

THESE DE DOCTORAT DE

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 597
Sciences Economiques et sciences De Gestion
Spécialité : Sciences économiques

Par

Antoine DEBILLE

**Etudes de la valeur du stockage d'énergie dans le mix électrique :
Contribution des outils appliqués à la technologie REMORA**

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 7 juin 2024

Unité de recherche : Laboratoire d'Economie et de Management de Nantes-Atlantique (LEMNA)

Rapporteurs avant soutenance :

Mouez FODHA Professeur des universités, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, PjSE
Philippe QUIRION Directeur de recherche CNRS, CIRED, Nogent-sur-Marne

Composition du Jury :

Président :	Prénom Nom	Fonction et établissement d'exercice (8) (à préciser après la soutenance)
Examineurs :	Mouez FODHA	Professeur des universités, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, PjSE
	Philippe QUIRION	Directeur de recherche CNRS, CIRED, Nogent-sur-Marne
	Frédéric WURTZ	Directeur de recherche CNRS, Université de Grenoble, G2ELAB

Dir. de thèse :	Rodica LOISEL	Maitre de conférences, Nantes Université, LEMNA
Co-dir. de thèse :	Lionel LEMIALE	Maitre de conférences, Nantes Université, LEMNA
	Thibault NEU	Senior Technical Officer, Segula Engineering, IMT Atlantique

Invité(s)

David GUYOMARC'H Head of Research and Development, Segula Engineering

Titre : Etude de la valeur du stockage d'énergie dans le mix électrique : Contribution des outils appliqués à la technologie REMORA

Mots clés : Stockage d'énergie ; transition énergétique ; coût actualisé ; optimisation linéaire ; analyse multicritère

Résumé : Parmi les verrous au déploiement du stockage d'énergie dans le marché actuel de l'électricité on compte le flou réglementaire sur son statut de générateur, consommateur et stockeur d'électricité, la difficulté de cumuler les services-système sur plusieurs segments de marché et de facto l'insuffisance de rémunération comme signal incitatif pour les investisseurs (CRE 2019, 2024). La technologie REMORA, développée par Segula Technologies, apporte des innovations dans le stockage par air comprimé grâce à son emplacement en milieu océanique, à sa nature modulable et son contenu en matériaux non critiques.¹ Toute nouvelle technologie doit préciser son positionnement sur un marché à la fois libéralisé (fonctionnement) et régulé (dimensionnement). Cette thèse consacrée à l'analyse du stockage vient en appui à la décision des parties prenantes.

Pour évaluer le coût complet, la thèse propose d'étendre la formule du coût moyen (LCOE) en intégrant le coût de la charge et à la durée de stockage à travers trois outils : analyse backward, simulation et optimisation, qui détermineront le seuil de rentabilité (chapitre 1). Le stockage étant fortement dépendant de l'opération du système électrique, l'évaluation est complétée par une optimisation en site isolé (l'île de Guadeloupe), permettant ainsi de scénariser les volumes de stockage chargés et déchargés, et évalue la complémentarité et la substituabilité entre REMORA et les batteries de type Li-ion (chapitre 2). Le développement d'une analyse multicritère (AHP) avec une pondération des préférences politiques appliquée à des critères économiques, techniques et environnementaux permet d'estimer la plus-value du stockage REMORA (chapitre 3).

Title : Study of the value of energy storage in the electricity mix : Contribution of tools applied to REMORA technology

Keywords : Energy storage ; energy transition ; levelised cost ; linear optimisation ; multicriteria analysis

Abstract: Among the obstacles to the deployment of energy storage in the current electricity market are the blur regulation of its status between generator, consumer and electricity storer, the difficulty of cumulating system services across several market segments, and the *de facto* inadequacy of remuneration as an incentive signal for investors (CRE 2019, 2024). REMORA technology, developed by Segula Technologies, brings innovations to compressed air energy storage thanks to its offshore location, its modular nature and its non-critical materials content.¹ New technologies needs to clarify its position in a market that is both liberalized (operation wise) and regulated (sizewise). This thesis on the analysis of energy storage is intended to support stakeholders in their decision-making.

To evaluate the total cost, the thesis proposes to extend the average cost formula (LCOE) by integrating the cost of charging and the duration of storage, using three tools: backward analysis, simulation and optimization, which will determine the break-even point (chapter 1). As storage is highly dependent on the operation of the power system, the evaluation is completed by an optimization in an isolated site (Guadeloupe), enabling us to plot the volumes of charged and discharged electricity, and assess the complementarity and substitutability between REMORA and Li-ion batteries (chapter 2). The development of a multi-criteria analysis (AHP) with a weighting of political preferences applied to economic, technical and environmental criteria enables us to estimate the added value of REMORA (chapter 3).

¹ www.segulatechnologies.com/fr/innovation/projet/remora/