HAL
open science

Evaluation des besoins électriques d'une communauté isolée en vue d'une planification multicritère

Laurine Ferrando, Antoine Labonne, Kathleen Mallard, Christophe Rousseau, Vincent Debusschere, Lauric Garbuio, Frederic Wurtz, Florian Jeanne

To cite this version:

Laurine Ferrando, Antoine Labonne, Kathleen Mallard, Christophe Rousseau, Vincent Debusschere, et al.. Evaluation des besoins électriques d'une communauté isolée en vue d'une planification multicritère. SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE : Session Poster, Jul 2021, Nantes, France. hal-03284289

HAL Id: hal-03284289

https://hal.science/hal-03284289

Submitted on 12 Jul 2021

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.

Evaluation des besoins électriques d'une communauté isolée en vue d'une planification multicritère

Laurine FERRANDO[1], Antoine LABONNE[1], Kathleen MALLARD[1], Christophe ROUSSEAU[1], Vincent DEBUSSCHERE[1], Lauric GARBUIO[1], Frederic WURTZ[1], Florian JEANNE[2]

[1] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G2Elab, 38000 Grenoble, France

*Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

[1] CNRS Guyane, LEESIA, Station scientifique Internationale des Nouragues

RESUME – Cet article présente la modélisation de l'installation électrique de la base scientifique CNRS des Nouragues d'après un monitoring complet mis en place sur site. En intégrant les contraintes techniques opérationnelles à une prospective énergétique long-terme (sur critères environnementaux en plus des contraintes techniques), l'objectif est d'utiliser le cas d'étude des Nouragues pour valider un certain nombre d'assertions concernant la planification multicritère de communautés locales d'énergie, en ciblant plus particulièrement le contexte des sites isolés, en premier accès à l'énergie. Cette modélisation est également utilisée pour affirmer le caractère pertinent d'une production d'énergie de conception « low-tech » dans ce contexte, en acceptant par exemple une légère dégradation du rendement énergétique à l'usage par rapport à un rendement global.

Mots-clés – microréseaux, modélisation, premier accès à l'énergie, évaluation multicritère et conception.

Acronyme – COPAS : Canopy Operating Permanent Acces System.

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

L'augmentation de la consommation énergétique d'une société est corrélée à la croissance de la qualité de vie et/ou à la croissance économique de celle-ci [1]. Les besoins énergétiques d'une société ont pour socle l'extraction de l'énergie primaire, puis sa transformation avant son acheminement vers son utilisation finale. Dans une volonté d'assurer un développement durable, il fait sens de considérer le taux de retour énergétique, et dans une problématique d'action vis-à-vis du changement climatique, de maximiser l'usage des énergies renouvelables.

Dans ce contexte, nous avons travaillé à une modélisation multicritère du camp Saut-Pararé qui fait partie de la station CNRS des Nouragues, située en Guyane, dans la forêt amazonienne. L'objectif est, au-delà de sa modélisation technico-économique, de simuler des évolutions long-terme de cette base sous la forme d'un microréseau autonome et résilient dont les extensions doivent avoir le plus faible impact environnemental possible, que ce soit par le choix du mix énergétique, donc avec une limitation de l'usage de générateur diesel, mais également via la gestion des charges et la consommation d'énergie, visant une augmentation de l'efficacité et une sobriété acceptable [2]. Des améliorations du fonctionnement actuel sont effectivement envisagées selon trois axes : intégrer de la production d'origine hydraulique (car il s'agit de la ressource locale disponible), automatiser la gestion des charges indispensables et flexibles (intégrer de l'intelligence dans la gestion de la consommation) et prévoir l'extension du camp minimisant son impact environnemental local, selon les demandes du CNRS pour les missions sur cette installation.

1.2. Problématique de l'article

Des microréseaux sont et ont été étudiés, traitant des impacts sur les populations et leur développement, notamment au Rwanda [3], en Himalaya [4], au Népal [5] au Pérou [6]. L'objectif principal est de mettre en œuvre un modèle générique du microréseau du projet associé au camp Saut-Pararé afin d'établir un cahier des charges technique pour une production hydraulique considérant des aspects opérationnels (chute de tension) mais également long-terme, avec une optimisation énergétique sur cycle de vie de l'installation.

2. CAS D'ÉTUDE : LE CAMP SAUT-PARARÉ DE LA STATION DES NOURAGUES

2.1. Installation électrique

La station des Nouragues est une station de recherche écologique en pleine forêt amazonienne. Ses besoins en énergie sont pour l'instant couverts par un mix de production solaire, stockage d'énergie (batteries) et un générateur diésel nécessitant l'acheminement de fuel par pirogue ou hélicoptère. Au camp Saut-Pararé, l'un des deux camps de la station des Nouragues, une petite unité de production hydroélectrique vient d'être installée sur la rivière Arataye afin de diminuer la dépendance au diesel [7] . La Fig. 1 présente son positionnement géographique.

