

Titre de la thèse : « Développement d'une stratégie de contrôle prédictif basée sur l'état hygrométrique pour le pilotage dynamique d'un électrolyseur AEM couplé aux énergies renouvelables. »

Laboratoire d'accueil : FEMTO-ST, département Energie, équipe SHARPAC ou THERMIE

Spécialité du doctorat préparé : Automatique, Système Energétique

Mots-clés : Électrolyse AEM haute pression - Gestion de l'hygrométrie - Contrôle Prédictif Intermittence des ENR - Durabilité et Mécanismes de dégradation

Descriptif détaillé de la thèse

Contexte et état de l'art :

L'hydrogène vert, produit par électrolyse de l'eau, est le vecteur clé de la décarbonation industrielle. Parmi les technologies disponibles, l'électrolyse à membrane échangeuse d'anions (AEM) émerge comme une alternative de rupture, combinant l'absence de métaux nobles (contrairement au PEM) et une forte dynamique de réponse. Cependant, l'intégration de l'AEM dans des micro-réseaux alimentés par des énergies renouvelables intermittentes impose des variations de charge brutales. La littérature récente souligne que la gestion de l'eau est le paramètre le plus critique : la membrane doit rester saturée pour assurer la conductivité ionique, tandis que les couches catalytiques doivent éviter le "noyage" pour ne pas bloquer le transport de masse. Sous haute pression, ces phénomènes sont exacerbés par les changements d'équilibre thermodynamique et les risques de *cross-over* gazeux accrus.

Verrous identifiés :

Le passage de l'échelle laboratoire à l'échelle système haute pression se heurte à trois verrous technologiques majeurs :

- Le verrou de l'hydratation dynamique : Comment maintenir un état hygrométrique optimal lors des variations rapides de courant induites par le solaire ou l'éolien ?
- Le verrou de la pression : La compression interne des gaz modifie le point de rosée et la solubilité de l'eau, rendant les capteurs classiques moins précis et la réponse du système non-linéaire.
- Le verrou de la durabilité : Les cycles d'hydratation/déshydratation provoquent des contraintes mécaniques (gonflement/retrait) qui mènent à la délamination des électrodes. Il faut essayer de définir les limites de la vitesse de variation acceptables par le système pour préserver la durée de vie.

Travaux envisagés :

La thèse s'articulera autour du développement d'une architecture de Contrôle Prédictif :

- Modélisation Multiphasique : Développement d'un modèle mathématique (0D/1D) intégrant les transferts de masse (eau/gaz), la thermique et l'électrochimie de la cellule AEM.
- Conception de la stratégie MPC : Implémentation d'un algorithme capable d'anticiper les variations de l'état hygrométrique en fonction des prévisions de production des énergies renouvelables et de la consigne de pression.
- Optimisation multicritère : Recherche du meilleur compromis entre rendement énergétique (faible surtension) et maximisation de la durée de vie (stabilité hydrique).

Calendrier prévisionnel :

- Année 1 : Étude bibliographique approfondie, prise en main des outils de simulation et développement du modèle multiphasique de la cellule AEM sous haute pression.
- Année 2 : Conception et codage de la loi de contrôle prédictif (MPC). Tests de robustesse en environnement de simulation face à des profils réels d'éolien ou solaire.
- Année 3 : Validation des résultats, rédaction de la thèse et publications scientifiques. Analyse de la sensibilité du modèle aux paramètres de dégradation à long terme.

Collaborations éventuellement prévues :

- Au niveau de l'équipe SHARPAC, deux thèses CIFRE UTBM/GEN-HY vont démarrer à la prochaine rentrée. Un cadre de travail collaboratif ouvert et une mutualisation des outils et modèles de simulation est de nature à stimuler les échanges autour de cette technologie d'électrolyseur en développant un banc d'essai localement à échelle réduite, 1kW par exemple.
- A l'internationale, l'UMLP et l'UIR ont signé une convention de collaboration en recherche sur les activités hydrogène. Une thèse a démarré à Rabat en octobre sous la direction de Nadia Steiner et suivi au niveau de l'encadrement par Youcef Ait-Amirat. A défaut, d'une thèse en cotutelle, dont la recherche d'un financement est toujours en cours, il s'agit de démarrer une thèse cotée UMLP sur le sujet. L'UIR a lancé l'installation d'un démonstrateur (maison témoin) pour la production, le stockage et l'utilisation de l'hydrogène vert à base d'un mix énergétique propre. Le système dispose d'un électrolyseur membrane échangeuse anionique de 5kW ; d'une pile à combustible hybridée à 5kW ; d'un système solaire PV de 10kWc. Un projet TOUBKAL pour un soutien financier à la mobilité des chercheurs durant 3 ans a été déposé. Le doctorant et les encadrants pourront bénéficier de cette aide en cas de son obtention.

