

Système énergétique hybride pour l'île d'Ouessant : Commande floue appliquée à la gestion des énergies renouvelables et de l'hydrogène

Feriel ABDERRAHMANE ^{1,2} Jean-Frédéric CHARPENTIER ² Ignacio HERNANDO-GIL ¹ Ionel VECHIU ¹

¹ : Univ. Bordeaux, ESTIA Institute of Technology, EstiaR, F-64210 Bidart, France.

² : Institut de Recherche de l'Ecole Navale (EA 3634 IRENav), French Naval Academy, 29240 Brest, France.

Résumé – L'île d'Ouessant, comme de nombreuses communautés maritimes et portuaires non interconnectées, dépend des énergies fossiles tant pour la production de son électricité que pour ces besoins en mobilité navale, une situation aggravée par les effets du changement climatique. Dans ce contexte, l'étude traite de la gestion énergétique d'un micro-réseau hybride, cette étude combine plusieurs sources d'énergie renouvelables : éolien, hydrolien et photovoltaïque, en utilisant de l'hydrogène comme vecteur énergétique. L'objectif de cette gestion est de maximiser l'utilisation des énergies renouvelables tout en respectant des contraintes liées aux émissions de CO₂, à la production d'hydrogène, et à l'équilibre énergétique du micro-réseau insulaire. Une commande floue (FIS) est utilisée pour gérer les flux énergétiques entre les différentes sources, les systèmes de stockage (batteries et hydrogène) et la demande du réseau local. Un scénario représentatif a été élaboré afin d'évaluer l'efficacité du système de gestion proposé, appliqué à l'outil de simulation développé. Ce scénario vise à couvrir l'ensemble des besoins énergétiques de l'île d'Ouessant, tout en assurant également l'approvisionnement en hydrogène des navires desservant l'île. Les résultats montrent que cette approche améliore l'efficacité énergétique globale et assure une meilleure stabilité des flux énergétiques. De plus, cette nouvelle stratégie diminue la dépendance aux générateurs diesel, contribuant ainsi à la transition énergétique de l'île.

Mots-clés – Système hybride, gestion d'énergie, énergies renouvelables, hydrogène, commande floue et micro-réseau insulaire.

1. INTRODUCTION

L'alimentation en électricité durable et abordable des réseaux insulaires isolés constitue un défi majeur en raison de leur isolement géographique et de leur dépendance aux combustibles fossiles [1]. Le site étudié est l'île d'Ouessant, située au large des côtes bretonnes. Cette île, qui compte environ 800 habitants, dépend actuellement de quatre générateurs diesel d'une capacité totale de 4,4 MW, consommant 1 600 tonnes de fioul par an pour répondre à une demande énergétique annuelle d'environ 7,1 GWh [2]. Cette dépendance entraîne un coût de l'électricité d'environ quatre fois supérieur à celui du continent. La courbe de consommation énergétique de l'île présentée dans la figure 1 révèle les variations de puissance électrique demandée tout au long de l'année. On observe des pics de consommation pendant la saison hivernale, en raison des besoins accrus en chauffage et en éclairage. Ces pointes sont encore plus marquées lors des périodes de vacances, notamment pendant les fêtes de fin d'année et durant la haute saison touristique, où la population de l'île augmente fortement avec l'arrivée des visiteurs. L'objectif du projet dans lequel s'inscrit ce travail est de proposer une solution pour relever les défis énergétiques des îles isolées, en utilisant les ressources locales disponibles (éolien, hydrolien, photovoltaïque) avec l'hydrogène comme vecteur énergétique central, utilisé pour le stockage, la gestion des flux d'énergie et la mobilité navale [2]. Dans la suite de cet article, la section 2 présente le micro-réseau hybride étudié, la section 3 détaille la stratégie

de gestion de l'énergie utilisée, et enfin la section 4 présente des résultats de simulation gestion d'énergie utilisée.

