLLER

Thank you for choosing ENDA ET2011 temperature controller.

- * 77 x 35mm sized.
- * Selectable dual-set value.
- * Selectable thermocouple types or Pt100 input.(Selection must be specified in order).
- * Automatic calculation of PID parameters.(SELF TUNE).
 Enter PID parameters of the system if they are known at the beginning. Otherwise, Self-Tune should be activated.
- * Soft-Start feature.
- * Input offset feature.
- * C/A2 Relay output can be programmable as alarm or control output.
- * Selectable SSR control output.
- * Selectable heating/cooling control.
- * In the case of sensor failure periodical running or relay state can be selected.
- * CE marked according to European Norms.




RoHS
Compliant

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Input type	Temperature range		Accuracy
	°C	°F	
Pt 100 Resistance thermometer EN 60751	-99.9...300.0 °C	-99.9...543.0 °F	± 0,5% (of full scale) ± 1 digit
Pt 100 Resistance thermometer EN 60751	-200...600 °C	-328...1112 °F	± 0,5% (of full scale) ± 1 digit
J (Fe-CuNi) Thermocouple EN 60584	0... 600°C	+32... +1112°F	± 0,5% (of full scale) ± 1 digit
K (NiCr-Ni) Thermocouple EN 60584	0...1300°C	+32... +2372°F	± 0,5% (of full scale) ± 1 digit
T (Cu-CuNi) Thermocouple EN 60584	0... 400°C	+32... +752°F	± 0,5% (of full scale) ± 1 digit
S (Pt10Rh-Pt) Thermocouple EN 60584	0...1700°C	+32... +3092°F	± 0,5% (of full scale) ± 1 digit
R (Pt13Rh-Pt) Thermocouple EN 60584	0...1700°C	+32... +3092°F	± 0,5% (of full scale) ± 1 digit

ENVIRONMENTAL CONDITIONS	
Ambient/storage temperature	0 ... +50°C/-25... +70°C (with no icing)
Max. Relative humidity	80% up to 31°C decreasing linearly 50% at 40.
Rated pollution degree	According to EN 60529 Front panel : IP65 Rear panel : IP20
Height	Max. 2000m

 Do not use the device in locations subject to corrosive and flammable gases.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS	
Supply	230V AC +%10 -%20, 50/60Hz or 24V AC %±10, 50/60Hz
Power consumption	Max. 5VA
Wiring	Power connector: 2.5mm ² screw-terminal, Signal connector: 1,5mm ² screw-terminal conenction.
Line resistance	Max. 100ohm
Data retention	EEPROM (minimum 10 years)
EMC	EN 61326-1: 2006
Safety requirements	EN 61010-1: 2010 (Pollution degree 2, overvoltage category II)

OUTPUTS	
C/A2 output	Rôle : 250V AC, 8A (for resistive load), Selectable as NO+NC Control or Alarm2 output. Rôle : 250V AC, 16A (for resistive load), Selectable as NO Control or Alarm2 output.
SSR output	Max 20mA 12Volt (as control output)
Life expectancy for relay	Withot load 30.000.000 mechanical operation; 250V AC, on the 8A resistive load 100.000 electrical switching

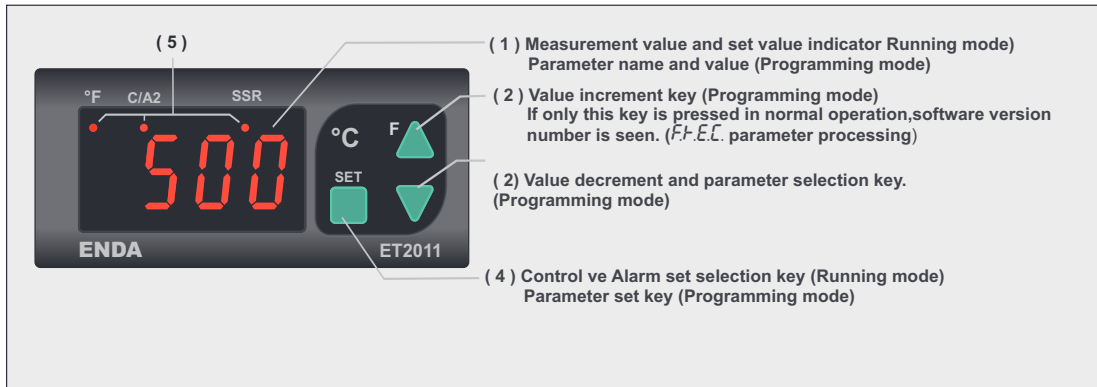
CONTROL	
Control type	Single set-point and alarm control
Control algorithm	On-Off / P, PI, PD, PID (selectable)
A/D converter	12 bit
Sampling time	100ms
Proportional band	Adjustable between 0% and 100%. If Pb=0%, On-Off control is selected.
Control period	Adjustable between 1 and 250 seconds
Hysteresis	Adjustable between 1 and 50°C/F
Output power	The ratio of power at a set point can be adjusted between 0% and 100%

