



UNIVERSITÉ
LAVAL

**Projet de fin d'étude
Conception d'une pile à combustible à l'hydrogène**

Détail du projet et Plan de travail

présenté à

**Simon Rainville
Martin Bernier
Simon Thibault**

Réalisé par

CHALIFOUR Médéric, 536 896 217
THÉROUX Joanie, 536 897 814

Université Laval
2 mai 2025

1 Introduction

Ce projet de fin d'études est réalisé en collaboration avec le projet étudiant Alérion Supermileage de l'Université Laval, qui vise à développer des véhicules à très faible consommation énergétique. Chaque année, l'équipe participe à des compétitions internationales afin de se mesurer à d'autres équipes universitaire et déterminer quel véhicule détient la meilleure consommation énergétique.

Historiquement, le véhicule d'Alérion fonctionnait à l'essence. L'an dernier, l'équipe a réalisé une conversion majeure en le rendant électrique grâce à une batterie. Cette année, un nouveau défi a été lancé : convertir le véhicule pour qu'il fonctionne à l'hydrogène. Cette transition impose une refonte complète du système énergétique et la conception de nouveaux sous-systèmes pour assurer l'intégration d'une pile à combustible. Le projet couvre ainsi la conception de la pile à hydrogène, ainsi que le développement de composants critiques tels que l'humidificateur, le supercondensateur, le circuit pneumatique, le montage mécanique, le détecteur de fuites et le système de sécurité. La réalisation de ces systèmes est menée en collaboration avec l'équipe d'Alérion, afin d'assurer une intégration harmonieuse et une performance optimale du véhicule.

Médéric, impliqué depuis plusieurs années au sein du projet et actuellement directeur technique, a vu une opportunité d'intégrer cette initiative à son projet de fin d'études. Joanie s'est jointe à lui pour relever ce défi d'envergure, combinant leurs expertises respectives pour développer une solution efficace et innovante. Pour encadrer leur travail, ils ont choisi le professeur Innocent Kamwa comme superviseur. Son expertise en systèmes énergétiques et en hydrogène sera précieuse pour guider les décisions techniques et assurer la viabilité du projet. Son accompagnement constitue un atout pour la réussite de cette initiative. Nous le remercions pour son encadrement et son soutien tout au long de cette démarche.

En somme, ce projet ne se limite pas à une simple conversion énergétique ; il s'agit d'une transformation technologique ambitieuse, nécessitant des choix d'ingénierie stratégiques et une gestion rigoureuse des ressources et des délais. Ce rapport détaille les objectifs, le cahier des charges et le plan de travail qui permettront de mener ce projet à terme.



2 Description et objectifs

Le projet consiste à concevoir et à intégrer une pile à combustible à hydrogène et son système de gestion pour équiper le véhicule prototype électrique d'Alérion Supermileage en vue de sa participation à l'Eco-Marathon 2025, qui se tiendra en avril. Cette pile à combustible remplacera la batterie utilisée lors de l'édition précédente, marquant ainsi une transition vers une propulsion par hydrogène.

La conception de la pile et de ses sous-systèmes est un défi d'ingénierie nécessitant le développement et l'intégration des éléments suivants :

- Pile à combustible : conception et fabrication des assemblages membrane-électrode (AMÉ), des plaques bipolaire, des plaques de support, et du système de contrôle.
- Système de gestion et de stockage de l'énergie électrique : intégration d'un dispositif de gestion de l'énergie électrique et des circuits de régulation de puissance.
- Système de distribution du gaz : contrôle du flux d'hydrogène vers la pile à combustible.
- Humidificateur : maintien des conditions optimales d'humidité pour le bon fonctionnement de la pile.
- Supports mécaniques : fixation et intégration des différents composants dans le véhicule.
- Systèmes de sécurité : détecteurs de fuite, valves de sécurité et protocoles de gestion des risques.
- Autres composants nécessaires à la conversion efficace de l'hydrogène en électricité.

Pour chaque sous-système, l'équipe suivra un processus rigoureux comprenant les étapes suivantes :

1. Recherche et élaboration des solutions techniques
2. Conception et modélisation
3. Fabrication et assemblage
4. Tests et validation
5. Débogage et optimisation

L'axe central du projet est la fabrication de la pile à combustible, qui nécessitera une étude approfondie des matériaux, la conception des différentes plaques et membranes, ainsi que le développement d'un système de monitoring performant. Une fois assemblée, la pile sera soumise à plusieurs cycles de tests pour en optimiser l'efficacité et la fiabilité. Parallèlement, les autres sous-systèmes suivront le même processus afin d'assurer une intégration harmonieuse et fonctionnelle au sein du véhicule.

L'enjeu principal est de maximiser l'autonomie et l'efficacité énergétique du prototype en exploitant pleinement les avantages de l'hydrogène comme source d'énergie, tout en respectant les contraintes de sécurité et de performance imposées par la compétition.

Objectifs

- Concevoir une pile à combustible efficace et suffisamment puissante pour propulser le véhicule à l'Eco-Marathon 2025
- Concevoir le système de gestion de l'énergie électrique
- Concevoir le système de distribution de gaz pour la pile
- Concevoir un humidificateur qui s'intègre à la pile à combustible
- Assurer l'intégration du nouveau système dans le véhicule
- Être conforme aux exigences de la compétition (Eco-Marathon 2025)

3 Cahier des charges

* : Proviens du cahier de règlement de l'Eco-Marathon 2025.

3.1 Aspects générales

- Le système doit être le plus léger possible.
- Le système doit maximiser l'efficacité de la conversion de l'hydrogène en électricité.
- Le système doit pouvoir entrer dans le compartiment moteur du véhicule.
- Le système doit être prêt et testé avant le 31 mars 2025, soit la date de départ de l'équipe.
- Un budget de 8500 \$ est prévu pour la réalisation du projet.

3.2 Pile à combustible

- Doit fournir, au moins la puissance moyenne consommé par le véhicule, avec une marge de sécurité.
En 2024, il a consommé 307 à 317 km/kWh sur 16km en 35 minutes.
- La densité de courant de la zone active ne doit pas dépasser 1 A/cm^2 .*
- La tension de la pile ne doit pas dépasser 60V.*
- L'oxygène pour la pile doit provenir de l'air ambiant.*

3.3 Système de gestion de l'énergie électrique

- Le stockage d'énergie électrique doit être de type condensateur.*
- La tension de sortie du système doit idéalement demeurer entre 50 et 60V.
- Le système doit pouvoir fournir le courant nécessaire pour une accélération complète avec une variation de tension inférieur à 10 V.

3.4 Système de distribution du gaz

- La pression du gaz dans le système ne doit pas dépasser 1 bar au dessus de la pression atmosphérique.*
- Un débit-mètre volumique, fourni lors de la compétition devra être installé juste avant la pile à combustible.
- Un régulateur de pression doit être installé directement sur la bouteille. *
- Deux manomètre devront indiquer la pression de la bouteille et celle du système. *
- Une valve de surpression doit suivre le régulateur. En cas de surpression, l'hydrogène doit être évacué à l'extérieur du véhicule. *
- La tuyauterie et les connexions doivent être appropriées pour une utilisation avec de l'hydrogène.

3.5 Humidificateur

- L'humidificateur doit être intégré à la pile à combustible. *
- L'humidificateur doit être muni d'une valve de surpression. *
- L'humidité produite par l'humidificateur doit être ajustable afin d'optimiser les performances de la pile.
- Le système doit pouvoir extraire l'eau excédentaire qui s'accumule dans la pile. Ceci peut être accompli par un système de purge ou par un système de recirculation.

4. RETOUR SUR LE BUDGET ET L'ÉCHÉANCIER

3.6 Support mécanique

- Les systèmes doivent être solidement maintenu dans le compartiment moteur du véhicule.

3.7 Système de sécurité

- Un détecteur d'hydrogène doit fermer une valve solénoïde normalement fermée et un ouvrir un relais normalement ouvert si une concentration supérieur à 1% est détectée. Dans cas, le système ne doit pas se remettre en marche sans une intervention humaine.

4 Retour sur le budget et l'échéancier

4.1 Échéancier

L'échéancier final, présenté sous forme de diagramme de Gantt en [Annexe A](#), a été ajusté en raison des défis rencontrés au cours du projet. Certaines tâches ont nécessité plus de temps que prévu ou ont été reportées, ce qui a entraîné des modifications par rapport à la planification initiale.

La compétition de l'Eco-Marathon se déroulant du 1er au 8 avril, les deux semaines précédentes ont été particulièrement intenses, avec des efforts soutenus pour finaliser le système global à temps. Lors des premiers jours de la compétition, les membres de l'équipe ont procédé à des ajustements et à la finalisation de certains systèmes, afin d'essayer de garantir la conformité aux exigences techniques et opérationnelles.