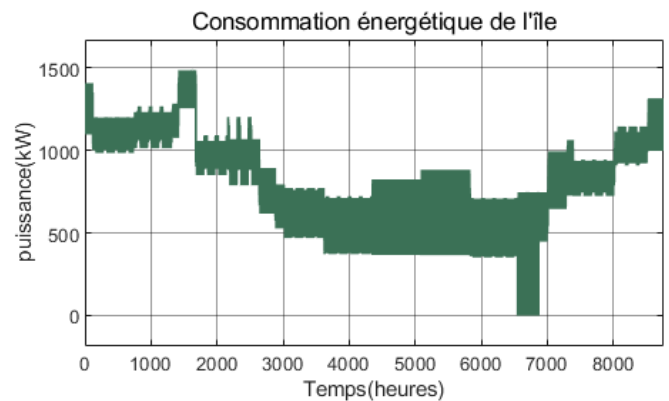


FIG. 1. Variation de la puissance électrique demandée

2. PRÉSENTATION DU MICRO-RÉSEAU HYBRIDE

Le micro-réseau étudié se compose de trois parties : la première concerne la production d'énergie (sources renouvelables et générateurs diesel existants) et la charge de l'île, la deuxième intègre le système de stockage d'énergie (batteries et hydrogène), et la troisième représente le bloc de gestion de l'énergie. Le schéma fonctionnel de ce micro-réseau est représenté dans la figure 2. Chaque composant a été modélisé à l'aide d'approches simplifiées, décrites en détail dans un précédent travail [3]. Cette modélisation met l'accent sur les flux de puissance : les puissances positives représentent la production d'énergie, tandis que les flux négatifs reflètent la consommation. Les turbines éoliennes et hydroliennes sont modélisées à partir de courbes d'extraction de puissance spécifiques, basées sur leurs caractéristiques techniques. Les panneaux photovoltaïques intègrent une stratégie de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Et les générateurs diesel ont été modélisés en tenant compte de leur consommation spécifique en carburant. Le système de stockage inclut un pack de batterie lithium-ion qui permet des échanges bidirectionnels de puissance, dont le vieillissement a également été pris en compte dans la modélisation. Ainsi qu'un système de stockage d'hydrogène basé sur des technologies PEM (membrane échangeuse de protons). Ce dernier comprend une pile à combustible, un électrolyseur, un réservoir d'hydrogène et un compresseur. Les différents éléments ont été dimensionnés dans des précédents travaux [3], les puissances et capacités des éléments sont indiqués sur 2 Ce dimensionnement prend en compte une production d'hydrogène suffisante pour alimenter la mobilité maritime de l'île où l'on considère que les navires desservant