Fig. 1. Camp Saut-Pararé, carbet solaire avec PV sur le toit [7].

Le réseau (étendu sur quelques centaines de mètres) est principalement distribué de manière radiale en monophasé et tri-

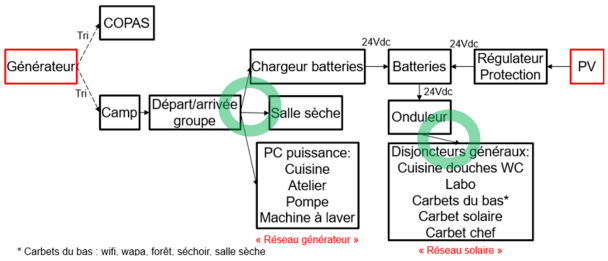
phasé alternatif (AC) avec quelques points en continu (DC). La puissance apparente totale est de l'ordre de 20 kVA. Le réseau est séparé en deux parties. La première est alimentée par le générateur diesel, qui alimente les charges puissantes mais utilisées occasionnellement (COPAS, étuve, climatisation…). La deuxième partie est alimentée par le réseau solaire, utilisé pour les petites charges plutôt permanentes (Wi-Fi, radio, congélateur, ordinateurs portables, etc.). Les deux parties du microréseau sont reliées par un chargeur de batterie (lui-même connecté aux panneaux solaires) fonctionnant uniquement en mode « charge batterie ». L'installation simplifiée est représentée Fig. 10. Le microréseau complet avec les caractéristiques des lignes sources, charges est représenté en Section 3.3.1.

2.2. *Bilan des consommations*

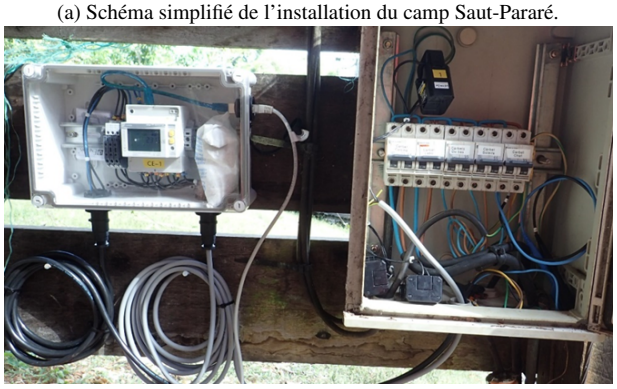
Une visite du site et son instrumentation ainsi que l'installation de deux data-loggers communiquant a permis de répertorier les appareils présents, et d'analyser le réseau électrique et son usage (fréquence de sollicitation, heures typiques, puissances, viabilité pour la sécurité de fonctionnement de la base). Les éléments manquants ont été estimés pour la modélisation avec l'aide pratique des usagers.

2.3. *Instrumentation sur site pour le projet*

Afin de disposer de données réelles, nous avons préparé préalablement nos propres capteurs nomades et non intrusifs, permettant de monitorer le réseau. Ces capteurs, sont implantés aux endroits entourés en vert sur la Fig. 2(a). Deux types de technologies de capteurs (« low-cost » et plus évolués) ont été développés au G2Elab, dans le but de tester des technologies et de rendre le système de monitoring plus résilient, puis installés sur place, comme présenté sur la Fig. 2(b).



(a) Schéma simplifié de l'installation du camp Saut-Pararé.



(b) Image d'un capteur : Coffret étanche contenant le compteur (gauche) et armoire dans laquelle des points de mesures sont effectués (droite).

Fig. 2. Implantation des centrales de mesures installées sur le camp Saut-Pararé.

Les données ont été récoltées suite à une installation sur site en septembre 2019. La première période d'observation est du 29/09/2019 au 10/10/2019. Ces données (avant installation de l'hydrolienne en décembre 2019), nous ont permis de fiabiliser nos hypothèses sur les fréquentations et consommations du site.

La Fig. 3 montre par exemple les heures d'utilisation du « réseau générateur » et la Fig. 4 met en évidence une consommation classique du « réseau solaire ». Après une signature du site lorsque personne ne l'occupe, nous avons pu soustraire le talon énergétique de celui-ci. La Fig. 4 met par exemple en évidence les heures de réveils et de repas du midi et du soir.

