

Évaluation multicritère des technologies de piles à combustible pour une intégration dans le bâtiment

Ayat-Allah Bouramdane*

@ 52956

Mots-clés : technologies, évaluation multi-critères, intégration dans le bâtiment, piles à combustible, transition énergétique

Cette étude évalue cinq types de piles à combustible selon des critères tels que l'efficacité énergétique, la compatibilité avec l'infrastructure, la durabilité, le coût et la sécurité, pour alimenter des systèmes énergétiques comme l'électricité, le chauffage, la climatisation et les bornes de recharge dans les bâtiments. La pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) obtient le meilleur score de performance, tandis que les piles à combustible à oxyde solide (SOFC), à carbonate fondu (MCFC), directe au méthanol (DMFC) et alcaline (AFC) affichent des performances inférieures. Cette évaluation aide les décideurs à sélectionner des solutions optimales, réduisant ainsi les coûts et les émissions.

Introduction

Les bâtiments, essentiels pour les activités quotidiennes, dépendent fortement des combustibles fossiles, contribuant significativement aux émissions de gaz à effet de serre (GES). En 2021, les émissions directes des bâtiments dues à la combustion de carburant pour la cuisson et le chauffage représentaient environ 6 % des émissions mondiales de GES. En ajoutant les émissions indirectes issues de la production d'électricité et de chaleur utilisées dans les bâtiments, les émissions totales atteignent environ 9 GtCO₂. La construction et l'ameublement des bâtiments génèrent également des émissions grises [WRI, 2023].

Depuis 1990, les émissions des bâtiments ont augmenté en raison de la consommation d'électricité et de l'expansion de la superficie. Les changements pendant la pandémie de Covid-19, tels que le télétravail et la baisse de la fréquentation des

hôtels et restaurants, ont temporairement réduit les émissions, mais celles-ci ont rebondi aux niveaux pré-pandémie. En 2022, les émissions ont fortement augmenté en Asie et en Amérique du Nord, en partie à cause des températures élevées et de la dépendance au gaz et au charbon. En Europe, les émissions ont diminué grâce à un hiver doux et à la réponse aux perturbations de l'approvisionnement en combustibles fossiles causées par l'invasion de l'Ukraine par la Russie [WRI, 2023].

Pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris et limiter la hausse de la température mondiale à 1,5 °C, il est crucial de réduire les émissions des bâtiments. Cela nécessitera quatre changements interreliés : améliorer l'efficacité énergétique, décarboner l'énergie, rénover les bâtiments existants et construire des bâtiments zéro carbone. Le concept de suffisance du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC; en anglais, Intergovernmental Panel on

* Université Internationale de Rabat.

Climate Change ou IPCC) implique de réduire la demande en optimisant l'utilisation de l'espace, en réaffectant les bâtiments vides et en rendant les bâtiments multifonctionnels. Les objectifs incluent : (1) réduire l'intensité énergétique des bâtiments à 85-120 kWh/m² d'ici 2030 et à 55-80 kWh/m² d'ici 2050; (2) abaisser l'intensité carbone à 13-16 kgCO₂/m² d'ici 2030 et à 0-2 kgCO₂/m² d'ici 2050; (3) atteindre un taux de rénovation annuel de 2,5-3,5 % d'ici 2030 et 3,5 % d'ici 2040, avec des bâtiments bien isolés et zéro carbone d'ici 2050; (4) assurer que tous les nouveaux bâtiments soient zéro carbone d'ici 2030 et maintenir cet objectif jusqu'en 2050 [WRI, 2023].

Les piles à hydrogène jouent un rôle clé dans cette transition. Elles convertissent l'hydrogène (produit par exemple par les énergies renouvelables [Bouramdane, 2024] ou autres sources [Bouramdane, 2023a]) en électricité, chaleur et eau, sans émissions polluantes, sauf de la vapeur d'eau. En utilisant des piles à hydrogène pour le chauffage, le refroidissement ou la production d'électricité, les bâtiments peuvent réduire considérablement leurs émissions de CO₂, contribuant ainsi à l'atteinte des objectifs de décarbonation. En outre, les piles à hydrogène permettent la production d'énergie directement sur le site du bâtiment. Cela réduit la dépendance aux réseaux électriques traditionnels, diminue les pertes d'énergie liées au transport et améliore la résilience énergétique, notamment en cas de panne de réseau. De plus, les piles à hydrogène peuvent fonctionner en combinaison avec d'autres sources d'énergie renouvelables, comme l'énergie solaire ou éolienne [Bouramdane, 2021], en stockant l'excédent d'énergie produite lorsque la demande est faible. Cette énergie stockée peut être utilisée lorsque la production d'énergie renouvelable est insuffisante, assurant une alimentation énergétique stable et continue [Baharuddin et al., 2021; Sánchez et al., 2022].

Cependant, le choix de la technologie la plus appropriée dépend de nombreux facteurs, comme l'efficacité énergétique, la compatibilité avec l'infrastructure, le coût et la durabilité. Les décideurs politiques, les urbanistes et les concepteurs de bâtiments doivent analyser ces aspects

pour intégrer efficacement ces technologies dans les projets de construction.

Bien que plusieurs études aient évalué les technologies de piles à hydrogène dans divers contextes (pour l'alimentation durable des navires [Wang et al., 2023], pour les systèmes de propulsion électrifiés dans l'aviation commerciale [Kazula et al., 2022], pour les applications de services publics électriques [Minkov et al., 1989], pour les applications domestiques [Nomnqa et al., 2019], etc.), il existe encore des lacunes dans la littérature en ce qui concerne leur évaluation spécifique pour une utilisation dans les bâtiments. Les études existantes manquent souvent de détails sur les critères d'évaluation pertinents pour cette application spécifique et ne fournissent pas de comparaison systématique entre les différentes technologies.

Dans ce contexte, cette étude vise à répondre aux questions de recherche suivantes : quels sont les critères prédominants dans l'évaluation des diverses technologies de piles à combustible adaptées à une utilisation dans le bâtiment? Comment les différentes technologies de piles à combustible se comparent-elles en termes d'efficacité énergétique, de coût, de fiabilité et d'autres critères pertinents? Quelle technologie de pile à combustible est la plus adaptée pour une intégration efficace dans les bâtiments?

Cette étude se distingue par son examen approfondi des différentes technologies de piles à combustible dans le contexte spécifique du bâtiment. En utilisant l'approche « aide à la décision multicritère – processus d'analyse hiérarchique » (MCDM-AHP : *Multi-Criteria Decision Making – Analytic Hierarchy Process*, en anglais) [Taherdoost et Madanchian, 2023; Saaty, 1990], elle offre une méthodologie rigoureuse pour évaluer et comparer ces technologies selon une gamme de critères pertinents. Les résultats de cette recherche sont susceptibles d'avoir des implications pratiques significatives pour les concepteurs de bâtiments, les décideurs politiques et les professionnels de l'énergie.

Évaluation multicritère des technologies de piles à combustible pour une intégration dans le bâtiment

Après cette introduction, la section suivante présente la méthodologie adoptée pour évaluer les différentes technologies de piles à combustible dans le contexte du bâtiment (section 1), en utilisant l'approche MCDM-AHP. Cette section détaille les technologies de piles à combustible considérées, les critères pris en compte dans l'évaluation, ainsi que la méthode d'élaboration et de prise de décision. La section 2 présente ensuite les résultats obtenus à partir de l'évaluation, en mettant en évidence les poids relatifs attribués à chaque critère et en comparant les performances des différentes technologies de piles à combustible. Enfin, la section 3 synthétise les résultats de l'étude et développe les implications pratiques des conclusions tirées. Cette section met en évidence les principales contributions de la recherche, identifie les limitations éventuelles et suggère des pistes pour des recherches futures dans ce domaine crucial de l'énergie durable.

