

L'énergie à point nommé

Essais sur l'innovation, la diffusion et les politiques relatives au stockage d'énergie en Europe

Milien Dhorne

Université Paris-Nanterre - EconomiX
Sous la direction de Pr. Marc Baudry

5 décembre 2025

- 1 Contexte**
- 2 Stockage et émissions**
- 3 Modèle numérique de mix optimal**
- 4 Déterminants de l'innovation dans le stockage**
- 5 Analyse de politiques publiques**
- 6 Conclusion**
- 7 Références bibliographiques**

Contexte

- Objectif neutralité carbone en Europe en 2050
- Secteur de production d'électricité : 1^{er} secteur d'émissions (27 % du total)
- Préoccupation majeure pour l'électrification des transports et de l'industrie
- Mix électrique encore dépendant du gaz et du charbon (35 % de la production totale) : choix technologiques et géopolitiques
- Eolien et solaire sont intermittentes et dépendent des conditions météorologiques : « cannibalisation » ou faible production
- Tout système électrique doit être à l'équilibre entre consommation et production à chaque instant

Comment assurer une transition énergétique en garantissant un niveau de service identique tout en maîtrisant les coûts ?

Contexte



- Le stockage est une solution émergente permettant à la production intermittente de s'adapter à la consommation
- Intérêt grandissant pour le stockage :
 - Volatilité en augmentation sur les marchés à mesure que les EnR progressent
 - Davantage de prix négatifs (3-6% du temps en 2024 en Europe)
 - Dynamique d'investissement pour la mobilité et réduction des coûts



Prix d'un pack batterie en \$2020/kWh (BloombergNEF)

Axes de recherche



Cette thèse interroge le rôle du stockage d'énergie pour la transition du système électrique européen, autour des axes de recherche suivants :

- Les systèmes de stockage contribuent-ils à réduire les émissions de CO₂ ?
- Quelles sont les conditions d'émergence du stockage à grande échelle dans un environnement *energy only* ?
- Quelles sont les mécanismes de réduction des coûts des systèmes de stockage à l'œuvre ?
- Quel est le rôle des politiques publiques pour le développement du stockage en Europe ?

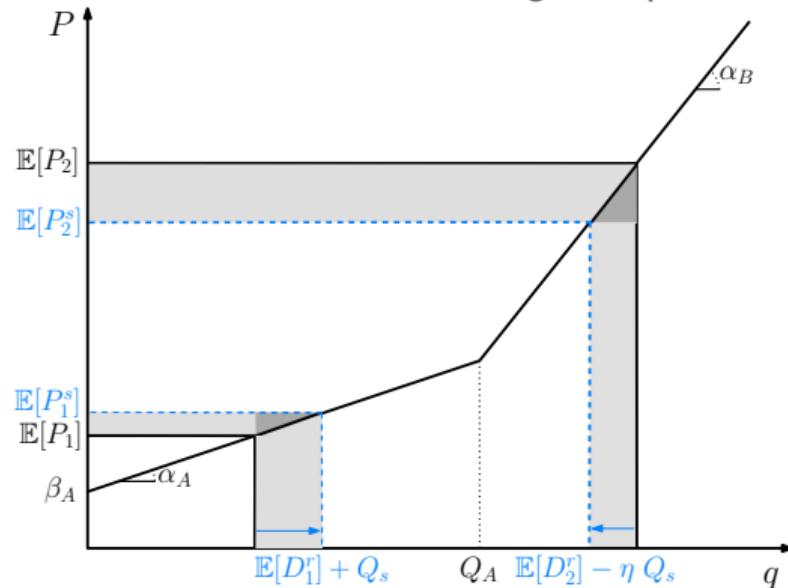
L'effet du stockage sur les émissions de CO₂

