

La membrane des électrolyseurs PEM, talon d'Achille pour la formation de dihydrogène vert.

Voulant devenir pilote de ligne, j'ai à cœur de comprendre les enjeux écologiques et les solutions apportées afin de rendre le secteur aéronautique plus durable. C'est pourquoi j'ai décidé de me concentrer sur les problèmes rencontrés par un des moyens de production de l'hydrogène vert.

Les électrolyseurs PEM (Membrane Échangeuse de Protons) sont utilisés lors de la transformation de l'eau en dihydrogène. La transition écologique devenant une nécessité vitale pour le secteur aéronautique, le vecteur hydrogène semble incontournable. Néanmoins, au fur et à mesure des utilisations, ces électrolyseurs se dégradent, devenant ainsi moins performants.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- CHIMIE (*Chimie Théorique - Générale*)
- CHIMIE (*Chimie Inorganique*)
- PHYSIQUE (*Physique de la Matière*)

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français)	Mots-clés (en anglais)
<i>Electrolyse</i>	<i>Electrolysis</i>
<i>Membrane Échangeuse de Protons</i>	<i>Proton exchange membrane</i>
<i>Pile à combustion</i>	<i>Fuel cell</i>
<i>Surtension</i>	<i>Overvoltage</i>
<i>Hydrogène</i>	<i>Hydrogen</i>

Bibliographie commentée

Dans les années 1950 les piles à combustible à base de dihydrogène et de dioxygène font leur apparition, notamment pour la conquête spatiale. Ainsi, les études sur le dihydrogène, nommé de façon abusive hydrogène, comme vecteur énergétique propre, reprennent en 1970 lors d'une prise de conscience environnementale associée aux chocs pétroliers. Étant déjà utilisé dans les piles, et ne produisant que de l'eau et de la chaleur, il apparaît comme l'alternative durable au pétrole, pour un avenir plus vert notamment dans les transports [1]. En 2015 les Accords de Paris sur le Climat sont signés. 193 pays s'engagent à contenir l'augmentation de la température mondiale à +1.5°C par rapport à l'ère préindustrielle. En vue de parvenir à ces

objectifs, chaque secteur doit se réinventer de manière plus écologique [2]. En effet, au niveau national, les transports représentent 30% des émissions de gaz à effet de serre (GES) en 2021, marquant une hausse de 1,9% par rapport à 2019, alors que les autres secteurs adoptent des pratiques plus respectueuses de l'environnement [3].

Une des solutions envisagées est donc l'hydrogène : vecteur énergétique, n'existant pas sur Terre à l'état naturel. Il est associé à plusieurs couleurs en fonction de son mode de production. Si ce dernier limite l'émission de GES, l'hydrogène sera dit vert. De ce fait, l'électrolyse de l'eau semble être un bon moyen écologique de production, à condition que l'électricité utile à son fonctionnement provienne d'énergies renouvelables [4].

Ainsi, vers les années 2010, l'électrolyse de l'eau fit l'objet de plus en plus d'études au vu de l'augmentation de la demande en énergies renouvelables [1]. Cependant, ce moyen de production présente plusieurs faiblesses : il coûte cher (5 à 10 euros en moyenne par kilogramme d'hydrogène), son rendement est faible et enfin il ne peut être considéré comme décarboné que si l'électricité utilisée provient de ressources renouvelables. Néanmoins, ce qui joue en sa faveur est le fait que l'électrolyse de l'eau permet par là même de stocker l'énergie renouvelable. En effet, les électrolyseurs peuvent fonctionner avec le surplus électrique des centrales et restituer l'énergie accumulée lors des périodes de faible production. L'hydrogène est donc bien un "vecteur énergétique", et non une source d'énergie [1].

Il existe plusieurs technologies d'électrolyseurs. Le point commun est que chaque cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes : l'anode (reliée au pôle positif du générateur) et la cathode (reliée au pôle négatif du générateur). Elles sont séparées par un milieu conducteur ohmique (électrolyte) et reliées par un générateur extérieur [5]. Ce qui les différencie est le type de structure des cellules et l'électrolyte. Les principaux électrolyseurs pour la production d'hydrogène à partir d'eau sont les électrolyseurs alcalins, à membrane échangeuse de protons (PEM) et à oxyde solide [5].