1. Méthodologie

Dans cette étude, nous utilisons l'aide à la décision multicritère – processus d'analyse hiérarchique pour évaluer différentes technologies de piles à combustible à intégrer dans le bâtiment en prenant en compte différents critères.

1.1. L'aide à la décision multicritère – processus d'analyse hiérarchique

L'aide à la décision multicritère – processus d'analyse hiérarchique est une méthode de prise de décision qui permet de gérer les choix complexes impliquant plusieurs critères. Développée par Thomas L. Saaty dans les années 1970, cette approche vise à structurer les problèmes de décision en hiérarchisant les critères et en évaluant les alternatives selon ces critères [Taherdoost et Madanchian, 2023; Saaty, 1990].

Le MCDM-AHP offre une méthodologie robuste et polyvalente qui peut être appliquée à divers domaines de l'énergie, y compris l'évaluation des technologies et des stratégies émergentes. Par exemple, dans le domaine des énergies renouvelables, il peut être utilisé pour déterminer les zones les plus favorables à l'installation de

différentes sources d'énergie telles que le photovoltaïque (PV) [Bouramdane, 2023b et 2023c], l'éolien *onshore* [Bouramdane, 2023d], l'éolien *offshore* [Bouramdane, 2023e], et le PV flottant [Bouramdane, 2023f]. En tenant compte de critères tels que l'ensoleillement, la vitesse du vent, la disponibilité des ressources, les contraintes géographiques et environnementales, le MCDM-AHP permet de hiérarchiser les emplacements les plus propices à chaque technologie, facilitant ainsi la prise de décision stratégique pour les investissements énergétiques. De plus, cette méthode peut être appliquée à l'évaluation des technologies de production d'hydrogène, en considérant des critères tels que l'efficacité énergétique, la disponibilité des matières premières et l'impact environnemental [Bouramdane, 2024]. De même, le MCDM-AHP peut être utilisé pour évaluer les mesures de cybersécurité dans les micro-réseaux énergétiques, en prenant en compte des facteurs tels que la résilience du système, la protection des données et la prévention des cyberattaques [Bouramdane, 2023g]. Enfin, dans le domaine de la gestion de l'eau, cette approche peut être appliquée pour analyser et comparer différentes stratégies de gestion, telles que la réutilisation des eaux usées, la conservation de l'eau et la gestion des ressources hydriques, en évaluant des critères tels que l'efficacité, la durabilité et l'impact environnemental [Bouramdane, 2023h]. En résumé, le MCDM-AHP fournit un cadre méthodologique puissant pour prendre des décisions éclairées dans divers domaines de l'énergie, permettant ainsi d'optimiser les ressources et de promouvoir des solutions durables et efficaces.

L'approche MCDM-AHP peut également être appliquée pour évaluer différentes technologies de piles à combustible dans le contexte du bâtiment, en considérant divers critères. Cette méthode offre une originalité dans sa capacité à structurer les décisions complexes en hiérarchisant les critères et en intégrant les préférences des décideurs à travers des comparaisons par paires, permettant ainsi une évaluation rigoureuse et transparente des alternatives possibles.

Dans le MCDM-AHP, le processus de prise de décision est découpé en plusieurs étapes [Bou-ramdane, 2024; 2023g; 2023h] :

- Décomposition hiérarchique : les problèmes de décision sont décomposés en une série de niveaux hiérarchiques. Au sommet se trouve l'objectif global de la décision, suivi de critères intermédiaires et enfin des alternatives à évaluer (Figure 1).
- Évaluation par comparaison par paires : la méthode AHP utilise une échelle de comparaison par paires pour évaluer la relative importance des critères et des alternatives. Cette échelle est fondamentale pour construire des matrices de comparaison par paires (entre les critères, entre les alternatives, et entre les critères et alternatives), qui sont ensuite utilisées pour calculer les poids des critères et les

scores globaux des alternatives. Cette échelle de Saaty est une échelle de 1 à 9 qui quantifie la force de préférence entre deux éléments. Chaque valeur sur l'échelle représente un degré d'importance ou de préférence : 1) égale importance (les deux éléments sont jugés également importants), 3) légère préférence (un élément est légèrement plus important qu'un autre), 5) forte préférence (un élément est clairement plus important qu'un autre), 7) préférence très forte (un élément est beaucoup plus important qu'un autre), 9) préférence absolue (un élément est extrêmement plus important qu'un autre). Les valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) peuvent également être utilisées pour exprimer des préférences plus nuancées, intermédiaires entre les points de l'échelle. Par exemple, 2 représente une légère préférence, mais pas aussi marquée que 3, et 6 représente une préférence forte mais pas

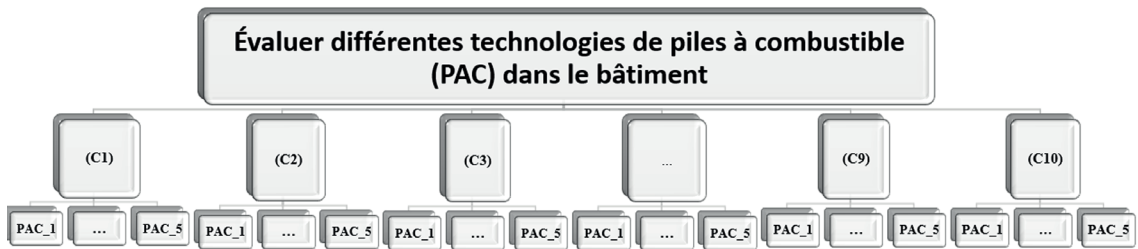


Figure 1. Hiérarchie d'évaluation des technologies de piles à combustible selon l'approche de l'aide à la décision multicritère – processus d'analyse hiérarchique (MCDM-AHP)

Source : élaboration de l'auteur

Le graphique est structuré en trois niveaux. Le niveau 1 représente l'objectif global de l'évaluation, qui est de sélectionner la meilleure technologie de pile à combustible pour une application spécifique dans le bâtiment. Cet objectif est situé au sommet de la hiérarchie. Le niveau 2 décompose cet objectif en critères d'évaluation pertinents. Ces critères sont des aspects spécifiques sur lesquels les différentes technologies de piles à combustible seront jugées. Ils incluent : efficacité énergétique (C1), température de fonctionnement (C2), flexibilité du combustible (C3), taille et encombrement (C4), compatibilité avec l'infrastructure existante (C5), fiabilité (C6), coût (C7), durabilité (C8), émissions (C9), sécurité (C10), offrant ainsi une perspective holistique de l'évaluation des technologies de piles à combustible. Le niveau 3 présente les différentes technologies de piles à combustible qui sont évaluées en fonction des critères définis au niveau 2. Ces technologies incluent : pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), pile à combustible alcaline (AFC), pile à combustible à carbonate fondu (MCFC), pile à combustible à oxyde solide (SOFC), pile à combustible directe au méthanol (DMFC). Chaque technologie est évaluée selon les critères du niveau 2 pour déterminer laquelle est la plus adaptée à l'application spécifique dans un bâtiment.

Évaluation multicritère des technologies de piles à combustible pour une intégration dans le bâtiment

aussi marquée que 7. La réciprocité dans les matrices de comparaison par paires est un principe fondamental de la méthode AHP. La réciprocité est le principe selon lequel, si un élément A est jugé x fois plus important qu'un élément B, alors B doit être jugé $1/x$ fois plus important qu'un élément A. En d'autres termes, si vous évaluez un élément par rapport à un autre en utilisant une certaine valeur, la valeur inverse doit être utilisée pour l'évaluation inverse. La réciprocité est essentielle pour garantir la cohérence des jugements et des évaluations dans la méthode.

