



HAL
open science

Fiabilité des micro-réseaux isolés avec considération du plan de protection et mode d'opération

M Riou, F Dupriez-Robin, D Grondin, C Le Loup, M Benne, Q. T. Tran

► **To cite this version:**

M Riou, F Dupriez-Robin, D Grondin, C Le Loup, M Benne, et al.. Fiabilité des micro-réseaux isolés avec considération du plan de protection et mode d'opération. Symposium de Génie Electrique, Jul 2021, Nantes, France. hal-03676374

HAL Id: hal-03676374

<https://hal.science/hal-03676374>

Submitted on 23 May 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Fiabilité des micro-réseaux isolés avec considération du plan de protection et mode d'opération

M. Riou¹, F. Dupriez-Robin², D. Grondin³, C. Le Loup¹, M. Benne³, Q. T. Tran²
Entech Smart Energies¹ / CEA Tech² / LE2P Energy Lab³

RESUME – Les micro-réseaux exploitant les énergies renouvelables ont un fort potentiel pour l'électrification des zones rurales éloignées du réseau national. Une intégration importante des énergies renouvelables nécessite un dimensionnement précis afin d'assurer une qualité de service et limiter les indisponibilités dont les causes peuvent être très variées. Dans cet article, nous nous intéressons à deux sources d'indisponibilité majeures que sont les défaillances matérielles sur les moyens de production et de stockage et les défaillances du plan de protection. Une méthode d'analyse de fiabilité a été développée spécifiquement pour les micro-réseaux isolés et est appliquée ici à un projet pour l'alimentation d'un site isolé au Mali. Cette analyse est réalisée vis-à-vis de l'opération du micro-réseau grâce à la simulation dynamique intégrant les algorithmes de gestion d'énergie. Les principaux résultats permettent de comparer la fiabilité de trois configurations de contrôle proposées pour un cas d'étude et un dimensionnement donné.

Mots-clés—Micro-réseaux, microgrid, offgrid, fiabilité, protection, photovoltaïque, groupe électrogène

1. INTRODUCTION

Les micro-réseaux sont en pleine expansion ces dernières années. Il existe des définitions variées, qui les classifient selon leur tailles, leur applications ou selon qu'ils soient interconnectés ou non. Nous nous intéressons dans cet article aux micro-réseaux isolés pour l'alimentation de zones non connectées au réseau national. Des micro-réseaux ont depuis longtemps été utilisés pour alimenter les zones rurales à partir d'énergies fossiles [1]. Le développement des énergies renouvelables fait que ces micro-réseaux intègrent de plus en plus des sources de production à faible empreinte carbone telles que le solaire et l'éolien.

Les intérêts sont multiples. D'une part il y a un fort intérêt environnemental à la production d'électricité à partir de sources renouvelables et la réduction d'émissions de gaz à effet de serre [2].

D'autre part, il y a un intérêt économique à éviter des investissements coûteux dans l'extension et potentiellement le renforcement du réseau national, une réduction des coûts d'opération grâce aux économies de carburant et l'utilisation d'une ressource renouvelable quasiment gratuite, une réduction des coûts de maintenance liée à l'augmentation de la qualité et la fiabilité du réseau, une stabilisation des coûts de l'énergie en limitant la dépendance à des exportations de carburant à un coût volatile, le développement économique avec la création de services grâce à l'accès à l'électricité [2].

Il y'a également un intérêt social à l'électrification des zones rurales en réduisant la précarité énergétique. L'accès à une électricité stable permet d'améliorer les conditions de vie des habitants et la création d'emplois. Une activité et un savoir-faire autour de l'installation et la maintenance de systèmes de production d'énergie renouvelable peut également apparaître et être partagé.

Enfin, les micro-réseaux permettent l'apport d'une électricité fiable comparé à l'alternative de raccordement au réseau national qui peut être sujet à une disponibilité et une qualité réduite, une réduction des pertes sur le réseau de distribution et des problèmes de congestion car la production d'électricité se fait au plus près des sites de consommation.

Ces réseaux ont le potentiel de fournir de l'électricité à des millions de personnes en intégrant des ressources renouvelables locales de plus en plus abordables, telles que l'énergie photovoltaïque, éolienne ou hydraulique [3]. La fiabilité de ces réseaux, plus fragiles du fait de la redondance limitée et la forte variabilité de la ressource et de la demande, est un enjeu majeur. L'analyse de fiabilité des micro-réseaux est très souvent limitée à l'évaluation de l'adéquation production-consommation [4].