HOUSING	
Housing type	Suitable for flush-panel mounting according to DIN 43 700.
Dimensions	W77xH35xD71mm
Weight	Approx. 200g (after packing)
Enclosure material	Self extinguishing plastics.



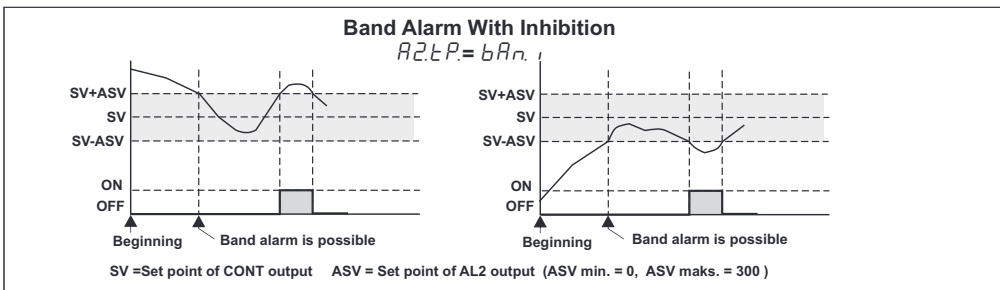
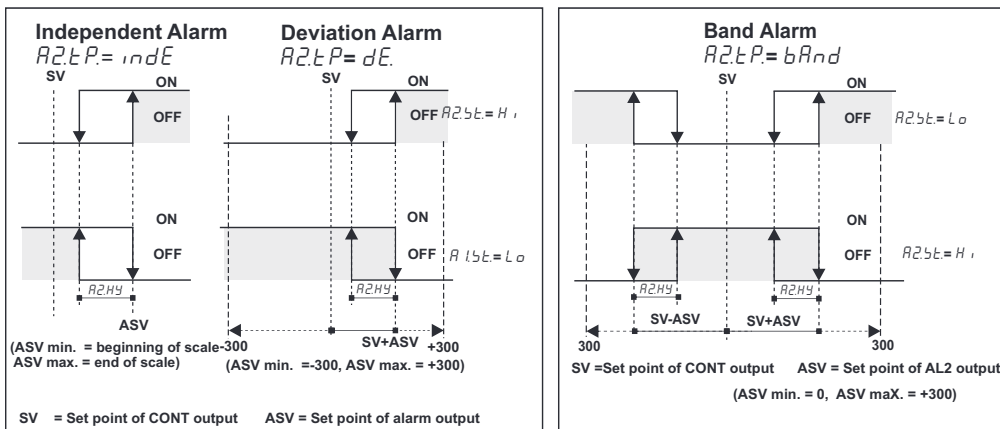
While cleaning the device, solvents (thinner, benzine, acid etc.) or corrosive materials must not be used.

TERMS

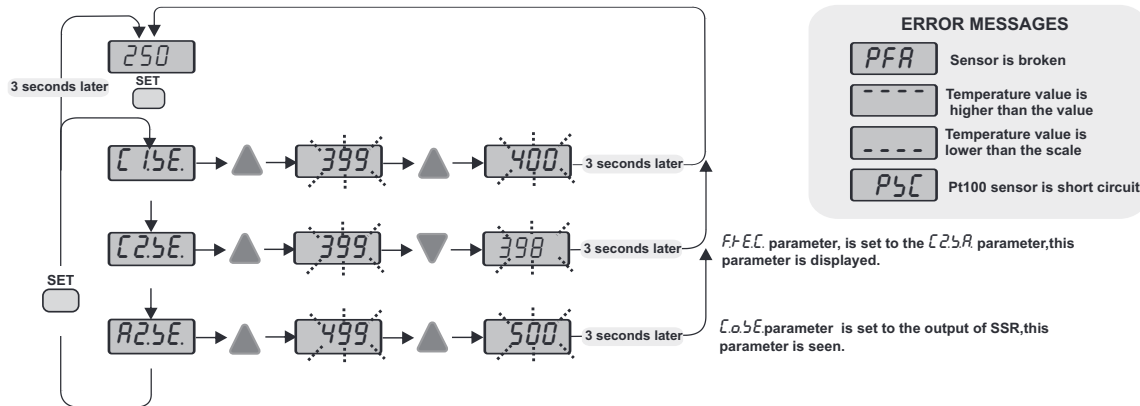


(1) PV and SV display	7 segment, 4 digits red LED display
Character heights	12 mm
(2),(3),(4) Keypad	Mikro switch
(5) State indicator	For control, Alarm1 and SSR outputs 3 digits red LED