- Calcul des poids des critères : à partir des matrices de comparaison par paires, nous avons calculé les poids relatifs de chaque critère (Figure 2) en utilisant les valeurs propres des matrices. Ces poids représentent l'importance relative de chaque critère dans le contexte de la décision globale.
- Évaluation des alternatives : de manière similaire, nous avons comparé les alternatives par paires par rapport à chaque critère. Cela nous a permis de déterminer à quel point chaque alternative satisfait chaque critère.
- Calcul des scores globaux : les poids des critères et les évaluations des alternatives ont été agrégés pour obtenir des scores de préférence globaux pour chaque alternative. Les scores finaux (Figure 3) permettent de classer les alternatives en fonction de leur alignement avec les objectifs de notre étude. Les résultats finaux ont révélé le classement des technologies de piles à combustible en fonction de leur adéquation avec les critères définis. Cela nous a permis de recommander la technologie la plus appropriée pour l'intégration dans les bâtiments, en prenant en compte tous les aspects techniques et économiques.
- Vérification de la cohérence : pour assurer la fiabilité des jugements d'experts, nous avons calculé l'indice de cohérence (CI) et le rapport de cohérence (CR). Si le CR est inférieur à 0,1, les jugements sont considérés comme

cohérents. Si nécessaire, des ajustements ont été apportés pour améliorer la cohérence.

En utilisant la méthode MCDM-AHP, nous avons pu structurer le problème complexe de sélection des technologies de piles à combustible, effectuer des évaluations objectives et rigoureuses, et fournir des recommandations basées sur une analyse multicritère approfondie. Cette approche garantit que les décisions prises sont bien fondées et alignées avec les objectifs de notre étude.

1.2. Les technologies de piles à combustible considérées

Les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques convertissant directement l'énergie chimique d'un carburant en électricité, avec de l'eau et de la chaleur comme sous-produits. Elles offrent une alternative prometteuse aux sources d'énergie conventionnelles en raison de leur efficacité élevée et de leurs émissions réduites. Il existe diverses technologies de piles à combustible :

- Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell* ou PEMFC, en anglais) : la PEMFC utilise une membrane polymère électrolytique pour séparer les gaz réactifs [Jiao et al., 2021]. Les PEMFC ont une densité de puissance élevée et un faible poids spécifique. Elles fonctionnent à des températures relativement basses (environ 80 °C), ce qui permet une mise en service rapide [Cheng et al., 2022], une grande efficacité pour les applications stationnaires et de transport [Pahon et al., 2021] et une intégration dans les bâtiments pour la production d'électricité et de chaleur. Les PEMFC sont largement utilisées dans les véhicules électriques à pile à combustible et dans les applications de secours en cas de catastrophe. Cependant, les PEMFC sont sensibles à l'humidité. Elles nécessitent une humidification précise pour maintenir leur performance optimale. Un excès ou un manque d'humidité peut entraîner des problèmes de performance ou de durabilité. De plus, les PEMFC utilisent souvent des catalyseurs coûteux tels que la platine, ce qui rend

les systèmes PEMFC plus coûteux que d'autres technologies de piles à combustible. Bien que des améliorations aient été apportées, les PEMFC peuvent encore avoir une durée de vie limitée, en particulier dans des conditions de fonctionnement difficiles telles que des variations de température et d'humidité. Les PEMFC nécessitent de l'hydrogène pur comme combustible, ce qui nécessite une infrastructure de stockage et de distribution coûteuse et complexe pour les applications à grande échelle [Jin et al., 2021 ; Sireesha et al., 2023].

- Pile à combustible alcaline (*Alkaline Fuel Cell* ou AFC, en anglais) : les AFC utilisent un électrolyte alcalin tel que l'hydroxyde de potassium ou l'hydroxyde de sodium [Ferriday et Middleton, 2021 ; Wang et al., 2021]. Bien qu'elles offrent une efficacité élevée, une longue durée de vie, utilisent des catalyseurs abordables tels que le nickel et, dans certains cas, le platine en faibles quantités, et puissent fonctionner avec divers types de carburant — y compris l'hydrogène, le méthanol, l'ammoniac et même des dérivés organiques comme les déchets biodégradables —, elles nécessitent des températures élevées pour fonctionner, ce qui nécessite des matériaux de construction résistants à la chaleur et augmente les coûts de maintenance. Les AFC sont également sensibles à la contamination par le dioxyde de carbone (CO₂) et aux impuretés présentes dans le combustible et l'air, ce qui peut réduire leur performance et leur durabilité. Les AFC ont généralement une densité de puissance plus faible que d'autres types de piles à combustible, ce qui limite leur application dans des applications nécessitant une puissance élevée dans un encombrement réduit. Les AFC sont principalement utilisées dans des applications spécifiques telles que l'espace, la défense et certaines applications stationnaires en raison de leurs exigences opérationnelles. Bien que moins couramment utilisées dans les applications résidentielles et commerciales, les AFC peuvent être adaptées à la production d'électricité dans les bâtiments, en particulier dans des applications spécifiques telles que les systèmes de secours [McLean et al., 2002 ; Liu et al., 2023].

- Pile à combustible à carbonate fondu (*Molten Carbonate Fuel Cell* ou MCFC, en anglais) : les MCFC utilisent un électrolyte de carbonate fondu à haute température (600-700 °C). Cette technologie est adaptée aux applications stationnaires de grande taille, telles que la production d'électricité dans les centrales électriques et les installations industrielles [Baccioli et al., 2021]. Les MCFC peuvent également être utilisées pour la cogénération dans les bâtiments, mais elles nécessitent des températures encore plus élevées que les SOFC [Shikhar et al., 2021 ; Wang et al., 2022]. Les MCFC offrent une efficacité élevée de conversion de l'énergie chimique en électricité, ce qui en fait une option attrayante pour la cogénération d'électricité et de chaleur dans les applications stationnaires. Les MCFC peuvent également fonctionner avec une variété de combustibles, y compris le gaz naturel, le biogaz et les hydrocarbures liquides, offrant ainsi une certaine flexibilité dans le choix des sources d'alimentation. Les MCFC produisent des émissions relativement faibles de polluants atmosphériques tels que le dioxyde de carbone (CO₂) et les oxydes d'azote (NOx), contribuant ainsi à réduire l'impact environnemental par rapport aux sources d'énergie traditionnelles. Les MCFC ont une durée de vie prolongée, ce qui en fait une option viable pour les applications à long terme nécessitant une alimentation continue en électricité et en chaleur. Cependant, les MCFC nécessitent des températures élevées (600-700 °C) pour fonctionner efficacement, ce qui peut entraîner des défis en termes de gestion thermique et de matériaux de construction résistants à la chaleur. En raison de leur conception complexe et des matériaux spécifiques nécessaires pour fonctionner à des températures élevées, les MCFC peuvent être plus coûteuses à fabriquer et à entretenir que d'autres types de piles à combustible. Les MCFC sont sensibles aux contaminants présents dans le combustible et peuvent nécessiter des prétraitements pour maintenir leur efficacité et leur durabilité. En raison de leur température de fonctionnement élevée et de leurs matériaux spécifiques, les MCFC peuvent avoir une taille et un encombrement plus importants que d'autres types de piles à combustible, limitant leur application dans

Évaluation multicritère des technologies de piles à combustible pour une intégration dans le bâtiment

certains environnements ou applications nécessitant une compacité [Zhou et al., 2023].