Dans cette étude, deux sources d'indisponibilité sont considérées afin d'évaluer la fiabilité d'un micro-réseau isolé :

- La première est l'indisponibilité liée à des pannes sur les composants (contingences). Elle est fortement liée au dimensionnement et à l'opération du système;
- La deuxième est l'indisponibilité liée à une défaillance du plan de protection. Elle est également dépendante de l'opération du système.

La méthode développée est appliquée à un micro-réseau pour l'alimentation d'une zone isolée au Mali. Le cas d'étude est dans un premier temps introduit avant de décrire la méthode d'analyse de fiabilité. Les résultats obtenus pour le cas d'étude sont ensuite présentés avant de conclure.

2. CAS D'ETUDE : LE MICRO-RESEAU DE SANANDO

2.1. Description du projet de micro-réseau

La méthode d'analyse de fiabilité a été appliquée à un micro-réseau en phase de conception, qui sera installé pour alimenter les localités de Sanando-Tissala, situé à une centaine de kilomètres de Bamako. Le projet, facilité par le projet Energising Development (endev) et coordonné par la GIZ conjointement avec l'AMADER et la commune de Sanando, consiste en la mise en place d'une centrale de production pour former un micro-

réseau isolé alimentant les deux sites. Le micro-réseau sera mis en place et opéré par un groupement composé d'Entech SE et Sinergie SA. Actuellement, l'accès public d'électricité n'est pas disponible et les ménages, infrastructures publiques et commerces sont soit démunis d'électricité ou exploitent des solutions individuelles de production d'énergie telles que des groupes électrogènes ou des kits individuels photovoltaïques.



Figure 1: Localisation du projet de micro-réseau

Le projet de micro-réseau consiste en une centrale hybride comprenant des groupes électrogènes (GE), des panneaux photovoltaïques (PV) et un système de stockage électrochimique (BESS). Le synoptique du micro-réseau est illustré en Figure 2.

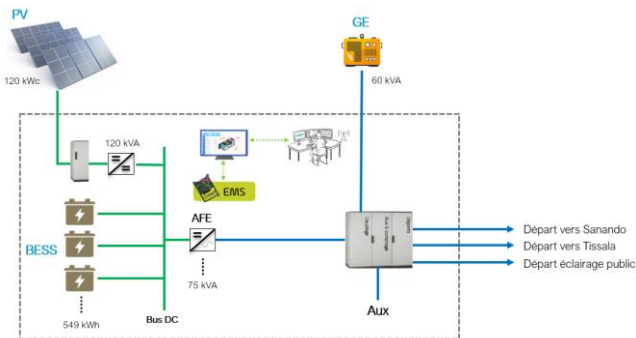


Figure 2: Synoptique du micro-réseau considéré dans l'étude

Le micro-réseau sera distribué en basse tension 400 Vac via trois départs, un départ pour la localité de Sanando, un pour la localité de Tissala et un pour l'éclairage public.

Tableau 1 : Spécifications du micro-réseau de Sanando

Composant	Description
PV	120 kWc / 120 kVA
BESS	549 kWh / 75 kVA
GE	60 kVA (48 kW)

2.2. Description de l'opération du système

L'objectif de l'opération du micro-réseau est la minimisation de la consommation en fuel, la limitation du vieillissement des équipements (en particulier les batteries) et la minimisation du risque de blackout.

2.2.1. Fonctionnalités apportées par le BESS

L'ajout du système de stockage permet l'implémentation de fonctionnalités variées. Ces fonctionnalités sont intégrées à l'automate en charge de la gestion d'énergie du micro-réseau (EMS). Pour le cas d'étude considéré, les fonctions suivantes seront utilisées :

Energy shifting – Cette fonction permet de stocker l'excédent d'énergie solaire la journée pour la redistribuer ultérieurement.

Genset Off – Cette fonction permet de se passer totalement de groupes électrogènes sur le micro-réseau. Elle nécessite le mode grid-forming sur l'onduleur du BESS afin de pouvoir former et stabiliser tension et fréquence.

Spinning Reserve – Cette fonction permet de surveiller la réserve disponible et de gérer le système de stockage afin d'assurer une réserve suffisante.

Peak shaving – Cette fonction permet de faire participer le BESS à la pointe du soir.