Validation expérimentale prévue :

La validation de la stratégie de contrôle s'effectuera selon deux axes :

- Validation par comparaison bibliographique : Confrontation des trajectoires d'hydratation prédites avec les données expérimentales issues de la littérature récente concernant le vieillissement accéléré.
- Validation sur banc d'essai (sous réserve de financement) : Si les moyens le permettent, l'algorithme sera implanté sur un automate de pilotage pour commander un électrolyseur AEM réel. Les performances (pureté du gaz, stabilité du potentiel) seront mesurées sous différentes rampes de puissance et pressions de service pour valider l'efficacité du contrôle en temps réel.
- Validation sur le démonstrateur de l'UIR par le doctorant si le soutien financier à la mobilité est obtenu ou à défaut par nos collaborateurs à l'UIR.

Références bibliographiques :

- [1] Ito, H., et al. (2026). "Pressurized operation of anion exchange membrane water electrolysis: Impact on gas crossover and thermal balance." *Journal of Applied Electrochemistry*.
- [2] Mishra, S., et al. (2026). "Performance and Durability of Pure-Water-Fed Anion Exchange Membrane Electrolyzers Using Baseline Materials and Operation." *ACS Energy Letters / ResearchGate*.
- [3] Xu, F., et al. (2025). "Deconvoluting Degradation Mechanisms in Anion Exchange Membrane Water Electrolysis using Operando X-ray Microtomography." *Nature Communications (Preprint/ChemRxiv)*.
- [4] Kim, H., et al. (2023). "Stabilizing the Catalyst Layer for Durable and High-Performance Alkaline Membrane Fuel Cells and Water Electrolyzers." *ACS Central Science*.
- [5] Gen-Hy (2025). "Rapport technique sur la perméabilité et la performance de la membrane Gen-AEM® sous pression." *Publication France Hydrogène / Rapport de filière*.
- [6] Zheng Zhu et al, PV/Hydrogen DC microgrid control using distributed economic model predictive control, *Renewable Energy*, 222, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119871>.
- [7] C. Celebi, C. O. Colpan, and Y. Devrim, 'Performance assessment of anion exchange electrolyzer with PBI-BASED membrane through 0-D modeling', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 143, pp. 1295–1306, July 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.422.
- [8] H. Cheng et al, Hydrogen production efficiency enhancement for alkaline water electrolyzers operating at varying temperature via an adaptive multi-mode control", *International Journal of Hydrogen Energy*, 93, 430-440, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene>.
- [9] M. Hammoudi, C. Henao, K. Agbossou, Y. Dubé, and M. L. Doumbia, 'New multi-physics approach for modelling and design of alkaline electrolyzers', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 37, no. 19, pp. 13895–13913, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.015.
- [10] M. Gunuru and M. Paravada, 'Mathematical modeling of an AEMWE: Investigating optimum operating conditions of an alkaline-fed AEM electrolyzer', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 157, p. 150320, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.150320.
- [11] S. Ding *et al.*, 'Analysis of the effect of characteristic parameters and operating conditions on exergy efficiency of alkaline water electrolyzer', *J. Power Sources*, vol. 537, p. 231532, July 2022, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.231532.
- [12] I. Vincent and D. Bessarabov, 'Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 1690–1704, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.258.

Profil recherché

Le candidat ou la candidate devra être titulaire d'un Master (ou équivalent pour un stage) en automatique, génie électrique, énergétique, électrochimie ou discipline connexe. Avoir une formation solide en modélisation des systèmes dynamiques, simulation numérique et systèmes énergétiques. Un intérêt marqué pour les technologies de l'hydrogène et l'intégration des énergies renouvelables. Une sensibilité aux approches multiphysiques et aux problématiques de commande des systèmes complexes.

Critères de sélection préférntiels

Expérience préalable en programmation scientifique et en outils de simulation (par exemple MATLAB/Simulink, Python ou équivalents).
Connaissances en commande avancée, notamment en commande prédictive (MPC), en optimisation ou en modélisation des systèmes énergétiques représenteront un avantage. Une première expérience en recherche, projet académique ou stage dans le domaine de l'hydrogène, de l'électrolyse ou des systèmes énergétiques sera également valorisée. Capacité à travailler dans un environnement interdisciplinaire et à communiquer efficacement en anglais scientifique.