- Pile à combustible à oxyde solide (*Solid Oxide Fuel Cell* ou SOFC, en anglais) : les SOFC utilisent un électrolyte solide en oxyde de zirconium stabilisé à l'oxyde d'yttrium. Elles fonctionnent à des températures élevées (800-1000 °C) et peuvent donc accepter directement le méthane, le propane ou d'autres hydrocarbures comme carburant. Les SOFC conviennent aux applications stationnaires de moyenne à grande échelle, telles que la cogénération et la production d'électricité dans les bâtiments [Brown, 1988; Mahato et al., 2015]. Les SOFC offrent une efficacité élevée de conversion de l'énergie chimique en électricité, généralement supérieure à 50 % (en raison de la température de fonctionnement plus élevée), ce qui en fait une option attrayante pour la cogénération d'électricité et de chaleur. Les SOFC peuvent fonctionner avec une variété de combustibles, y compris le gaz naturel, le biogaz, le gaz de synthèse et les hydrocarbures liquides, offrant ainsi une certaine flexibilité dans le choix des sources d'alimentation. Les SOFC produisent des émissions relativement faibles de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone (CO₂) et de polluants atmosphériques comme les oxydes d'azote (NOx), contribuant ainsi à réduire l'impact environnemental par rapport aux sources d'énergie traditionnelles. Les SOFC ont une durée de vie prolongée, ce qui en fait une option viable pour les applications à long terme nécessitant une alimentation continue en électricité et en chaleur. Cependant, les SOFC fonctionnent à des températures encore plus élevées que les MCFC (800-1000 °C), ce qui peut entraîner des défis en termes de gestion thermique, de matériaux de construction résistants à la chaleur et de démarrage rapide. En raison de leur conception complexe et des matériaux spécifiques nécessaires pour fonctionner à des températures élevées, les SOFC peuvent être plus coûteuses à fabriquer et à entretenir que d'autres types de piles à combustible. Comme les MCFC, les SOFC sont sensibles aux contaminants présents dans le combustible et peuvent nécessiter des prétraitements pour maintenir leur efficacité et leur durabilité. En raison de leur température de fonctionnement élevée et de

leurs matériaux spécifiques, les SOFC peuvent avoir une taille et un encombrement plus importants que d'autres types de piles à combustible, limitant leur application dans certains environnements ou applications nécessitant une compacité [Corigliano et al., 2022; Singhal, 2000].

- Pile à combustible directe au méthanol (*Direct Methanol Fuel Cell* ou DMFC, en anglais) : la DMFC est un type de pile à combustible qui utilise directement le méthanol comme carburant pour produire de l'électricité via une réaction électrochimique. Contrairement à d'autres types de piles à combustible qui nécessitent de l'hydrogène comme carburant, les DMFC peuvent fonctionner en utilisant du méthanol liquide, ce qui simplifie le stockage, le transport et l'utilisation du carburant [Pollet, 2013; Hartnig et Roth, 2012]¹. Les DMFC présentent plusieurs autres avantages que la simplicité du combustible : la polyvalence des applications — en raison de leur compacité et de leur facilité d'utilisation, les DMFC peuvent être intégrées dans une variété d'appareils portables tels que les téléphones mobiles, les ordinateurs portables, les caméras, les appareils électroniques grand public et des applications de secours dans les bâtiments; la faible température de fonctionnement — les DMFC fonctionnent à des températures relativement basses (environ 70-120 °C), ce qui réduit les exigences de refroidissement et permet une mise en service rapide et une utilisation efficace dans des applications portables; la réduction des émissions — les DMFC produisent des émissions faibles et négligeables de polluants atmosphériques tels que les oxydes d'azote (NOx) et les particules, contribuant ainsi à réduire l'impact environnemental par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. Cependant, malgré leurs avantages, les DMFC présentent également certains inconvénients : une faible densité énergétique — les DMFC ont une densité énergétique plus faible par rapport à d'autres types de piles à combustible, ce qui limite leur puissance et leur autonomie par rapport à certaines applications spécifiques, notamment les véhicules électriques; des problèmes de perméabilité — les membranes utilisées dans les DMFC peuvent être sujettes à la perméation du méthanol à travers la membrane, ce qui peut entraîner des pertes de rendement

et des problèmes de durabilité; la complexité de la logistique du combustible — bien que le méthanol soit un combustible liquide disponible et largement utilisé, sa manipulation et son stockage nécessitent une logistique spécifique, ce qui peut constituer un inconvénient dans certaines applications; des coûts de fabrication élevés — les DMFC peuvent être plus coûteuses à fabriquer et à entretenir que d'autres technologies de piles à combustible en raison de la complexité des systèmes de distribution de combustible et des matériaux spécifiques nécessaires pour les membranes et les catalyseurs.

Chaque type de pile à combustible présente ses propres avantages et limites, ce qui le rend adapté à différentes applications et environnements. La sélection de la technologie appropriée dépend des besoins spécifiques de l'application, tels que la puissance requise, la durée de vie, la disponibilité des combustibles et les contraintes de température.

1.3. Critères d'évaluation des piles à combustible dans les bâtiments

L'évaluation des piles à combustible pour leur intégration dans les bâtiments nécessite une analyse minutieuse prenant en compte divers critères. Ces critères sont essentiels pour déterminer quelle technologie de pile à combustible convient le mieux à l'application spécifique du bâtiment tout en répondant aux besoins énergétiques, économiques et environnementaux.

Parmi les critères clés à considérer, on retrouve :

- (C1) Efficacité énergétique : la capacité de la pile à combustible à convertir efficacement l'énergie chimique du combustible en électricité et en chaleur. L'efficacité énergétique est essentielle pour maximiser la production d'électricité et de chaleur tout en minimisant les pertes énergétiques.
- (C2) Température de fonctionnement : la plage de température nécessaire pour que la pile à combustible fonctionne efficacement, ce qui peut avoir des implications sur la gestion thermique et les matériaux de construction du bâtiment.
- (C3) Flexibilité du combustible : la capacité de la pile à combustible à fonctionner avec une variété de carburants, ce qui peut influencer la disponibilité des sources d'alimentation et les coûts associés.
- (C4) Taille et encombrement : l'espace requis pour l'installation de la pile à combustible, ainsi que son impact sur la conception et l'aménagement du bâtiment, ce qui inclut les considérations de poids et de bruit. En effet, le poids de la pile à combustible affecte directement l'installation et le support structurel nécessaires, tandis que le bruit généré peut influencer le confort et la faisabilité dans des environnements sensibles au bruit.
- (C5) Compatibilité avec l'infrastructure existante : la capacité de la pile à combustible à s'intégrer harmonieusement avec les systèmes électriques et de chauffage existants du bâtiment.
- (C6) Fiabilité : la fiabilité et la disponibilité opérationnelle de la pile à combustible, y compris sa capacité à fonctionner de manière fiable dans diverses conditions environnementales.
- (C7) Coût : le coût global, y compris les coûts initiaux d'installation et les coûts d'exploitation à long terme, doit être soigneusement évalué pour assurer la rentabilité du système.
- (C8) Durabilité : la durée de vie prévue de la pile à combustible et sa capacité à maintenir ses performances à long terme. La durabilité est un facteur crucial car elle garantit la longévité et les performances constantes de la pile à combustible sur une période prolongée.
- (C9) Émissions : les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques produites par la pile à combustible au cours de son fonctionnement.

Évaluation multicritère des technologies de piles à combustible pour une intégration dans le bâtiment

- (C10) Sécurité : les risques associés à l'utilisation de la pile à combustible, notamment en ce qui concerne la manipulation et le stockage du combustible, ainsi que les risques potentiels d'incendie ou de fuite de gaz.