Ramp Rate Control – Cette fonction permet de lisser la production solaire en appliquant des consignes de charge/décharge suivant des mesures de rampes de puissance.

Backup – Cette fonction permet de garantir une réserve d'énergie dans les batteries afin de pouvoir alimenter une partie des consommateurs en cas de blackout.

2.2.2. Configurations de grid-forming

Pour un micro-réseau isolé, il faut au minimum avoir un élément du réseau qui soit en charge de maintenir la fréquence et la tension. Cette fonctionnalité est naturellement effectuée par les groupes électrogènes, mais peut également être implémentée sur l'électronique de puissance, on parle alors de convertisseur avec capacité de « grid-forming ». Trois configurations de contrôle peuvent être distinguées selon l'élément responsable du grid-forming (Master) : single master, single-switched master et multimaster. Ces trois modes sont définis par [5].

Single-master - Cette configuration consiste à avoir toujours le même maître sur le réseau. L'avantage de cette configuration est une grande fiabilité (contrôle des groupes éprouvé) et l'absence de transitions compliquées, mais elle ne permet pas d'obtenir un taux d'intégration d'énergie renouvelable très important [5].

Single-switched master - Cette configuration consiste à alterner la tâche de grid-forming entre différents générateurs. Généralement, la tâche de grid-forming est alternée entre les groupes électrogènes et le(s) système(s) de stockage [5]. Cela permet une opération sans GE possible. C'est une architecture prisée pour les micro-réseaux afin d'obtenir un taux d'intégration renouvelable important. Les passages d'un maître à l'autre sont cependant délicats.

Multimaster - Dans cette configuration, plusieurs sources fonctionnent parallèlement en grid-forming. Un exemple peut être typiquement un groupe électrogène fonctionnant en parallèle à un convertisseur, tous deux en grid-forming. L'architecture multimaster dominée par l'électronique de puissance a généralement deux approches pour l'opération en parallèle des unités participant au grid forming [5]. La première approche dite « active current sharing » repose sur des consignes de synchronisation et de courant de la part d'un contrôleur central pour effectuer le dispatch entre les différentes sources, ce qui nécessite une communication entre elles. La seconde approche est un contrôle de type « droop » ne nécessitant pas de

consigne du contrôleur central. L'intérêt de cette configuration et de s'affranchir des problèmes de transition et également d'assurer une redondance en ayant plusieurs maîtres à la fois sur le réseau. Par l'arrêt possible des groupes électrogènes, un niveau d'intégration d'énergie renouvelable important peut être atteint.

3. METHODE D'ANALYSE DE FIABILITE DE MICRO-RESEAUX ISOLES

La méthode d'analyse de fiabilité présentée dans cet article a été développée spécifiquement pour les micro-réseaux isolés et permet la prise en compte de la gestion du système et du plan de protection. La méthode globale est réalisée en trois étapes :

- L'opération du micro-réseau est simulée via une plateforme de simulation développée sur Python avec des modèles énergétiques des différents composants ;
- Les points de fonctionnements sont récupérés de la simulation et une analyse de contingence est réalisée pour évaluer la fiabilité liée aux pannes des composants du micro-réseau ;
- Une analyse de fiabilité du plan de protection est enfin réalisée à partir des mêmes points de fonctionnement

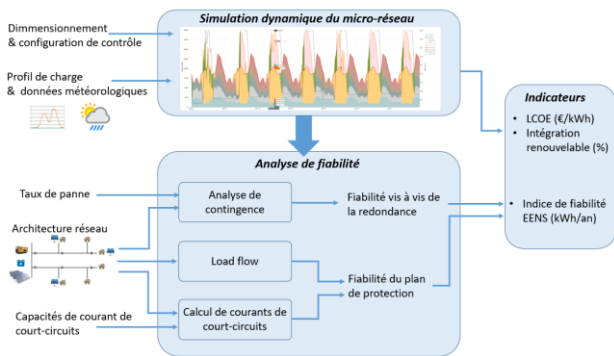


Figure 3: Schéma de la méthode globale

À partir de cette méthode d'analyse, l'indicateur EENS (Expected Energy Not Supplied) est calculé par l'équation (1)

$$EENS_{total} = EENS_{cont.} + EENS_{prot.} \quad (1)$$

Où :