4.2 Budget

Les tableaux [1](#) et [2](#) présentent le budget final ainsi que les dépenses engagées pour le projet. Un montant total de 8500 \$ a été nécessaire pour la conception de la pile à combustible et des systèmes connexes essentiels à son bon fonctionnement.

Malgré quelques ajustements au cours du développement, le budget prévu a été respecté, permettant la réalisation complète du projet sans dépassement majeur. La gestion rigoureuse des ressources, ainsi que les contributions de divers commanditaires, ont facilité l'optimisation des coûts tout en maintenant la qualité et la performance des systèmes développés.

TABLEAU 1 – Budget du projet

Section	Montant alloué (\$)
Pile à combustible et autres systèmes connexes	6000
Commandite Swagelok – Système de distribution de gaz	1500
Système de gestion et stockage d'énergie	1000
Total	8500

5. AVANCEMENT DU PROJET EN DATE DU 5 MARS

TABLEAU 2 – Dépenses engagées au 28 avril 2025

Section	Montant dépensé (\$)
Pile à combustible	4000
Système de distribution de gaz	1400
Système de gestion et stockage d'énergie	1200
Humidificateur	100
Support mécanique	100
Système de sécurité	500
Autres (non classé)	1200
Total	8500

5 Avancement du projet en date du 5 mars

5.1 Pile à combustible

La figure 1 présente le design élaboré pour la pile à combustible.

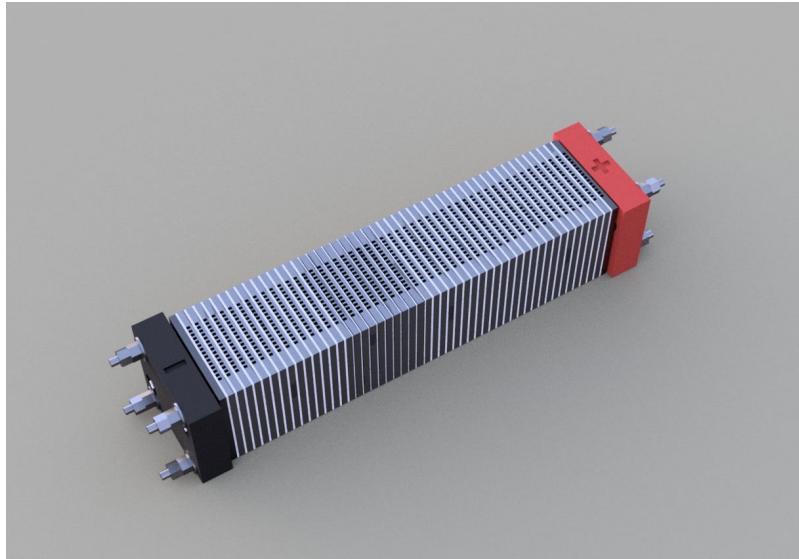


FIGURE 1 – Design V1 de la pile à combustible

Plaques d'écoulement

Pour la fabrication des plaques d'écoulement, deux plaques de graphite de 13 x 13 pouces ont été obtenues grâce à une commandite. Cependant, un défi majeur s'est présenté : ces plaques sont trop grandes pour être directement usinées avec la graveuse CNC, dont les dimensions maximales sont de 30 x 18 cm. Afin de les découper sans risque de casse, une solution a été mise en place, l'utilisation d'un gabarit pour scie sauteuse. Des tests sont en cours pour valider cette méthode et s'assurer que les plaques conservent leur intégrité après la découpe. De plus, pour optimiser le design des canaux d'écoulement (serpentin, structures alternatives, etc.), toute l'équipe a été impliquée dans la proposition de concepts. Le principal défi est de tester rapidement les différentes configurations et de déterminer un critère de sélection dont

5. AVANCEMENT DU PROJET EN DATE DU 5 MARS

l'objectif est basé sur l'efficacité de distribution du gaz et des fluides. La date limite, pour proposer des concepts, initialement fixée au 5 mars, pourrait être dépassée en raison du temps nécessaire pour la réalisation, l'évaluation et la validation des designs.

Membranes

Pour le choix du type de membrane, celle qui a été sélectionnée est composée de PFSA, intégrant une microstructure en ePTFE pour renforcer sa résistance mécanique. De plus, un revêtement de platine sur une face a été ajouté afin de réduire la contamination croisée : si une petite quantité d'hydrogène traverse la membrane, elle sera immédiatement convertie en eau, minimisant ainsi les pertes et améliorant l'efficacité du système. Un autre paramètre critique pour le bon fonctionnement de la pile à combustible est l'épaisseur de la membrane. Actuellement, des essais sont en cours pour comparer des membranes de 9 à 15 microns, afin d'identifier le compromis optimal entre performance, durabilité et perméabilité aux gaz. De plus, pour assurer une découpe précise des membranes, un couteau de découpe a été installé sur la graveuse CNC. Cette solution, testée et validée, permet d'obtenir des découpes nettes et reproductibles. Un adaptateur spécifique a dû être conçu pour permettre l'installation du couteau sur la machine.

Électrodes

Le choix entre tissu de carbone et papier de carbone a été éclairé par une analyse comparative basée sur un article scientifique [1]. La figure 2 présente deux graphiques de comparaison des deux options selon deux niveaux d'humidification différents. Les performances étant quasiment identiques dans notre cas, le tissu a été privilégié en raison de sa meilleure maniabilité, facilitant ainsi la découpe et l'assemblage du MEA. Grâce à une commandite, des électrodes en tissu de carbone ont été obtenues, avec une densité de catalyseur de 2 mg de Pt/cm², offrant des performances élevées. Étant donné que les électrodes ont une forme carrée, leur découpe est réalisée manuellement avec un couteau de précision de type exacto. Cette approche simple et efficace permet d'obtenir des découpes précises sans nécessiter d'usinage complexe.

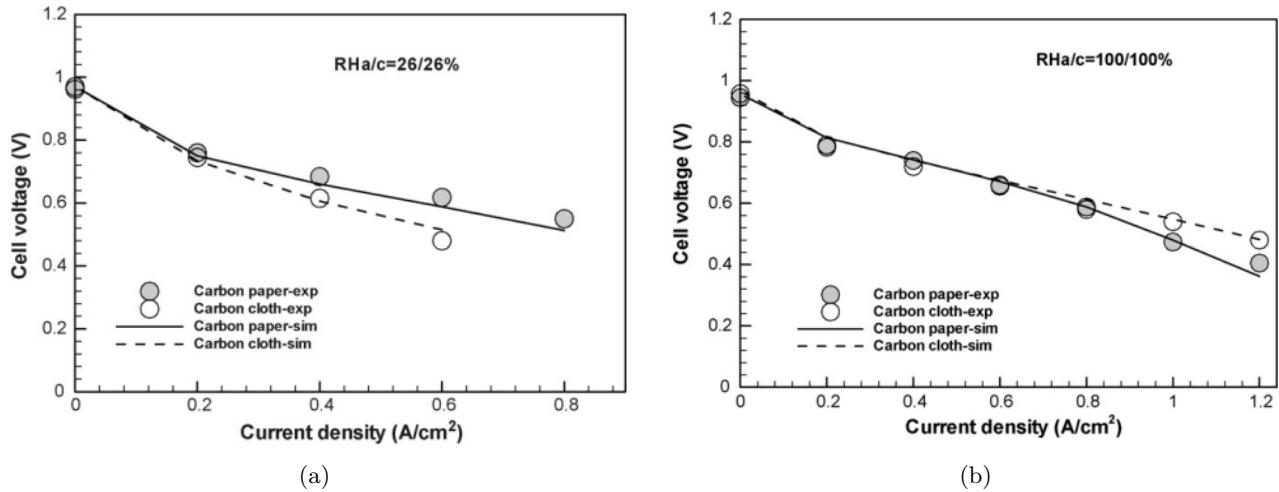


FIGURE 2 – (a) Courbes de polarisation sous des opérations à faible humidité ($RHa/c = 26/26\%$)
(b) Courbes de polarisation sous opérations d'humidification complète ($RHa/c = 100/100\%$). [1]

Plaques de compression

Les plaques de compression ont été fabriquées en FR-4, un matériau composite robuste et isolant, couramment utilisé en électronique et en ingénierie pour sa résistance mécanique et thermique. Pour l'assemblage du système, des raccords NPT 1/4" ont été installés sur les plaques, permettant une connexion

5. AVANCEMENT DU PROJET EN DATE DU 5 MARS

fiable pour l'alimentation en gaz et en fluides.

Tige de positionnement

Pour assurer l'alignement précis des composants de la pile à combustible, des tiges en fibre de verre ont été sélectionnées. L'option du carbone a été envisagée, mais finalement écartée en raison de sa conductivité électrique, qui aurait pu interférer avec le fonctionnement du système.