Comprendre les relations complexes qui existent entre ces différents critères utilisés pour évaluer les technologies de piles à combustible est crucial pour prendre des décisions éclairées et identifier les compromis potentiels entre les critères.

- Efficacité énergétique (C1) et température de fonctionnement (C2) : il existe souvent une relation inverse entre l'efficacité énergétique et la température de fonctionnement. Les technologies de piles à combustible qui fonctionnent à des températures plus élevées, telles que les piles à combustible à oxyde solide (SOFC), ont tendance à être plus efficaces, mais peuvent nécessiter des processus de refroidissement plus complexes pour maintenir des températures de fonctionnement optimales.

- Flexibilité du combustible (C3) et émissions (C9) : la flexibilité du combustible peut avoir un impact significatif sur les émissions de la technologie de pile à combustible. Par exemple, les piles à combustible directes au méthanol (DMFC) peuvent présenter des émissions de CO₂ plus élevées en raison de l'utilisation du méthanol comme combustible, tandis que les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) peuvent fonctionner avec de l'hydrogène produit à partir de sources renouvelables, réduisant ainsi les émissions.

- Compatibilité avec l'infrastructure existante (C5) et coût (C7) : la compatibilité avec l'infrastructure existante peut avoir un impact significatif sur le coût global d'installation et d'exploitation d'une technologie de pile à combustible. Les technologies qui nécessitent moins de modifications de l'infrastructure existante, telles que les PEMFC, peuvent avoir un coût initial plus faible et être plus attrayantes pour les applications existantes.

- Durabilité (C8) et fiabilité (C6) : la durabilité et la fiabilité sont souvent étroitement liées dans le contexte des piles à combustible. Une technologie de pile à combustible qui est plus durable aura généralement également une fiabilité plus élevée, car elle est moins sujette aux défaillances et aux pannes.

- Sécurité (C10) et fiabilité (C6) : la sécurité et la fiabilité sont également étroitement liées, car des technologies de pile à combustible plus fiables ont tendance à être plus sûres à utiliser. Des conceptions robustes et des systèmes de contrôle avancés peuvent contribuer à améliorer à la fois la fiabilité et la sécurité des piles à combustible.

En comprenant ces relations entre les différents critères, il devient possible de prendre des décisions plus éclairées lors du choix de la technologie de pile à combustible la plus adaptée à une application spécifique. Une approche holistique qui prend en compte l'ensemble de ces interactions est essentielle pour parvenir à des solutions énergétiques durables et efficaces.

1.4. Collecte et traitement des données pour l'évaluation des technologies de piles à combustible

Les valeurs numériques dans les matrices reflètent les jugements qualitatifs des experts qu'il faut demander pour comparer chaque paire de critères ou d'alternatives pour déterminer leur importance relative. Dans cette étude, nous n'avons pas consulté un focus groupe d'experts ayant une expertise significative dans le domaine des technologies de piles à combustible et de l'intégration énergétique des bâtiments. En effet, bien que des conférences internationales précédentes — rassemblant des experts qui possédaient des antécédents diversifiés, incluant des chercheurs académiques, des ingénieurs en énergie et des consultants industriels — aient fourni des perspectives sur les dimensions plus larges des piles à combustible, elles manquaient souvent de la spécificité requise pour les critères et alternatives uniques de notre étude.

Nous avons plutôt mené un processus de jugement objectif méticuleux, impliquant une évaluation structurée des alternatives, des critères et de leurs interrelations [Bouramdane, 2024; 2023h; 2023g]. Cette approche s'appuyait à la fois sur le raisonnement logique et sur la vaste base de connaissances disponibles dans la littérature [Steele et Heinzl, 2001; Fan et al., 2021; Akinyele et al., 2020]. Notre processus de jugement objectif a été intentionnellement conçu pour garantir que les évaluations des critères et des alternatives respectaient une logique claire et cohérente ancrée dans les connaissances du domaine trouvées dans la littérature. Cette étape était cruciale pour adapter notre analyse aux nuances spécifiques de notre étude, en nous alignant avec la diversité des critères et des alternatives que nous cherchions à évaluer.

2. Résultats

Dans cette étude, nous évaluons plusieurs technologies de piles à combustible, notamment la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), la pile à combustible alcaline (AFC), la pile à combustible à carbonate fondu (MCFC), la pile à combustible à oxyde solide (SOFC) et la pile à combustible directe au méthanol (DMFC).

Notre évaluation repose sur une gamme de critères cruciaux, incluant (C1) l'efficacité énergétique, (C2) la température de fonctionnement, (C3) la flexibilité du combustible, (C4) la taille et l'encombrement, (C5) la compatibilité avec l'infrastructure existante, (C6) la fiabilité, (C7) le coût, (C8) la durabilité, (C9) les émissions et (C10) la sécurité.

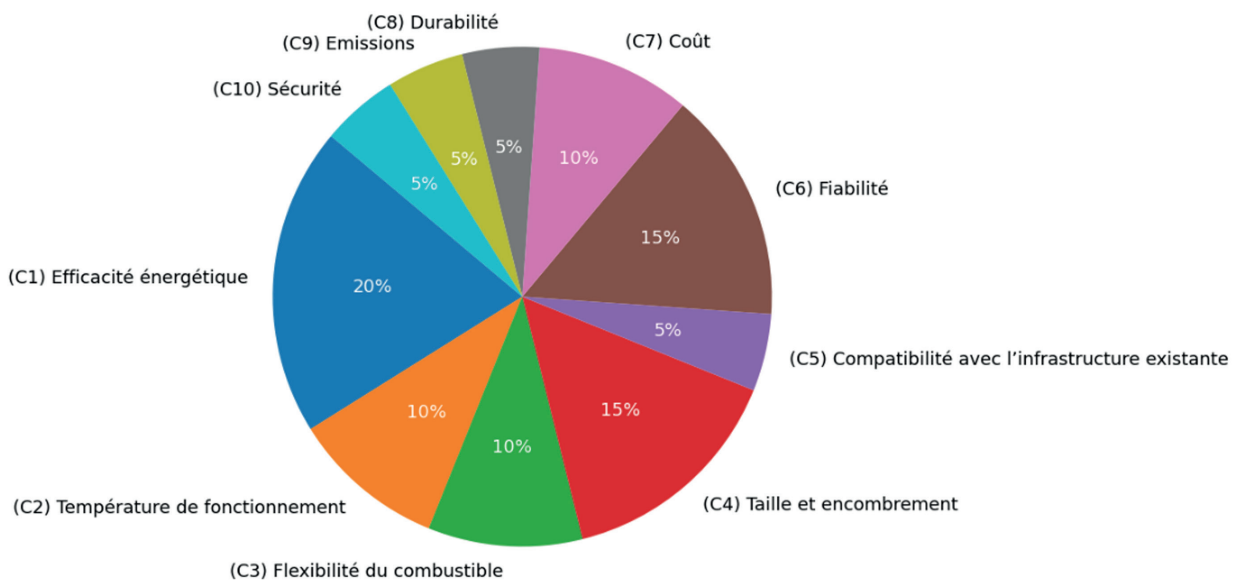


Figure 2. Répartition relative des critères (C1) l'efficacité énergétique, (C2) la température de fonctionnement, (C3) la flexibilité du combustible, (C4) la taille et l'encombrement, (C5) la compatibilité avec l'infrastructure existante, (C6) la fiabilité, (C7) le coût, (C8) la durabilité, (C9) les émissions et (C10) la sécurité pour l'évaluation des piles à combustible à hydrogène dans les bâtiments

Source : élaboration de l'auteur

Évaluation multicritère des technologies de piles à combustible pour une intégration dans le bâtiment

2.1. Analyse des poids relatifs des critères

Les poids relatifs attribués à chaque critère obtenus dans notre évaluation des technologies de piles à combustible sont présentés dans la Figure 2. Les pourcentages indiqués représentent l'importance relative de chaque critère dans notre processus de décision.

