

Vers des micro-réseaux intelligents plus résilients : simulation, modélisation des défauts et stratégies de diagnostic

Xavier SIDAMBAROMPOULÉ, Bakhta FADHIL

Univ Angers, LARIS, SFR MATHSTIC, F-49000 Angers, France

RESUME – Les micro-réseaux intelligents représentent une option intéressante pour intégrer les énergies renouvelables et répondre aux défis liés à la transition énergétique. Cependant, leur complexité croissante et l'interconnexion des composants les rendent vulnérables à divers types de défaillances. Ces dernières peuvent compromettre la continuité de service et réduire l'efficacité des systèmes, ce qui pose des défis majeurs en matière de fiabilité et de sûreté de fonctionnement. Cet article propose de mettre en place des algorithmes de détection de pannes par une étude numérique. Un micro-réseau autonome est modélisé et des défaillances couramment rencontrées lui sont appliquées. Des réponses qualifiées de signatures sont alors détectées par l'algorithme qui alerte d'une panne en cours. L'originalité de ce travail réside dans la modélisation conjointe d'une architecture énergétique hybride (batterie + hydrogène) et l'implémentation de détections de différentes défaillances rapides, illustrant une démarche réaliste orientée vers des applications autonomes.

Mots-clés – Micro-réseaux intelligents, détection de défauts, sûreté de fonctionnement, fiabilité, simulation, énergie renouvelable.

1. INTRODUCTION

Les smartgrids, ou réseaux intelligents, offrent une solution aux défis liés à la transition énergétique et à l'intégration des énergies renouvelables. Ces systèmes diffèrent des réseaux traditionnels par leur structure décentralisée, et offrent une plus grande souplesse pour relever le défi de la gestion des énergies intermittentes, dont la part augmente dans le mix énergétique. Toutefois, ces systèmes, plus complexes que les réseaux traditionnels, sont d'autant plus vulnérables aux pannes, ce qui nuit à leur fiabilité et à leur sécurité opérationnelle.

Ces défaillances, qu'elles soient d'origine électrique ou mécanique, peuvent entraîner des arrêts de fonctionnement et une mauvaise performance des panneaux photovoltaïques, des convertisseurs de puissance ou encore des systèmes de stockage. Il est donc crucial d'assurer une identification rapide et efficace des défauts pour maintenir la continuité de service.

Ce travail propose une modélisation des défaillances dans un micro smartgrid autonome et des techniques de détection de défauts des composants le constituant. La modélisation est réalisée à l'aide de MATLAB Simulink, et les simulations incluent des scénarios permettant d'identifier des signatures électriques liées aux défauts rencontrés le plus couramment.

2. ÉTAT DE L'ART

Les smartgrids, de part leurs aspects décentralisés, intelligents et communicants, disposent de composants non présents sur les réseaux électriques traditionnels. Ces composants additionnels augmentent le risque de défaillances du réseau et donc peuvent impacter la continuité de service. Un des leviers employé pour pallier à ce problème est l'utilisation de systèmes de stockage de l'énergie. Ils prennent le relais des systèmes de production renouvelables (principalement éolien ou photovoltaïque), en cas de défaillance, voire en cas de production insuf-

fisante. Le stockage permet également de répondre aux besoins énergétiques déphasés de la période de production : nuit, mauvaises conditions météorologiques ou hiver [1].

Les panneaux photovoltaïques (PV), qui constituent l'essentiel des productions d'énergies renouvelables des smartgrids, sont principalement concernés par des pannes liées aux cellules photovoltaïques [2]. Lorsque celles-ci ont un défaut, cela induit des pannes de type courts-circuits/circuits ouverts qui vont réduire les performances du panneau affecté, et donc de la chaîne (string) toute entière.

L'utilisation de multiples sources d'énergies, inhérente à la nature même des smartgrids, requiert l'utilisation de convertisseurs de puissance [3]. Ils permettent notamment le fonctionnement actif du réseau, grâce aux systèmes de stockage et aux charges pilotables [4]. La fiabilité des convertisseurs est principalement liée aux composants à semi-conducteurs et aux capacités [5, 6]. Ces derniers constituant l'articulation entre les différents sous-systèmes du smartgrid, leur fiabilité est synonyme d'un bon fonctionnement du smartgrid.