Joint d'étanchéité

Pour le choix des matériaux, deux matériaux ont été testés pour les joints d'étanchéité, le silicone 0,010 po et le téflon 0,010 po. Le téflon s'est révélé facile à découper, tandis que le silicone pose un défi majeur : sa texture trop molle fait que la lame accroche lors de la découpe, compliquant le processus. Étant donné qu'il faut produire plus de 100 joints, la découpe manuelle n'est pas viable. L'objectif est d'utiliser la même méthode automatisée qu'avec la découpe de membrane pour assurer une découpe rapide et précise. Des ajustements sont en cours pour adapter le processus au silicone ou explorer d'autres matériaux plus faciles à fabriquer.

Assemblage d'une AMÉ

La fabrication d'un assemblage membrane-électrode suit une procédure méthodique pour assurer un positionnement précis des électrodes et une bonne adhérence des composants. La procédure d'assemblage est résumée ci-dessous.

- La membrane est laissée sur sa pellicule plastique afin de faciliter sa manipulation.
- Un coin est soulevé pour insérer la première électrode en dessous.
- La seconde électrode est placée sur le dessus pour compléter l'assemblage.
- Un gabarit est utilisé pour garantir un alignement précis des électrodes sur la membrane.

Une fois les électrodes correctement positionnées, l'assemblage est soumis à un pressage à chaud à 66 kg/cm², 97°C et 3.56 minutes. Cette étape permet d'assurer une bonne adhésion des couches et d'optimiser les performances de la pile [2]. De plus, une recommandation a été faite pour explorer l'utilisation de la protection des bords ("edge protection"), mais cette méthode n'a pas encore été testée.

Assemblage de la pile

Le processus d'assemblage de la pile à combustible, constituée d'une seule cellule, est illustrée à la figure 3.

5.2 Système de gestion et de stockage de l'énergie électrique

Le système de stockage d'énergie repose sur des super-condensateurs. Une première version (V1) a été assemblée en utilisant des circuits individuels reliés par des fils soudés. La capacité de stockage a été validée grâce à un convertisseur boost, permettant de simuler une courbe courant-tension correspondant au comportement de la pile à combustible. Les tests ont été réalisés avec une stratégie qui imite un système avec et sans convertisseur DC-DC entre la pile et le super-condensateur, chaque approche présentant des avantages et des inconvénients.

5. AVANCEMENT DU PROJET EN DATE DU 5 MARS

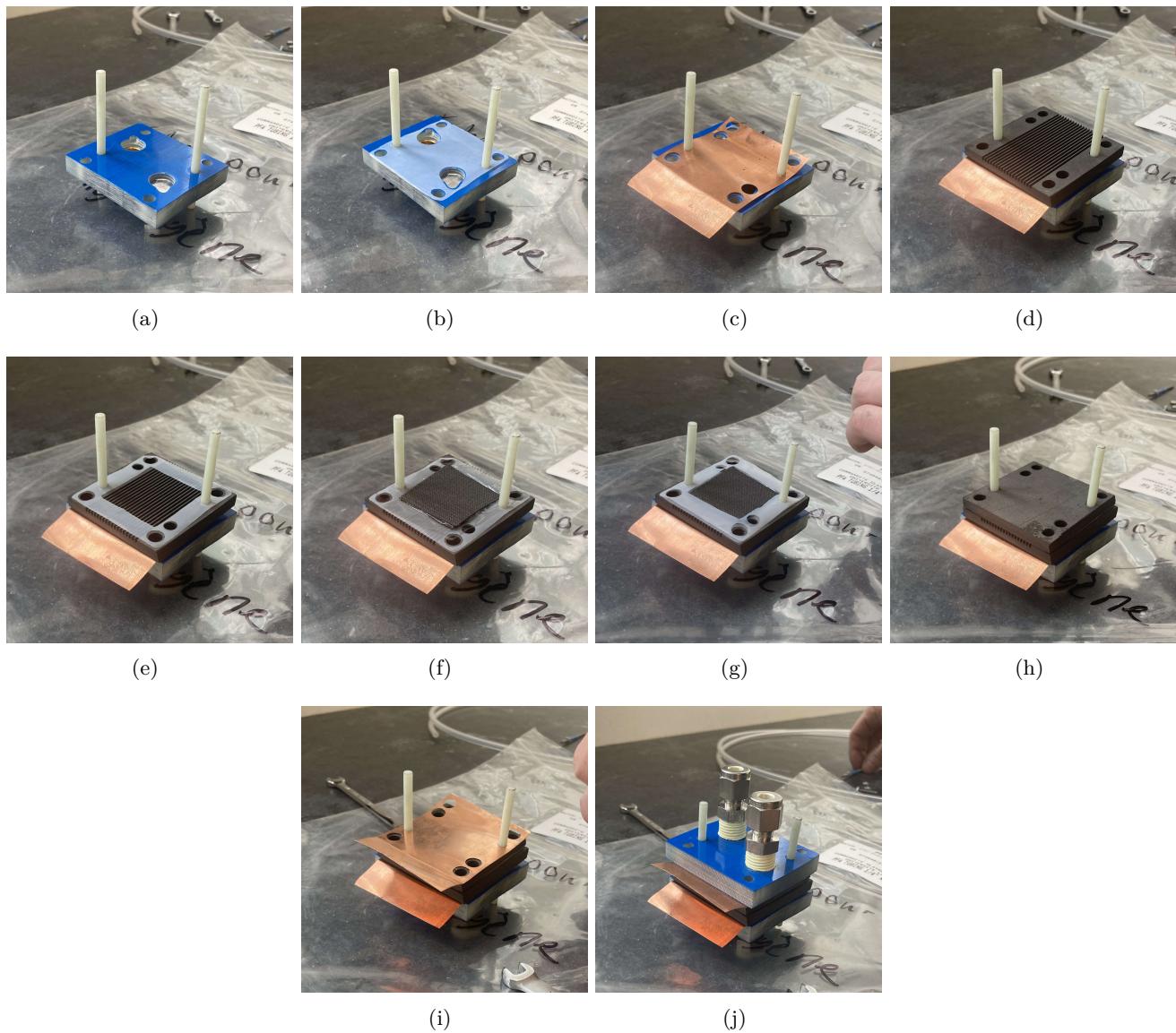


FIGURE 3 – Assemblage par étape de la pile avec une seule cellule.

Avec convertisseur :

- Permet une tension plus élevée et plus stable (50 à 55V).
- Facilite l'atteinte de vitesses plus élevées avec le moteur sans devoir réduire le ratio de transmission ou recourir à un contrôle par défluxage.
- Puissance imposée à la pile à combustible, ce qui peut permettre une stratégie de contrôle par *Maximum Efficiency Point Tracking*.
- Nécessite une méthode pour garantir l'équilibre entre la demande en puissance et la puissance fournie par la pile.

Sans convertisseur :

- Gestion passive des pics de courant, simplifiant le système.

5. AVANCEMENT DU PROJET EN DATE DU 5 MARS

- Suppression des pertes liées à la conversion, ce qui améliore l'efficacité énergétique.
- Requiert davantage de cellules pour atteindre une tension adéquate.
- Conditions de fonctionnement de la pile à combustible plus variables et moins contrôlées.

Une caractérisation de l'efficacité du convertisseur est en cours afin de déterminer la meilleure approche à adopter.

Parallèlement, une seconde version (V2) du système est en développement. Elle intégrera des PCB personnalisés afin d'améliorer la modularité et de faciliter l'assemblage. La configuration estimée de cette banque est de 22 super-condensateurs en série, et 2 chaînes en parallèle, avec des condensateurs de 100F à 2.7V, offrant ainsi une capacité totale de 9.1F à 59,4V. Le poids du système, en incluant les circuits de protection et les supports mécaniques, est estimé à environ 900g.

5.3 Système de distribution du gaz

Le régulateur de pression sélectionné pour le système est un modèle TESCOM BB-1 en acier inoxydable. Ce choix a été fait en raison de son faible poids, un critère essentiel pour l'intégration au véhicule. Il permet une pression de sortie réglable entre 0 et 80 psi, avec une pression d'entrée allant jusqu'à 6000 psi, ce qui devrait répondre aux exigences du système.

À ce stade, une évaluation est en cours pour déterminer si un second étage de régulation est nécessaire afin d'améliorer la précision de la pression en sortie. Pour l'instant, comme les règles de la compétition, pour une pression d'opération inférieure à 1 bar, sont plus souples, cette contrainte est appliquée au design.

Afin d'assurer la sécurité du système, une valve de surpression Swagelok RL3, réglée à 10 psi, a été choisie. Une démonstration sera nécessaire pour prouver que la pile à combustible peut supporter cette pression sans compromettre son intégrité structurelle.

5.4 Humidificateur

À ce stade du projet, le développement de l'humidificateur n'est pas considéré comme une priorité. Pour l'instant, l'intégration d'un humidificateur est envisagée comme une amélioration possible à explorer dans le futur, en fonction du temps disponible et des performances du système actuel sans cette composante.