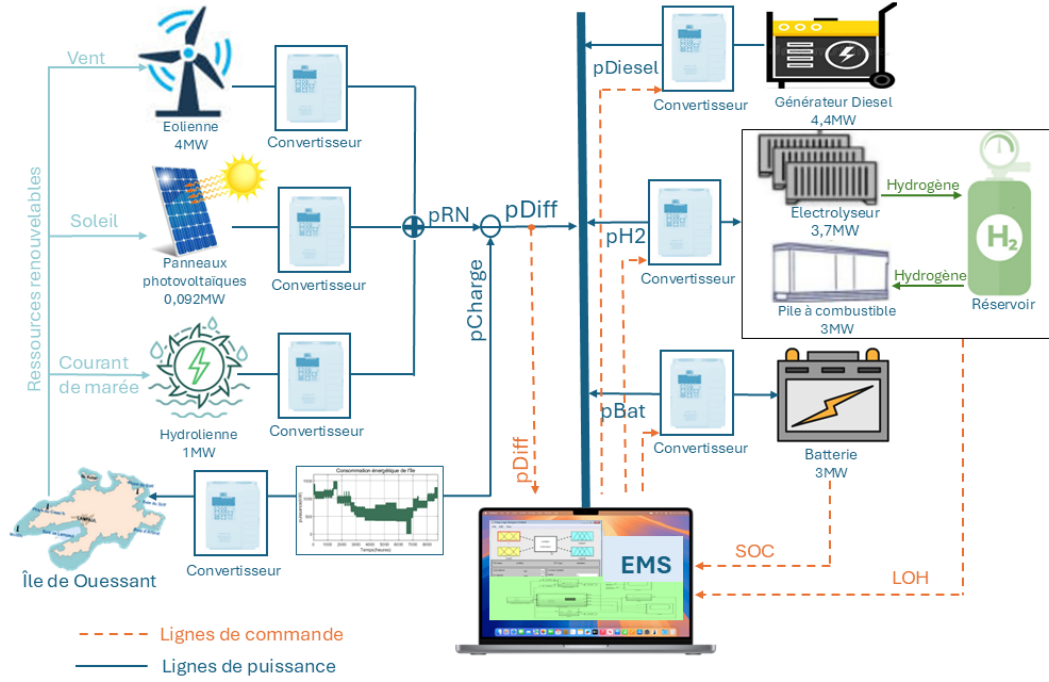


FIG. 2. schéma fonctionnel du micro réseau

l'île sont alimentés par des topologies hybrides [4] utilisant des piles à combustible et viennent se ravitailler en hydrogène grâce à la production de l'île. A cette fin un prélèvement journalier de 300 kg d'hydrogène est considéré dans la simulation. La pile à combustible et l'électrolyseur sont supposés utiliser une topologie "multi-stack" telle que décrite dans [5]. Ceci permet de faire fonctionner ces systèmes à différents niveaux de puissance sans trop affecter leur vieillissement et leur comportement. On suppose aussi que ces systèmes sont associés à des systèmes de stockage énergétiques rapprochés "court terme" comme des super-capacités. Ces systèmes de stockage qui permettent de lisser les fluctuations rapides de puissance sur les systèmes de conversion d'hydrogène, comme dans [5] pour des hydroliennes, qui ne sont pas représentés finement dans cette modélisation. La troisième partie du micro-réseau, consacré à la gestion de l'énergie, repose sur l'utilisation d'une commande floue pour optimiser les flux énergétiques. Les détails de cette approche seront présentés dans la section suivante.

3. STRATÉGIE DE GESTION D'ÉNERGIE

La stratégie de gestion d'énergie à base de règles utilisée dans le précédent travail [3], bien que satisfaisante dans certains scénarios, est limitée. Notamment cette stratégie manque de flexibilité face aux variations imprévues de la demande ou de la production [6], réduisant ainsi son efficacité à long terme dans des systèmes complexes. Pour y remédier, une méthode basée sur la logique floue est proposée.

3.1. La commande basée sur la logique floue

La stratégie de gestion d'énergie élaborée repose sur une commande floue de type Mamdani qui permet une approche multi entrées multi sorties (MIMO) [7]. Cette approche a pour objectif de maintenir l'état de charge de la batterie (SOC) dans des limites sûres, de réduire la consommation du générateur diesel et de maximiser l'indépendance énergétique. La commande floue utilise des sous-ensembles flous, où le degré d'appartenance des variables est exprimé de manière graduelle via des fonctions d'appartenance. Cette méthode offre une flexibilité

dans la gestion des flux énergétiques, assurant une réponse adaptée aux variations des conditions opérationnelles.

Le bloc de commande floue est composé de trois entrées et deux sorties détaillées dans le tableau 2. Les entrées sont respectivement l'état de charge des batteries, SOC, le niveau relatif d'hydrogène, LOH, et la puissance échangée par les batteries sur le réseau, pBat. La figure 3 représente les fonctions d'appartenance utilisées. Chaque variable d'entrée et de sortie est associée à plusieurs fonctions d'appartenance (MFs), utilisant principalement des trapèzes et triangles pour représenter les états tels que "Bas", "Moyen", "Haut" ou encore "Négatif", "Zéro", et "Positif". Ces fonctions permettent de modéliser les transitions entre les différents niveaux des variables. Par exemple, pour l'état de charge de la batterie (SOC), les niveaux considérés sont "Bas", "Moyen" et "Haut", et pour la puissance délivrée ou consommée par la batterie (pBat), elles couvrent les états "Négatif", "SNégatif", "Zero", "SPositif", et "Positif". Une base de règles floues a été définie pour traduire les relations entre les entrées et les sorties du système. Par exemple, lorsque le niveau d'hydrogène dans le réservoir (LOH) est "Bas", l'état de charge de la batterie (SOC) est "Bas" et la différence entre la puissance renouvelable produite et la charge de l'île (pDiff) est "L", la puissance de la batterie (pBat) est maintenue à "Zéro", tandis que le générateur diesel (pDiesel) intervient.

