

Titre de la thèse :

Modélisation et évaluation multicritère de l'intégration du stockage d'énergie de long terme centralisé et diffus en contexte insulaire

Thesis title:

Modelling and multi-criteria evaluation of the integration of centralized and distributed long-term energy storage in an island context

Laboratoire d'accueil : FEMTO-ST, département Energie, équipe SHARPAC

Host laboratory: FEMTO-ST, Energy department, SHARPAC team

Spécialité du doctorat préparé : Génie électrique

Ph.D. specialty: Electrical engineering

Mots-clefs : stockage de long terme, systèmes énergétiques, réseaux électriques, hydrogène-énergie, dimensionnement, gestion de l'énergie, optimisation multicritère

Keywords: long term energy storage, energy systems, power systems, hydrogen energy, sizing, energy management, multicriteria optimization

Descriptif détaillé de la thèse

Contexte et état de l'art :

Les zones non-interconnectées, dont notamment les îles françaises, souffrent d'un mix énergétique à la fois plus carboné et plus cher que la France hexagonale. Ces zones sont également fortement dépendantes aux importations d'énergies fossiles, et notamment de pétrole, pour la production d'électricité comme pour les transports. La Réunion en est un exemple, avec, en 2022, un coût de production de l'électricité moyen de plus de 280 €/MWh, 85 % de taux de dépendance énergétique, 65 % de la consommation finale d'énergie utilisée pour les transports, et seulement 14 % d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire [1].

La Réunion s'est rapprochée d'une production électrique 100 % renouvelable en 2024, par la conversion de centrales thermiques à la biomasse et aux bioliquides. Cependant les impacts environnementaux de ces solutions sont discutables, de même que le choix de recourir à des importations de bois d'autres continents. Pour 2030, l'île vise par ailleurs l'autonomie énergétique complète, ce qui semble très ambitieux.

Le projet ANR Hyles, qui s'achève en 2024 et est coordonné par FEMTO-ST, a permis une étude du mix énergétique et du rôle de l'hydrogène pour les horizons 2030 et 2050, suivant différents scénarios [2] s'appuyant sur une modélisation de la production (notamment renouvelable), de la consommation, des moyens de transports et du réseau de transport d'électricité. Ces travaux ont montré le besoin de stockage de long terme (en complément du court terme à l'échelle de quelques heures) à l'échelle de l'île mais la question ne pourra pas être étudiée dans le cadre du projet par manque de temps. Ils ont également pointé la forte difficulté à couvrir les besoins nécessaires à la décarbonation du secteur aérien, notamment, tandis que celle du secteur maritime serait envisageable.

Verrous :

- Le besoin en stockage est encore mal cerné, car dépendant des évolutions de la demande et du mix énergétique, et donc des données météorologiques. Une évaluation sur un minimum de 10 à 20 ans de données historique serait nécessaire pour identifier les probabilités et durées des phénomènes de *dunkelflaute* (une période avec un vent et un ensoleillement faibles) [3], par exemple. A l'inverse, une capacité d'effacement – par exemple via le pilotage de la recharge de véhicules – pourrait apporter plus de flexibilité côté demande.
- Différentes technologies permettent du stockage de long terme (de plusieurs heures jusqu'au saisonnier) à grande échelle [3]. Les STEPs sont une solution classique, mais dont le potentiel est limité ou dont les technologies sont à adapter, comme avec des STEPs marines. L'hydrogène – ou ses dérivés – est une solution potentielle mais qui ne peut reposer sur du stockage géologique (cavités salines, etc.) du fait de son absence à La Réunion. D'autres technologies comme les batteries fer-air, avec une faible densité mais un coût très faible, pourraient émerger à l'avenir [5]. En dehors des questions de faisabilité technique, de coûts et de performances, la question des impacts environnementaux (émissions, biodiversité, ressources, etc.) de ces technologies est également à considérer.
- Une autre approche serait de recourir à du stockage diffus, par exemple sous forme de batteries résidentielles, voire de *vehicle-to-grid* (V2G). Néanmoins, la coordination de ces ressources est bien plus complexe car elle repose sur un grand nombre d'équipements, peut impacter les utilisateurs et pose la question du modèle d'affaires sous-jacent. La faisabilité de cette approche n'est donc pas certaine.
- En termes de gestion, la prise en compte simultanée des dynamiques de court terme (de la minute à l'heure) et de long terme (plusieurs années) pose des problèmes de temps de calcul, d'autant plus lorsque le vieillissement des composants est considéré [4].