Dans ce contexte, la détection des défauts revêt une importance capitale pour limiter les interruptions de service et optimiser la gestion des micro-réseaux. Les approches modernes tendent à s'appuyer sur des algorithmes de diagnostic automatisés, qui offrent une précision et une rapidité de détection de la défaillance [2].

3. MÉTHODOLOGIE

3.1. Architecture du micro-réseau modélisé

Le micro-réseau isolé modélisé dans cette étude, schématisé en Figure 1, est conçu pour répondre aux besoins énergétiques d'une maison résidentielle habitée par quatre personnes. Avec une consommation quotidienne moyenne de 52 kWh [7], le système doit garantir une autonomie énergétique, même en cas d'absence prolongée de production solaire ou de variations saisonnières marquées. Le champ photovoltaïque, élément central du système, est dimensionné pour produire suffisamment d'énergie afin de couvrir les besoins quotidiens de la maison tout en rechargeant les batteries de stockage. La configuration des modules photovoltaïques, connectés en série et en parallèle, permet de maintenir une production suffisante, même en présence de défauts comme l'ombrage partiel ou la perte partielle de strings.

Les batteries assurent un rôle essentiel dans l'équilibre production/consommation de ce smartgrid isolé. Elles ont été dimensionnées pour assurer une autonomie énergétique de 48 heures sans apport photovoltaïque, garantissant ainsi une continuité de service en cas de faible ensoleillement ou de défaillances dans la production solaire. Pour enrichir ce système, un électrolyseur et une pile à combustible ont été intégrés pour gérer les surplus de production. En période estivale, lorsque la production solaire dépasse les besoins de l'habitation et que les batteries sont pleinement chargées, l'électrolyseur convertit le

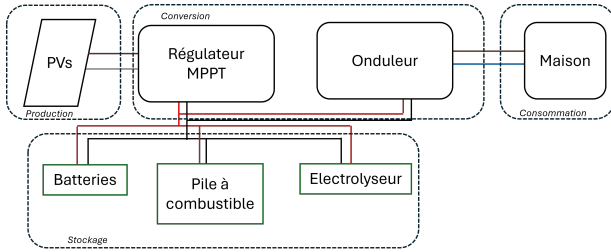


FIG. 1. Schéma de l'architecture du smartgrid étudié

surplus énergétique en hydrogène, qui est stocké pour un usage ultérieur. En hiver, lorsque l'ensoleillement est insuffisant et que les batteries sont déchargées, la pile à combustible utilise l'hydrogène stocké en été pour produire de l'électricité, garantissant ainsi de couvrir les besoins électriques de la maison.

3.1.1. Production d'énergie

Pour répondre aux besoins énergétiques du micro-réseau quotidiens (environ 190 kWh/jour) dans les scénarios de conditions hivernales, 10 strings de 19 panneaux de 200 Wc ont été modélisés à l'aide du bloc *PV Array*. Cet assemblage permet d'atteindre une tension au niveau du bus continu d'environ 600 V, nécessaire pour alimenter l'onduleur triphasé 230 V/400 V - 50 Hz. Les modules simulés sont sensibles à l'irradiance et à la température, mais seule la variation d'irradiance est simulée dans cette étude. La température est fixée à 25°C pour tous les scénarios. Un convertisseur boost est placé en aval de l'assemblage de panneaux. Son rapport cyclique est régulé par un algorithme de conductance incrémentale pour assurer une puissance maximale, quel que soit l'éclairement incident.

L'installation modélisée comporte également une pile à combustible (PAC), modélisée à partir du bloc *Fuel cell stack*, de type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) qui vient en renfort des panneaux lorsque l'éclairement est insuffisant. Cette PAC d'une puissance de 6 kW, correspondant à la puissance crête de la consommation d'un foyer, est connectée au bus de tension au travers d'un convertisseur boost, régulé par un algorithme de conductance incrémentale pour maximiser la production électrique. Il puise l'hydrogène dans un réservoir rempli par l'électrolyseur.