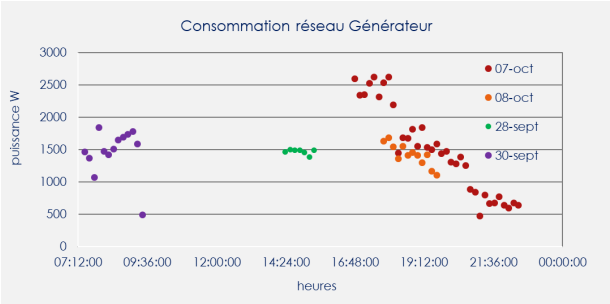


Fig. 3. Puissance électrique délivrée par le groupe électrogène en fonction des heures de la journée sur la période du 29/09/2019 au 10/10/2019.

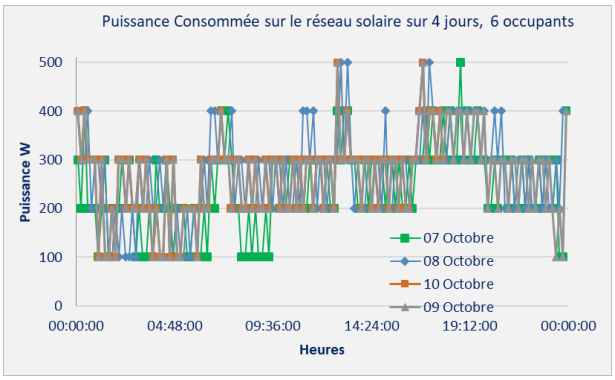


Fig. 4. Consommation électrique mesurée du réseau solaire entre le 07/10/2019 et le 10/10/2019.

D'autres données ont été récupérées depuis, regroupant la période du 10/10/2019 au 13/05/2020. Ces données ne sont pas exploitées pour cet article et feront l'objet d'une autre étude si le projet continue. Elles pourront confirmer ou infirmer les résultats des premières simulations.

3. SCENARII ET RÉSULTATS

Il nous faut concevoir un certain nombre de scénarios représentatifs de l'usage qui est actuellement fait des charges locales, mais également de l'usage prévisionnel des futures installations scientifiques, qui elles-mêmes dépendront de la capacité d'accueil du site. Autrement dit, plus les usagers s'habitueront à consommer de l'énergie, plus ils en auront besoin. Ce travers ne pourra malheureusement pas être résolu simplement par de la modélisation et une commande auto-adaptative des charges, si optimisée soit-elle, mais plutôt par une action concertée et accompagnée [8].

3.1. *Méthodologie*

Différents outils sont proposés pour des études d'analyses, de dimensionnement et de simulation ou d'optimisation. Comme l'analyse faite par [9], un large panel est présenté avec les spécificités de chacun de ces outils [10].

Nous avons utilisé conjointement les logiciels Homer Pro et Matlab/Simulink respectivement pour une étude de perspective générale et pour une modélisation dynamique. Les simulations sont groupées en plusieurs catégories de scénarios :

— Scénarios énergétiques (Homer Pro) :

— Cas limites de production (surproduction – production minimum) ;
— Cas réel et représentation des mesures ;
— Validation des simulations en comparant aux données du réseau énergétique réel.

— Scénarios dynamiques (Matlab/Simulink) :
— Simulations dynamiques du réseau électrique.

L'analyse énergétique permet d'observer les bilans énergétiques (consommation/production) sur une année complète et d'évaluer les performances techniques, économiques et environnementales.

Les scénarios dynamiques permettent d'analyser les grandeurs électriques et leur évolution sur des temps plus courts (heure, jour, minute). Les limitations rencontrées pour les modélisations sur chaque outil sont détaillées en Section 3.4.

3.2. *Scénarios énergétiques (modélisation Homer Pro)*

Le logiciel Homer Pro permet d'évaluer le mix énergétique d'un microréseau électrique selon des paramètres techniques, économiques et environnementaux. Dans notre cas, il permet de prévoir les périodes d'insuffisance énergétique ou de surproduction. Homer Pro propose une banque de modèle de sources énergétiques et une architecture de réseau avec un bus AC et un bus DC communiquant par un onduleur/redresseur. Les sources et charges sont réparties sur ces deux bus. Les charges sont définies par leur puissance active consommée et leur profil de consommation sur l'année. Le générateur diesel est programmable avec une journée type mensuelle. Le fonctionnement choisi est le suivant : en juin (saison humide), fonctionnement deux heures par jour de 14 h à 16 h et en décembre (saison sèche), une heure par jour de 17 h à 18 h. Les données d'ensoleillement de l'année sont renseignées pour les PV. En sortie, le logiciel donne l'état de charge des batteries, le taux de charge non alimentée, la surproduction, le coût du système et les émissions de gaz à effet de serre sur une année.