$EENS_{cont.}$ est l'indicateur de fiabilité lié aux pannes

$EENS_{prot.}$ est l'indicateur de fiabilité du plan de protection

3.1. Simulation dynamique du micro-réseau isolé

La première étape consiste à simuler l'opération du micro-réseau. Pour cela, des modèles énergétiques ont été développés sous python pour l'ensemble des composants. Ces modèles permettent de prendre en compte les contraintes principales ainsi que les différentes pertes. L'EMS est également modélisé pour émuler le comportement de l'automate. La simulation est réalisée sur une année au pas de temps de 10 minutes. Les données d'entrées sont :

- Les données satellitaires d'irradiance et de température du site récupérées pour une année à un pas de temps de 10 minutes via la base de données HelioClim-3.
- Les données de consommation du site au pas de temps horaire. Pour le cas d'étude présenté, un profil de consommation a été interpolé à partir d'hypothèses d'évolution des différentes catégories de consommateurs et du taux de raccordement estimé. Un profil pour l'année 10 d'opération du micro-réseau a été utilisé.

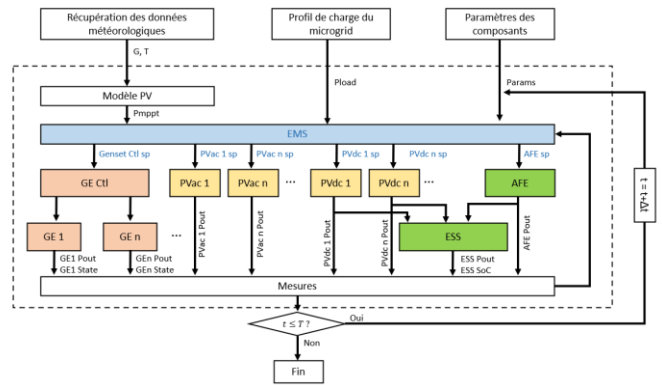


Figure 4: Flowchart de la plateforme de simulation

3.2. Analyse de fiabilité liée aux pannes

La méthode d'analyse de fiabilité liées aux pannes repose sur une méthode d'analyse énumérative de contingences, souvent utilisée pour analyser la fiabilité des réseaux électriques [6].

Les contingences suivantes sont considérées dans l'analyse :

- Panne d'un GE
- Panne d'un générateur PV
- Panne d'un onduleur AFE
- Panne du système de batteries

Chaque élément est modélisé avec un taux de panne cours terme $\lambda_{n,t}$ correspondant à la probabilité de panne de l'équipement n à l'instant t.

La production étant centralisée en un point du micro-réseau, il n'y a pas de possibilité de partiellement fournir les consommateurs en cas de défaillance. L'état de défaillance du micro-réseau est donc binaire et la fiabilité est évaluée à l'échelle du micro-réseau complet et non à chaque point de consommation.

Un état de défaillance du micro-réseau est obtenu lorsque la puissance restante suite à une panne est insuffisante pour alimenter la charge totale ou qu'aucun générateur n'est capable de reprendre la tâche de maître. Les différentes étapes suivies dans la méthode sont décrites sur le diagramme en Figure 5.

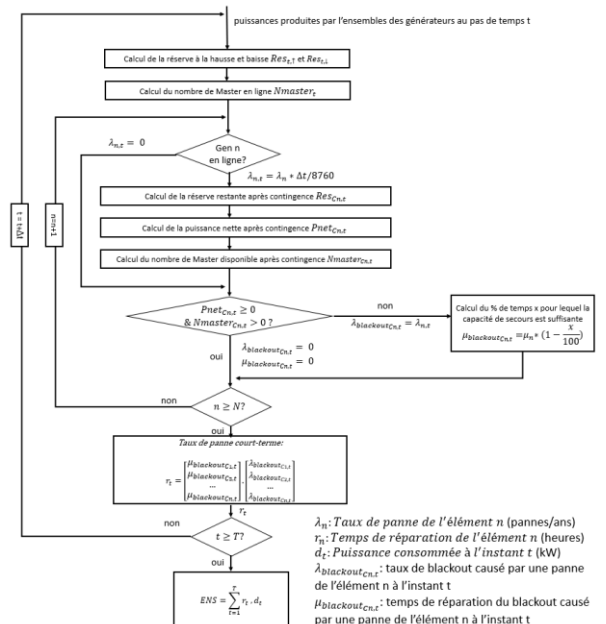


Figure 5: Diagramme de l'analyse de fiabilité liée aux pannes

3.2.1. Calcul des réserves disponibles

Dans un premier temps, les réserves disponibles à la hausse et à la baisse sont calculées pour chaque pas de temps, à partir des séries temporelles de simulation. Il est fait l'hypothèse que peu importe la configuration de grid-forming, la réserve est assurée par le système de stockage (ESS) et le groupe électrogène (GE).