ALARM2 OUTPUT TYPES



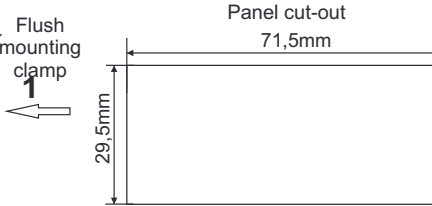
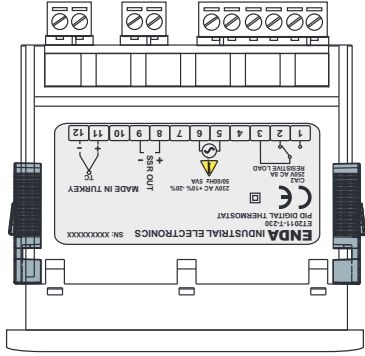
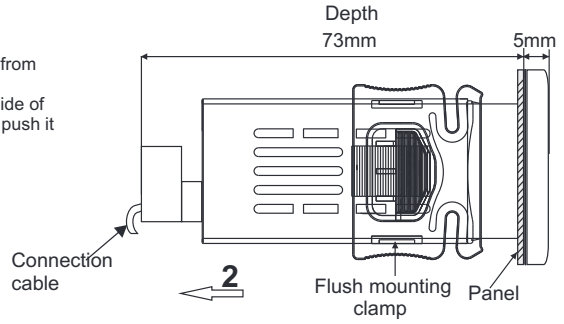
MODIFICATION OF CONTROL AND ALARM SET POINTS



DIMENSIONS



For removing the device from the panel:
- While pressing both side of the device in direction 1, push it in direction 2.



Note

- 1) Panel thickness should be maximum 7mm.
- 2) If there is no 60mm free space at back side of the device, it would be difficult to remove it from the panel.

Order Code: ET2011-X-XXX-X

Input selection
RT....PT100 input
T....TC input

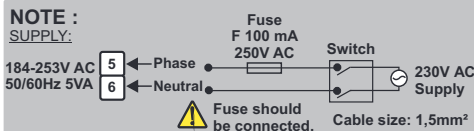
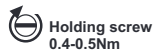
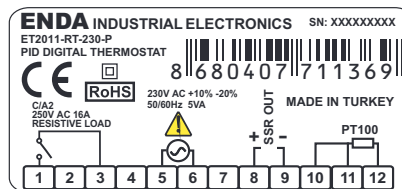
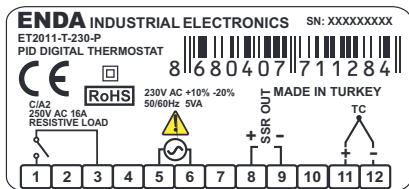
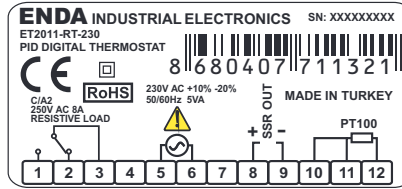
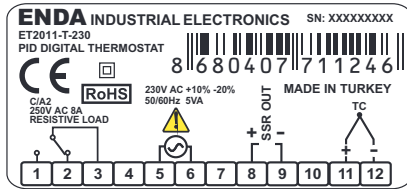
Supply voltage
230VAC.....230V AC
110VAC.....110V AC
024VAC.....24V AC
SM.....9-30VDC/7-24V AC