Le rôle ambigu du stockage



- Consommateur net d'électricité, donc émetteur indirect d'émissions (Beuse *et al.*, 2021)
- Substitue le taux d'émissions de la technologie de pointe par la technologie de base (\neq la moins polluante) (Carson et Novan, 2013)
- Contribue à modifier les régimes de prix et induit donc des effets à long terme sur les moyens de production
- Modifie les contraintes opérationnelles des centrales conventionnelles

Illustration de l'arbitrage de prix



Résultats d'un modèle analytique : Réduction / augmentation des émissions selon la forme du *merit-order* et la possibilité de recharge décarbonée

**Un modèle numérique pour
déterminer l'émergence du stockage**

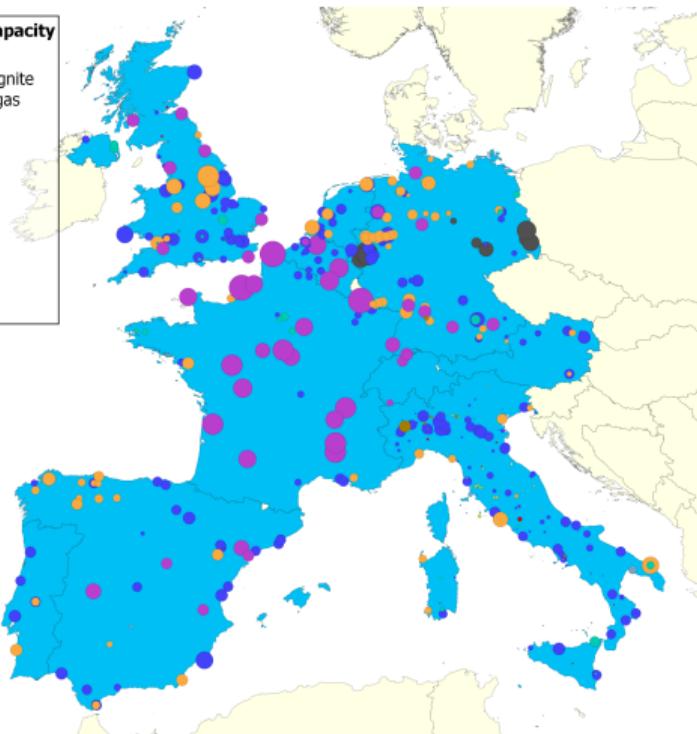
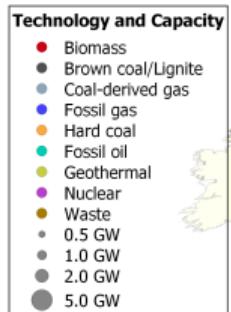
Un modèle numérique européen



- Modèle d'optimisation sous contrainte qui réplique une concurrence entre acteurs preneurs de prix
- Scénarios Monte-Carlo hebdomadaires → focus sur les cycles \leq moyen terme

Contributions :

- Expansion endogène de capacités : EnR, batteries, V2G, P2H
- Transition jusqu'en 2040
- Calibration fine des mixes existants
- Résolution stochastique par algorithme de Benders