5.5 Supports mécaniques

Le développement du support mécanique est actuellement bloqué en raison d'un manque d'informations critiques de la part des organisateurs de la compétition. Plus précisément, les dimensions exactes des cylindres requis pour le stockage de l'hydrogène n'ont toujours pas été communiquées par les organisateurs de la compétition, ce qui empêche la conception et l'intégration du système de fixation.

Ce manque d'information crée une incertitude majeure dans la planification du projet, retardant l'avancement des travaux mécaniques et pouvant potentiellement impacter l'intégration finale de la pile à combustible dans le véhicule. L'équipe explore actuellement des solutions alternatives pour anticiper ces contraintes, notamment en développant des modèles adaptatifs permettant d'accueillir différentes tailles de cylindres.

5. AVANCEMENT DU PROJET EN DATE DU 5 MARS

5.6 Systèmes de sécurité

Détecteur d'hydrogène

Le détecteur d'hydrogène repose sur un circuit personnalisé conçu sur un PCB, basé sur une cellule électrochimique à trois électrodes. Le dispositif comprend un potentiostat maintenant la tension de la cellule à 0V, ainsi qu'un amplificateur à transimpédance qui convertit le courant en tension. Cette tension est ensuite comparée à un seuil ajusté en fonction de la température ambiante et calibré via un potentiomètre.

En théorie, ce système permet une détection précise des fuites d'hydrogène, garantissant le respect de la limite de sécurité de 1 % de concentration. Toutefois, les premiers essais ont révélé des écarts entre les performances attendues et la réalité du fonctionnement du circuit. Afin d'assurer une détection fiable et conforme aux exigences de sécurité, l'équipe a décidé d'adopter une approche empirique pour le calibrage, ajustant les paramètres en fonction des données expérimentales obtenues lors des tests en conditions réelles. Comme plan de contingence, d'autres modèles de capteur comprenant déjà le circuit d'acquisition ont été commandés.

Valve solénoïde

En cas de détection de fuite d'hydrogène, une valve solénoïde doit couper l'alimentation en hydrogène à la pile et un relais doit ouvrir le circuit afin de mettre le système hors fonction. Afin de réduire la consommation de ces composantes, la tension nominale de 12V est appliquée pour activer les systèmes, puis abaissé à environ 4V.

La valve sélectionnée est une valve ASCO de la série 302. Elle est de sécurité intrinsèque et ne consomme que 0.25W au point nominal. Elle peut tenir une pression allant jusqu'à 8 bar, ce qui dépasse largement les spécifications du système. Étant constitué de PARA, de POM, de PET, d'acier inoxydable, de laiton, de NBR, de FPM et de TPE, elle est compatible avec l'hydrogène. Cette valve nécessite une base pneumatique de type ISO 15218. Cette même valve sera utilisée pour la purge du système.

6 Défis rencontrés

Du contact électrique entre les cellules jusqu'à la stabilité du régulateur, plusieurs défis ont émergé au cours du projet. Cette section présente les imprévus rencontrés et les solutions mises en place pour atteindre les objectifs fixés

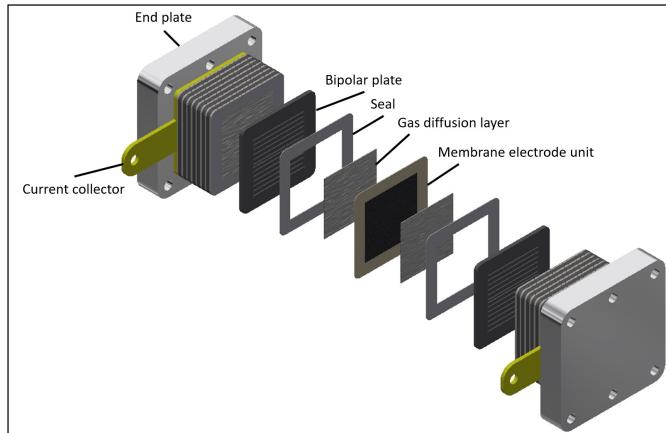


FIGURE 4 – Composantes de la pile à combustible. [Source]

6.1 Joint d'étanchéité

Une composante essentielle du projet est le joint d'étanchéité, dont le rôle est de contenir l'hydrogène, un gaz hautement inflammable, à l'intérieur de la pile à combustible. Bien que cette tâche puisse sembler rudimentaire et secondaire au fonctionnement global, elle s'est révélée d'une importance capitale pour la sécurité et la performance du système.

TABLEAU 3 – Évolution des prototypes de joints d'étanchéité

Itération	Solution	Comportement
A	PTFE (0.010 po)	Grosse fuite
B	PTFE (0.015 po)	Petite fuite
C	PTFE (0.020 po)	Étanche, mais faible contact électrique
D	PTFE (0.008 po), avec ensemble de joints toriques (nitrile)	Étanche et bon contact électrique pour une cellule, Compression trop sensible pour l'empiement
E	EPDM (0.015po, 50A)	Étanche, mais le joint bouche le canal d'hydrogène
F	Combinaison de E et D	Canal bouché ou fuite selon la compression
G	E, avec lamelle métallique pour couvrir le canal d'hydrogène	Petite fuite, repli du joint dans les canaux d'apport en air
H	E, avec lamelle métallique pour couvrir les canaux d'hydrogène et d'apport en air	Test à venir

6. DÉFIS RENCONTRÉS

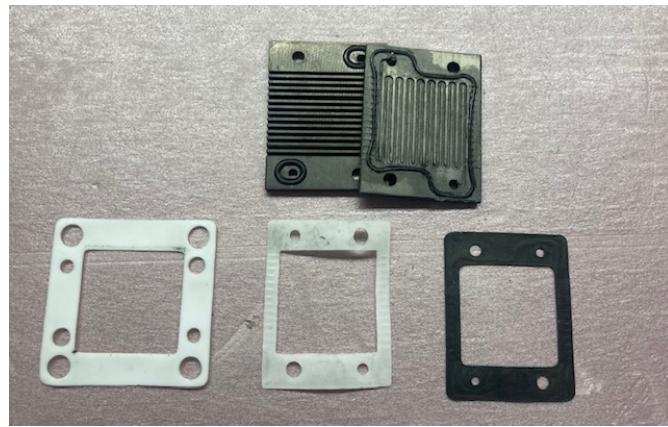


FIGURE 5 – Comparaison des joints d'étanchéités

Au fil du développement, plusieurs prototypes ont été conçus, chaque itération visant à corriger les limitations identifiées dans la version précédente. Les tests préliminaires ont permis de déterminer que les joints d'étanchéité devaient être fabriqués à partir de feuilles de PTFE plutôt qu'en silicone, en raison de la facilité de découpage associée à ce matériau. Les premiers prototypes utilisaient uniquement le PTFE, avec des variations d'épaisseur d'une itération à l'autre. Pour évaluer l'efficacité des joints, plusieurs tests d'étanchéité ont été réalisés :

- Mesure de la chute de pression pour détecter d'éventuelles fuites importantes.
- Submersion dans de l'eau distillée pour identifier les micro-fuites.

La dernière version du joint d'étanchéité est fabriquée en caoutchouc EPDM avec une dureté de 50A, offrant une meilleure flexibilité que le PTFE utilisé précédemment. Ce matériau semble prometteur puisqu'il permet une compression moins sensible de l'empilement. Cependant, il présente un inconvénient : il a tendance à se déformer sous pression et à obstruer les canaux des plaques d'écoulement. Pour résoudre ce problème, deux solutions ont été explorées :

- Ajout de lamelles métalliques pour recouvrir les canaux et prévenir leur obstruction.
- Utilisation d'un caoutchouc plus dur (ex. 70A) afin de limiter la déformation excessive.

Par ailleurs, il a été observé qu'un joint trop épais empêchait les électrodes d'entrer en contact optimal avec les plaques d'écoulement, ce qui augmentait significativement la résistance interne de la pile. Pour mesurer cette métrique, une électrode unique a été placée entre deux plaques bipolaires avec un seul joint d'étanchéité, et la chute de tension a été mesurée sous un courant de 5A. Idéalement, un bon joint ne devrait pas impacter la résistance de contact. Les résistances de référence mesurées pour chaque configuration sont présentées dans le tableau 4.

6. DÉFIS RENCONTRÉS

TABLEAU 4 – Résistance de référence à 5A

Système	Résistance (mΩ)
Plaques d'écoulements seules	5
Plaques d'écoulement et électrode seule	8
Avec le joint B	140
Avec le joint C	600
Avec les joints D	10
Avec le joint E	11

6.1.1 Méthode de fabrication

Afin de garantir une fabrication précise et répétable des joints d'étanchéité—une caractéristique essentielle, puisque la pile comprend plus de 100 joints—une machine de type CNC drag-knife a été mise au point pour cette tâche (voir figure 6). Cette approche a permis une fabrication rapide et efficace, facilitant les itérations nécessaires pour tester différents prototypes et affiner le design.

