

## **L'énergie à point nommé. Essais sur l'innovation, la diffusion et les politiques relatives au stockage d'énergie en Europe.**

La décarbonation du système électrique européen et le renforcement de son indépendance nécessitent de substituer la production fossile principalement par du solaire et de l'éolien. Le stockage apparaît donc comme un moyen de flexibilité essentiel pour faire face à l'intermittence, à l'incertitude et à la congestion, bien que son déploiement et la répartition géographique demeurent incertains. Cette thèse analyse les trajectoires d'innovation et de diffusion des technologies de stockage (batteries, véhicules électriques intelligents et hydrogène) vers la neutralité carbone.

Elle examine d'abord les conditions dans lesquelles le stockage contribue à la réduction des émissions et concurrence les centrales fossiles, au moyen d'un modèle d'expansion de capacité. Les résultats montrent qu'en l'absence de politiques dédiées, le stockage se développe de manière modérée, alors qu'il permet une meilleure intégration des renouvelables et une baisse de l'usage des combustibles fossiles et des émissions de CO<sub>2</sub> à long terme par comparaison à de nouvelles centrales conventionnelles.

Elle analyse ensuite les stratégies de renouvellement de brevets des entreprises en réponse à la demande anticipée. La protection internationale s'avère corrélée à la taille du marché attendu, tandis que les renouvellements apparaissent indifférenciés dans les marchés secondaires. Ces résultats soulignent la nécessité de politiques adaptées pour soutenir l'innovation et la diffusion du stockage en Europe.

Enfin, en intégrant l'apprentissage dans le modèle d'expansion de capacité, cette thèse montre que le cadre de politique optimal doit venir compléter un prix du carbone par des subventions ciblées. Les résultats soulignent l'intérêt des baisses de coûts induites, notamment pour éviter tout verrouillage technologique. Le stockage interagit avec les énergies renouvelables, générant d'importants gains systémiques bénéfiques pour le surplus collectif. L'hétérogénéité des effets selon les pays souligne l'importance d'une coopération afin d'internaliser les externalités de diffusion et d'assurer une allocation efficiente des ressources publiques.

Mots clés : Stockage d'énergie, Politiques de décarbonation, Energies renouvelables intermittentes, Innovation, Modélisation, Apprentissage par la pratique.

## **Energy in good time. Essays on innovation, diffusion and policy for energy storage in Europe.**

Decarbonizing Europe's power system and strengthening its energy independence requires replacing fossil generation with low-carbon sources, chiefly solar and wind. In this context, storage emerges as a pivotal flexibility option to address intermittency, uncertainty, and grid congestion, though its deployment trajectory and geographic distribution remain uncertain. This thesis analyzes the innovation and diffusion pathways of storage technologies (batteries, vehicle-to-grid, and hydrogen) on the road to net-zero.

The thesis first investigates the conditions under which storage contributes to emissions reduction and competes with fossil plants, using a stochastic capacity expansion model. Results

show that, without support policies, stationary storage develops only moderately, yet it enables more effective renewable integration and delivers stronger reductions in fossil use and CO<sub>2</sub> emissions in the long run than continued reliance on fossil plants.

Second, firms' patent renewal strategies in response to market demand are examined. European protection is found to align with expected market size, supporting the relevancy of demand-pull mechanisms. Yet, renewal behavior remains largely indiscriminate in smaller markets, calling for tailored intellectual property policies to support innovation and diffusion of emerging storage technologies.

Finally, by incorporating endogenous learning-by-doing into the capacity expansion model, this work shows that optimal policy design must complement carbon pricing with technology-specific subsidies. Results demonstrate the importance of fully exploiting deployment-driven cost reductions while avoiding technology lock-in. Storage fundamentally reshapes the substitutability of renewables, yielding significant integration gains with major implications for welfare and policy. Because national outcomes remain heterogeneous, cross-country cooperation is essential to internalize spillovers and ensure efficient allocation of public resources.

Keywords : Energy storage, Decarbonization policies, Variable renewable energy, Innovation, Modeling, Learning-by-doing.

\*Sous la direction de/under the supervision of Marc Baudry (Paris-Nanterre)