Qualités personnelles :

Rigueur scientifique – Autonomie - Capacité d'analyse face à des problématiques complexes.
Esprit d'initiative - Motivation pour la recherche - Intérêt pour les enjeux de la transition énergétique.
Capacité à travailler en équipe
Capacité à s'adapter à un environnement de recherche évolutif
Engagement durable dans la réalisation des objectifs scientifiques du projet

Financement : MESRI Etablissement

Dossier à envoyer pour le **18 mai 2026**
Début du contrat : 1^{er} Octobre 2026
Salaire mensuel brut : 2300€

Direction de la thèse:/ Thesis Supervisor

- Youcef AIT-AMIRAT, directeur de thèse, youcef.ait-amirat@umlp.fr

Encadrement de la thèse : co-directeur(s) et co-encadrant(s)

- Yacine AIT OUMEZIANE, co-encadrant, yacine.ait_oumeziane@umlp.fr
- Halima IKAOUASSEN, co-encadrante, halima.ikaouassen@umlp.fr

Les candidats sont invités à soumettre leur candidature aux encadrants de la thèse.

Le dossier de candidature doit contenir les documents suivants :

CV - Lettre de Motivation - Relevés de notes du Master ou équivalent – Résumé du travail de stage ou du projet de fin d'études - Au moins une lettre de recommandation.

Thesis title: « Development of a Predictive Control Strategy Based on Hygrometric State for the Dynamic Operation of an AEM Electrolyzer Coupled with Renewable Energy Sources. »

Host Laboratory: FEMTO-ST, département Energie, équipe SHARPAC ou THERMIE

Doctoral field: Control Engineering, Energy Systems

Keywords: High-pressure AEM electrolysis – Water management – Model Predictive Control – Renewable energy intermittency – Durability and degradation mechanisms.

Detailed description of the PhD project

Context and state of the art:

Green hydrogen, produced by water electrolysis, is a key vector for industrial decarbonization. Among the available technologies, anion exchange membrane (AEM) electrolysis is emerging as a disruptive alternative, combining the absence of noble metals (unlike PEM technology) with high dynamic response capability. However, the integration of AEM electrolyzers into microgrids supplied by intermittent renewable energy sources imposes sudden load variations. Recent literature highlights that water management is the most critical parameter: the membrane must remain saturated to ensure ionic conductivity, while catalytic layers must avoid flooding in order to maintain effective mass transport. Under high-pressure operation, these phenomena are intensified by thermodynamic equilibrium shifts and increased risks of gas crossover.

Identified technological challenges:

The transition from laboratory-scale systems to high-pressure system-scale deployment faces three major technological barriers:

- Dynamic hydration challenge: How can an optimal hygrometric state be maintained during rapid current variations induced by solar or wind power?
- Pressure challenge: Internal gas compression modifies the dew point and water solubility, making conventional sensors less accurate and system response strongly nonlinear.
- Durability challenge: Hydration and dehydration cycles generate mechanical stresses (swelling and shrinkage) that may lead to electrode delamination. Defining acceptable rate-of-change limits is essential to preserve system lifetime.

Proposed research work:

The PhD project will focus on the development of a Model Predictive Control (MPC) architecture:

- Multiphysics modeling: Development of a mathematical model (0D/1D) integrating mass transfer (water/gas), thermal phenomena, and electrochemical behavior of the AEM cell.
- MPC strategy design: Implementation of an algorithm capable of anticipating variations in the hygrometric state based on renewable energy production forecasts and pressure setpoints.
- Multi-objective optimization: Identification of the optimal trade-off between energy efficiency (low overvoltage) and lifetime maximization (hydric stability).

Provisional timeline:

Year 1: Comprehensive literature review, familiarization with simulation tools, and development of the multiphysics model of the high-pressure AEM cell.

Year 2: Design and implementation of the predictive control law (MPC). Robustness testing in simulation environments using realistic wind and solar power profiles.

Year 3: Validation of results, thesis writing, and scientific publications. Sensitivity analysis of the model with respect to long-term degradation parameters.

Planned Collaborations:

- At the SHARPAC research team level, two CIFRE PhD projects in collaboration with UTBM and GEN-HY will start in the upcoming academic year. An open collaborative working environment and the sharing of tools and simulation models are expected to foster scientific exchanges around this electrolyzer technology, notably through the development of a locally implemented small-scale test bench (e.g., 1 kW).
- At the international level, UMLP and UIR have signed a research collaboration agreement on hydrogen-related activities. A PhD project started in Rabat in October under the supervision of Nadia Steiner, with academic follow-up provided by Youcef Ait-Amirat. In the absence of a co-supervised (cotutelle) PhD, for which funding is still being sought, the objective is to initiate a PhD project formally registered at UMLP on this topic. UIR has launched the installation of a demonstration system (pilot house) dedicated to the production, storage, and use of green hydrogen based on a clean energy mix. The system includes a 5kW anion exchange membrane electrolyzer, a 5kW hybrid fuel cell, and a 10kWp photovoltaic (PV) system. A TOUBKAL project providing financial support for researcher mobility over a three-year period has been submitted. The PhD candidate and supervisors will benefit from this support if the funding is awarded.