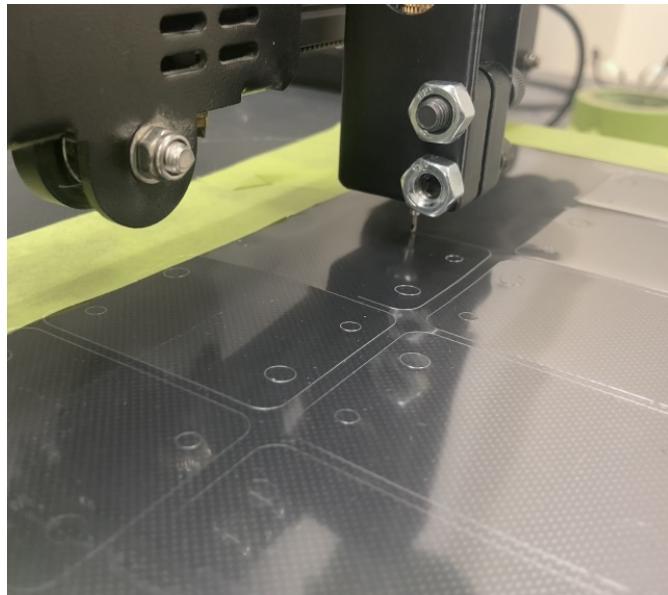


FIGURE 6 – Machine «CNC drag-knife» conçu avec une imprimante 3D *Creativity Ender 3* et un couteau de coupe rotatif.

Cette méthode a été principalement utilisée lors de la phase de conception afin d'expérimenter et d'optimiser les configurations des joints. Pour la production de l'ensemble des joints de l'empilement, la fabrication a été réalisée par l'atelier du département de génie mécanique à l'aide d'une découpe laser, garantissant une qualité uniforme et une précision optimale.

6. DÉFIS RENCONTRÉS

6.2 Collecteur de courant

Les collecteurs de courant constituent l'interface entre les plaques d'écoulement aux extrémités de la pile et les fils du circuit électrique qu'ils alimentent. Le principal défi associé à ce composant était de garantir une connexion étanche, tout en maximisant la surface de conduction avec les plaques d'écoulement. Il n'est pas possible d'intercaler un joint d'étanchéité entre la plaque d'écoulement et le collecteur de courant, car cela interromprait le contact électrique—sauf en utilisant un joint conducteur, tel que du graphite.

Le premier prototype de collecteur était constitué d'une tôle en cuivre et, naïvement, ne prévoyait aucune solution d'étanchéité. Sans surprise, ce système n'était pas hermétique. La deuxième solution testée intégrait un joint d'étanchéité plat en PTFE sur le périmètre extérieur du collecteur de courant. Pour connecter les câbles, un trou central dans la plaque de compression permettait le passage d'une tige de cuivre soudée à la tôle. Cependant, cette approche s'est révélée inefficace en termes d'étanchéité et présentait une complexité accrue, rendant l'assemblage plus fragile.

La solution retenue a finalement été l'intégration de joints toriques, encastrés dans les plaques d'écoulement. Ce système permettait aux joints de se comprimer dans leurs cavités, assurant ainsi une étanchéité fiable, tout en garantissant un contact électrique efficace entre le collecteur de courant en cuivre et la plaque d'écoulement. Les différentes configurations testées sont présentées à la figure 7



FIGURE 7 – Itérations du prototype de collecteur de courant

Un autre défi rencontré avec les collecteurs de courant était la corrosion, notamment dans l'environnement humide auquel la pile était exposée. Ce phénomène était amplifié par les tests de submersion réalisés durant le développement. et la production d'eau inhérente au processus chimique de conversion de l'hydrogène. Pour prévenir la corrosion, la tôlerie de cuivre a été plaquée d'argent à l'aide d'une solution chimique commerciale. Cette finition améliore la durabilité et la fiabilité des collecteurs de courant dans des conditions d'humidité prolongées.

6.3 Système de compression

Le système de compression permet de comprimer les cellules de l'empilement entre elles. Il est constitué de deux plaques de compression situées aux extrémités ainsi que de boulons assurant une fixation robuste.

La première itération de ce système était composée d'une plaque de Garolite d'une épaisseur de 3/8 po. Ce matériau a été sélectionné pour sa rigidité élevée, garantissant une compression uniforme. La force était appliquée à l'aide de quatre boulons traversant des trous dans les plaquettes d'écoulement. De plus, les ports d'entrée et de sortie de l'hydrogène étaient directement intégrés dans la plaque de compression à l'aide de connecteurs Swagelok MNPT 1/4".

6. DÉFIS RENCONTRÉS

Afin d'augmenter la compression, ce premier système a été remplacé par des plaques d'aluminium avec huit vis disposées à l'extérieur de l'empilement. Les ports, jugés trop volumineux, ont été remplacés par des connecteurs Swagelok 10-32. Cependant, l'aluminium s'est révélé insuffisamment rigide, entraînant des déformations et des fuites. Pour pallier ce problème, un dernier prototype en Garolite, adoptant la même géométrie que l'itération précédente, a finalement été retenu. Les trois prototypes sont présentés à la figure 8.

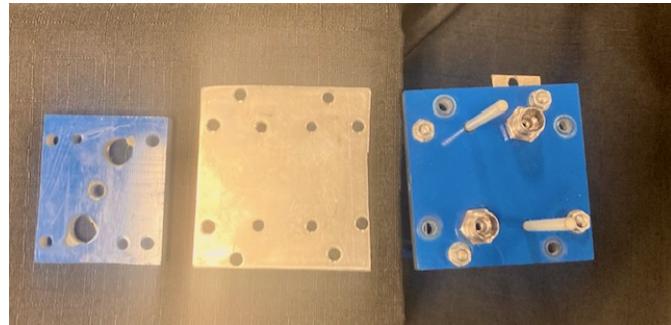


FIGURE 8 – Prototypes de plaques de compression

Pour déterminer le degré optimal de serrage des boulons, une première méthode consistait à surveiller l'épaisseur complète de l'empilement pendant la compression. Toutefois, cette approche s'est révélée peu pratique et difficilement reproductible. Pour garantir une compression maîtrisée et uniforme, une clé dynamométrique sera utilisée.

6.4 Plaques d'écoulement

Les plaques d'écoulement remplissent plusieurs fonctions essentielles. Elles assurent la distribution homogène des gaz et garantissent un contact électrique efficace entre les différentes plaques. La géométrie des canaux joue un rôle déterminant dans la performance de la pile, influençant directement l'efficacité de la distribution de l'hydrogène, l'évacuation de l'eau lors des phases de purge et la prévention des fuites.

D'une épaisseur de 1/8 po, ces plaques sont composées de graphite imprégné de résine, un matériau offrant une excellente imperméabilité aux gaz, une bonne conductivité électrique et une machinabilité optimale avec une machine CNC à coût modéré. Toutefois, leur fragilité relative impose des limitations quant à la compression maximale possible dans l'empilement.

La première itération des plaques présentait une forme carrée avec un côté de 50 mm, incluant quatre trous de passage pour les vis de compression. Cette version a ensuite évolué vers des dimensions de 39 x 51 mm, optimisant le nombre de cellules par plaque de 13 x 13 po et permettant ainsi une plus grande flexibilité pour les essais. Par ailleurs, les vis de compression ont été déplacées à l'extérieur afin de simplifier l'assemblage et d'améliorer l'intégrité structurelle.

Pour déterminer la géométrie optimale des canaux de distribution, un processus itératif a été mis en place, prenant en compte à la fois la qualité de l'étanchéité et la puissance électrique produite. Afin de tester les différents designs, un banc d'essai a été conçu, utilisant une charge résistive variable (de 0.0625 à 2 Ω) pour générer les courbes de polarisation de la pile (voir figure 10). Le design offrant la puissance maximale a ainsi été retenu. Ces tests ont été réalisés en évaluant une seule cellule, en supposant que son comportement serait représentatif de l'ensemble de l'empilement.