3.2.1. *Hypothèses de départ*

Les scénarios de consommation reposent sur des hypothèses d'énergie consommée par personne et le nombre de personnes présentes au camp. L'ensemble de ces hypothèses ont été possibles grâce aux mesures présentées en Section 2.3 et aux éléments fournis par les partenaires du projet. L'hypothèse de consommation par personne est la suivante : éclairage matin et soir pour 12 Wh, charge d'un ordinateur 60 W ou 80 W pendant 3 h, charge d'un téléphone de 10 W pendant 3 h. La consommation du réseau générateur est supposée constante et égale à la moyenne observée précédemment, à savoir 1,6 kWh tous les jours. La fréquentation réelle du camp Pararé est très aléatoire. Le Tableau 1 donne la fréquentation annuelle respectivement réelle et supposée haute.

Tableau 1. Fréquentation du camp dans les scénarios de consommation.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fréquentation réelle	4	5	5	6	5	4	4	8	6	6	5	4
Fréquentation haute	4	5	5	8	10	10	12	14	10	8	5	4

Les scénarios de production combinent générateur diesel, panneaux photovoltaïques, batteries et hydrolienne. Pour la production PV, nous renseignons les données réelles d'ensoleillement du camp Saut-Pararé sur l'année 2019. Pour la production hydrolienne, nous considérons la vitesse d'eau relevée en saison sèche à 1,4 m/s qui est sûrement le cas le plus défavorable. Les simulations réalisées sont notées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Scénarios de production et consommation pour les simulations énergétiques.

Cas	Production	Consommation
Cas 1 (lim.)	PV + batteries	Charges permanentes : 200 W
Cas 2 (lim.)	Générateur 24/24 + batteries	Charge maximum possible : 8.2 kW
Cas 3	Générateur 2 h/jour + PV + batteries	Fréquentation réelle
Cas 3bis	Générateur 2 h/jour + PV + batteries	Fréquentation haute
Cas 4	Hydrolienne + PV + batteries	Fréquentation haute

3.2.2. *Etude des cas limites de production (Cas 1 et Cas 2)*

La simulation du Cas 1 correspond au cas limite où seuls les PV produisent et seules les charges permanentes consomment, sollicitant plus ou moins la batterie, comme illustré sur la Fig. 5. Deux périodes se distinguent :
— D'octobre à mai : les PV alimentent les charges et les batteries sont déchargées à plus de 50 %.
— De mai à octobre : les PV suffisent pour alimenter les charges et recharger les batteries. Durant cette période elles ont un taux de charge de 90 %.

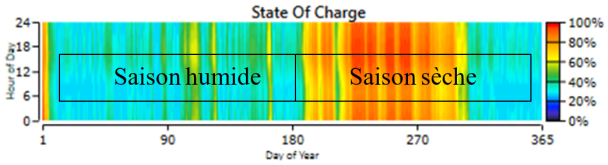


Fig. 5. Usage de la batterie Cas 1 (état de charge des batteries dans les grandes saisons humides et sèches).

Pour l'énergie qui transite dans le convertisseur, nous observons que les périodes de blackout (présentées en Fig. 6) interviennent lors de la saison des pluies, où les charges sont alimentées en priorité par rapport au pack batterie, amenant nécessairement à un manque de capacité sur un horizon journalier ou hebdomadaire.

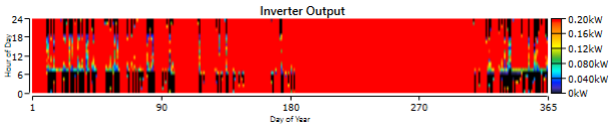


Fig. 6. Périodes de blackout observée en sortie de convertisseur.

Le Cas 2 est le cas limite où seul le générateur produit de l'énergie en continu et les charges consomment le maximum pour 8,2 kWh/jour. Le générateur parvient à alimenter toutes les charges en adaptant sa puissance en fonction de la charge avec une consommation de diesel très importante (60 L par jour). La batterie est donc peu sollicitée, comme visualisé sur la Fig. 7.

3.2.3. *Cas réel et représentation des mesures*

Le Cas 3 représente le fonctionnement réel du camp avec les PV et le générateur utilisé 2 h par jour. La simulation reproduit le fait que le microréseau du camp peut fonctionner toute l'année. Les batteries sont chargées la plupart du temps ce qui permet de maximiser leur durée de vie. L'état de charge des batteries est visible sur la Fig. 8.

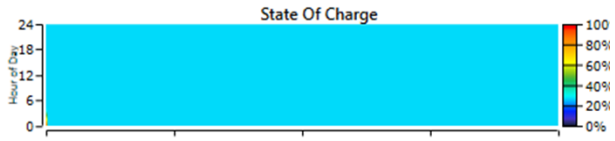


Fig. 7. Usage de la batterie Cas 2 (état de charge).