Les critères avec le poids le plus faible (5 %) sont : (C5) la compatibilité avec l'infrastructure existante, (C8) la durabilité, (C9) les émissions, (C10) la sécurité. Ces critères, bien qu'importants, ont reçu un poids relatif plus faible dans notre évaluation globale. Cela indique qu'ils peuvent ne pas être aussi déterminants que d'autres facteurs, mais restent néanmoins des considérations cruciales dans le choix final de la technologie de pile à combustible.

Les critères avec le poids moyen (10 %) sont : (C2) la température de fonctionnement, (C3) la

flexibilité du combustible et (C7) le coût. Ces critères ont reçu un poids intermédiaire dans notre analyse. Ils sont considérés comme importants mais ne dominent pas nécessairement la décision globale.

Les critères avec le poids le plus élevé (15-20 %) sont (C1) l'efficacité énergétique (20 %), (C2) la taille et l'encombrement (15 %) et (C3) la fiabilité (15 %). Ces critères se sont vus attribuer des poids relativement plus élevés, ce qui indique leur importance significative dans notre évaluation. Ils sont susceptibles d'avoir un impact plus significatif sur le choix final de la technologie de pile à combustible, en raison de leur contribution à des aspects essentiels tels que la performance, l'efficacité opérationnelle et la fiabilité à long terme.

Cette analyse des poids relatifs fournit un aperçu crucial de la hiérarchie des critères dans notre processus de prise de décision, ce qui nous

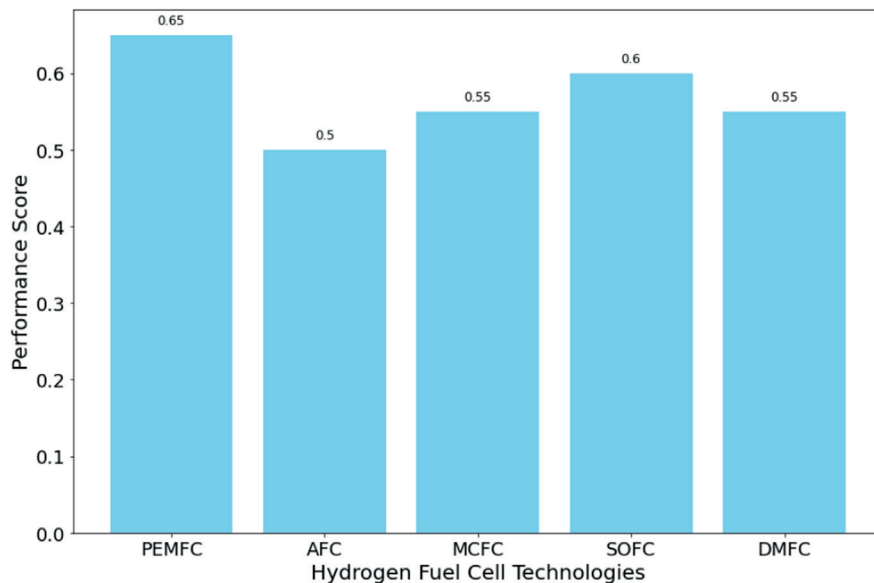


Figure 3. Scores de performance agrégés des technologies de piles à combustible à hydrogène : pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), pile à combustible alcaline (AFC), pile à combustible à carbonate fondu (MCFC), pile à combustible à oxyde solide (SOFC) et pile à combustible directe au méthanol (DMFC)

Source : élaboration de l'auteur

Ces scores reflètent une évaluation globale des performances de chaque technologie basée sur les critères C1 à C10.

guidera vers un choix éclairé parmi les différentes technologies de piles à combustible examinées.

2.2. Évaluation des performances des technologies de piles à combustible intégrées dans le bâtiment

Dans cette section, nous examinons les scores de performance attribués à chaque technologie de pile à combustible pour son intégration dans un bâtiment. Les scores sont classés en fonction de leur niveau de performance (Figure 3).

La pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) (0,65) se distingue par son efficacité énergétique élevée et sa faible température de fonctionnement, ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications résidentielles et commerciales. Sa flexibilité en termes de combustible, sa taille compacte et sa fiabilité en font un choix attrayant pour les bâtiments. De plus, elle est compatible avec l'infrastructure existante dans de nombreuses régions, ce qui réduit les coûts d'installation et améliore la durabilité du système.

La pile à combustible à oxyde solide (SOFC) (0,6) offre une bonne efficacité énergétique et une compatibilité avec divers types de combustibles. Cependant, sa température de fonctionnement élevée peut poser des défis d'intégration dans certains environnements de bâtiments. Bien qu'elle présente une taille relativement compacte par rapport à d'autres types de piles à combustible, sa durabilité et sa fiabilité peuvent nécessiter une attention particulière pour assurer une performance optimale à long terme.

Les piles à combustible à carbonate fondu (MCFC) (0,55), les piles à combustible directes au méthanol (DMFC) (0,55), et les piles à combustible alcalines (AFC) (0,5) ont toutes reçu des scores de performance relativement plus bas en raison de diverses limitations. Les AFC ont une efficacité énergétique modérée et des contraintes en termes de compatibilité de combustible, tandis que les MCFC et DMFC présentent des températures de fonctionnement plus élevées et des exigences spécifiques en matière de combustible.

Leur taille et leur encombrement peuvent également être plus importants, ce qui peut limiter leur application dans les bâtiments plus petits. De plus, ces technologies peuvent nécessiter des investissements supplémentaires pour l'adaptation à l'infrastructure existante et peuvent avoir des émissions plus élevées.

Conclusion

L'évaluation des différentes technologies de piles à combustible grâce à l'aide à la décision multicritère – processus d'analyse hiérarchique a fourni des informations précieuses pour orienter les décisions dans le choix de la technologie la plus appropriée pour diverses applications. En analysant les performances de chaque technologie selon une gamme de critères, nous avons pu identifier les forces et les faiblesses de chaque option.

Il est clair que la pile à combustible à membrane échangeuse de protons se distingue comme une solution très prometteuse, offrant une efficacité énergétique élevée, une taille compacte, une fiabilité élevée et une compatibilité avec l'infrastructure existante. Ces avantages en font un choix attractif pour une intégration dans diverses applications, des véhicules électriques aux systèmes de production d'énergie pour les bâtiments. Cependant, il convient de noter que d'autres technologies telles que les piles à combustible à oxyde solide (SOFC) et les piles à combustible directes au méthanol (DMFC) présentent également des avantages significatifs dans certaines situations. Par exemple, la SOFC offre une grande flexibilité en termes de combustible, tandis que la DMFC peut être particulièrement adaptée aux applications mobiles en raison de son fonctionnement direct au méthanol. En revanche, les piles à combustible alcalines (AFC) et à carbonate fondu (MCFC) semblent présenter des performances relativement moins compétitives dans plusieurs domaines, ce qui limite leur attractivité pour de nombreuses applications. En conclusion, le choix de la technologie de pile à combustible appropriée dépendra des besoins spécifiques de chaque application, ainsi que des compromis entre les différents critères évalués.

Évaluation multicritère des technologies de piles à combustible pour une intégration dans le bâtiment

L'approche MCDM-AHP fournit un cadre robuste pour évaluer ces compromis et guider les décisions stratégiques dans le domaine de l'énergie et de la mobilité durable.

