

Sujet de thèse : FUELCELL

1. Titre ou intitulé de la thèse

Miniaturisation et spatialisation d'une pile à combustible régénérative pour les applications planétaires radicales et les scénarios de sobriété énergétique extrêmes.

2. Objet de la thèse (5 lignes maximum)

L'objectif de la thèse est d'étudier des solutions de rupture permettant **l'utilisation de piles à combustibles pour le stockage d'énergie** collectée dans l'environnement. Ces piles à combustibles régénératives doivent pouvoir résister à des environnements extrêmes : nuit lunaire -froid extrême-, ou Vénus (pression et températures extrêmes) mais aussi être miniaturisées pour obtenir des systèmes intégrés pesant moins de 10 kg.

3. Descriptif de la thèse (1 à 2 pages)

Les piles à combustible sont utilisées dans l'exploration spatiale depuis des décennies et elles continuent d'être une source d'énergie importante, en particulier pour les missions habitées.

De nos jours, les technologies de piles à combustible les plus largement utilisées pour les applications spatiales sont celles basées sur les membranes à échange de protons (PEM). Ces piles à combustible utilisent de l'hydrogène et de l'oxygène, qui sont stockés à bord du vaisseau spatial et combinés dans la pile à combustible pour produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. Les piles à combustible PEM sont préférées dans l'espace car elles sont très efficaces et légères. Cette utilisation date des années 1960, et la technologie n'a cessé d'être améliorée au fil des ans. Par exemple, la Station spatiale internationale (ISS) utilise actuellement des systèmes de pile à combustible PEM avancés qui fournissent de l'électricité et de l'eau à l'équipage. Ces piles à combustible sont très fiables et peuvent fonctionner pendant des années sans entretien. Dans ces systèmes, l'hydrogène et l'oxygène sont consommés pour fournir de l'eau et de l'énergie.

Dans un système régénératif, une pile à combustible et un électrolyseur sont combinés pour à la fois produire et consommer de l'hydrogène stocké, et éventuellement de l'oxygène. Si l'on connecte une source d'énergie externe (par exemple solaire dans le cas d'une application spatiale) à un électrolyseur, l'énergie est utilisée pour produire de l'hydrogène à partir de l'eau. L'hydrogène est ensuite stocké dans le système et consommé dans la pile à combustible pour produire de l'électricité lorsque la source renouvelable n'est pas disponible. Ce processus combiné est avantageux pour le stockage d'énergie loin des réseaux traditionnels, ou pour les applications autonomes.

Si les piles à combustibles sont aujourd'hui matures, y compris dans le spatial, un certain nombre d'applications sont en développement aujourd'hui pour la miniaturisation et l'augmentation de la robustesse de ces systèmes régénératifs. On peut par exemple noter les développements chez Clara Venture Labs, en collaboration avec notre partenaire Air Liquide sur cette thèse (voir figure 1)


Missions	Power needed for lunar night survival	Battery mass estimation	RFCS mass estimation
 Small rovers	10-100W	20-150kg	30-100kg
 Small landers	100-500W	150-850kg	100-450kg
 Lunar base	>20kW	>35 T	>14 T

Figure 1 : P.Barbier et al



Figure 2 : P. Barbier et al

Toutefois, les objets en développement sont loin d'être déployables facilement sur des atterrisseurs ou bien de façon portable.

Trois aspects doivent être considérés

- La portabilité de manière à avoir des équipements de masse et d'encombrement réduit
- La robustesse aux environnements spatiaux parfois extrêmes (mécanique, thermique, radiatifs)
- La diversité possible des sources d'énergie primaires (diffuses ou non)

S'il n'y a pas de verrou technologique à proprement parler pour des équipements de quelques dizaines de kilogrammes, tout reste à faire pour évaluer les possibilités de miniaturisation plus « radicales », ainsi que la tenue aux environnements extrêmes, depuis la nuit lunaire jusqu'à la chaleur de Venus (450°C) ou un tel système pourrait jouer le rôle aujourd'hui dévolu aux batteries dans les systèmes spatiaux actuels.

Enfin, à l'extrême, ce type d'équipement se place tout à fait dans la lignée du scénario de la Red Team « Basse énergie, après la nuit carbonique » ou des systèmes de collecte et de stockage des énergies diffuses sont mis en place de manière

Il est bien entendu que de nombreuses applications civiles ou militaires sont à terme envisageables, la collecte et la gestion décentralisée de l'énergie étant probablement l'un des challenges à venir de la deuxième moitié du XXI^e siècle lorsque les énergies fossiles deviendront de plus en plus rares.

4. Programme de la thèse (2 à 3 pages)

La question scientifique traitée va partir d'une étude scientifique « classique » sur la base d'une paramétrisation des différents éléments du système vers une spécification des sous systèmes, ainsi qu'une prospective un peu large sur la manière de collecter des énergies diffuses dans des environnements extrêmes afin de recharger le système.

La méthodologie que nous proposons est la suivante

- 1) Définition de différents cas d'utilisation « radicale » des piles à combustible régénératives
- 2) Étude bibliographique et confrontation à l'état de l'art chez les partenaires
- 3) Mise en place de différents modèles paramétrique permettant de comprendre les dépendances et d'identifier les verrous technologiques
- 4) Pour chacun des sous systèmes identifiés, mise en place d'une carte routière des technologies actuelles, possibles, faisables, de rupture et prospectives permettant de répondre au besoin
- 5) Maquettage si besoin de certaines technologies identifiées.

Conformément à l'esprit de l'appel à idée, nous nous permettrons des excursions larges vers des technologies non encore validées ou balbutiantes afin de balayer un certain nombre de ruptures envisageables à terme.

5. Références (5 références principales, par exemple)

L'expérience du laboratoire est limitée dans les domaines des piles à combustibles spatiales, hormis leur utilisation à bord de drones. Elle s'étend principalement sur la spatialisation des charges utiles et la réalisation des missions lunaires et martiennes. Quelques références cependant :

Gavrilovic, Nikola, Jean-Marc Moschetta, and Quentin Barascud. "Development of a Hydrogen-powered UAV System for Crossing the Atlantic Ocean." *AIAA SCITECH 2023 Forum*. 2023.

Mimoun, David, et al. "ARPS: an Advanced Radio Isotope Power Subsystem for ExoMars Geophysical Package (GEP)." *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 2005. 2005.

Mimoun, David, et al. "Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the moon." *Experimental Astronomy* 33 (2012): 529-585.

6. Originalité du projet (10 lignes maximum)

L'objet technologique sur lequel nous travaillons est décalé car il propose une excursion aux bornes de la faisabilité des technologies considérées. Il est étonnant et singulier car les spécifications d'environnement dépassent de fort loin les limites habituelles. Finalement, un tel système s'il atteint les bornes permettra certainement des réactions d'étonnement et de surprise ...

Contact : david.mimoun@isae-superaero.fr (Avant le 1^{er} juin 2023)