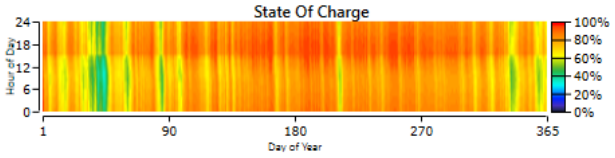
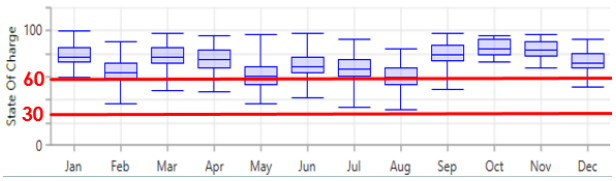


Fig. 8. Etat de charge de la batterie pendant la journée sur l'année (Cas 3).

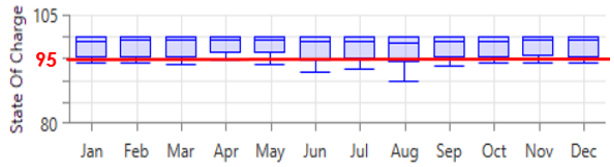
Les décharges surviennent en saison des pluies (couleur verte). Les charges sont alimentées sans interruption mais il y a un excès de production de 415 kWh/an soit 11,4 % de la production totale. Il faut limiter cette surproduction en ajustant le fonctionnement du générateur. En pratique, il est allumé et éteint manuellement en cas de besoin alors que Homer Pro donne un planning fixe par heure. Au regard des résultats, il est envisageable d'augmenter la fréquentation du site entre avril et octobre, là où l'excès de production est le plus important.

Le Cas 3bis simule le cas réel en mix hybride avec une fréquentation haute. L'excès d'énergie produite est divisé par quatre sans dégrader l'état de charge des batteries. La simulation montre que la fréquentation peut encore augmenter sur la saison sèche quand la production solaire est la plus haute.

Le dernier cas (Cas 4) simule le remplacement du générateur par l'hydrolienne en cas de fréquentation haute. Les performances de l'hydrolienne sont celles de la P66 de Guinard Energies : à 1,4 m/s, la puissance fournie est d'environ 450 W [11]. Cette production suffit pour recharger les batteries et alimenter les charges permanentes ainsi que les charges de forte puissance du réseau générateur. La Fig. 9 compare les cas de fréquentation augmentée des Cas 3bis et 4. Elle met en évidence qu'en rapport à l'excès de production, il est encore possible d'augmenter la fréquentation du camp.



(a) Cas 3 bis : Fréquentation augmentée.



(b) Cas 4 : Avec l'hydrolienne.

Fig. 9. Comparaison des états de charge des batteries pour les Cas 3bis et 4.

3.2.4. *Synthèse des résultats*

Deux tableaux regroupent la synthèse des simulations sur l'aspect statique. Le Tableau 3 rassemble la synthèse des bilans énergétiques. Nous retrouvons dans ce tableau les caractéristiques des différents cas, permettant facilement de les comparer en vue d'un choix de développement futur.

Malgré le manque de données économiques sur le microréseau actuel du camp Saut-Pararé, nous avons réalisé une étude qualitative à titre de première évaluation. Les coûts de remplacement ont été choisis égaux aux coûts initiaux avec un taux d'actualisation de 8 %. Les durées de vie des composants sont de 10 ans pour les batteries, 5 ans pour l'onduleur, 20 ans le générateur et 15 ans les PV. Le Tableau 4 donne les coûts initiaux relatifs, les coûts du diesel à l'année et la fréquentation moyenne associée.

La comparaison des cas montre qu'il va être intéressant d'aller chercher un compromis entre le coût initial et les coûts de maintenance (ici représentés par le coût du diesel). Ce compromis CAPEX/OPEX en fonction de la fréquentation n'est pas nouveau, mais pourra être modéré par la prise en compte de critères environnementaux.

Tableau 3. Synthèse des bilans énergétiques.

Cas	SoC batteries	Charge non alimentée	Gen. diesel	Excès prod.
Cas 1 (lim.)	25 % du temps > 60 %	232 kWh/an soit 13 % du temps	0	33,5 kWh/an, 1,9 % de la prod.
Cas 2 (lim.)	Toujours déchargées	0	24 h/jour	0
Cas 3	90 % du temps > 60 %	0	2 h/jour	415 kWh/an, 11.4 % de la prod.
Cas 3bis	70 % du temps > 60 %	20,8 kWh/an	2 h/jour	107 kWh/an
Cas 4	Toujours chargées	0	0	2,15 kWh/an

Tableau 4. Bilans économiques.