Contact current selection
None.....8A contact output
P....16A contact output

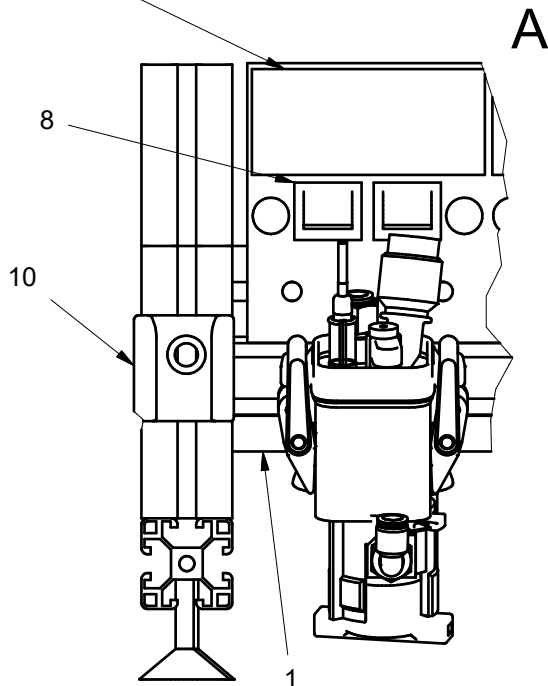
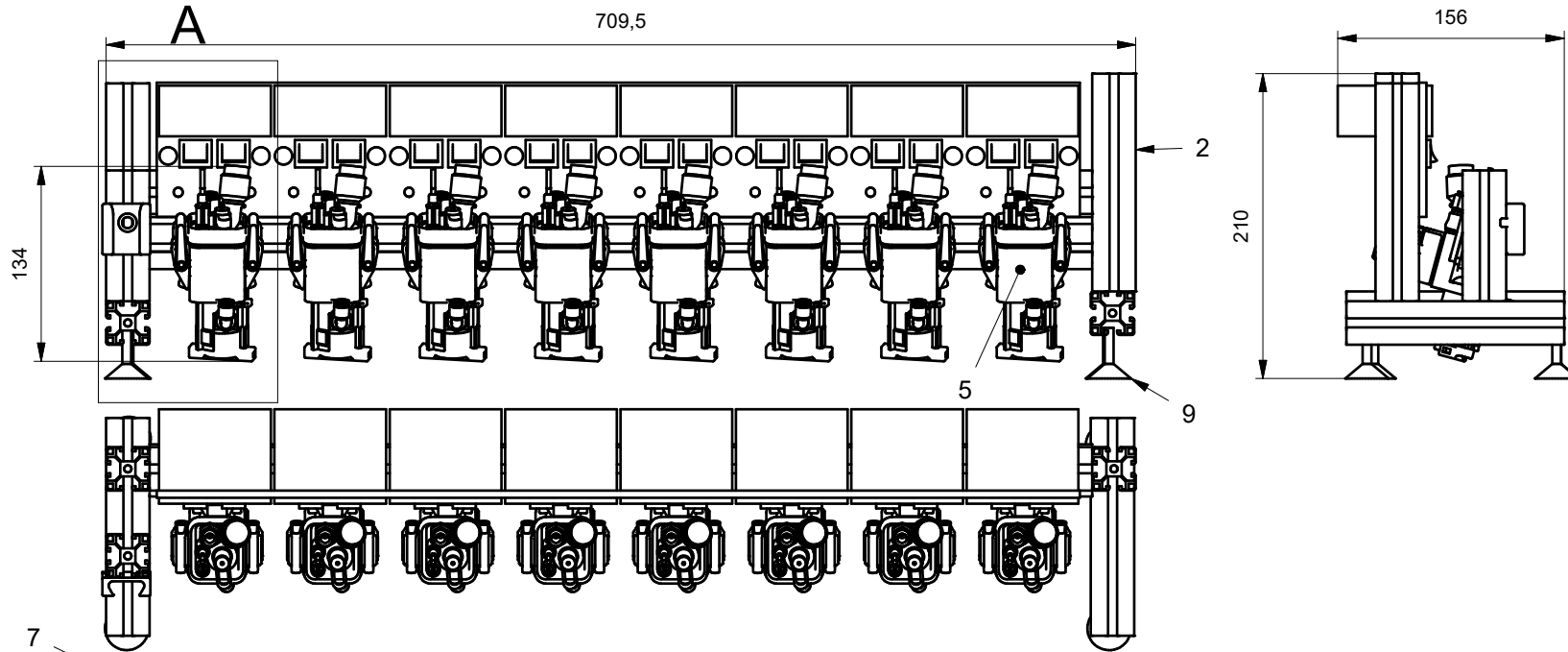
CONNECTION DIAGRAM



