



**HAL**  
open science

# Stratégie de conception d'une micro-STEP (Station de Transfert Energétique par Pompage) solaire en Zone Non-Interconnectée (ZNI) en Colombie

Nathan Guignard

► **To cite this version:**

Nathan Guignard. Stratégie de conception d'une micro-STEP (Station de Transfert Energétique par Pompage) solaire en Zone Non-Interconnectée (ZNI) en Colombie. CNRIUT 2023 Saint Pierre - La Réunion, IUT de Saint Pierre, Jun 2023, Saint Pierre (La Réunion), La Réunion. hal-04326933

**HAL Id: hal-04326933**

**<https://hal.science/hal-04326933>**

Submitted on 6 Dec 2023

**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.

---

**Stratégie de conception d'une micro-STEP (Station de Transfert Energétique par Pompage) solaire en Zone Non-Interconnectée (ZNI) en Colombie**

---

Nathan Guignard<sup>1</sup>

nathan.guignard@stepsol-energy.com

<sup>1</sup> IUT, Université de Corse Pascal Paoli, Laboratoire Sciences pour l'Environnement (SPE) , UMR 6134

**Thèmes** – *Énergie - Environnement*

**Résumé** – *Actuellement, la production d'électricité dans les communautés hors réseau se fait au moyen de générateurs diesel polluants et souvent inefficaces, parfois couplés à des batteries chimiques, dont les spécificités s'adaptent mal aux environnements éloignés et difficiles. En tant qu'alternative plus durable, cet article examine le stockage d'énergie hydroélectrique par micro-STEP couplé à la production solaire photovoltaïque. L'électrification rurale en Colombie est sélectionnée comme meilleur contexte potentiel pour une telle solution. Plusieurs machines électriques sont envisagées pour la conversion d'énergie (associées aux pompes et turbines) et évaluées sur des critères précis : puissance réactive, rendement, prix, souplesse d'absorption de puissance, complexité et robustesse. Cette phase d'esquisse met en lumière deux machines : une machine à induction et une machine synchrone à aimants permanents, toutes deux couplées à un variateur de fréquence. Deux configurations de micro-réseaux sont également sélectionnées parmi quatre principales, qui accueillent le mieux un tel système de stockage dans la zone colombienne non interconnectée (ZNI).*

**Mots-Clés** – *Solaire PV, stockage, offgrid.*

## 1 Introduction

L'équilibre entre la production et la consommation d'électricité est l'un des principaux enjeux dans un monde qui vise à réduire l'utilisation des centrales électriques à combustible fossile. Ainsi, pour rendre le même service que les centrales thermiques qu'ils remplacent, les énergies renouvelables (PV, éolien) ont besoin de stockage pour faire face aux intermittences de production et variations de consommation.

La principale technologie de stockage pour les systèmes électriques est la STEP (Station de Transfert Energétique par Pompage). En 2017, elle représentait 97 % de la puissance installée [1] et 97 % de l'électricité produite à partir du stockage [2]. Bien que la plupart des STEPs soient de grande taille et connectées à de larges réseaux électriques, de plus en plus d'initiatives se créent pour adapter cette technologie aux petites communautés hors réseau (ou offgrid) qui ont des coûts prohibitifs de connexion aux réseaux nationaux ou régionaux. Dans les endroits où l'eau est disponible et l'altitude suffisante, c'est une alternative intéressante aux moyens de production actuels : les générateurs diesel [3].

## 2 Contexte de Recherche

L'ensemble des zones non interconnectées colombiennes (ZNI) est la zone géographique choisie pour cette étude. L'IPSE (L'Institut de planification et de promotion des solutions énergétiques dans les zones non interconnectées) fournit des chiffres pertinents pour les zones étudiées avec l'aide d'autres institutions publiques colombiennes. La ZNI colombienne s'étend sur plus de 600 000 km<sup>2</sup> (53% de la superficie du pays), 273 MW de puissance installée génère 387,8 MWh par an. Elle abrite près de 730 000 foyers, dont 500 000 sans couverture électrique du tout) répartis sur 1772 communes et villages [3].

Des données détaillées datant de 2021 sur les 1772 communautés en ZNI nous disent que 97% des communautés sont alimentées uniquement par des groupes électrogènes diesel, 1% par des énergies renouvelables.

Pour compléter les données sur les groupes électrogènes diesel : la puissance totale installée moyenne dans une collectivité est de 150 kW (médiane 40 kW), 90 % des collectivités moins de 115 kW et 95 % moins de 170 kW. 71 localités sont même totalement privées d'électricité à cause de pannes. Cela montre le niveau de précarité énergétique dans les ZNI colombiennes et leur dépendance à un seul type de production d'énergie (diesel) et souvent à une seule machine. Connaissant la disponibilité de l'altitude en Colombie, il est logique d'étudier comment le mix énergétique de ces communautés peut être décarboné grâce à une micro-

STEP couplée à l'énergie solaire photovoltaïque [4].