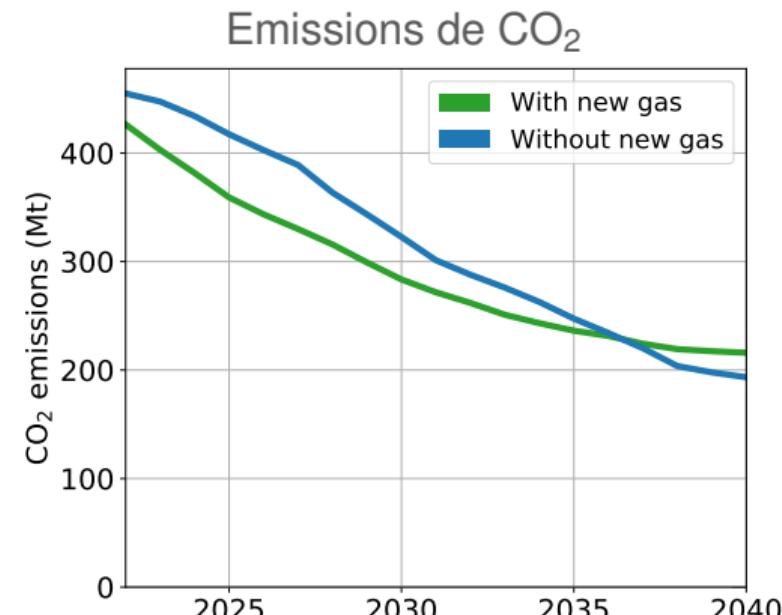
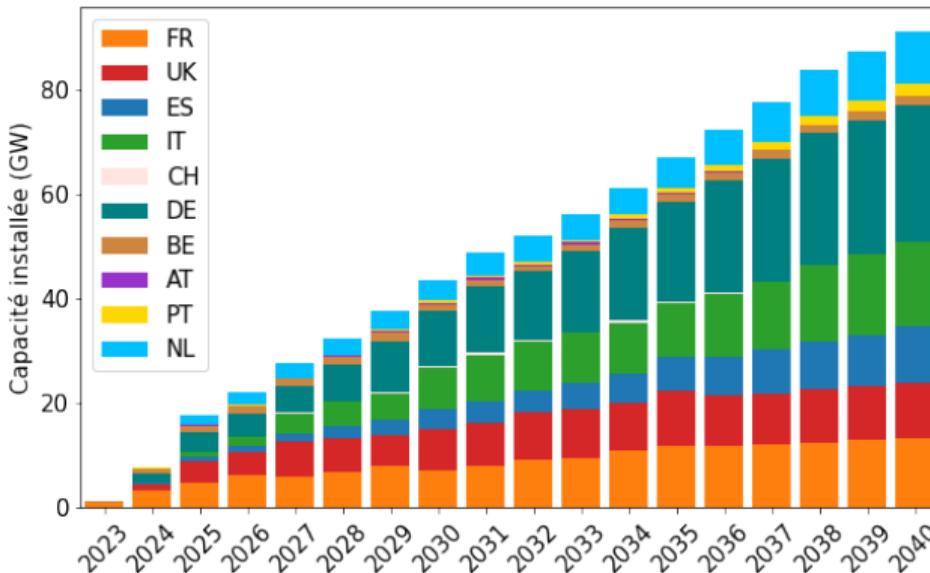


Périmètre du modèle numérique

Résultats numériques



Capacités de long-terme optimales en stockage
(sortie du charbon et moratoire gaz)



Effets des politiques *demand-pull* sur l'innovation dans le stockage

Les limites du marché de l'innovation



Les investissements en stockage peuvent être suboptimaux :

- Forte incertitude et aversion au risque pour les investissements de long-terme
- Information partielle sur le potentiel des technologies émergentes
- Incapacité des firmes à s'approprier la valeur de l'innovation (Jaffe, 1986)

Réponse des politiques publiques :

- Mettre en œuvre des droits à la propriété intellectuelle
- Inciter à l'innovation à travers des politiques *technology-push* (e.g subvention à la recherche) et *demand-pull* (e.g contraintes réglementaires sur les marchés) (Fabrizio *et al.*, 2013)

Les firmes innovent afin de rester dans la course technologique et protègent leurs inventions dans le but de sécuriser des futurs marchés