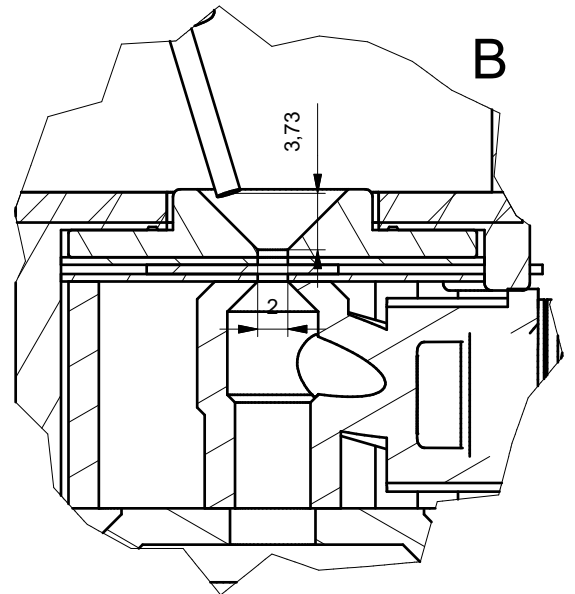
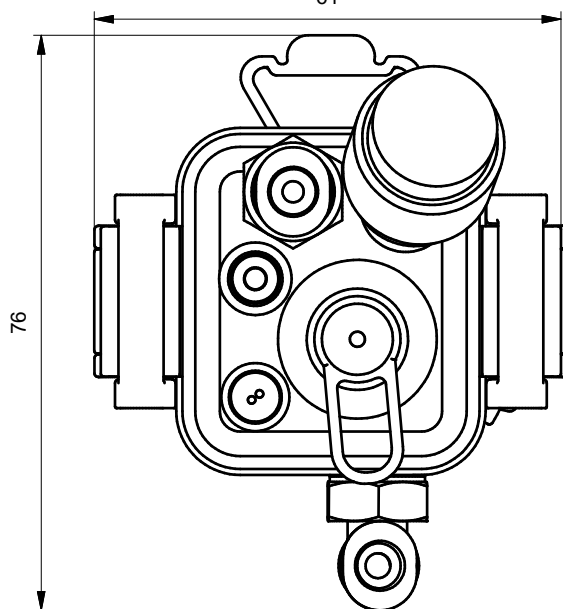
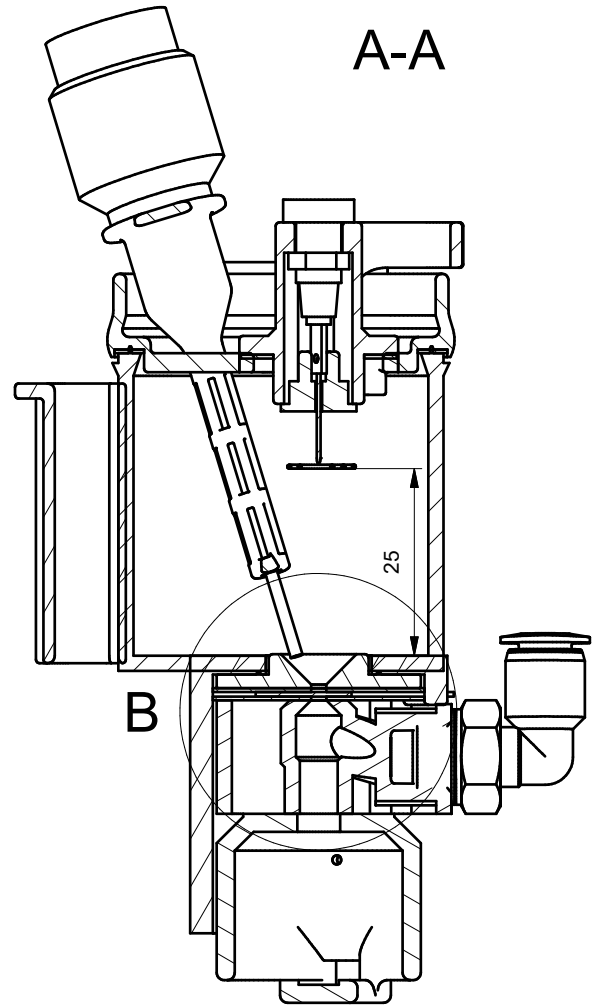
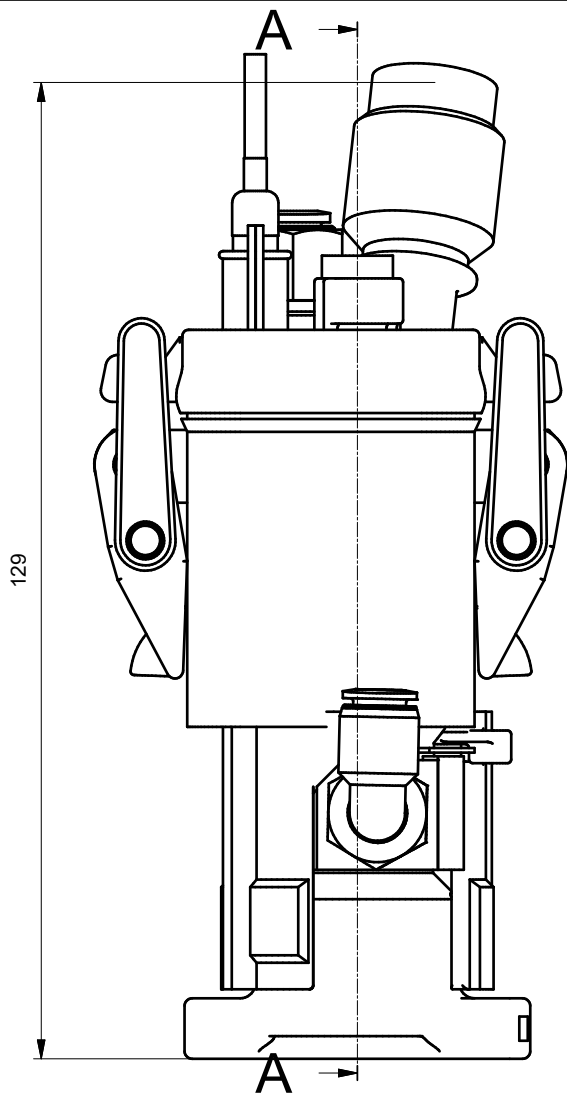
ENDA ET2011 is intended for installation in control panels. Make sure that the device is used only for intended purpose. The shielding must be grounded on the instrument side. During an installation, all of the cables that are connected to the device must be free of energy. The device must be protected against inadmissible humidity, vibrations, severe soiling. Make sure that the operation temperature is not exceeded. All input and output lines that are not connected to the supply network must be laid out as shielded and twisted cables. These cables should not be close to the power cables or components. The installation and electrical connections must be carried on by a qualified staff and must be according to the relevant locally applicable regulations.