Les règles de la commande floue, présentées dans le Tableau 1,

TABLEAU 1. Variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou

Type	Variable	Unité	Intervalle
Entrées	LOH (niveau d'hydrogène)	%	[10 , 90]
	SOC (état de charge de la batterie)	%	[10 , 90]
	pDiff (différence de puissance)	MW	[-1.7 , 4.5]
Sorties	pBat (puissance de la batterie)	MW	[-1.6 , 1.6]
	pDiesel (puissance du diesel)	MW	[-1.5 , 0]

ont été conçues de manière à privilégier l'utilisation des sources d'énergie renouvelables — en particulier la batterie et le système hydrogène — tout en limitant autant que possible le recours au générateur diesel. Ces règles, telles que formulées dans le Tableau 1, sont détaillées et expliquées ci-dessous :

Lorsque la différence entre la puissance renouvelable produite et la charge de l'île (P_{diff}) est très faible (L)

- SI le niveau d'hydrogène (LOH) est Bas et l'état de charge de la batterie (SOC) est Bas ALORS la puissance batterie est nulle ($p_{Bat} = \text{zero}$) et la puissance Diesel est fortement activée ($p_{Diesel} = \text{negatif}$). Cette règle permet d'éviter une forte décharge de la batterie lorsqu'elle est peu chargée et qu'un déficit énergétique est présent
- Pour des SOC moyen ou haut, la batterie prend le relai avec deux niveaux de puissance, niveau moyen : $p_{Bat} = \text{snegatif}$ quand le SOC est moyen ou niveau haut : negatif lorsque le SOC est haut, en gardant le diesel éteint : $p_{Diesel} = \text{zero}$.

Lorsque P_{diff} est légèrement faible (SL)

- SI le niveau d'hydrogène (LOH) est Moyen, l'état de charge de la batterie (SOC) est Moyen ALORS la batterie se décharge doucement ($p_{Bat} = \text{snegatif}$) et le générateur diesel reste éteint ($p_{Diesel} = \text{zero}$). Le système réagit à un léger déficit en sollicitant la batterie, sans activer le diesel.
- Lorsque SOC est Bas, la batterie n'est pas sollicitée ($p_{Bat} = \text{zero}$); le diesel est activé uniquement si le niveau d'hydrogène est Bas ($p_{Diesel} = \text{negatif}$), sinon il reste éteint.

Lorsque P_{diff} est équilibré (Z)

- Dans tous les cas, les actions sont identiques : $p_{Bat} = \text{zero}$, $p_{Diesel} = \text{zero}$. Cela traduit un équilibre parfait entre production renouvelable et la consommation énergétique de l'île.

Lorsque P_{diff} est légèrement positif (SH)

- SI LOH = Bas et SOC = Bas, ALORS $p_{Bat} = \text{positif}$, $p_{Diesel} = \text{zero}$. On privilégie toujours la recharge de la batterie tout en gardant le générateur diesel éteint. Lorsque cette dernière est pleine, l'excès d'énergie est redirigé vers la production d'hydrogène.

Lorsque P_{diff} est fortement positif (H)

- SI SOC = Bas, ALORS $p_{Bat} = \text{positif}$. Toujours on privilégie la recharge de la batterie et lorsque elle est pleine, la puissance batterie est nulle ($p_{Bat} = \text{zero}$), l'excès d'énergie est redirigé vers la production d'hydrogène.

Comme illustré dans les règles, la commande comprend deux variables de sortie : p_{Bat} (puissance de la batterie) et p_{Diesel} (puissance du générateur diesel), toutes deux directement pilotées par le contrôleur flou. En revanche, la puissance du système hydrogène, notée p_{H2} , est gérée en mode esclave. Cela signifie que son fonctionnement s'ajuste automatiquement en fonction des consignes données à la batterie et au générateur diesel, afin de maintenir l'équilibre énergétique global du micro-réseau à chaque instant. Cette solution technologique permet de réduire les contraintes mécaniques et thermiques, limitant ainsi le vieillissement prématuré et les dommages potentiels. De plus, dans ces simulations, le pas de temps retenu est d'une heure, ce qui implique que les dynamiques rapides et transitoires de l'électrolyseur et de la pile à combustible ne sont pas modélisées en détail. Cette structure hiérarchique, avec une commande floue directe pour la batterie et le diesel, et un

contrôle esclave pour l'hydrogène, simplifie la stratégie globale tout en assurant une coordination efficace entre les différentes sources d'énergie du micro-réseau.