Planned experimental validation:

The validation of the control strategy will be carried out along three complementary axes:

- Validation through literature-based comparison: The predicted hydration trajectories will be compared with experimental data reported in recent literature related to accelerated aging phenomena.
- Validation on a test bench (subject to funding availability): If resources allow, the control algorithm will be implemented on an industrial controller to operate a real AEM electrolyzer. System performance indicators (gas purity and potential stability) will be evaluated under different power ramp rates and operating pressures in order to assess the effectiveness of the real-time control strategy.
- Validation on the UIR demonstration platform: The validation will be conducted by the PhD candidate if mobility funding is obtained; otherwise, it will be carried out by collaborators at UIR.

Bibliographical references

- [1] Ito, H., et al. (2026). "Pressurized operation of anion exchange membrane water electrolysis: Impact on gas crossover and thermal balance." *Journal of Applied Electrochemistry*.
- [2] Mishra, S., et al. (2026). "Performance and Durability of Pure-Water-Fed Anion Exchange Membrane Electrolyzers Using Baseline Materials and Operation." *ACS Energy Letters / ResearchGate*.
- [3] Xu, F., et al. (2025). "Deconvoluting Degradation Mechanisms in Anion Exchange Membrane Water Electrolysis using Operando X-ray Microtomography." *Nature Communications (Preprint/ChemRxiv)*.
- [4] Kim, H., et al. (2023). "Stabilizing the Catalyst Layer for Durable and High-Performance Alkaline Membrane Fuel Cells and Water Electrolyzers." *ACS Central Science*.
- [5] Gen-Hy (2025). "Rapport technique sur la perméabilité et la performance de la membrane Gen-AEM® sous pression." *Publication France Hydrogène / Rapport de filière*.
- [6] Zheng Zhu et al, PV/Hydrogen DC microgrid control using distributed economic model predictive control, *Renewable Energy*, 222, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119871>.
- [7] C. Celebi, C. O. Colpan, and Y. Devrim, 'Performance assessment of anion exchange electrolyzer with PBI-BASED membrane through 0-D modeling', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 143, pp. 1295–1306, July 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.422.
- [8] H. Cheng et al, Hydrogen production efficiency enhancement for alkaline water electrolyzers operating at varying temperature via an adaptive multi-mode control", *International Journal of Hydrogen Energy*, 93, 430-440, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene>.
- [9] M. Hammoudi, C. Henao, K. Agbossou, Y. Dubé, and M. L. Doumbia, 'New multi-physics approach for modelling and design of alkaline electrolyzers', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 37, no. 19, pp. 13895–13913, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.015.
- [10] M. Gunuru and M. Paravada, 'Mathematical modeling of an AEMWE: Investigating optimum operating conditions of an alkaline-fed AEM electrolyzer', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 157, p. 150320, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.150320.
- [11] S. Ding *et al.*, 'Analysis of the effect of characteristic parameters and operating conditions on exergy efficiency of alkaline water electrolyzer', *J. Power Sources*, vol. 537, p. 231532, July 2022, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.231532.
- [12] I. Vincent and D. Bessarabov, 'Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 1690–1704, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.258.

Candidate Profile

The candidate must hold a Master's degree in control engineering, electrical engineering, energy systems, electrochemistry, or a related discipline. A strong background in dynamic systems modeling, numerical simulation, and energy systems is required, along with a strong interest in hydrogen technologies and renewable energy integration.

Preferred selection criteria:

Previous experience in scientific programming and simulation tools (e.g., MATLAB/Simulink, Python, or equivalent).
Knowledge of advanced control methods, particularly Model Predictive Control (MPC), optimization techniques, or energy system modeling will be considered an advantage.

Personal characteristics:

Scientific rigor – Autonomy – Strong analytical skills in addressing complex problems.
Initiative and motivation for research – Interest in energy transition challenges.
Ability to work effectively within a multidisciplinary team.
Adaptability to an evolving research environment.
Long-term commitment to achieving scientific objectives.

Funding: MESRI (French Ministry of Higher Education and Research)

Application deadline: May 18, 2026.
Contract start date: October 1, 2026.
Gross monthly salary: €2300.

Thesis Supervisor

- Youcef AIT-AMIRAT, directeur de thèse, youcef.ait-amirat@umlp.fr

Co-supervision:

- Yacine AIT OUMEZIANE, co-encadrant, yacine.ait_oumeziane@umlp.fr
- Halima IKAOUASSEN, co-encadrante, halima.ikaouassen@umlp.fr

Applicants are invited to submit their application to the PhD supervisors.

The application file must include the following documents:

- Curriculum Vitae (CV) - Cover letter - Master's transcripts or equivalent - Summary of internship or final-year project work - At least one letter of recommendation