6. DÉFIS RENCONTRÉS

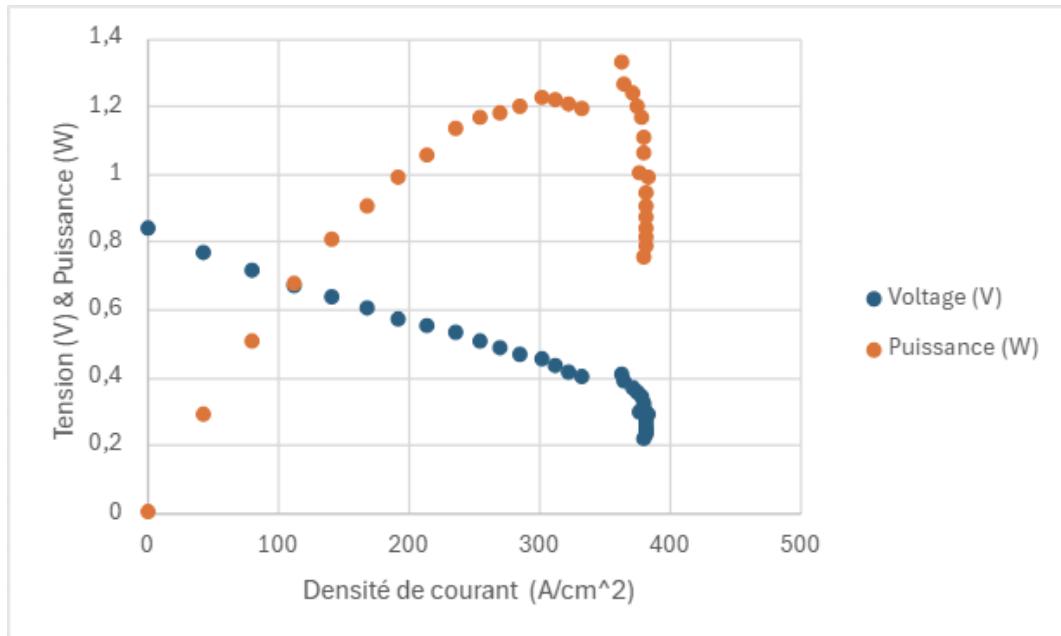


FIGURE 9 – Courbe de polarisation de la cellule retenue. La discontinuité est probablement dû à une mauvaise caractérisation de la charge résistive.



FIGURE 10 – Itération du motifs de canal de distribution de gaz.

6. DÉFIS RENCONTRÉS

6.5 Distribution de gaz

La figure 11 présente le fonctionnement du système de distribution des gaz.

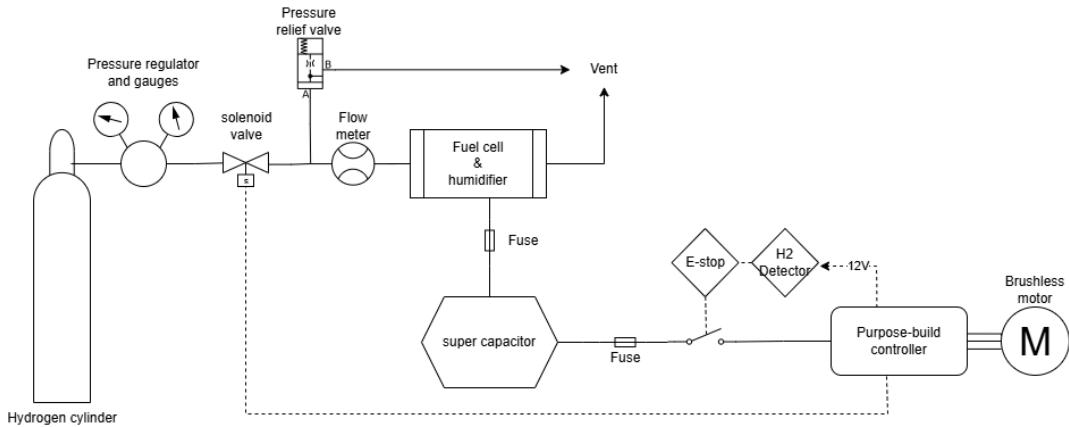


FIGURE 11 – Diagramme fonctionnel du système de distribution de gaz et du système de propulsion.

6.5.1 Régulateur de pression

Lors des tests du régulateur de pression, il est apparu qu'un seul étage de régulation ne permettait pas d'assurer la stabilité nécessaire. Pour pallier ce problème, un second régulateur a été ajouté en série avec le premier, améliorant ainsi le contrôle et garantissant une pression plus stable et adaptée aux exigences du système.

6.5.2 Valve solénoïde

La valve solénoïde sélectionnée pour contrôler l'entrée d'hydrogène est le modèle ASCO série 302. Cette valve est conçue pour s'interfacer avec un bloc percé selon la norme ISO 15218, grandeur 15. Cependant, une erreur de commande a conduit à l'acquisition d'un bloc de grandeur 10, incompatible avec la valve choisie.

Face aux contraintes de délais du projet, il a été nécessaire de concevoir et fabriquer un nouveau bloc adapté. Cette fabrication a été réalisée par l'atelier du département de génie mécanique, permettant une intégration fonctionnelle et conforme aux spécifications requises.

6.5.3 Supports mécaniques et cylindres

L'organisateur de la compétition avait fourni l'information suivante concernant les dimensions du cylindre d'hydrogène : *Height : approx. 17.1" including valve*. Toutefois, à l'arrivée sur le site de la compétition, il s'est avéré que le cylindre avait une hauteur totale de 22 po, rendant ainsi l'arrangement initial, illustré à la figure 12, inapplicable.

Face à cette contrainte imprévue, l'équipe a dû adapter sa stratégie et changer de catégorie pour compétitionner avec une batterie. Ce changement implique une réorganisation du compartiment moteur, qui devra être revue et ajustée pour la prochaine compétition afin d'assurer une intégration conforme aux dimensions réelles du cylindre d'hydrogène.

6. DÉFIS RENCONTRÉS



FIGURE 12 – Support prévu du cylindre d'hydrogène

6.6 DéTECTEUR de fuite

Le plan initial prévoyait la conception d'un détecteur d'hydrogène maison, basé sur une cellule électrochimique et un circuit d'amplification. Toutefois, après trois versions problématiques, ce projet a été abandonné en raison des difficultés rencontrées pour garantir un fonctionnement fiable et précis.

L'alternative retenue a été l'utilisation du capteur SGX BLD1, couplé à un microcontrôleur et à un photo-relais. Cette solution offre une meilleure stabilité et facilite l'intégration dans le système global. La figure 13 présente le prototype final



FIGURE 13 – Configuration finale du détecteur de fuites

7 Caractéristique de la pile à combustible

La figure 14 présente la pile à combustible dans sa version actuelle.

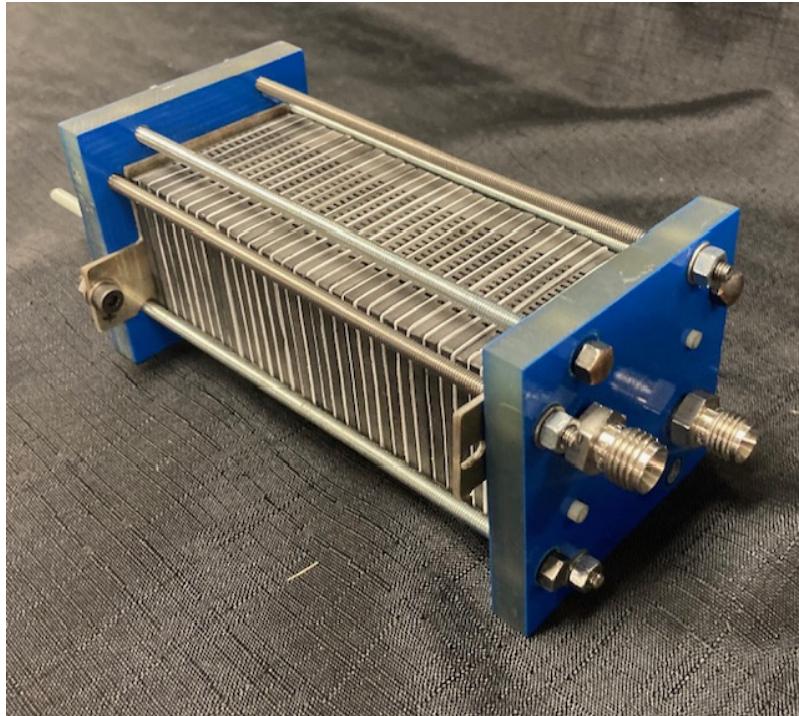


FIGURE 14 – Prototype de pile à combustible.

7.1 Manque de puissance

Tel qu'illustré par la figure 10, la pile semble actuellement produire une puissance maximale de 1.2 W par cellule. La configuration actuelle comprend 32 cellules, et l'équipe dispose de suffisamment de matériau pour en fabriquer 69 cellules. Toutefois, à ce stade, la puissance générée reste insuffisante pour alimenter le véhicule, dont la consommation moyenne est d'environ 90 W.

Par ailleurs, la pile sous-performe en termes de densité de puissance, ce qui suggère qu'une amélioration significative pourrait être obtenue en identifiant et en corrigeant la source de cette sous-performance. Actuellement, la densité de puissance mesurée est d'environ 0.13 W/cm^2 , alors que certaines piles utilisant la même technologie atteignent des valeurs allant jusqu'à 0.6 W/cm^2 . Cette différence indique que des ajustements dans les conditions de fonctionnement pourraient permettre d'optimiser la puissance disponible.