3.1.2. Stockage

Le stockage est assuré par deux composants avec des constantes de temps différentes : la batterie et l'électrolyseur. La batterie, de type lithium-ion, permet un stockage journalier en accumulant de l'énergie la journée et en la restituant la nuit. Elle est reliée au bus de tension DC par un convertisseur buck-boost bi-directionnel. Le contrôle des cycles de charge / décharge est assuré par un contrôleur PI qui bascule le mode de fonctionnement de la batterie en fonction de la différence entre une tension de référence et la tension de bus DC. Lorsque la différence est positive, le régulateur donne une consigne de courant positive, ce qui décharge la batterie. Lorsqu'elle est négative, la batterie se recharge. Une consigne supplémentaire est implémentée pour éviter une décharge en dessous de 20%, qui pourraient endommager la batterie.

L'électrolyseur va, quant à lui, utiliser le surplus de production (essentiellement en saison estivale) pour produire de l'hydrogène qui sera converti en électricité lorsque le gisement solaire sera insuffisant. L'hydrogène produit est stocké dans un réservoir connecté à la pile à combustible. L'électrolyseur est alimenté lorsque la puissance produite par les PV est supérieure à la consommation de la maison et lorsque la batterie est pleinement chargée.

Ces éléments de stockage permettent d'assurer une continuité de service en cas de défaillance sur la partie production.

3.1.3. Consommation

Pour connecter l'habitation à la production d'énergie, nous avons fait le choix d'utiliser un onduleur triphasé à commande vectorielle. La consommation est considérée comme étant équitablement répartie sur les trois phases avec un facteur de puissance unitaire.

Le profil de charge, défini comme représentatif de la consommation électrique en France [7], est représenté en Figure 2.

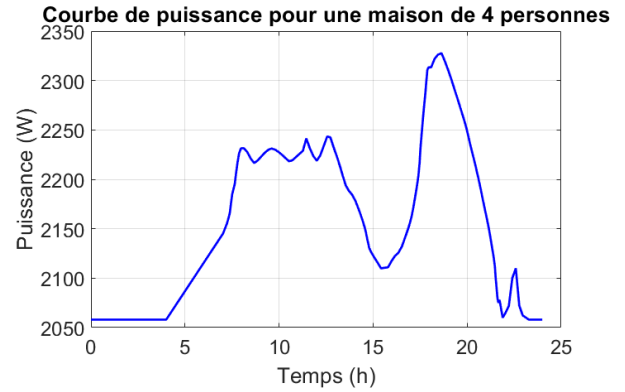


FIG. 2. Évolution temporelle de la charge électrique consommée par l'habitation

3.2. Modélisation des défaillances

Afin d'évaluer la résilience du smartgrid modélisé, plusieurs défaillances critiques ont été intégrées dans le modèle numérique. Celles-ci visent à représenter les défauts les plus couramment observés dans les installations photovoltaïques et les convertisseurs de puissance, et à étudier leur impact sur la stabilité du système.

Dans le champ PV, une perte de string a été simulée en réduisant dynamiquement le nombre de branches connectées en parallèle. Ce type de défaut peut résulter d'un débranchement, d'un défaut de connexion ou de la dégradation d'un ensemble de cellules. La réponse du système à ce défaut dépend fortement du niveau d'irradiance au moment de son apparition.

Deux types de défauts ont été simulés au niveau du transistor de puissance du convertisseur boost, essentiel à la régulation MPPT du champ PV :

- un court-circuit : modélisé par un interrupteur ouvert en parallèle du transistor, qui se ferme lorsque le défaut est activé.
- Un défaut de circuit ouvert : modélisé par deux interrupteurs, en amont et en aval du transistor, qui sont passants en temps normal et qui s'ouvrent lors de l'activation de la défaillance.

Ces défauts introduisent des signatures électriques bien identifiables (déséquilibres tension/courant, chute de puissance), exploitées dans les algorithmes de détection développés en Section 3.4.

Pour caractériser l'effet des défauts modélisés sur le comportement du micro-réseau, les simulations sont réalisées à différents moments de la journée simulée, correspondant à des niveaux d'irradiance faibles, moyens et élevés.

3.3. Méthodes de détection

Dans le but d'améliorer la résilience du smartgrid autonome étudié, des méthodes de détection automatique ont été développées pour identifier les défaillances simulées en Section 3.2. Ces méthodes visent à reconnaître les signatures électriques anormales associées aux pertes de performance et à déclencher une alerte sans recours à une supervision manuelle.