Chaque type d'électrolyseur a ses atouts et ses faiblesses. Les électrolyseurs alcalins coûtent moins cher grâce à l'utilisation de catalyseurs non rares et cette technologie est déjà industrialisée. Cependant, l'électrolyte crée une chute ohmique imposant une faible densité de courant au système. Les électrolyseurs à oxydes solides, eux, ont un coût en énergie plus faible, et les catalyseurs utilisés ne sont pas nobles. Néanmoins, l'élément séparateur utilisé est une céramique fragile. Cette dernière fonctionne correctement s'il y a un apport de chaleur important.

Quant à eux, les électrolyseurs PEM supportent une densité de courant élevée et produisent des gaz purs. Toutefois, ils utilisent des catalyseurs nobles et l'électrolyte est composée d'une membrane coûteuse [4].

Ces membranes, constituées d'électrolyte, sont justement amenées à se dégrader, ce qui est un problème au vu de leur prix. En effet, le polymère synthétique le plus utilisé comme base électrolytique pour l'échange de protons est le Nafion (800€/m²), produit par la société

Chemours [4]. Or à cause d'une décomposition chimique et thermique intérieure du polymère, les membranes peuvent se dégrader [6]. Cette étude de la dégradation de la membrane sera donc au cœur de ce TIPE.

Problématique retenue

Dans quelle mesure les électrolyseurs PEM sont-ils amenés à se dégrader, quelles en sont les conséquences et comment y remédier ?

Objectifs du TIPE du candidat

- 1) Modéliser un électrolyseur en régime statique.
- 2) Obtenir une courbe de polarisation et repérer les différentes surtensions.
- 3) Observer l'impact de la dégradation de la membrane sur les courbes de polarisation et les courbes de rendement.
- 4) Conclure quant aux conséquences associées et aux moyens d'y remédier.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] ÉLISE MULLER : Pleins gaz sur l'hydrogène: trajectoire sociotechnique du déploiement territorial de l'hydrogène en France entre 2010 et 2020. : <https://pastel.hal.science/tel-04146867v1>
- [2] VIE PUBLIQUE (SITE RÉPUBLIQUE FRANÇAISE) : Chronologie du changement climatique d'origine humaine. : https://www.vie-publique.fr/eclairage/290911-chronologie-du-changement-climatique-dorigine-humaine#_989-2006--le-r%C3%A9chauffement-climatique-doit-%C3%AAtre-contenu--les-vell%C3%A9it%C3%A9s
- [3] MINISTÈRE TERRITOIRES, ECOLOGIE, LOGEMENT : Chiffres clés des transports - Edition 2023 : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-des-transports-edition-2023>
- [4] CAROLINE ROZAIN : Développement de nouveaux matériaux d'électrodes pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. : <https://theses.hal.science/tel-00923169v1>
- [5] BENOÎT GUENOT : Étude de matériaux catalytiques pour la conversion électrochimique de l'énergie. : <https://hal.umontpellier.fr/tel-01684435v1>
- [6] LUDIVINE FRANCK-LACAZE, CAROLINE BONNET, FRANÇOIS LAPICQUE : Les membranes pour piles à combustible PEMFC. : <https://hal.science/hal-03202217v1>

DOT

- [1] : 09/2024 : entrée en école d'ingénieur à l'EOST puis abandon et retour en 2ème année de CPGE début novembre pour atteindre mon objectif initial.
- [2] : 16/10/2024 : Envoi de mails à : Jean-Philippe Héraud, Stéphane Henriot, Richard Tilagone et à Yannick Peysson qui travaillent à l'IFPEN.
- [3] : 30/10/2024 : réunion avec Bruno Auvity, directeur du département de thermique-énergétique de Polytech Nantes.
- [4] : 27/11/2024 : rencontre avec Haniyeh Marefat, thésarde à l'IREENA.
- [5] : 01/2025 : rédaction du MCOT.
- [6] : 09/01/2025 : rendez-vous avec Jean-Christophe Olivier, enseignant-chercheur à l'IUT de Saint-nazaire et visite de l'entreprise Xsun à Guérande.
- [7] : 06/02/2025 : première partie d'expériences sur les électrolyseurs à l'IUT de Saint-nazaire.
- [8] : 07/03/2025 : deuxième et dernière partie d'expériences sur les électrolyseurs à l'IUT de Saint-nazaire.