Les résultats de cette étude ont des implications pratiques importantes pour plusieurs domaines d'application des piles à combustible. En identifiant les forces et les faiblesses de chaque technologie, cette recherche peut guider le développement de politiques énergétiques, ainsi que les décisions d'investissement dans les infrastructures énergétiques. Par exemple, les gouvernements et les fabricants d'équipements énergétiques peuvent utiliser ces informations pour orienter leurs efforts de recherche et de développement vers les technologies les plus prometteuses, en fonction des besoins spécifiques de chaque région ou secteur.

Bien que cette étude ait fourni des informations précieuses sur les performances des technologies de piles à combustible, elle comporte certaines limitations à prendre en compte. Tout d'abord, les données utilisées pour évaluer chaque technologie peuvent être sujettes à des incertitudes, en particulier en ce qui concerne les analyses d'efficacité, de coûts et d'émissions. De plus, certains critères, tels que la compatibilité avec l'infrastructure existante, peuvent varier selon les régions géographiques et les contextes d'application spécifiques, ce qui nécessite une adaptation locale des résultats. Enfin, cette étude n'a pas pris en compte les considérations socio-économiques et politiques qui peuvent influencer l'adoption des technologies de piles à combustible, ce qui constitue un domaine important pour de futures recherches.

Cette étude ouvre la voie à de futures recherches dans le domaine des piles à combustible. Tout d'abord, il serait intéressant d'approfondir l'analyse des implications socio-économiques et environnementales de l'adoption des différentes technologies de piles à combustible, en tenant compte des dynamiques de marché et des politiques gouvernementales. De plus, des études supplémentaires pourraient explorer de nouvelles approches pour améliorer la performance et la durabilité des piles à combustible, telles que le

développement de matériaux plus efficaces ou de systèmes de gestion de l'énergie plus avancés.

NOTE

1. La *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) utilise le méthanol plutôt que de l'hydrogène pour plusieurs raisons : (1) Stockage et maniabilité du carburant : le méthanol est un liquide à température ambiante, ce qui le rend plus facile à stocker, transporter et manipuler que l'hydrogène, qui est généralement stocké sous forme de gaz comprimé ou liquéfié, nécessitant des infrastructures spécifiques de stockage et de distribution. (2) Sécurité : le méthanol est moins explosif que l'hydrogène, ce qui réduit les risques associés à la manipulation et au stockage du carburant, en particulier dans des applications portables et grand public. (3) Densité énergétique : le méthanol a une densité énergétique plus élevée que l'hydrogène, ce qui signifie qu'une plus grande quantité d'énergie peut être stockée dans un volume donné de méthanol. Cela permet une plus grande autonomie et une puissance plus élevée dans les applications portables. (4) Infrastructure existante : étant donné que le méthanol est déjà largement utilisé dans diverses industries pour des applications telles que les carburants automobiles, les solvants et les produits chimiques, il existe déjà une infrastructure de production, de distribution et de stockage pour le méthanol, ce qui rend son utilisation plus pratique dans certaines régions. Cependant, il est à noter que l'utilisation du méthanol comporte également des défis, tels que la perméabilité à travers la membrane de la pile à combustible et les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) lors de la conversion du méthanol en électricité. De plus, la production de méthanol est souvent dérivée de sources fossiles, ce qui contribue indirectement à une empreinte carbone plus élevée. Malgré cela, dans de nombreuses applications, les avantages du méthanol en termes de stockage, de maniabilité et de densité énergétique l'emportent sur ses inconvénients, ce qui en fait un choix attrayant pour les DMFC [Pollet, 2013; Hartnig et Roth, 2012].

RÉFÉRENCES

- Akiyele D., Olabode E., Amole A., 2020. "Review of Fuel Cell Technologies and Applications for Sustainable Microgrid Systems", URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:225405612>.
- Baccioli A., Liponi A., Milewski J., Szczeńniak A., Desideri U., 2021. "Hybridization of an Internal Combustion Engine With a Molten Carbonate Fuel Cell For Marine Applications", *Applied Energy* 298 (2021) 117192, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:236287972>.
- Baharuddin N.A., Yusoff W.N.A.W., Aziz A.J.A., Tahir N.N.M., 2021. "Hydrogen Fuel Cells For Sustainable Energy: Development and Progress in Selected Developed Countries", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1078 (2021), URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:234082183>.
- Bouramdane A.-A., 2021. Scenarios of Large-Scale Solar Integration with Wind in Morocco: Impact of Storage, Cost, Spatio-Temporal Complementarity and Climate Change, Thèse, Institut polytechnique de Paris (octobre 2021), URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03518906>.
- Bouramdane A.-A., 2023a. *Hydrogen Production Technologies: Modeling, Pros and Cons, Applications, Suitable Regions, and Unveiling Sustainability and Economics Through LCA and LCC*, Lambert Academic Publishing (LAP), London, United Kingdom, ISBN : 978-620-6-78174-5, <https://www.morebooks.shop/shop-ui/shop/product/9786206781745>.
- Bouramdane A.-A., 2023b. "Identifying Large-Scale Photovoltaic and Concentrated Solar Power Hot Spots: Multi-Criteria Decision-Making Framework", World Academy of Science, Engineering and Technology, *International Journal of Energy and Power Engineering* 17 (02) (2023), doi:10.5281/zenodo.7324107, URL <https://publications.waset.org/abstracts/157186/pdf>.
- Bouramdane A.-A., 2023c. *Unlocking Photovoltaic Potential in Climate Action-Challenged Countries*, Lambert Academic Publishing (LAP), London, United Kingdom, ISBN : 978-620-6-84437-2, <https://www.morebooks.shop/shop-ui/shop/product/9786206844372>.
- Bouramdane A.-A., 2023d. "Spatial Suitability Assessment of Onshore Wind Systems Using the Analytic Hierarchy Process", World Academy of Science, Engineering and Technology, *International Journal of Energy and Power Engineering* 17 (07) (2023), doi: 10.5281/zenodo.7324223, URL <https://publications.waset.org/abstracts/157232/pdf>.
- Bouramdane A.-A., 2023e. "Site Suitability of Offshore Wind Energy: A Combination of Geographic Referenced Information and Analytic Hierarchy Process", World Academy of Science, Engineering and Technology, *International Journal of Energy and Power Engineering* 17 (02) (2023), doi:10.5281/zenodo.7324191, URL <https://publications.waset.org/abstracts/157240/pdf>.
- Bouramdane A.-A., 2023f. *Potential Site for Offshore Floating Photovoltaic Systems in Morocco: Evaluation Criteria Required Considering Climate Change Effects to Achieve the Energy Trilemma*, Lambert Academic Publishing (LAP), London, United Kingdom, ISBN : 978-620-6-15964-3, <https://www.morebooks.shop/shop-ui/shop/product/9786206159643>.
- Bouramdane A.-A., 2023g. "Cyberattacks in Smart Grids: Challenges and Solving the Multi-Criteria Decision-Making for Cybersecurity Options, Including Ones That Incorporate Artificial Intelligence, Using an Analytical Hierarchy Process", *Journal of Cybersecurity and Privacy (JCP)* 3 (2023) 4, doi:10.3390/jcp3040031.
- Bouramdane A.-A., 2023h. "Optimal Water Management Strategies: Paving the Way for Sustainability in Smart Cities", *Smart Cities* 6 (2023) 5, doi:10.3390/smartcities6050128.
- Bouramdane A.-A., 2024. "Crafting An Optimal Portfolio For Sustainable Hydrogen Production Choices in Morocco", *Fuel* 358 (2024), 130292, doi:10.1016/j.fuel.2023.130292.
- Brown J.T.L., 1988. "Solid Oxide Fuel Cell Technology", *IEEE Transactions on Energy Conversion* 3 (1988) 193–198, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:98713995>.
- Cheng S.-J., Hai D., Hao D., Yang Q., Wang J., Feng L., Li J., 2022. "Investigation and Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Dynamic Response Characteristics on Hydrogen Consumption of Fuel Cell Vehicle", *International Journal of Hydrogen Energy* (2022), URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:247877864>.