La Figure 3 présente la tension et la puissance en sortie des PV dans une situation de fonctionnement normal. Vers 6h, lors

de l'apparition du soleil, la tension augmente rapidement pour atteindre une valeur avoisinant les 550 V (soit la tension de 19 panneaux en série à la tension de puissance maximale), et conserve ce niveau de tension tant que le soleil est présent, soit jusqu'à 22h. La puissance va suivre l'évolution de l'irradiance. Ici, le profil d'ensoleillement modélisé ne prend pas en compte de perturbations liées à des passages de nuages ou des variations rapides d'ensoleillement.

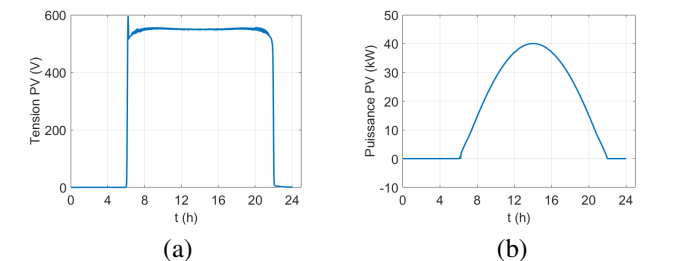


FIG. 3. Évolution temporelle de la tension (a) et de la puissance (b) du panneau - Fonctionnement standard

3.3.1. Détection de perte de string

En cas de perte d'un string, une chute nette de la puissance est observée, comme le montre la Figure 4, non expliquée par les conditions climatiques. Le signal de tension des PV n'est pas perturbé par la perte du string car l'apparition du défaut modélisé est instantanée et parce que l'assemblage en parallèle des strings n'influence pas la tension de tout le champ PV. Un algorithme de détection a été développé en comparant la puissance mesurée avec celle attendue pour une irradiance donnée, à l'aide d'un modèle de référence et en s'assurant qu'il n'y a pas eu de variations importante de la tension des PV. Il va également s'assurer que la tension des panneaux reste cohérente avec la tension de puissance maximale délivrée par un string. Dans une configuration expérimentale, l'information d'irradiance serait obtenue à l'aide d'un pyranomètre.

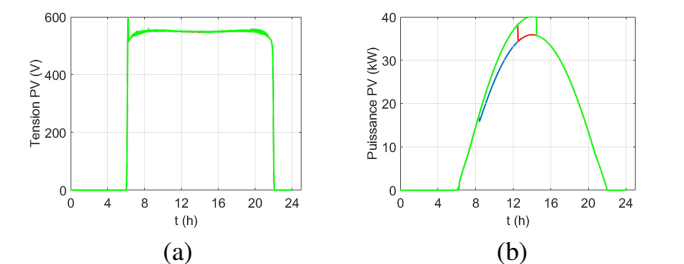


FIG. 4. Évolution temporelle de la tension (a) et de la puissance (b) du panneau - Défaut de perte d'un string intervenu vers 8h (bleu), 12h (rouge) et 15h (vert)

3.3.2. Détection de défauts du transistor du convertisseur boost

Deux types de défauts ont été traités indépendamment par une méthode d'analyse des formes d'onde tension/courant au niveau de la sortie du convertisseur. Concernant le défaut de type court-circuit, son apparition se traduit par une chute de la tension des PV et donc une chute significative de la puissance générée, comme montré en Figure 5. La chute de tension est suivie d'une oscillation persistante, tout comme la puissance, avant d'atteindre une valeur nulle. Le courant quant à lui, continue d'être produit par les panneaux.

L'algorithme se base donc sur une analyse de la tension et du courant. Si une chute brutale de tension, avec une valeur finale inférieure à 10 V, est détectée lorsque le courant est non nul,

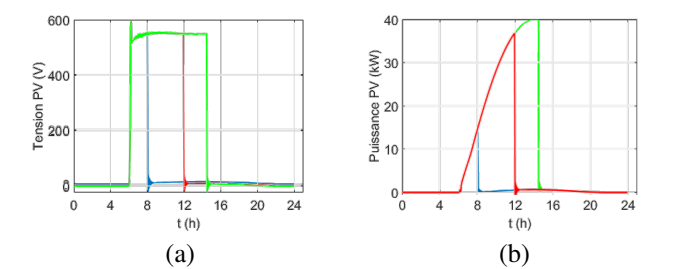


FIG. 5. Évolution temporelle de la tension (a) et de la puissance (b) du panneau - Défaut de court-circuit intervenu vers 8h (bleu), 12h (rouge) et 15h (vert)

alors une alerte de défaut de court-circuit au niveau du convertisseur boost est envoyée.