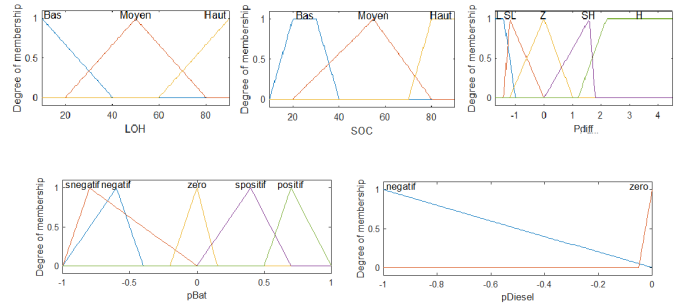


FIG. 3. Fonctions d'appartenance du contrôleur flou

4. ANALYSE ET RÉSULTATS DE SIMULATION

La figure 4 présente les résultats de simulation obtenus à l'aide du système d'inférence floue appliqué à la gestion énergétique du micro-réseau isolé. Les courbes affichées décrivent l'évolution, en fonction du temps (en heures), des principales puissances échangées entre les composants du système :

- **p_{Diff}** (en noir) : différence entre la demande énergétique de l'île et sa production renouvelable;
- **p_{Bat}** (en rouge) : puissance échangée avec la batterie (positive en charge, négative en décharge);
- **p_{H2}** (en orange) : puissance échangée avec le système de stockage hydrogène;
- **p_{Diesel}** (en vert clair) : puissance fournie par le générateur diesel.

Ces résultats permettent d'évaluer le comportement dynamique du contrôleur flou en réponse aux déséquilibres de puissance (p_{Diff}) et à la disponibilité de l'énergie dans le stockage (SOC de la batterie et LOH du réservoir d'hydrogène). Contrairement à une stratégie à base de règles fixes comme celle utilisée dans [3], l'approche proposée ici repose sur une logique souple et continue. Les grandeurs de commande ne changent pas de façon brutale, mais sont ajustées progressivement en fonction des niveaux de production et de puissance demandée par la charge ainsi que de l'état des systèmes de stockage, selon les fonctions d'appartenance définies. Cela permet une meilleure flexibilité dans la gestion de l'énergie, ainsi qu'une sollicitation plus raisonnée des sources pilotables.

En situation de déficit énergétique (lorsque p_{Diff} est négatif), le contrôleur flou évalue la meilleure source de compensation : activer la batterie, le système hydrogène ou le générateur diesel, en tenant compte du niveau de charge de la batterie (SOC) et de la quantité d'hydrogène disponible (LOH).

À l'inverse, lorsqu'il y a un excédent de production d'énergie renouvelable (p_{Diff} est positif), le système redirige cet excédent vers le mode de stockage le plus approprié, selon l'état des différents stockages disponibles.

Réponse du système face à une perturbation de charge

Pour évaluer la robustesse de la stratégie de commande floue, une perturbation aléatoire a été introduite dans la simulation. Plus précisément, une variation aléatoire, comprise entre -1000 kW et +1000 kW, est appliquée une fois toutes les 24 heures sur la charge du réseau initiale. Cette fluctuation génère un déséquilibre ponctuel entre la production et la consommation, simulant un événement inattendu.

TABLEAU 1 : BASE DE RÈGLES DE LOGIQUE FLOUE PROPOSÉE

Lorsque P_{diff} est **L**

Sorties (pBat, pDiesel)			
SOC \ LOH	Bas	Moyen	Haut
Bas	(zero, negatif)	(zero, zero)	(zero, zero)
Moyen	(negatif, zero)	(snegatif, zero)	(snegatif, zero)
Haut	(negatif, zero)	(negatif, zero)	(negatif, zero)

Lorsque P_{diff} est **SL**

Sorties (pBat, pDiesel)			
SOC \ LOH	Bas	Moyen	Haut
Bas	(zero, negatif)	(zero, zero)	(zero, zero)
Moyen	(snegatif, zero)	(snegatif, zero)	(snegatif, zero)
Haut	(snegatif, zero)	(snegatif, zero)	(snegatif, zero)

Lorsque P_{diff} est **Z**

Sorties (pBat, pDiesel)			
SOC \ LOH	Bas	Moyen	Haut
Bas	(zero, zero)	(zero, zero)	(zero, zero)
Moyen	(zero, zero)	(zero, zero)	(zero, zero)
Haut	(zero, zero)	(zero, zero)	(zero, zero)