La Figure 1 montre les courbes de charges quotidiennes typiques de 4 communautés alimentées avec un seul groupe électrogène diesel. Elles sont toutes situées dans la partie sud-ouest de la Colombie, une région où se trouve la plus grande concentration de communautés isolées du pays.

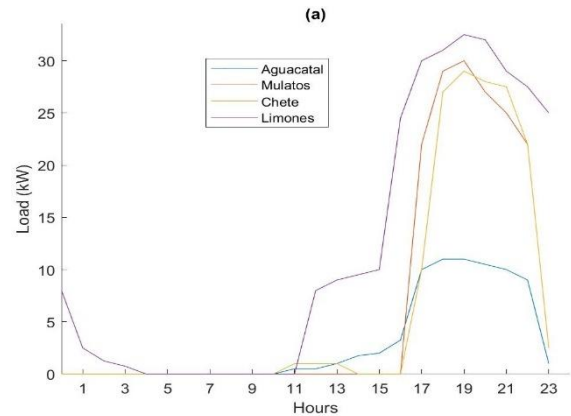


Figure 1 – Profils de charge journaliers dans 4 communautés du Sud-Ouest de la Colombie [5]

Les générateurs diesel sont pour la plupart surdimensionnés et fonctionnent souvent en dehors de leur puissance nominale, d'où des inefficacités majeures et une surconsommation de carburant [6].

Les groupes électrogènes apparaissent comme une solution simple nécessitant des capacités d'investissement faibles à moyennes (CAPEX 450-750\$/kW [7]), de petites infrastructures et un transport léger jusqu'au site. Cependant, la fiabilité dépend fortement de l'accès au carburant, que ce soit par le biais d'une chaîne d'approvisionnement solide ou de prix suffisamment bas, et de la capacité de l'opérateur à entretenir avec succès le générateur. Cela induit des coûts opérationnels élevés qui ont l'autre inconvénient d'être très fluctuants : OPEX fixe annuel = 2-4% de CAPEX plus 0,3-0,5 \$/kWh d'OPEX carburant [8]. Ce mode de production d'électricité a également une forte teneur en carbone (environ 1200 gCO<sub>2</sub>/kWh [9]) ce qui est problématique compte tenu de l'effort à fournir pour atténuer le changement climatique.

L'IPSE cherche donc à augmenter la part de renouvelables dans les ZNI et nécessite des solutions de stockage fiable en milieu isolé et hostile climatiquement.

## 3 Conception d'un micro-réseau avec micro-STEP

Pour des raisons de simplicité et de robustesse, l'organe de production de la micro-STEP est une pompe pouvant également fonctionner en mode réversible et générer de l'électricité (PAT : Pump as Turbine). Une seule machine électrique est couplée à cette PAT, elle doit donc faire office de moteur et de génératrice. La Table 1 pose le

récapitulatif des différentes machines et équipements nécessaires à leur fonctionnement : vanne de laminage, régulateur de fréquence (VFD).

Machine Electrique	Système de régulation de puissance ; Intervalle de Puissance (% de P. Nominale)	Intervalle de rendement [I0] [H]	Mécanisme de démarrage	Source de puissance réactive	Intervalle de prix [12] [13]	Commentaires
Machine Asynchrone +VFD	Pompage: VFD; 0-100% Turbinage: VFD +vanne; 25-100%	IE1-IE4 70-90%	VFD donne des courants de démarrage faibles	Seulement avec VFD 4Q	Moteur: 90-120 USD/kW VFD: 50-70 USD/kW	Surchauffe à basses vitesses
Machine Synchrone à Aimants Permanents +VFD	Pompage: VFD; 0-100% Turbinage: VFD +vanne; 20-100%	IE3-IE5 85-95%	VFD Obligatoire	Oui	Moteur: 150-200 USD/kW VFD: 50-70 USD/kW	Terres rares possibles (aimants)
Machine Synchrone à Aimants Permanents +Cage	Pompage: Vanne laminage; 25-100% Turbinage: Vanne laminage; 20-100%	IE3-IE5 85-95%	Inhérent (Courants de démarrage forts)	Oui	Moteur: 150-200 USD/kW	Pas d'électronique de puissance Terres rares possibles (aimants)
Machine Synchrone à Excitation +Cage	Pompage: Vanne laminage; 25-100% Turbinage: Vanne laminage +AVR; 20-100%	IE3-IE5 85-95%	Inhérent (Courants de démarrage forts)	Oui	Moteur: 150-200 USD/kW	Petit convertisseur AC/DC pour le système d'excitation

Tableau 1 – Comparaison des Machines Electriques

Quatre configurations pour un micro-réseau solaire PV/micro-STEP/Diesel pour les communautés colombiennes en ZNI sont présentées. La première (C1) reste à dominante diesel et les trois autres peuvent réduire plus significativement le rôle de la génération diesel sans nécessiter l'installation d'un stockage d'énergie chimique. C2 offre un moyen de communication entre tous les organes de production (diesel compris), et 24h d'électricité sans interruption. C3 n'utilise le groupe diesel qu'en cas de coupure. C4 demande des démarrages manuels de chaque moyen de production avec coupure d'électricité à chaque changement de régime. C1 et C2 représentent un niveau de confort proche des sociétés urbaines occidentales C3 un compromis intéressant et C4 plus rudimentaire encore. La capacité de chaque machine électrique à satisfaire chaque niveau de confort et configuration est présenté dans le Tableau 2.