La Figure 6 montre l'effet du défaut de type circuit ouvert se manifeste par une variation brusque de la tension et du courant. Ces valeurs restent non nulles. La tension augmente jusqu'à la tension du bus DC (soit celle de la batterie lorsqu'elle est connectée au micro-réseau), et induit un très légère évolution (quelques volts pour une tension de 615 V) qui suit celle de l'irradiance. Lorsque cette dernière est nulle (condition de nuit), la tension reste non nulle. Le courant subit lui une décroissance, d'où la perte de puissance observée. La détection de cette défaillance se fait par l'observation conjointe d'un courant non nul et de la tension des PV qui est semblable à la tension de bus.

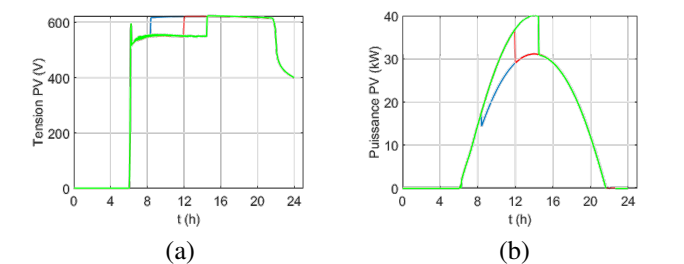


FIG. 6. Évolution temporelle de la tension (a) et de la puissance (b) du panneau - Défaut de circuit ouvert intervenu vers 8h (bleu), 12h (rouge) et 15h (vert)

3.3.3. Algorithmes de détection

L'algorithme de détection des différentes pannes modélisées est présenté en Figure 7. Il prend en compte les trois types de défauts rencontrés lors de ce travail. Il teste les différentes signatures identifiées lors de l'analyse des signaux pour détecter la présence de l'un des défauts.

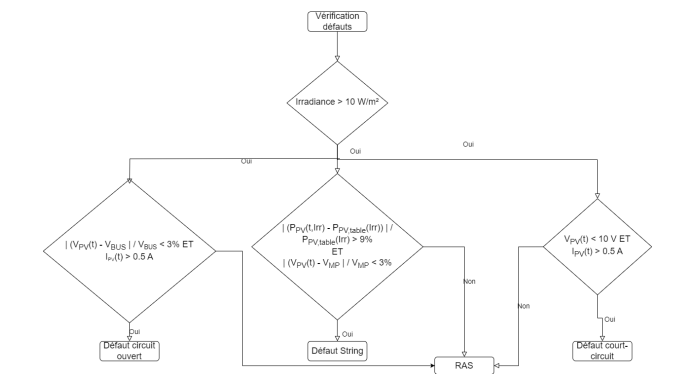


FIG. 7. Algorithme de détection des défauts rencontrés

La détection de la perte de string est effective quelques instants après l'apparition du défaut et permet de générer une alerte.

Les défaillances des défauts au niveau du transistor sont également correctement identifiées lorsqu'elles apparaissent. Les tests réalisés confirment la capacité de l'algorithme à distinguer un fonctionnement sain d'un défaut de string, de court-circuit ou de circuit ouvert au niveau du transistor du convertisseur boost.

Les résultats obtenus montrent que l'algorithme est capable de détecter les trois types de défauts dans un délai court, sans fausse alerte dans les conditions normales de fonctionnement.

Les tests ont été répétés sur plusieurs niveaux d'irradiance afin de vérifier la robustesse des méthodes en conditions variables. Dans l'ensemble des conditions testées, les algorithmes se sont montrés fiables pour les défauts simulés. La sensibilité des seuils reste toutefois un point de vigilance à ajuster lors d'un passage en expérimentation réelle.