La réserve ESS (à la hausse et à la baisse) est le minimum entre la réserve de puissance disponible sur les onduleurs AFE et la réserve de puissance disponible dans les batteries (puissance pouvant être chargée/déchargée le temps d'arrêter/démarrer un GE).

La réserve GE est calculée par rapport à sa puissance nominale pour le calcul de réserve à la hausse et par rapport à sa puissance minimale de fonctionnement pour le calcul de réserve à la baisse.

3.2.2. Calcul du nombre de Master en ligne

Le nombre d'éléments maîtres du réseau dépend de la configuration de grid-forming. Pour une configuration single-master, le nombre de maîtres correspond au nombre de GE en marche. Pour une configuration single-switched master, le nombre de maîtres correspond au nombre de GE en ligne ou, dans le cas où aucun GE n'est en ligne, au nombre d'onduleurs AFE en ligne. Pour une configuration multimaster, le nombre de maîtres correspond à la somme du nombre de GE et d'onduleurs AFE en ligne.

3.2.3. Méthode d'énumération des contingences

Les étapes suivantes sont réalisées pour chaque élément n du micro-réseau, dont la contingence est considérée.

La réserve disponible après contingence de l'élément n , notée $Pres_{cn,t}$, correspond à la réserve disponible avant contingence, calculée précédemment à laquelle on soustrait la réserve fournie par l'élément en panne $Pres_{en,t}$.

La puissance nette après contingence permet d'estimer si la réserve disponible après contingence est suffisante pour pallier la perte de l'élément n au pas de temps t . Si au pas de temps considéré, l'élément génèrait de la puissance (positif), la réserve à la hausse est considérée. Si au contraire, l'élément absorbait de la puissance (négatif), la réserve à la baisse est considérée.

La perte de l'élément n à l'instant t induit une indisponibilité du micro-réseau dans le cas où :

- La puissance nette après contingence est négative : $P_{net_{cn,t}} < 0$
- Ou le nombre de maîtres restant après contingence est nul : $N_{master_{cn,t}} = 0$

Si l'une de ces conditions est remplie, un temps de réparation $r_{cn,t}$ est attribué. Sinon, aucune indisponibilité n'est comptée et le temps de réparation est nul.

Le temps de réparation est calculé par rapport à la puissance nominale restante sur le réseau après contingence. Si suffisamment de puissance de secours est présent, alors le temps de réparation est simplement le temps de redémarrage du micro-réseau, sinon le temps de réparation du micro-réseau peut aller jusqu'au temps de réparation de l'équipement en panne.

3.2.4. Calcul du taux de panne à l'instant t

Le taux de panne court-terme est calculé à chaque pas de temps par la formule suivante :

$$r_t = \begin{bmatrix} \mu_{blackout_{C1,t}} \\ \mu_{blackout_{C2,t}} \\ \dots \\ \mu_{blackout_{Cn,t}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{blackout_{C1,t}} \\ \lambda_{blackout_{C1,t}} \\ \dots \\ \lambda_{blackout_{Cn,t}} \end{bmatrix}$$

3.2.5. Calcul de l'indicateur de fiabilité

L'indicateur choisi pour représenter la fiabilité liée aux contingences est l'indicateur d'espérance d'énergie non distribuée (EENS), dont la formule est la suivante :

$$EENS_{cont.} = \sum_{t=1}^T \Delta t \cdot (d_t, r_t)$$

Cet indicateur est calculé sur l'ensemble des points de fonctionnement récupérés de la simulation faite sur une année de données.

3.3. Analyse de fiabilité du plan de protection

Le plan de protection du micro-réseau considéré repose sur des disjoncteurs et fusibles conventionnels. Ce type de protections, basé sur les surintensités, nécessite un niveau de courant de court-circuit suffisant pour pouvoir être déclenché lors d'un défaut.

Lorsqu'un court-circuit apparaît sur le micro-réseau, les groupes électrogènes en ligne ainsi que les convertisseurs AFE participent au courant de court-circuit. Ces derniers fournissent un courant de court-circuit limité à des valeurs entre 1.5 et 2 fois leur courant nominal [7].