Lorsque P_{diff} est **SH**

Sorties (pBat, pDiesel)			
SOC \ LOH	Bas	Moyen	Haut
Bas	(positif, zero)	(spositif, zero)	(spositif, zero)
Moyen	(spositif, zero)	(spositif, zero)	(spositif, zero)
Haut	(zero, zero)	(zero, zero)	(zero, zero)

Lorsque P_{diff} est **H**

Sorties (pBat, pDiesel)			
SOC \ LOH	Bas	Moyen	Haut
Bas	(positif, zero)	(positif, zero)	(positif, zero)
Moyen	(spositif, zero)	(positif, zero)	(positif, zero)
Haut	(zero, zero)	(zero, zero)	(zero, zero)

Le système d'inférence floue réagit de manière efficace à la perturbation, en mobilisant les ressources de façon cohérente et adaptée. Aucun dysfonctionnement ni déséquilibre prolongé n'est observé, ce qui confirme la bonne tenue de la stratégie face à ce type d'événement. Cette stratégie hiérarchisée démontre la capacité du système flou à s'adapter dynamiquement à des perturbations aléatoires, tout en optimisant l'utilisation des ressources et en limitant le recours au diesel. La continuité de service est ainsi maintenue sans surcharge d'un composant unique, assurant la stabilité et la flexibilité du système, même en conditions imprévues. Les résultats obtenus avec la stratégie de commande floue en présence de perturbations montrent des performances globalement supérieures à celles de la stratégie basée sur des règles.

Comparaison de résultats obtenus

Afin d'évaluer les performances des différentes stratégies de gestion de l'énergie, une comparaison a été réalisée entre la commande floue et la stratégie à base de règles présentée dans [3], en conservant le même profil de charge et les mêmes ressources renouvelables disponibles. La stratégie à base de règles vise à couvrir la totalité des besoins énergétiques de l'île uniquement à partir de sources 100% renouvelables. Avec cette approche, la production annuelle d'hydrogène atteint 120,8 tonnes en conditions normales, et 120,2 tonnes en présence de perturbations, tout en maintenant une empreinte carbone nulle. En revanche, la commande floue a pour objectif de réduire significativement les émissions de CO₂ de l'île de Ouessant, actuellement estimées à environ 1600 tonnes par an [2], tout en produisant l'hydrogène nécessaire à la mobilité navale. Cette stratégie permet d'augmenter la production d'hydrogène jusqu'à 124,1 tonnes en conditions nominales, et 123,9 tonnes en présence de perturbations. Cependant, cette amélioration s'accompagne de l'utilisation partielle de diesel, ce qui génère respectivement 92,43 tonnes et 98,93 tonnes de CO₂ par an. Il est important de souligner qu'en aucun cas le diesel n'est utilisé pour la production d'hydrogène dans cette stratégie. Ces résultats, présentés dans le Tableau 2, montrent que la commande floue implique un compromis environnemental lié aux émissions résiduelles de CO₂ et offre une meilleure efficacité de conversion et d'exploitation des ressources, notamment dans des conditions perturbées.

TABLEAU 2. Comparaison des performances selon les stratégies de contrôle

Stratégie de contrôle	H ₂ produit [tonnes]	CO ₂ émis [tonnes]
Base de règles	120.8	0.0
Base de règles avec perturbation	120.2	0.0
Commande floue	124.1	92.43
Commande floue avec perturbation	123.9	98.93