La modélisation des défaillances et le développement des méthodes de détection automatique constituent une étape essentielle pour évaluer la robustesse du smartgrid simulé. Il est désormais nécessaire d'analyser les réponses du système face aux différents scénarios de défauts introduits et d'évaluer la performance des algorithmes de détection proposés. La section suivante présente les résultats obtenus à partir des simulations, suivis d'une discussion critique sur leur efficacité et leurs limites.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. Impact des défaillances sur le comportement du micro-réseau

4.1.1. Perte de string photovoltaïque

La perte d'un string a induit une réduction brutale de la puissance générée par le champ photovoltaïque, comme illustré en Figure 4. La chute de puissance observée est directement proportionnelle au niveau d'irradiance au moment du défaut. Lors du pic d'ensoleillement, l'impact est maximal : la puissance délivrée chute d'environ 10%, conformément à la perte d'un string sur les dix disponibles.

À noter que la tension au bus DC reste relativement stable, grâce à l'action compensatrice de la batterie. Ce comportement souligne l'intérêt d'une stratégie de stockage dimensionnée correctement pour absorber les perturbations de production solaire.

4.1.2. Défauts du convertisseur boost

Les défauts de court-circuit sur le transistor du convertisseur MPPT provoquent une chute instantanée de la tension des PV et de la production d'électricité solaire, comme vu sur la Figure 5. En cas d'ouverture permanente du transistor (Figure 6), la régulation de tension des PV n'est plus assurée, mais le courant continue d'être produit. Cela implique une baisse des performances de l'installation (plus de MPPT), mais elle continue à produire, contrairement à un défaut de court-circuit du transistor de puissance.

La présence de systèmes de stockage sur le micro-réseau, permet à la charge de rester correctement alimentée. Cela démontre l'intérêt des solutions de stockage pour permettre une résilience du système en l'absence du réseau électrique.

4.2. Performances des algorithmes de détection

Les algorithmes développés ont été évalués sur les différentes simulations de défauts. La détection de perte de string a été correcte dans les cas simulés, sans fausse détection lors de variations normales d'irradiance. Les défauts du convertisseur boost ont également été détectés avec précision. Les formes d'onde caractéristiques (pics de courant, interruptions de puissance) ont permis une classification fiable entre court-circuit et circuit ouvert. Les signatures identifiées sont suffisamment différentes pour permettre une bonne discrimination entre les anomalies à détecter. Le tableau 1 résume les performances observées des algorithmes de détection pour chacun des défauts simulés. Les temps de détection sont donnés à titre indicatif à partir des chronogrammes, et aucune fausse alerte n'a été enregistrée sur les

scénarios testés.

Les résultats obtenus démontrent l'efficacité des méthodes proposées pour détecter rapidement les défaillances simulées. Cependant, la robustesse de ces approches reste à valider expérimentalement, notamment en intégrant des perturbations réalistes telles que le bruit de mesure ou les imprécisions sur les modèles.

L'utilisation de modèles de machine learning doit également être envisagée pour renforcer la fiabilité des micro-réseaux intelligents, comme le montrent les résultats d'études récentes [8, 9]. Leurs travaux, axés sur des défauts de courts circuits entre lignes et entre lignes et terre, ont montré une très bonne capacité à catégoriser les défauts malgré une présence de bruits sur les signaux, et ce pour différents scénarios de fonctionnement. Le travail réalisé dans notre étude pourrait servir pour l'étiquetage des différentes catégories de défaut, suite à un apprentissage des différentes conditions de fonctionnement. De plus, les capacités des modèles de machine learning à identifier des comportements anormaux du système pourraient être la clef pour lever les verrous scientifiques liés au développement de la maintenance prédictive.

5. CONCLUSIONS

Ce travail propose une approche de modélisation et de détection des défaillances dans un micro-réseau intelligent autonome destiné à l'alimentation d'une habitation résidentielle. À partir d'un modèle numérique construit sous MATLAB Simulink, plusieurs scénarios de défauts réalistes ont été simulés, incluant la perte de strings photovoltaïques et des pannes de composants critiques au sein des convertisseurs de puissance.

L'étude a permis de caractériser l'impact de ces défauts sur le comportement du système autonome, montrant notamment l'importance d'une architecture de stockage robuste pour atténuer les chocs de production. Les méthodes de détection développées, basées sur l'analyse des variations de puissance et des anomalies de tension/courant, ont démontré leur capacité à identifier efficacement les défaillances en temps court, sans fausse alerte dans les situations étudiées.