Trois hypothèses ont été avancées pour expliquer cette faible puissance :

1. Flux d'air insuffisant : Une ventilation trop faible pourrait limiter l'apport en oxygène à la pile. Une solution envisagée serait l'installation d'un système de ventilation plus performant afin d'améliorer la diffusion des gaz.
2. Utilisation d'hydrogène sec : La cellule a été testée sans humidification, ce qui pourrait entraîner un assèchement de la membrane et, par conséquent, une augmentation de sa résistance interne. Une régulation de l'humidité pourrait donc être bénéfique.

8. ANALYSE DE RISQUE

3. Température ambiante trop basse : La pile a été testée à température ambiante, alors que les performances optimales des piles à combustible PEM sont généralement atteintes aux alentours de 80°C. Laisser la pile monter en température pourrait permettre d'améliorer ses performances.

Ces pistes seront explorées afin d'optimiser la puissance générée et d'assurer une intégration efficace au sein du véhicule

7.2 Validation du cahier des charges

À l'exception de la puissance produite, le système respecte globalement les exigences du cahier des charges. Cependant, deux éléments ont compromis l'atteinte de l'objectif principal : les dimensions du cylindre d'hydrogène et les performances sous-optimales de la pile à combustible.

Ces limitations ont empêché la propulsion du véhicule lors de l'Eco-Marathon 2025. Une optimisation du système sera donc nécessaire pour les prochaines itérations du projet, notamment en améliorant la densité de puissance de la pile et en adaptant la conception aux contraintes dimensionnelles des réservoirs disponibles.

8 Analyse de risque

Une analyse de risque conforme aux exigences du département de génie mécanique est présentée à l'[Annexe B](#). En collaboration avec l'équipe Alérion Supermileage et avec l'aide d'un expert en chimie, un protocole de sécurité rigoureux a été mis au point afin d'assurer la réalisation des tests dans des conditions optimales.

Les tests ont dû être effectués sous une hotte chimique, accompagnés d'un détecteur de fuite pour surveiller en temps réel la présence d'hydrogène. Pour minimiser les risques d'ignition pouvant conduire à un incendie, plusieurs mesures de sécurité ont été intégrées au système. L'utilisation de composants certifiés explosion-proof et la mise à la terre du système de distribution des gaz ont été mises en place pour garantir une protection efficace contre les décharges électrostatiques et les sources potentielles d'inflammation

9 Enjeux sociaux, économiques et environnementaux

9.1 Développement d'une nouvelle expertise en hydrogène à l'Université Laval

Avant le lancement du projet Alérion Supermileage, l'Université Laval ne disposait pas d'une expertise spécifique en pile à combustible. Grâce à cette initiative étudiante, une nouvelle compétence s'est développée au sein de l'établissement, ouvrant la voie à des recherches et des projets futurs dans ce domaine.

L'intégration de l'hydrogène dans le véhicule prototype a nécessité une exploration approfondie des technologies de stockage, de gestion et de conversion de l'énergie. Ce travail a permis de poser les bases d'une expertise qui pourra être enrichie et pérennisée par les générations suivantes d'étudiants et chercheurs. La continuité du projet Alérion Supermileage, ainsi que l'émergence de nouvelles initiatives en hydrogène, contribueront à renforcer cette spécialisation et à positionner l'Université Laval comme un acteur clé dans la transition énergétique.

9.2 Évolution des technologies liées à l'hydrogène

L'hydrogène est une technologie en pleine évolution, avec des avancées significatives dans sa production, son stockage et son utilisation. Les efforts de recherche se concentrent sur l'amélioration de l'efficacité des piles à combustible, la réduction des coûts de production et le développement d'infrastructures adaptées.

Le projet Alérion Supermileage s'inscrit dans cette dynamique en testant des solutions innovantes pour maximiser l'efficacité énergétique et la fiabilité des systèmes à hydrogène. En explorant ces technologies dans un cadre académique, les étudiants contribuent à l'évolution du secteur et à la démocratisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie viable.

9.3 Application des technologies pour l'environnement

L'hydrogène est souvent présenté comme une alternative écologique aux combustibles fossiles. Son utilisation dans les transports permet de réduire les émissions de CO₂ et d'améliorer l'efficacité énergétique des véhicules. Contrairement aux moteurs thermiques, une pile à combustible ne produit que de l'eau comme sous-produit, ce qui en fait une solution prometteuse pour la mobilité durable.

Le projet Alérion Supermileage illustre cette transition vers une énergie propre en intégrant une pile à hydrogène dans son prototype. Cette démarche permet de tester et d'optimiser les performances du système tout en sensibilisant la communauté universitaire et industrielle aux avantages de cette technologie.

Annexe A

Diagramme de Gantt actualisé le 10 avril 2025.

N°	Nom de la tâche	Durée	Début	Fin		2025 Janvier	2025 Février	2025 Mars	2025 Avril
						26 31 05 10 15 20 25	30 04 09 14 19 24	01 06 11 16 21 26 31 05	
1	Conception du système générale	54.25 jours	Lun 25-01-06	Mar 25-04-01					
2	Élaboration du plan et des différents systèmes	9 jours	Lun 25-01-06	Lun 25-01-20					
3	Conception de la pile à combustible	49 jours	Lun 25-01-13	Lun 25-03-31					
4	recherche de matériaux et concept	5.25 jours	Lun 25-01-13	Lun 25-01-20					
5	Élaboration du Design des AMÉ	10.5 jours	Lun 25-01-20	Mar 25-02-04					
6	Élaboration du Design des plaques de support	9.63 jours	Lun 25-02-03	Lun 25-02-17					
7	Élaboration du Design du système de surveillance	9 jours	Lun 25-02-10	Lun 25-02-24					
8	Élaboration du Design des plaques bipolaire	11.38 jours	Lun 25-02-17	Mer 25-03-05					
9	Validation des différents Design	9.63 jours	Lun 25-02-24	Dim 25-03-09					
10	Commander pieces et/ou machiner	12 jours	Lun 25-02-17	Jeu 25-03-06					
11	Assembler une cellule	4.38 jours	Lun 25-02-24	Ven 25-02-28					
12	Tester et Déboguer la 1ere cellule	1 jour	Ven 25-02-28	Lun 25-03-03					
13	Assemblage de différentes cellules	7.88 jours	Mer 25-03-05	Lun 25-03-17					
14	Tester différentes cellules	7.88 jours	Lun 25-03-10	Jeu 25-03-20					
15	Caractériser et optimiser les cellules	8.75 jours	Jeu 25-03-13	Mer 25-03-26					
16	Assembler la pile	11.38 jours	Mar 25-03-11	Jeudi 25-03-27					
17	Tester et optimiser la pile	4.38 jours	Mar 25-03-25	Lun 25-03-31					
18	Conception du système humidificateur	19.63 jours	Ven 25-02-28	Mar 25-04-01					
19	Recherche du concept et design	9.63 jours	Ven 25-02-28	Ven 25-03-14					
20	Validation Design	4.38 jours	Mar 25-03-25	Lun 25-03-31					
21	Commander pieces et/ou machiner	3 jours	Jeu 25-03-27	Mar 25-04-01					
22	Conception du système de gestion de l'énergie électrique	42.5 jours	Lun 25-01-06	Jeudi 25-03-13					
23	Design du circuit et choix des élément:17.5 jours	Lun 25-01-06	Ven 25-01-31						
24	Validation du Design	8.75 jours	Lun 25-02-03	Ven 25-02-14					
25	Commander pieces	9.63 jours	Ven 25-02-07	Ven 25-02-21					
26	Assembler V1	4 jours	Ven 25-02-21	Jeu 25-02-27					
27	Tester et Déboguer	3 jours	Jeu 25-02-27	Mar 25-03-04					