Évaluation multicritère des technologies de piles à combustible pour une intégration dans le bâtiment

- Corigliano O., Pagnotta L., Fragiaco P., 2022. "On the Technology of Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Energy Systems for Stationary Power Generation: A Review", *Sustainability* (2022), URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:253704486>.
- Fan L., Tu Z., Chan S.H., 2021. "Recent Development of Hydrogen and Fuel Cell Technologies: A Review", *Energy Reports* (2021), URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:239709899>.
- Ferriday T.B., Middleton P.H., 2021. "Alkaline Fuel Cell Technology – A Review", *International Journal of Hydrogen Energy* (2021), URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:233559147>.
- Hartnig C., Roth C., 2012. Polymer Electrolyte Membrane and Direct Methanol Fuel Cell Technology, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:98686661>.
- Jiao K., Xuan J., Du Q., Bao Z., Xie B., Wang B., Zhao Y., Fan L., Wang H., Hou Z., Huo S., Brandon N.P., Yin Y., Guiver M.D., 2021. "Designing the Next Generation of Proton-Exchange Membrane Fuel Cells", *Nature* 595 (2021) 361-369, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:235906731>.
- Jin L., Wang X.-J., Zhu J., Wang C., Zhou T., Zhang X., 2021. "Sensitivity Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance to Operating Parameters and Its Applicability Assessment Under Different Conditions", *Energy Conversion and Management* 228 (2021) 113727, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:230553489>.
- Kazula S., de Graaf S., Enghardt L., 2022. "Review of Fuel Cell Technologies and Evaluation of their Potential and Challenges for Electrified Propulsion Systems in Commercial Aviation", *Proceedings of Global Power & Propulsion Society* (2022), URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:253115492>.
- Liu T., Xu Z., Zhang Q., 2023. "Structure and Materials of Alkaline Fuel Cell", *Theoretical and Natural Science* (2023), URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:266582586>.
- Mahato N., Banerjee A., Gupta A., Omar S., Balani K., 2015. "Progress in Material Selection For Solid Oxide Fuel Cell Technology: A Review", *Progress in Materials Science* 72 (2015) 141–337, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:136677330>.
- McLean G.O., Niet T., Prince-Richard S., Djilali N., 2002. "An Assessment of Alkaline Fuel Cell Technology", *International Journal of Hydrogen Energy* 27 (2002) 507–526, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55176749>.
- Minkov V., Krumpelt M., Daniels E.K., Asbury J.G., Zeh C.M., 1989. "Evaluation of Fuel Cell Technologies For Electric Utility Applications", URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:108218608>.
- Nomnqa M., Ikhu-Omoregbe D.I.O., Rabi A.M., 2019. "Performance Evaluation of a HT-PEM Fuel Cell Micro-Cogeneration System For Domestic Application", *Energy Systems* 10 (2019), 185–210, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:114499447>.
- Pahon E., Bouquain D., Hissel D., Rouet A., Vacquier C., 2021. "Performance Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell in Automotive Applications", *Journal of Power Sources* 510 (2021) 230385, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:238678913>.
- Pollet B.G., 2013. "Polymer Electrolyte Membrane and Direct Methanol Fuel Cell Technology", *Platinum Metals Review* 57 (2013) 137-142, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:220664184>.
- Saaty, T.L., 1990. "How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process", *Interfaces* 24 (1990), 19-43, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:11456848>.
- Sánchez S.M.M., Chasiluisa N.T.Q., Uvidia R.A.C., Guadalupe M.M.E., 2022. "Hydrogen Fuel Cells and Their Potential to Fight Climate Change", *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M* (2022), URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:250199799>.
- Shikhar U., Hemmes K., Woudstra T., 2021. "Exploring the Possibility of Using Molten Carbonate Fuel Cell for the Flexible Coproduction of Hydrogen and Power", in: *Frontiers in Energy Research*, 2021, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:237271295>.
- Singhal S.C., 2000. "Advances in Solid Oxide Fuel Cell Technology", *Solid State Ionics* 135 (2000) 305–313, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18618431>.

Sireesha N.V., Kumar D.G., Dsnmrao, Gatla R.K., Kshatri S.S., Babu P.C., Neerudi B., 2023. "Performance Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell During Transient Operations Using Artificial Intelligence", *Journal of New Materials for Electrochemical Systems* (2023), URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:261204157>.

Steele B.C.H., Heinzel A., 2001. "Materials For Fuel-Cell Technologies", *Nature* 414 (2001) 345–352, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:4405856>.

Taherdoost H., Madanchian M., 2023. "Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts", *Encyclopedia* (2023), URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:255663336>.

Wang Z., Dong B., Wang Y., Li M., Liu H., Han F., 2023. "Analysis and Evaluation of Fuel Cell Technologies For Sustainable Ship Power: Energy Efficiency and Environmental Impact", *Energy Conversion and Management: X* (2023), URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:265194515>.

Wang S., Wu X., Jafarmadar S., Singh P.K., Khorasani S., Marefati M., Alizadeh A., 2022. "Numerical Assessment of a Hybrid Energy System Based on Solid Oxide Electrolyzer, Solar Energy and Molten Carbonate Fuel Cell For the Generation of Electrical Energy and Hydrogen Fuel With Electricity Storage Option", *Journal of Energy Storage* (2022), URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:250541278>.

Wang Z., Zhang X., Rezazadeh A., 2021. "Hydrogen Fuel and Electricity Generation From a New Hybrid Energy System Based on Wind and Solar Energies and Alkaline Fuel

Cell", *Energy Reports* 7 (2021) 2594–2604, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:236241684>.

WRI, 2023. State of Climate Action, available online <https://www.wri.org/research/state-climate-action-2023> (accessed on November 21, 2023).

Zhou J., Alsharif S., Alizadeh A., Ali M.A., Goyal V., 2023. "Development and Analysis of a New Method in Developments of Molten Carbonate Fuel Cell Technology, Based on Hybrid Supercritical Carbon Dioxide For Multi Objective Optimization Based on Machine Learning Techniques", *International Journal of Hydrogen Energy* (2023), URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:256541402>.

BIOGRAPHIE

AYAT-ALLAH BOURAMDANE est enseignante-chercheuse à l'UIR. Ingénieure en énergie, elle a effectué un échange à l'EEIGM, l'ENSEM et la FST de l'Université de Lorraine, suivi d'un master à l'École polytechnique et d'un mémoire à CentraleSupélec, Université Paris-Saclay. Docteure de l'Institut polytechnique de Paris, ses recherches portent sur la modélisation et l'optimisation des systèmes énergétiques face aux scénarios de changement climatique, en intégrant les dimensions techniques, économiques, environnementales et sociales.

À lire également dans *La Revue de l'Énergie*

- Les investissements pour la rénovation énergétique des bâtiments en Europe, *Juan Alario (n° 658, septembre-octobre 2021)*
- Choix de la meilleure technologie pour le transport maritime d'hydrogène : cas Australie-Japon à l'horizon 2050, *Guillaume Boissonnet, Nathalie Popiolek (n° 672, mai-juin 2024)*

À retrouver sur www.larevuedelenergie.com.