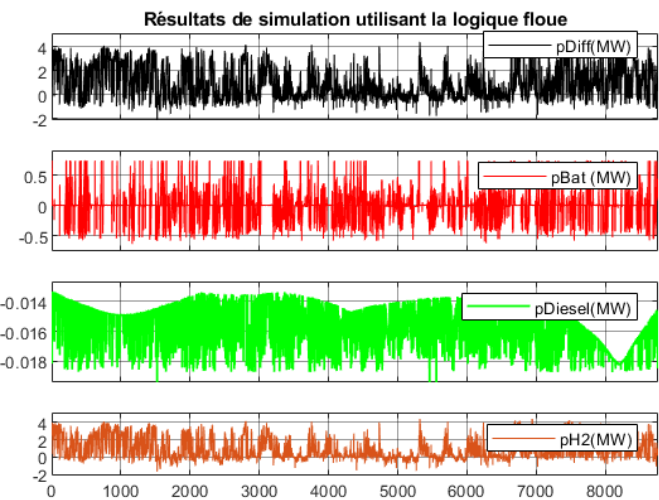


FIG. 4. Résultats de simulation utilisant la logique floue

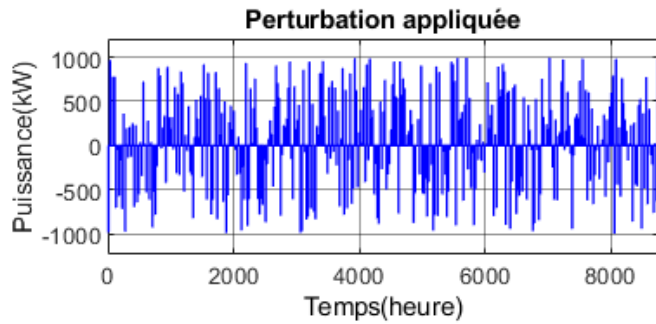


FIG. 5. La perturbation appliquée au micro-réseau

based energy management for isolated microgrid using meta-heuristic optimization algorithms. *Applied Energy*, 335, 120771.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La logique floue présente une solution adéquate pour l'optimisation des systèmes énergétiques hybrides, notamment dans des contextes caractérisés par une forte incertitude, tels que la variabilité des ressources renouvelables et des profils de charge. Elle permet un fonctionnement souple et robuste, mais dépend fortement du choix des paramètres, notamment des fonctions d'appartenance (MFs) et des règles d'inférence. Pour optimiser ces paramètres de manière efficace tout en respectant la logique floue initiale, un algorithme d'optimisation : l'algorithme de recherche gravitationnelle (GSA) sera intégré dans de prochains travaux. Afin de limiter la complexité et de réduire les temps d'exécution liés à l'optimisation de plusieurs paramètres, l'ajustement sera focalisé exclusivement sur les MFs des sorties du contrôleur flou. La théorie floue souligne que les variations sur les conséquents (les sorties) ont un impact plus significatif sur les performances que les modifications des antécédents (les entrées)[10]. Ce travail est en cours et vise à améliorer l'efficacité du système hybride en optimisant ces paramètres critiques du contrôleur flou.

6. RÉFÉRENCES

- [1] T.El Tawil, "On sizing and control of a renewables-based hybrid power supply system for stand-alone applications in an island context", *Université de Bretagne occidentale - Brest*, 2018
- [2] SDEF, MAirie de Ouessant, ICE, Interreg "L'Energie Et Les Energies Renouvelables A Ouessant", *Marie de Ouessant*, 2021.
- [3] Abderrahmane, Ferial, et al. "Evaluation of Energy Options for Island Communities : A Case Study on Ushant." *International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems (Electrimacs 2024)*. 2024.
- [4] Abderrahmane, Ferial, et al. "Comparisons of Different Propulsion Topologies of Service Ships for Islands." *The 6th International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering (REEE 2023)*. Vol. 433. 2023.
- [5] Trabelsi, Mohamed, et al. "Joint coordination of optimal power management and energy storage system sizing for a full-scale marine current turbine considering microgrid integration constraint." *Journal of Energy Storage* 52 (2022) : 104792.
- [6] Zia, M. F., Elbouchikhi, E., & Benbouzid, M. (2018). Microgrids energy management systems : A critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied energy*, 222, 1033-1055
- [7] Mamdani, E. H. (1974, December). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. In *Proceedings of the institution of electrical engineers* (Vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588). IEE.
- [8] Salic, Tom. *Modélisation multiphysique d'éoliennes offshore flottantes en vue d'optimiser leur contrôle/commande en termes d'extraction d'énergie et de stabilité de la plateforme*. Diss. Université de Bretagne occidentale-Brest, 2022.
- [9] Guilbert, D., & Vitale, G. (2020). Improved hydrogen-production-based power management control of a wind turbine conversion system coupled with multistack proton exchange membrane electrolyzers. *Energies*, 13(5), 1239.
- [10] Rodriguez, M., Arcos-Aviles, D., & Martinez, W. (2023). Fuzzy logic-