Une couverture géographique hétérogène

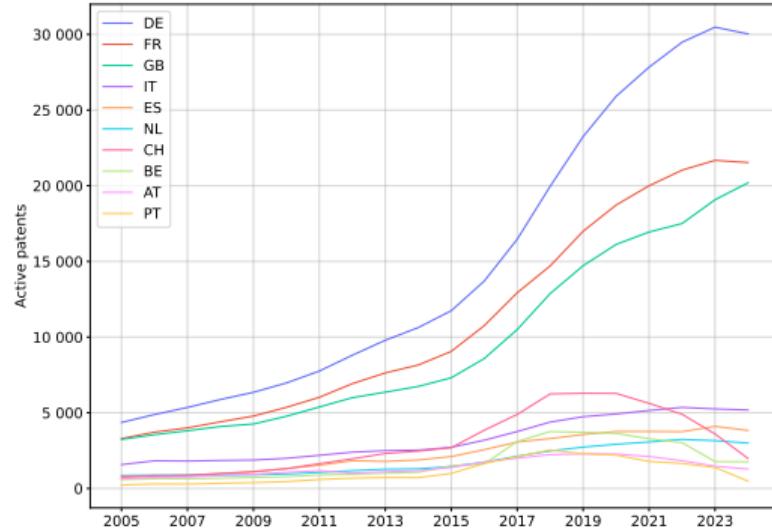


Protection des inventions :

- Sous réserve de dévoiler leurs inventions, les firmes ont l'exclusivité (≤ 20 ans)
- Elles choisissent où protéger leurs inventions en payant (analyse coûts-bénéfices)

Questions de recherche :

- Quels sont les effets des politiques *demand-pull* sur les renouvellements de brevets dans le stockage ?
- Les anticipations des acteurs sont-elles alignées sur les trajectoires de développement ?



Nombre de brevets actifs dans le domaine du stockage en Europe

Stratégie économétrique

- Brevets *European Patent Office* : un seul examen sur le fond pour l'octroi du brevet (un même objet), ensuite converti en brevet national

Formulation

Contributions :

- Modèle probit multivarié expliquant les renouvellements de brevets en Europe pour évaluer l'effectivité des mécanismes demand-pull
- Utilisation des tailles de marché futures simulées dans le chapitre précédent comme variable *demand-pull*
- Contrôles d'autres caractéristiques (qualité du brevet, état de la concurrence, inventeurs, etc)

$$Y_{i,c} = \begin{cases} 1 & \text{if } Y_{i,c}^* > 0, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Y_{i,c}^* = X_{i,c} \beta_c + \varepsilon_{i,c}$$

$$\varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0, P), \quad P = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \rho_{1,n_c} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n_c,1} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Résultats économétriques



- La variable de la taille de marché est significative et positive
- 1 GW $\Leftrightarrow + 4,2 \rightarrow 7,7\%$ de chance de renouvellement
- Tendance des firmes à renouveler soit dans le trio DE-FR-GB soit indifféremment malgré l'hétérogénéité
- Résultats robustes à plusieurs échéances après l'octroi du brevet et selon plusieurs spécifications
- Grande partie de la variance inexpliquée