N°	Nom de la tâche	Durée	Début	Fin	2025 Janvier	2025 Février	2025 Mars	2025 Avril
					26 31 05 10 15 20 25	30 04 09 14 19 24	01 06 11 16 21 26 31 05	
28	Design V2	3 jours	Jeu 25-02-27	Mar 25-03-04				
29	Assembler V2	3.5 jours	Mer 25-03-05	Sam 25-03-08				
30	Caractériser et optimiser	4 jours	Sam 25-03-08	Jeu 25-03-13				
31	Conception du système de distribution du gaz	54.25 jours	Lun 25-01-06	Mar 25-04-01				
32	Design et choix des pièces	13.13 jours	Lun 25-01-06	Ven 25-01-24				
33	Validation du Design	10 jours	Lun 25-01-27	Mar 25-02-11				
34	Commander pieces et/ou machiner	10 jours	Jeu 25-02-13	Ven 25-02-28				
35	Assembler les différentes parties	6 jours	Lun 25-03-03	Mar 25-03-11				
36	Tester et Déboguer	9 jours	Lun 25-03-10	Lun 25-03-24				
37	Caractériser et optimiser	5.25 jours	Mar 25-03-25	Mar 25-04-01				
38	Conception du système de supports mécaniques	10.75 jours	Ven 25-03-14	Mar 25-04-01				
39	Design du montage	3.5 jours	Ven 25-03-14	Mer 25-03-19				
40	Commander pieces et/ou machiner	4 jours	Mar 25-03-18	Lun 25-03-24				
41	Assembler les différentes parties	3 jours	Lun 25-03-24	Jeu 25-03-27				
42	Tester et ajuster	2 jours	Ven 25-03-28	Mar 25-04-01				
43	Conception du systèmes de sécurité	32.38 jours	Lun 25-01-27	Mar 25-03-18				
44	Design du détecteur et système	13.13 jours	Lun 25-01-27	Ven 25-02-14				
45	Validation Design	6.13 jours	Sam 25-02-15	Sam 25-02-22				
46	Commander pieces	5.25 jours	Jeu 25-02-20	Jeu 25-02-27				
47	Assembler	3 jours	Mer 25-02-26	Lun 25-03-03				
48	Tester et Déboguer	9.63 jours	Mar 25-03-04	Mar 25-03-18				
49	Assemblage des sous-système	10.5 jours	Ven 25-03-14	Sam 25-03-29				
50	Tests et validation du projet	1.75 jours	Sam 25-03-29	Lun 25-03-31				

Annexe B



UNIVERSITÉ
LAVAL

Vice-rectorat aux
ressources humaines
et aux finances

Formulaire
Analyse de risques

IDENTIFICATION					PARTIE 1		
Unité (Faculté, Service, département, direction, etc.):		Département de génie mécanique			Date :	2025-01-07	
Pavillon :	Adrien Pouliot		Local :		Autres :		
Description de l'élément analysé :							
Personne(s) exposée(s) :	<input type="checkbox"/>	Membre du personnel	Analysée(s) par :	Médéric Chalifour			
	<input checked="" type="checkbox"/>	Étudiante / étudiant					
	<input type="checkbox"/>	Tier					
	<input type="checkbox"/>	Autres :					
Formation spécifique :		SIMDUT, Danger de l'électricité, Formation sur les travaux à chaud			Formation à jour :	<input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
Type de risques (exemples)							
Risques physiques		Risques chimiques	Risques biologiques	Risque à la sécurité		Risques ergonomiques	Risques psychosociaux
Bruit	Électricité	Utilisation d'un produit chimique	Agent biologique	Chute, glissade	Particules projetées	Durée ou rythme élevé	Charge de travail
Température chaude	Radiation	Gaz, vapeur, fumée, Poussière	Moisissure	Objets pointus, tranchants	Incendie, explosion	Effort excessif	Soutien social des supérieurs / collègues insuffisants
Température froide	Humidité	Contact avec un produit chimique	Parasite	Pièce en mouvement	Travail isolé (seul)	Mouvements répétés	Autonomie décisionnelle
Vibration	Brûlure	Inhalation d'un produit chimique	Liquide biologique	Chute d'objet	Équipements sous pression	Posture contraignante	Risque de violence ou d'agression (clientèle)
Rayonnement		Matière inflammable	Plantes, insectes	Énergie résiduelle	Outil / machine	Éclairage	Formation inadéquate
Assurez-vous de prendre en compte la conformité des obligations légales en matière de santé et sécurité.							

RAPPEL DE L'ÉVALUATION DU RISQUE

		Gravité				Probabilité <i>(Évaluer la probabilité que le risque identifié se manifeste en fonction des mesures d'atténuation mises en place)</i>	Gravité <i>(Évaluer la gravité du risque identifié et l'insérer dans la grille)</i>
Probabilité	1	2	3	4			
	5	5	10	15	20	5 – hautement probable : Événement accidentel imminent en raison de la nature même du risque ou en l'absence de mesures de prévention (presque toujours).	4 – Très grave : Lésion professionnelle avec perte de temps et limitation fonctionnelle permanente ou décès.
	4	4	8	12	16	4 – Très Probable : Événement accidentel qui peut survenir à l'occasion en raison des défaillances prévisibles des mesures de prévention (souvent).	3 – Grave : Lésion professionnelle avec perte de temps et limitation fonctionnelle temporaire.
	3	3	6	9	12	3 – Probable : Événement accidentel devrait survenir, car les mesures de sécurité ne sont pas toujours appliquées ou elles sont contournées (quelquefois).	2 – Modéré : Lésion professionnelle sans perte de temps, mais nécessite un traitement ou une consultation.
	2	2	4	6	8	2 – Peu probable : Événement accidentel pourrait survenir dans certaines circonstances (parfois).	1 – Mineur : Lésion professionnelle sans perte de temps et sans traitement ou consultation.
	1	1	2	3	4	1 – Improbable : Événement accidentel pourrait survenir dans des circonstances exceptionnelles (rarement).	

ANALYSE DES RISQUES

PARTIE 2

Éléments analysés	Risques	Mesures correctives et moyens de contrôle (en place)	Probabilité	Gravité	Niveau de risque	Mesures correctives et moyen de contrôle (à mettre en place)
Indiquer l'élément analysé qui expose une personne à risque	Pour chacun des éléments, indiquer les risques associés ou qui peuvent en découler					
Fuite de gaz : Sans ignition	Gaz	<ul style="list-style-type: none"> - Test de fuite avec de l'azote à chaque modification du système - Travail sous une hotte chimique ventilée - Application du protocole en cas de fuite - Limiteur de débit - Utilisation de composants de qualité (Swagelok) - Tenu d'un registre des manipulations 	2	1	2	Détecteur d'hydrogène qui ferme la valve principale en cas de fuite. Une intervention humaine doit être effectué pour la réouverture de la valve.
Fuite d'hydrogène : Ignition menant à la combustion	Matière inflammable, Brûlure,	<p>Mitigation des sources d'ignition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mise à terre du système de distribution - Composants électroniques appropriés (explosion-proof) et éloignés de l'installation lorsque possible - Purge du système à l'azote pour éviter le contact de l'hydrogène avec l'oxygène. <p>Application du protocole en cas de fuite (entre autres, ne pas tenter d'éteindre le feu si la fuite est toujours présente afin d'éviter l'accumulation d'hydrogène)</p>	1	3	3	<ul style="list-style-type: none"> - Présence d'extincteurs appropriés - Limiter la présence d'autres matériaux inflammables dans la pièce
Fuite d'hydrogène : Ignition menant à une explosion (déflagration ou détonation)	Incendie, explosion	<ul style="list-style-type: none"> - Mitigation des sources d'ignition - Application du protocole de sécurité - Port de lunettes de sécurité 	1	4	4	

ANALYSE DES RISQUES

PARTIE 2

Éléments analysés	Risques	Mesures correctives et moyens de contrôle (en place)	Probabilité	Gravité	Niveau de risque	Mesures correctives et moyen de contrôle (à mettre en place)
Indiquer l'élément analysé qui expose une personne à risque	Pour chacun des éléments, indiquer les risques associés ou qui peuvent en découler					
Projection d'un cylindre de gaz comprimé en cas de bris	Équipement sous-pression	<ul style="list-style-type: none"> - Cylindres solidement attachés au banc - Transport des cylindres suivant le protocole approprié 	1	3	3	
Surpression du système de gaz comprimé	Équipement sous-pression	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation de régulateurs appropriés - Limiteur de débit - Valves de surpressions - Utilisation de composants appropriés pouvant soutenir les pressions maximales limité par les valves de surpression 	1	1	1	
Circuit d'acquisition électrique	Électricité	<ul style="list-style-type: none"> - Mise à terre des composants métalliques exposés - Documentations du circuit électrique - Isolation appropriée des éléments sous-tension - Utilisation de fusibles approprié - Témoin lumineux pour indiquer lorsque le système est sous tension. 	1	4	4	

Bibliographie

- [1] Y. WANG, C.-Y. WANG et K. CHEN, « Elucidating differences between carbon paper and carbon cloth in polymer electrolyte fuel cells, » *Electrochimica Acta*, t. 52, n° 12, p. 3965-3975, 2007, ISSN : 0013-4686. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.11.012>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468606011960>.
- [2] O. OKUR, Ç. İYİGÜN KARADAĞ, F. G. BOYACI SAN, E. OKUMUŞ et G. BEHMENYAR, « Optimization of parameters for hot-pressing manufacture of membrane electrode assembly for PEM (polymer electrolyte membrane fuel cells) fuel cell, » *Energy*, t. 57, p. 574-580, 2013, ISSN : 0360-5442. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.001>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421300385X>.