L'évaluation de la fiabilité du micro-réseau vis-à-vis du plan de protection consiste à analyser deux sources de défaillances :

- L'insensibilité des protections dans le cas d'un faible courant de court-circuit. Cette insensibilité donne lieu à un problème de sélectivité pouvant conduire au blackout.
- Les déclenchements intempestifs dans le cas d'un réglage trop bas des seuils de déclenchement. Les protections se déclenchent alors en l'absence de défaut ce qui engendre une coupure pour une partie du micro-réseau.

Les différentes étapes suivies dans la méthode sont décrites sur le diagramme en Figure 6.

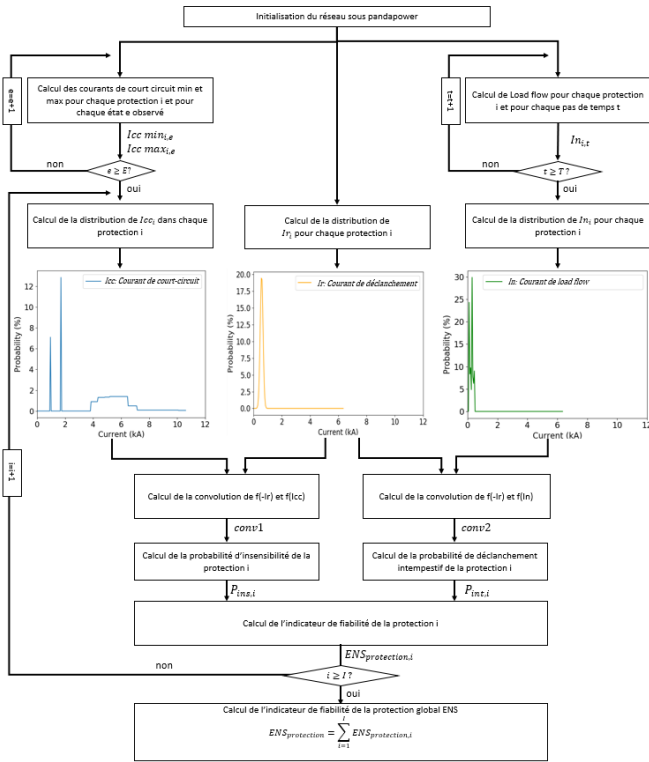


Figure 6 : Diagramme de l'analyse de fiabilité du plan de protection

Le micro-réseau est modélisé via le module pandapower [8] sous python qui permet d'effectuer des analyse de réseau statiques. Cette modélisation nécessite les étapes suivantes :

- Création des différents bus
- Création des lignes
- Création des convertisseurs AFE, modélisés comme convertisseurs statiques « Sgen » avec leurs limitations de courant
- Création des GE, modélisés comme des générateurs synchrones
- Création des charges

3.3.1. Calcul des courants de courts-circuits sur les états observés

L'ensemble des séries temporelles issues de la simulation sont utilisées pour cette étape. Dans un premier temps le nombre d'états observés du micro-réseau est comptabilisé ainsi que la fréquence d'occurrence. L'état concerne ici uniquement l'état On/Off des sources de courant de court-circuit (GE et onduleur AFE).

Ensuite, pour chaque état observé, le réseau créé précédemment sous pandapower est modifié afin de représenter cet état et les courants de court circuits min et max sont calculés.

3.3.2. Calcul des courants de load flow pour chaque pas de temps

Les calculs des courants de load flow sont effectués à chaque pas de temps, contrairement aux courants de court-circuit calculés uniquement pour chaque état observé. Le calcul de load flow nécessite également la paramétrisation de la puissance active « p_mw » qui correspond à celle issue de la simulation, retournée pour chaque source. Le courant au niveau de chaque protection est sauvegardé.

3.3.3. Calcul des indicateurs de fiabilité de la protection pour chaque protection i

Cette partie permet de calculer les indicateurs de fiabilité du plan de protection. Deux indicateurs de probabilité principaux sont calculés pour chaque ligne :

- **Probabilité d'insensibilité de la protection :**
Probabilité d'avoir un courant de court-circuit inférieur à la valeur de déclenchement de la protection sur la ligne.
- **Probabilité de déclenchement intempestif :**
Probabilité d'avoir un courant normal (issu des calculs de load flow) supérieur à la valeur de déclenchement de la protection sur la ligne.