Cas	Coût initial	Coût diesel (€/an)	Fréquentation*
Cas 1 (lim.)	-	0	2,3
Cas 2 (lim.)	+	12 912	Inconnu
Cas 3	++	1027	5
Cas 3bis	++	1027	7,9
Cas 4	+++	0	7,9

*Moyenne du nombre de personnes présentes par mois.

Les scénarios avec générateur ont un impact environnemental local sur le camp Saut-Pararé, caractérisé par une émission de gaz à effet de serre équivalente à 1844 kg de CO_2 par an pour le cas réel avec un fonctionnement du générateur 2 h/jour (issu de la simulation Homer pro). Il est donc probable que ces émissions perturbent les mesures de gaz effectuées sur site. Les scénarios sans générateur n'émettent pas de gaz à effet de serre localement (pollution déportée) mais l'hydrolienne peut avoir d'autres catégories d'impact sur la rivière, non mesurés ici.

3.3. *Scénarios dynamiques du réseau electrique (modélisation Matlab/Simulink)*

L'objectif de cette modélisation est d'obtenir un premier modèle pour faire des simulations sur des plus petits pas de temps que l'étude énergétique (de l'ordre de la minute) et d'observer ainsi de premiers phénomènes dynamiques. Parmi ceux-ci nous

avons voulu nous concentrer sur l'observation de la tension et la fréquence du réseau. Enfin nous avons reconstruit le réseau de Saut-Pararé en utilisant des modèles réutilisables des banques de modèles de Matlab/Simulink. Ce choix a été fait par soucis de rapidité de développement et de généricité lors d'échanges entre collègues. Nous avons été cependant confrontés à suffisamment de problèmes, pour ce genre de modélisation, pour qu'il soit intéressant d'en parler dans l'article, ce qui est fait à la Section 3.4.

3.3.1. Méthode de travail et hypothèse de simulation

Nous avons choisi de valider le modèle complet par blocs fonctions. Les éléments du réseau complet ont été simulés indépendamment puis assemblés pour donner un simulateur avec des données d'entrées réelles. La durée de simulation a été réalisée sur une heure de temps réel. Le pas de temps a été fixé à 0.0001s pour observer les variations de tensions. La Fig. 10 regroupe la répartition des charges (en bleu) et sources du réseau (en orange) ainsi que les distances métriques du site. Dans le modèle dynamique, les lignes sont représentées par des modèles en PI avec les caractéristiques réelles des câbles installés. Les charges et sources sont représentés par des modèles PQ.

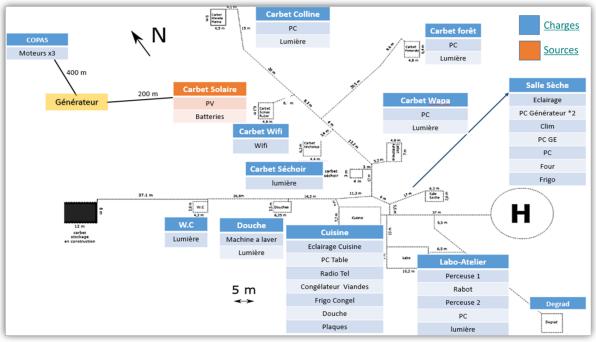


Fig. 10. Représentation du microgrid (lignes, charges, sources et distances mesurées sur site).

Le Tableau 5 rassemble l'ensemble des blocs fonctions identifiés pour la construction de notre modèle, développé en neuf éléments réutilisables indépendamment. L'ensemble des éléments sont fonctionnels mise à part le modèle du régulateur solaire (ligne 4 du Tableau 5) sur lequel nous avons rencontrés des difficultés de modélisation.

Tableau 5. Blocs fonctions du microréseau identifiés.

Bloc	Eléments	Modèle Matlab/Simulink
1	Générateur diesel	Générateur idéal sinusoïdal
2	Transformateur	Transformateur 400/230 V
3	Chargeur de batteries	Chargeur à tension constante
4	Régulateur solaire	Hacheur Buck commandé avec un MPPT P&O + chargeur
5	Onduleur	Onduleur en pont complet avec MOSFET + régulation PI
6	Batteries	Modèle Simulink
7	Charges	Charges résistives variables
8	Lignes et câbles	Modèle en PI
9	Panneaux solaires	Modèle PV avec sources de courant pilotée

La Fig. 11 rassemble l'ensemble de ces éléments dans le modèle complet Matlab/Simulink.