	C1	C2	C3	C4
Machine Asynchrone +VFD	Oui	Seulement avec VFD 4Q	Seulement avec VFD 4Q	Seulement avec banc de condensateurs
Machine Synchrone à Aimants Permanents +VFD	Oui	Oui	Oui	Seulement avec VFD pour démarrage pompe
Machine Synchrone à Aimants Permanents +Cage	Oui (charge constante)	Oui (charge constante)	Oui (charge constante)	Oui (charge constante)
Machine Synchrone à Excitation +Cage	Oui	Oui	Oui	Non

Tableau 2 – Adéquation des Configurations et des Machines Electriques

## 4 Conclusions

Sur la base des observations de la production d'électricité en ZNI colombienne, des profils de charge typiques et de la nécessité d'être une alternative crédible aux groupes électrogènes diesel (à la fois en service et dans la gamme de prix) : il a été décidé que l'utilisation d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents (avec VFD ou cage d'écureuil) ainsi que la machine Asynchrone avec un VFD à 4 quadrants étaient les solutions techniques à approfondir dans la mise en œuvre d'un micro-réseau PV + micro-STEP hors réseau. Les simulations MATLAB doivent être mises en œuvre à la fois à long terme (scénario énergétique sur plusieurs jours) et à court terme (réponse en fréquence et en tension

de la pompe/turbine) pour évaluer la validité de ces choix.

La plateforme PAGLIA ORBA située à Ajaccio et appartenant à l'Université de Corse contient une micro-STEP de 15kW et a la possibilité de passer en "mode offgrid", permettant ainsi une expérimentation à l'échelle et dans des conditions de terrain similaires aux communautés isolées. Cette expérience ainsi que les simulations numériques feront l'objet d'une prochaine publication.

## 5 Remerciements

L'auteur remercie Jean-Laurent Vellutini, délégué régional de l'ANRT en Corse, et Didier Pierrat-Agostini, président et fondateur de STEPSol.

## Références

- [1] Sandia Labs, « DOE Global Energy Storage Database ». <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/projects.html> (consulté le 18 janvier 2022).
- [2] P. Nikolaidis et A. Poulikkas, « A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability », p. 27, 2017.
- [3] IPSE, « Caracterizacion ZNI ». 24 juin 2020.
- [4] IPSE, « IPSE- Tabla Excel ZNI ». 2020.
- [5] IPSE, « INFORME TELEMETRÍA MENSUAL DE AGOSTO ». août 2021.
- [6] International Finance Corporation (World Bank), « The Dirty Footprint of the Broken Grid ». 2019.
- [7] Rockefeller Foundation, « COMPARING COSTS OF AN INTEGRATED APPROACH VERSUS PURE GRID EXTENSION ». 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.rockefellerfoundation.org/wp-content/uploads/2020/12/EE-Download-Opportunity-Datasheet-Detailed-Cost-Models-and-Benchmarks.pdf>
- [8] E. U. MWH, « Sustainable Energy Handbook Module 6.1 Simplified Financial Models ». 2016.
- [9] A. Q. Jakhriani, A.-K. Othman, A. R. H. Rigit, et S. R. Samo, « Estimation of carbon footprints from diesel generator emissions », in *2012 International Conference on Green and Ubiquitous Technology*, Jakarta, juill. 2012, p. 78- 81. doi: 10.1109/GUT.2012.6344193.
- [10] ABB, « IE5 synchronous -reluctance motors », *News*. <https://new.abb.com/news/detail/80775/ie5-synchronous-reluctance-motors> (consulté le 9 février 2022).
- [11] M. Alizadeh Bidgoli, W. Yang, et A. Ahmadian, « DFIM versus synchronous machine for variable speed pumped storage hydropower plants: A comparative evaluation of technical performance », *Renew. Energy*, vol. 159, p. 72- 86, oct. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.05.163.
- [12] A. Bhatt, M. P. Sharma, et R. P. Saini, « Feasibility and sensitivity analysis of an off-grid micro hydro-photovoltaic-biomass and biogas-diesel-battery hybrid energy system for a remote area in Uttarakhand state, India », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 61, p. 53- 69, août 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.030.
- [13] P. Sethupathi et N. Senthilnathan, « Comparative analysis of line-start permanent magnet synchronous motor and squirrel cage induction motor under customary power quality indices », *Electr. Eng.*, vol. 102, n° 3, p. 1339- 1349, sept. 2020, doi: 10.1007/s00202-020-00955-2.