Pour cela, trois distributions sont utilisées :

- La distribution du courant de court-circuit dans chaque protection I_{cc} (en bleu sur la Figure 7) : cette probabilité est calculée à partir des courants de court-circuit min et max et leur fréquence d'occurrence. L'hypothèse est faite que la probabilité de court-circuit est la même sur l'ensemble de la ligne. La distribution du courant de court-circuit par état correspond donc à une droite entre I_{cc_min} et I_{cc_max} .
- La distribution du courant de load flow dans chaque protection I_n (en vert sur la Figure 7) : cette distribution est obtenue directement sur la série temporelle de courant de load flow obtenue dans l'étape précédente.
- La distribution du courant de déclenchement de chaque protection I_r (en orange sur la Figure 7) : cette distribution est modélisée par une distribution normale autour de la valeur paramétrée.

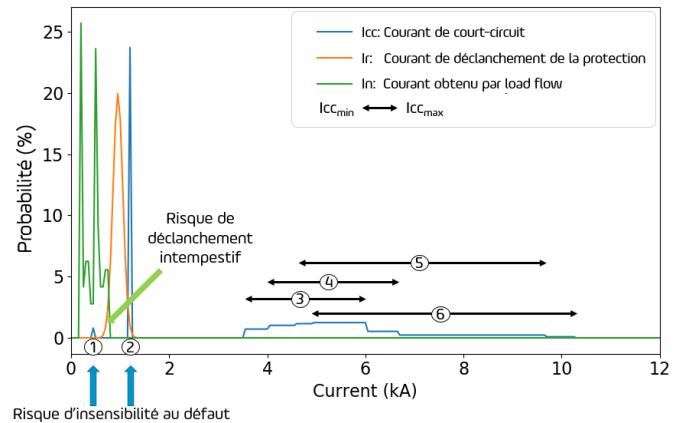


Figure 7: Distributions de probabilité pour une protection, les régions 1 et 2 correspondent à un fonctionnement sans groupe électrogène.

La probabilité d'insensibilité de la protection est la probabilité que le courant de déclenchement de la protection soit supérieur au courant de court-circuit disponible au niveau de la protection. Cette probabilité est calculée par convolution des distributions I_r et I_{cc} .

$$P_{ins,i} = p(I_r > I_{cc_i}) \quad (2)$$

La même chose est réalisée pour la probabilité de déclenchement intempestif. Cette fois la convolution est réalisée de manière à obtenir la probabilité que le courant dans la protection soit supérieur au courant de déclenchement de la protection.

$$P_{int,i} = p(I_n > I_r) \quad (3)$$

L'espérance d'énergie non distribuée est ensuite calculée pour trois cas :

L'énergie non distribuée du fait d'une insensibilité de la protection i :

$$EENS_{ins,i} = \lambda_i \cdot P_{ins,i} \cdot |P_i| \cdot (r_{cc} + r_{blc}) \quad (3)$$

L'énergie non distribuée du fait de déclenchement intempestif de la protection i :

$$EENS_{int,i} = (1 - \lambda_i) \cdot P_{int,i} \cdot |P_i| \cdot (r_{blc}) \quad (4)$$

L'énergie non distribuée du fait d'un déclenchement normal de la protection i :

$$EENS_{norm,i} = \lambda_i \cdot (1 - P_{ins,i}) \cdot |P_i| \cdot (r_{cc}) \quad (5)$$

Avec :

λ_i Est le taux de court-circuit

P_i est la puissance de consommation moyenne au niveau de la protection

r_{cc} est le temps de réparation du court-circuit

r_{blc} est le temps de redémarrage du micro-réseau (blackstart)

L'indicateur de fiabilité du plan de protection est ensuite obtenu en sommant les trois espérances d'énergie non distribuée (EENS) précédents :

$$EENS_{protection} = \sum_i^{nProt} EENS_{ins,i} + EENS_{int,i} + EENS_{norm,i}$$

4. APPLICATION DE LA METHODE AU CAS D'ETUDE

La méthodologie décrite précédemment a été testée sur le cas d'étude présentée en section 2. Les trois configurations de grid-forming ont été testées. La stratégie d'opération pour les configurations « single-switched mater » et « multimaster » est la même et permet l'arrêt complet des GE, elle est illustrée en Figure 9.