Note 1) Mains supply cords shall meet the requirements of IEC 60227 or IEC 60245.
2) In accordance with the safety regulations, the power supply switch shall bring the identification of the relevant instrument and it should be easily accessible by the operator.



10	1	Résine	Support cellule de montage
9	4	-	Pieds réglable
8	16	-	Bouton d'alimentation du contrôleur de température
7	8	-	Contrôleur de température
6	1	MDF	Support du système de régulation
5	8	Résine	Cellule électrochimique
4	8	Résine	Support de cellule
3	1	Aluminium	Montant zone de montage - profilé item
2	4	Aluminium	Montant et pieds - profilé item
1	2	Aluminium	Traverse structure - profilé item
Pos.	Quantité	Matière	Dénomination / Caractéristiques
Pos.	Menge	Werkstoff	Benennung / Merkmale
No./Num.		Assembly6_banc de test	
Titre/Titel		Représentation du banc de test pour 8 cellule électrochimique	
Sous-titre/Untertitel		Banc de test pour membrane de pile à combustible à hydrogène	
No. de Projet/Projektnummer:		Travail de diplôme	
Titre/Titel		Libéré	
Dessiné/ Gezeichnet		Thomas Garofano	18.08.2022
Contrôlé/ Geprüft		Mathieu Soutrenon	19.08.2022
Révision/ Änderung		1	
Matière/Rohstoff:			
Refer to protection notice ISO-16016			
Masse Gewicht		5 kg	
Hes-so		VALAIS WALLIS	
		A4	



La nomenclature est visible sur la figure 8 de du rapport

No./Num.	Assembly5_V4		No. de Projet/Projektnummer:	Travail de diplôme		Libéré	
Titre/Titel	Cellule électrochimique		Dessiné/ Gezeichnet	Thomas Garofano	18.08.2022	Echelle/Massstab 1 : 1	
Sous-titre/Untertitel	Banc de test pour pour membrane de pile à combustible à hydrogène		Contrôlé/ Geprüft	Mathieu Soutrenon	19.08.2022	Feuille/Blatt 1/1	
			Révision/ Änderung	V4			
			Refer to protection notice ISO-16016		Matière/Rohstoff:		
			Masse Gewicht	120 g	Résine d'impression SLA		A4