Les résultats obtenus confirment l'intérêt de coupler la modélisation prédictive des défauts à des stratégies de surveillance adaptées pour renforcer la résilience des smartgrids autonomes. En perspective, un travail expérimental serait nécessaire pour tester les algorithmes proposés dans un environnement réel, en tenant compte des incertitudes de mesure, des fluctuations aléatoires d'ensoleillement et du vieillissement des composants. L'approche proposée se distingue par l'intégration d'une modélisation complète de micro-réseau couplée à une stratégie de détection simple mais efficace. Cette démarche peut servir de base pour le développement de jumeaux numériques dédiés à la surveillance des réseaux énergétiques autonomes. La réalisation d'une maquette de micro-réseau constitue d'ailleurs une des poursuites de ce travail.

TABLEAU 1. Performances des algorithmes de détection pour différents types de défaut simulés

Type de défaut simulé	Signature observée	Méthode de détection	Temps estimé	Fausse alerte	Robustesse
Perte de string PV	Chute nette de puissance, tension stable	Puissance mesurée vs attendue à irradiance constante	≈ 5 s	Aucune	Bonne
Court-circuit transistor boost	Chute tension PV + oscillations	Tension < 10 V avec courant $\neq 0$	≈ 5 s	Aucune	Bonne
Circuit ouvert transistor	Tension $\approx$ bus DC, courant décroissant	Tension ≈ 615 V, courant non nul	≈ 5 s	Aucune	Bonne

6. RÉFÉRENCES

- [1] M. Patin, S. Begot, F. Gustin, and V. Lepiller, “Modélisation d’un système PV, électrolyseur, pile à combustible et batterie pour une application de cogénération dans l’habitat individuel,” in *Symposium de Génie Électrique 2023*, Lille, Jul. 2023. [Online]. Available : <https://actes.sge-conf.fr/2023/pdfs/SO2B/450635ModelisationDunSystemePvlectrolyseurPileCombustibleEtBatteriePourUneApplicationDeCogenerationDansLhabitat.pdf>
- [2] A. E. Labrador Rivas and T. Abrão, “Faults in smart grid systems : Monitoring, detection and classification,” *Electric Power Systems Research*, vol. 189, p. 106602, Dec. 2020. [Online]. Available : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779620304065>
- [3] M. E. T. Souza Junior and L. C. G. Freitas, “Power Electronics for Modern Sustainable Power Systems : Distributed Generation, Microgrids and Smart Grids—A Review,” *Sustainability*, vol. 14, no. 6, p. 3597, Jan. 2022, number : 6 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available : <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/6/3597>
- [4] F. R. Albogamy, S. A. Khan, G. Hafeez, S. Murawwat, S. Khan, S. I. Haider, A. Basit, and K.-D. Thoben, “Real-Time Energy Management and Load Scheduling with Renewable Energy Integration in Smart Grid,” *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1792, Jan. 2022, number : 3 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available : <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/3/1792>
- [5] S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, D. Xiang, L. Ran, and P. Tavner, “An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 3, pp. 1441–1451, May 2011, conference Name : IEEE Transactions on Industry Applications. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/5729810>
- [6] H. Wang and F. Blaabjerg, “Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters—An Overview,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 5, pp. 3569–3578, Sep. 2014, conference Name : IEEE Transactions on Industry Applications. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/6748007/references#references>
- [7] H. Watt, “Consommation électrique moyenne d’un foyer : kwh et prix.” [Online]. Available : <https://www.hellowatt.fr/suivi-consommation-energie/consommation-electrique/moyenne>
- [8] S. Rahman Fahim, S. K. Sarker, S. M. Mueen, M. R. I. Sheikh, and S. K. Das, “Microgrid Fault Detection and Classification : Machine Learning Based Approach, Comparison, and Reviews,” *Energies*, vol. 13, no. 13, p. 3460, Jan. 2020, number : 13 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available : <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/13/3460>
- [9] Z. Wu and X. Lu, “Microgrid Fault Diagnosis Based on Whale Algorithm Optimizing Extreme Learning Machine,” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 19, no. 3, pp. 1827–1836, Mar. 2024. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1007/s42835-023-01670-1>