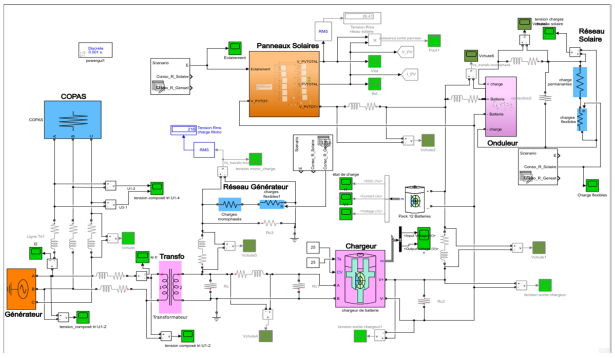


Fig. 11. Ensemble des blocs fonctions et simulation complète du microgrid.

3.3.2. Etude des impacts sur la tension du réseau

A titre d'illustration, nous nous concentrons ici sur le bloc fonction 3 (chargeur de batterie). Les variations de tension dans un réseau surviennent lors d'une variation de la charge. Nous observons également des chutes de tension aux bornes des câbles.

Pour visualiser la variation de la tension lorsque la charge varie nous avons utilisé le modèle de l'onduleur avec sa régulation. L'entrée de notre onduleur est une source de tension constante idéale à 24 V qui représente la batterie. En sortie, nous simplifions le scénario de consommation par des échelons de puissance consommée, l'échelon commence à 0,42 s, comme illustré Fig. 12, où une perturbation de la tension efficace est visible. Le correcteur PI fonctionne bien il rejette la perturbation. Le dépassement observé dépend de la puissance consommée.

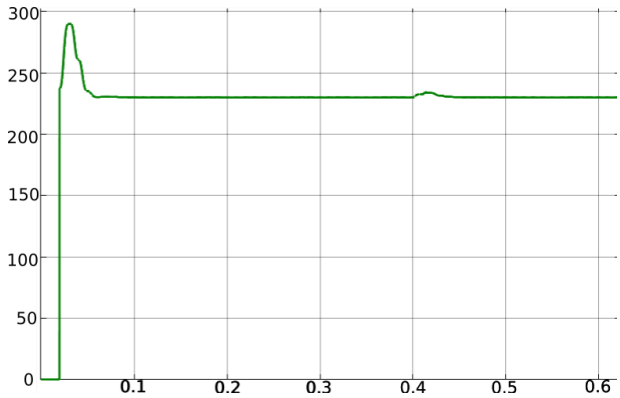


Fig. 12. Résultats et impact sur la tension du réseau en sortie du convertisseur.

Le Tableau 6 synthétise les variations de tension en fonction des échelons imposés lors des simulations dynamiques du réseau.

Tableau 6. Variation de chute de tension suivant la charge.

Echelon de P.	Veff. avant échelon	Dépassement Veff.	Variation (%)
200–800 W	230	234	1,7 %
200–400 W	230	232	0,86 %
200–200 W	230	231	0,43 %

3.4. Discussion

Au cours des différentes simulations nous avons mis en évidence les limites des premiers modèles implémentés ainsi que

des logiciels utilisés. Le logiciel Homer Pro nous oblige à adapter nos scénarios de consommation et de production réels aux possibilités d'optimisation du couple production/charge. Il faut donc modifier la simulation indirectement par des contraintes entrées sous la forme de données d'entrée. D'autre part, la structure de base d'un microréseau impose une ligne AC, une ligne DC ce qui n'est pas le cas du réseau réel. Malgré ces observations, le logiciel reste pertinent pour une première estimation des grandeurs énergétiques par rapport au temps nécessaire à sa mise en place. C'est pourquoi nous pouvons tout de même tirer quelques conclusions initiales sur cette thématique.

Le logiciel Matlab/Simulink quant à lui est bien adapté à la modélisation dynamique, mettant hors de propos la simulation d'une journée complète avec une précision suffisante ($100\,\mu$s) pour visualiser les variations de tension. Ceci représente des temps de calcul inacceptables dans le contexte de cette étude initiale, que les modèles et méthodes sélectionnées ont limité. Par manque de temps pour construire un modèle plus adapté, nous nous sommes focalisés sur un des éléments du modèle complet mettant en évidence l'impact sur la tension du réseau.

Pour l'étude dynamique, une alternative serait de limiter les cas d'étude, de limiter les composants analysés, ou de prendre un temps plus long pour implémenter un modèle spécifiquement dédié à la simulation, plutôt qu'un modèle sur étagère.

4. CONCLUSIONS

La modélisation du microréseau des Nouragues a été proposée dans une optique d'évaluation des meilleures pistes d'amélioration de ses performances énergétiques et environnementales, en prévision d'une évolution de sa consommation, déclenchée par une augmentation des séjours scientifiques sur la base de recherche du CNRS.