Corrélation des facteurs inobservés

		3 years after grant									
		DE	FR	GB	IT	ES	NL	CH	BE	AT	PT
5 years after grant	DE	1	0.712 *** (0.055)	0.611 *** (0.015)	-0.442 *** (0.011)	-0.605 *** (0.031)	-0.642 *** (0.025)	-0.616 *** (0.022)	-0.686 *** (0.026)	-0.737 *** (0.027)	-0.783 *** (0.024)
	FR	0.771 *** (0.060)	1	0.810 *** (0.029)	-0.114 *** (0.002)	-0.298 *** (0.043)	-0.362 *** (0.021)	-0.296 *** (0.013)	-0.345 *** (0.019)	-0.389 *** (0.019)	-0.484 *** (0.021)
	GB	0.680 *** (0.016)	0.832 *** (0.038)	1	-0.035 *** (0.001)	-0.174 *** (0.077)	-0.194 *** (0.018)	-0.146 *** (0.012)	-0.177 *** (0.020)	-0.241 *** (0.023)	-0.323 *** (0.021)
	IT	-0.278 *** (0.006)	0.051 ** (0.001)	0.133 *** (0.007)	1	0.868 *** (0.061)	0.789 *** (0.020)	0.742 *** (0.020)	0.759 *** (0.023)	0.757 *** (0.022)	0.763 *** (0.023)
	ES	-0.445 *** (0.035)	-0.160 *** (0.057)	-0.0304 *** (0.004)	0.854 *** (0.113)	1	0.865 *** (0.028)	0.819 *** (0.021)	0.843 *** (0.024)	0.851 *** (0.024)	0.880 *** (0.025)
	NL	-0.526 *** (0.028)	-0.233 *** (0.027)	-0.063 *** (0.037)	0.781 *** (0.025)	0.856 *** (0.041)	1	0.840 *** (0.029)	0.885 *** (0.024)	0.881 *** (0.022)	0.900 *** (0.022)
	CH	-0.526 *** (0.023)	-0.211 *** (0.016)	-0.069 *** (0.019)	0.744 *** (0.026)	0.828 *** (0.028)	0.869 *** (0.038)	1	0.873 *** (0.024)	0.880 *** (0.024)	0.879 *** (0.024)
	BE	-0.567 *** (0.025)	-0.247 *** (0.022)	-0.081 *** (0.022)	0.758 *** (0.029)	0.833 *** (0.031)	0.899 *** (0.029)	0.886 *** (0.031)	1	0.899 *** (0.026)	0.917 *** (0.024)
	AT	-0.626 *** (0.028)	-0.302 *** (0.023)	-0.143 *** (0.033)	0.770 *** (0.030)	0.859 *** (0.034)	0.908 *** (0.029)	0.920 *** (0.032)	0.913 *** (0.037)	1	0.928 *** (0.029)
	PT	-0.675 *** (0.025)	-0.386 *** (0.025)	-0.216 *** (0.028)	0.750 *** (0.029)	0.867 *** (0.032)	0.903 *** (0.027)	0.893 *** (0.030)	0.918 *** (0.030)	0.943 *** (0.037)	1

Analyse *ex ante* de politiques publiques de soutien

Learning-by-doing et politiques publiques



Insuffisance d'une tarification du CO₂ :

- N'intègre pas les retombées d'un investissement précurseur en termes d'innovation et de diffusion (Arrow, 1962, Acemoglu *et al.*, 2012)
- Le design du mix optimal de politiques est significativement impacté (Gillingham *et al.*, 2008, Coppens *et al.*, 2025)

Les effets de *learning-by-doing* :

- La diffusion, l'expérience et le passage à l'échelle sont sources de gains de productivité, participant à une réduction du coût unitaire (Wright, 1936, Fischer *et al.*, 2003)
- Les technologies émergentes dans le secteur de l'électricité sont particulièrement affectées (Rubin *et al.*, 2015)

Learning-by-doing et politiques publiques :



Rôle des politiques publiques

- Internaliser les retombées d'apprentissage dans les décisions d'investissement : subvention des technologies à fort potentiel
- Prévenir les situations de verrouillage technologique (mais peuvent également en être les causes)

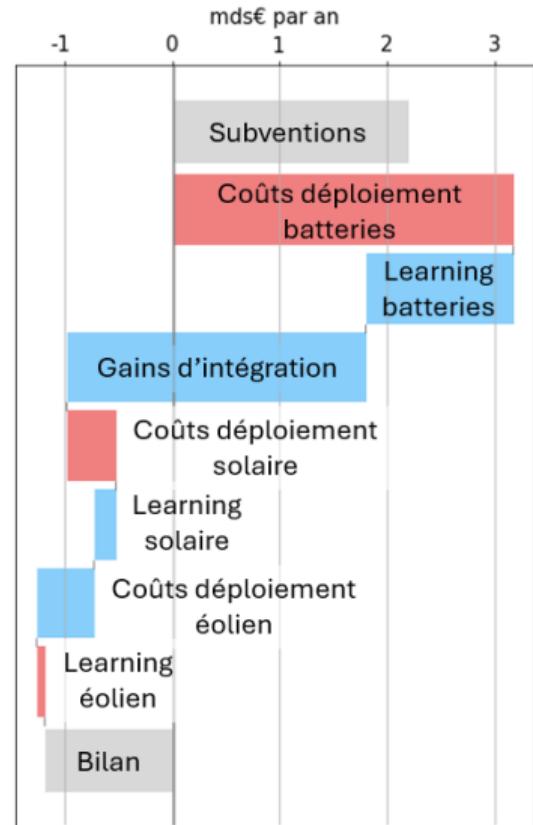
Contributions :