Figure 8: Opération du micro-réseau en cas d'étude dans la configuration "single master"

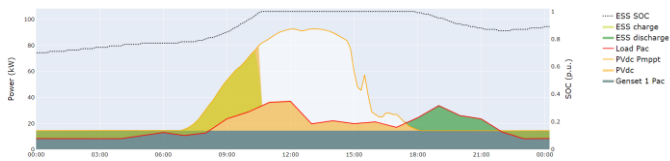
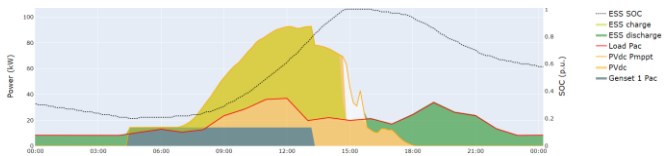


Figure 9: Opération du micro-réseau en cas d'étude dans les configurations "single-switched master" et "multimaster"



Les indicateurs issus de la simulation et de l'analyse de fiabilité sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2: Résultats de l'analyse de fiabilité pour différents modes d'opération

Indicateur	Configuration de grid forming		
	Single Master	Single - switched master	Multimaster
Heures d'opération GE (h)	8871	5200	5200
Intégration renouvelable (%)	25.4	55	55
LCOE année 15 (€/kWh)	0.563	0.45	0.45
EENS prot. (kWh/an)	2.3	5.2	5.6
EENS cont. (kWh/an)	77.7	74.1	6.4

En comparant les trois stratégies de grid-forming, la configuration single-switched master et multimaster permettent d'arrêter totalement les GE et donc permettent le meilleur gain en heures d'opération et en intégration d'énergie renouvelable. L'intégration d'énergie renouvelable pour le cas d'étude avec le dimensionnement donné est estimée à 25.4% avec un fonctionnement en single-master et passe à 55% avec une configuration single-switched master ou multimaster. Au niveau de la fiabilité liée aux pannes, la configuration multimaster est la meilleure option car elle garantit une redondance au niveau des générateurs en charge du maintien de la fréquence et tension du réseau, l'indicateur de fiabilité passe ainsi à 6.4 kWh/an au lieu de 74.1 kWh/an pour une opération en single-switched master. Cependant, le fait de pouvoir arrêter les GE induit un fonctionnement risqué compte tenu du plan de protection car les niveaux de courants de court-circuit fournis par l'électronique de puissance sont limités.

5. CONCLUSION

La méthode proposée permet d'évaluer la fiabilité du micro-réseau du point de vue de deux sources de défaillances : les pannes sur les équipements de production et stockage et les défaillances du plan de protection. La méthode testée sur un cas d'étude montre que pour un même dimensionnement, l'opération du micro-réseau a une influence sur le résultat obtenu, la configuration multimaster apportant le meilleur bénéfice en termes de fiabilité liée aux contingences. Les configurations single-switched master et multimaster cependant augmentent légèrement le risque d'indisponibilité lié à une défaillance du plan de protection du fait de l'arrêt des groupes électrogènes. Cette méthode d'analyse de fiabilité peut être utilisée afin d'optimiser mutuellement le dimensionnement et la gestion d'énergie du micro-réseau grâce à son implémentation sous l'environnement python.

6. REFERENCES

- [1] RES4Africa, « RE-thinking Access to Energy Business Models », 2019.
- [2] I. Patrao, E. Figueres, G. Garcerá, et R. González-Medina, « Microgrid architectures for low voltage distributed generation », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, p. 415-424, mars 2015,
- [3] Amanda Kahunzire, « Off-grid, Mini-grid and On-grid Solar PV Solutions in Africa: Opportunities and Challenges », *International Support Network for African Development (ISNAD-Africa)*, sept. 30, 2018.
- [4] *Microgrids design and implementation*. New York, NY: Springer Science+Business Media, 2018.

- [5] F. Katiraei, K. Mauch, M. Vandenberg, et L. Arribas, « PV Hybrid Mini-Grids: Applicable Control Methods for Various Situations », p. 104.
- [6] T. K. Vrana et E. Johansson, « Overview of Analytical Power System Reliability Assessment Techniques », p. 14.
- [7] T. N. Boutsika et S. A. Papathanassiou, « Short-circuit calculations in networks with distributed generation », *Electric Power Systems Research*, vol. 78, n° 7, p. 1181-1191, juill. 2008, doi: 10.1016/j.epsr.2007.10.003.
- [8] « pandapower », <http://www.pandapower.org/> (consulté le mai 14, 2020).