Parmi ces simulations, l'approche énergétique montre que l'ajout d'une hydrolienne de rivière permettrait d'annuler complètement les besoins en diesel, mais avec une sollicitation accrue des batteries. Cet usage n'impacte toutefois pas leur durée de vie à ce stade de modélisation (remplacement systématique à moins de 10 ans). La conception du moyen de production est l'objet d'une discussion concernant la pertinence de la recherche du meilleur rendement à l'usage dans ce contexte très contraint au niveau des impacts environnementaux de l'installation. Un bilan sur cycle de vie serait idéal pour certifier la solution.

La modélisation énergétique du site a permis également d'identifier des améliorations de rendement par simple remplacement des composants (par exemple les panneaux solaires). Dans ce contexte, le camp Saut-Pararé peut augmenter sa capacité d'accueil en taux de fréquentation du site sans craindre de voir les conditions de vie du site considérablement dégradées. Toutefois, la recherche d'une meilleure sobriété n'a pas fait l'objet d'une optimisation pour l'instant. Il s'agit d'une des perspectives de recherche.

Enfin, La modélisation dynamique du réseau, utile pour étudier les chutes de tension notamment, doit être améliorée afin de réellement définir son impact sur la planification long terme du site. Cela constitue une des perspectives de ces travaux.

Nous conclurons sur l'importance du couplage des contraintes opérationnelles et des méthodes multicritère de planification long-terme des réseaux électriques isolés, sur la pertinence de l'évaluation d'une installation existante et la description de ses évolutions futures, notamment dans une perspective de prise en compte de l'incertitude des données d'entrée du problème. Pour ce faire, le couplage entre les simulations énergétiques et de puissance, présentées séparément ici, constitue un enjeu significatif dans l'évaluation des meilleures pistes d'amélioration du site, sous contraintes durables.

En parallèle de toutes ces perspectives, l'extension du monitoring de l'installation des Nouragues est en cours de réflexions et d'actions.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'équipe du projet CNRS Nouragues du LEEISA, pour l'accès au camp et les mesures, ainsi que leur participation active dans l'évaluation des besoins de la base scientifique. A ce titre, nous souhaitons remercier chaleureusement Philippe Gaucher, Vincent Goujon, et Elodie Courtois pour leur implication active sur ce projet.

6. RÉFÉRENCES

[1] J. G. Lambert, C. A. S. Hall, S. Balogh, A. Gupta, and M. Arnold, "Energy, EROI and quality of life," Energy Policy, vol. 64, pp. 153–167, Jan. 2014.

[2] Mallard, K., Garbuio, L., et Debusschere, V. (2018, October). Multi-criteria Assessment Method on Energy Solution for Decision Support in Remote Coastal Locations. In 2018 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT) (pp. 1-8). IEEE.

[3] Gunther Bensch , Jochen Kluve et Jörg Peters (2011) Impacts of rural electrification in Rwanda, Journal of Development Effectiveness, 3 :4, 567-588, DOI : 10.1080/19439342.2011.621025.

[4] Kedia, D., et Kedia, A. (2002). Electrification of remote rural communities in the himalayas through solar-hydro hybrid power projects. Energy engineering, 99(4), 8-17.

[5] Pokharel, G. R., Chhetri, A. B., Khan, M. I., et Islam, M. R. (2008). Decentralized micro-hydro energy systems in Nepal : En route to sustainable energy development. Energy Sources, Part B, 3(2), 144-154.

[6] Thomas Love et Anna Garwood (2011) Wind, sun and water : Complexities of alternative energy development in rural northern Peru, Rural Society, 20 :3, 294-307, DOI : 10.5172/rsj.20.3.294.

[7] http ://www.nouragues.fr/assets/Rapport-dactivite-2019-_-Station-de-recherche-des-Nouragues.pdf

[8] López-González, A., Ferrer-Martí, L., et Domenech, B. (2019). Long-term sustainability assessment of micro-hydro projects : Case studies from Venezuela. Energy Policy, 131, 120-130.

[9] Kébé, Abdoulaye. Contribution au pré dimensionnement et au contrôle des unités de production d'énergie électrique en site isolé à partir des énergies renouvelables : Application au cas du Sénégal. Diss. Université Paris Sud-Paris XI, 2013.

[10] Moner-Girona, M., Bódis, K., Morrissey, J., Kougias, I., Hankins, M., Huld, T., et Szabó, S. (2019). Decentralized rural electrification in Kenya : Speeding up universal energy access. Energy for Sustainable Development, 52, 128-146.

[11] « Hydrolienne Guinard Energies - solution de production électricité », Guinard Energies. [En ligne]. Disponible sur : https ://www.guinard-energies.bzh/fr/guinard-energies/. [Consulté le : 24-févr-2020].