- La subvention d'une technologie produit un effet direct et indirect → approche systémique
- Le stockage a des fortes interactions avec le solaire et l'éolien : les effets sont-ils renforcés ?
- Décomposition par effet et analyse par pays démontrant des résultats hétérogènes

Bilan des politiques de soutien au stockage



- Conditions étroites d'efficacité (gains > coûts) des subventions
- Niveaux de subvention modérés pour éviter une distorsion et un risque de verrouillage (< 5000 €/MW de batterie/an)
- Bénéfices collectifs :
-1 mds€/an - 7,6 Mt CO₂/an
- 1 MW stockage \Leftrightarrow 0,36 MW de solaire mais -0,21 MW d'éolien
- Enjeux de bilans coûts-bénéfices différenciés pour les États en cas de subvention uniforme



Conclusion

Conclusion



- Outils empiriques et de modélisation pour analyser l'essor du stockage dans le système électrique européen
- Déploiement du stockage fortement dépendant des politiques publiques - mesures réglementaires portant sur les centrales conventionnelles, objectifs ambitieux de déploiement des EnR, mécanismes *demand-pull* pour l'innovation et subventions capacitaires pour le *learning*
- Rôle central d'intégration pour le système et condition *sine qua non* de l'intégration massive des EnR et de la neutralité carbone
- Poursuite des travaux de recherche :
 - Articulation commune des modélisations pour déterminer un *policy mix* optimal
 - Analyse *ex post* ou plus opérationnelle des politiques en lien avec le stockage pour discuter de l'ajustement fin de chaque instrument d'intervention publique

Merci pour votre attention

Merci également à l'École Nationale des Ponts et Chaussées et à la Chaire Économie du Climat

Références bibliographiques

Bibliographie



- Richard Carson, Kevin Novan, "The private and social economics of bulk electricity storage", *Journal of Environmental Economics and Management*, 2013.
- Martin Beuse, Bjarne Steffen, Mathias Dirksmeier, Tobias Schmidt, "Comparing CO₂ emissions impacts of electricity storage across applications and energy systems", *Joule*, 2021.
- Adam Jaffe, "Technological opportunity and spillovers of R&D: Evidence from firms' patents, profits, and market value", *American Economic Review*, 1986.
- Kira Fabrizio, Sharon Poczter, Bennet Zelner, "Does innovation policy attract international competition? Evidence from energy storage", *Research Policy*, 2017
- Kenneth Arrow, "The economic implications of learning-by-doing", *Review of Economic Studies*, 1962.
- Daron Acemoglu, Philippe Aghion, Leonardo Bursztyn, David Hemous, "The environment and directed technical change", *American Economic Review*, 2012.

Bibliographie



- Kenneth Gillingham, Richard Newell, William Pizer, "Modeling endogenous technological change for climate policy analysis", *Energy Economics*, 2008.
- Léo Coppens, Simon Dietz, Frank Venmans, "Optimal climate policy under exogenous and endogenous technical change: Making sense of the different approaches", *Journal of Environmental Economics and Management*, 2025.
- Theodore Wright, "Factors affecting the cost of airplanes", *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1936.
- Carolyn Fischer, Ian Parry, William Pizer, "Instrument choice for environmental protection when technological innovation is endogenous", *Journal of Environmental Economics and Management*, 2003.
- Edward Rubin, Inês Azevedo, Paulina Jaramillo, Sonia Yeh, "A review of learning rates for electricity supply technologies", *Energy Policy*, 2015.