Travaux envisagés et calendrier prévisionnel :

Le travail de thèse proposé s'intéressera plus spécifiquement au cas de La Réunion, correspondant à une zone non-interconnectée et isolée de taille importante (plus de 800 000 habitants).

La première étape (M1-M6) consistera en une étude de l'état de l'art du domaine et une prise en main des résultats du projet HyLES, qui a permis d'obtenir des données, de définir des premiers scénarios et de concevoir des algorithmes de dimensionnement et de gestion ne prenant pas en compte la question du stockage de long terme, ni les possibilités offertes par de l'effacement ou du stockage diffus.

La seconde étape (M4-M24) visera à étudier le stockage de long terme centralisé, en révisant les algorithmes existants pour y intégrer les modèles d'équipements considérés (stockage comme effacement), de nouvelles stratégies de gestion et de dimensionnement, et des scénarios spécifiques à concevoir et évaluer.

La troisième étape (M18-M30) se concentrera sur l'approche mettant en œuvre du stockage diffus, par exemple à travers une méthode basée agents et/ou un système d'information géographique (SIG). L'accent sera mis sur le pilotage du stockage résidentiel et des véhicules électriques. Les résultats obtenus sur les mêmes scénarios qu'à l'étape précédente permettront de réaliser une comparaison multicritère (technique, économique, environnementale voire sociale) des deux approches. La complémentarité entre les deux approches sera également évaluée.

Enfin, la dernière étape (M31-M36) correspondra à la rédaction du manuscrit de thèse puis la soutenance. Un objectif de publications visant plusieurs revues internationales et conférences internationales ou nationales sera fixé.

Job description

Context and state of the art:

Non-interconnected areas, including the French islands, suffer from an energy mix that is both more carbon-intensive and more expensive than mainland France. These areas are also highly dependent on imports of fossil fuels, especially oil, for electricity production and transport. La Réunion is an example of this, with, in 2022, an average electricity production cost of more than €280/MWh, an 85% energy dependency rate, 65% of the final energy consumption used for transport, and only 14% of renewable energy in primary energy consumption [1].

La Réunion has moved closer to 100% renewable electricity production by 2024, through the conversion of thermal power plants to biomass and bioliquids. However, the environmental impacts of these solutions are questionable, as is the choice to resort to importing wood from other continents. By 2030, the island is also aiming for complete energy self-sufficiency, which seems very ambitious.

The ANR HyLES project, which ends in 2024 and is coordinated by FEMTO-ST, has enabled a study of the energy mix and the role of hydrogen for the 2030 and 2050 horizons, according to different scenarios [2] based on a modelling of production (particularly renewable), consumption, means of transport and the electricity transmission network. This work has shown the need for long-term storage (in addition to short-term storage on the scale of a few hours) on the scale of the island, but the question cannot be studied within the project due to lack of time. The work also pointed out the great difficulty in covering the needs necessary for the decarbonization of the aviation sector while that of the maritime sector would be conceivable.

Challenges:

- The need for storage is still poorly understood, as it depends on changes in demand and the energy mix, and therefore on meteorological data. An evaluation of a minimum of 10 to 20 years of historical data would be necessary to identify the probabilities and durations of *dunkelflaute* phenomena (a period with low wind and sunshine) [3], for example. On the other hand, demand response capacity – for example via the management of vehicle charging – could provide more flexibility on the demand side.
- Different technologies allow long-term storage (from several hours to seasonal) on a large scale [3]. Pumped hydro plants are a classic solution, but their potential is limited, or the technologies need to be adapted, as with marine pumped hydro plants. Hydrogen – or its derivatives – is a potential solution, but it cannot be based on geological storage (salt caverns, etc.) due to its absence in La Reunion Island. Other technologies such as iron-air batteries, with low density but very low cost, may emerge in the future [5]. Apart from the questions of technical feasibility, costs and performance, the question of the environmental impacts (emissions, biodiversity, resources, etc.) of these technologies must also be considered.
- Another approach would be to use distributed storage, for example in the form of residential batteries or even *vehicle-to-grid* (V2G). However, the coordination of these resources is much more complex because it relies on a large number of equipment, can

impact users and raises the question of the underlying business model. The feasibility of this approach is therefore uncertain.

- In terms of management, the simultaneous consideration of short-term (minute to hour) and long-term (several years) dynamics poses problems of computation time, especially when the ageing of components is considered [4].

Planned work and provisional schedule:

The proposed thesis will focus more specifically on the case of La Reunion island, corresponding to a non-interconnected and isolated area of significant size (more than 800,000 inhabitants).

The first stage (M1-M6) will consist of a study of the state of the art in the field and a study of the results of the Hyles project, which made it possible to obtain data, to define initial scenarios and to design sizing and management algorithms that do not take into account the issue of long-term storage, nor the possibilities offered by demand response or grid-edge storage.

The second stage (M4-M24) will aim to study centralized long-term storage, revising existing algorithms to integrate the models of equipment considered (storage as well as demand response), new management and sizing strategies, and specific scenarios to be designed and evaluated.

The third step (M18-M30) will focus on the approach implementing distributed storage, e.g. through an agent-based method. The focus will be on the management of residential storage and electric vehicles. The results obtained on the same scenarios as in the previous step will make it possible to make a multi-criteria comparison (technical, economic, environmental and even social) of the two approaches. The complementarity between the two approaches will also be assessed.

Finally, the last step (M31-M36) will correspond to the writing of the thesis manuscript and then the defense. A target of publications targeting several international journals and international or national conferences will be set.

Références bibliographiques / Bibliography

[1] Observatoire Energie Réunion – Horizon Réunion, « Bilan énergétique de La Réunion », édition 2023.

[2] A. François, R. Roche, D. Grondin, and M. Benne, “Assessment of medium and long term scenarios for the electrical autonomy in island territories: The Reunion Island case study”, Renewable Energy, 2023.

[3] The Royal Society, “Large-scale electricity storage”, 2023.

[4] B. Li, R. Roche, D. Paire, and A. Miraoui, “Sizing of a stand-alone microgrid considering electric power, cooling/heating, hydrogen loads and hydrogen storage degradation”, Applied Energy, 2017.

[5] N.A. Sepulveda, J.D. Jenkins et al., “The design space for long-duration energy storage in decarbonized power systems”. Nature Energy, 2021.

Profil recherché :

Diplôme de master ou d'ingénieur en génie électrique, énergétique ou mathématiques appliquées. Expérience en programmation en Python. Maîtrise écrite et orale de l'anglais et du français. Capacité à rédiger et à présenter en anglais. Intérêt pour les questions énergétiques et de transitions. Intérêt pour le travail interdisciplinaire.

Applicant profile:

Master's or engineering degree in electrical, energy or applied mathematics engineering. Experience with Python programming. Written and oral proficiency in English and French. Ability to write and present in English. Interest in energy issues and transitions. Interest in interdisciplinary work.

Financement : MESRI Etablissement (université de Franche-Comté)

Dossier à envoyer pour le : **1^{er} juin 2024**
Début prévisionnel du contrat : 1^{er} octobre 2024
Salaire mensuel brut estimé : 1975€

Funding: French Ministry of Higher Education and Research – Université de Franche-Comté

Application to be sent by: **June 1, 2024**
Expected contract start: October 1, 2024
Estimated gross monthly salary: 1975€

Direction de la thèse / Thesis supervisor :

Prof. Dr. Robin ROCHE (Université de Franche-Comté, FEMTO-ST) – robin.roche@univ-fcomte.fr

Encadrement de la thèse / Co-supervisors :

Dr. Dominique GRONDIN (Université de La Réunion, ENERGY-lab), co-encadrant / co-supervisor,
dominique.grondin@univ-reunion.fr

Applicants are invited to submit their application to the PhD supervisors.

An application must contain the following documents:

- CV
- Grades / transcript from the latest degree
- Cover letter
- At least 1 reference letter