

## *L'hydroélectricité à l'épreuve du changement climatique : modélisation couplée des systèmes hydrologiques et électriques pour l'adaptation et l'atténuation*

Laure Baratgin

L'hydroélectricité joue aujourd'hui un rôle clé dans le paysage énergétique français, couvrant plus de 10 % de la demande électrique nationale et contribuant significativement aux besoins de flexibilité du système électrique, notamment infrajournaliers. Toutefois, la production hydroélectrique française sera exposée à d'importants changements dans les années à venir. D'une part, le réchauffement climatique accentue les contrastes saisonniers de précipitations et augmente la demande évaporative, modifiant les débits des rivières, et donc la ressource disponible pour les centrales hydroélectriques. D'autre part, l'intégration croissante d'énergies renouvelables variables (éolien et solaire), encouragée par les politiques de décarbonation, accroît les besoins de flexibilité du système électrique. Enfin, la gestion des réservoirs hydroélectriques dépend aussi de l'évolution des autres usages de l'eau, notamment agricoles.

Dans cette thèse, nous proposons une approche intégrée de modélisation pour représenter et quantifier ces différents effets et leurs interactions. Notre approche repose sur le couplage d'un modèle climatique de surface continentale (LSM) et d'un modèle d'optimisation du système électrique (PSM). Ce couplage permet de prendre en compte simultanément les contraintes liées au climat et au fonctionnement du système électrique.

Le couplage consiste à utiliser les résultats produits par un modèle comme données d'entrée

pour le second. La production hydroélectrique simulée par le PSM est ainsi utilisée comme cible pour guider l'opération des réservoirs dans le LSM. Elle sert de référence pour déterminer les lâchers d'eau de chaque réservoir à chaque pas de temps. Inversement, les simulations hydrologiques issues du LSM sont utilisées pour paramétriser les contraintes de production appliquées dans le PSM. Nous montrons que cette intégration améliore à la fois la modélisation de l'écoulement des rivières dans le modèle climatique et celle de la production hydroélectrique dans le modèle électrique. Surtout, elle permet d'évaluer de manière cohérente la réponse de la production hydroélectrique à différents scénarios de changement climatique et de mix électrique.

Les résultats obtenus pour la France montrent un impact limité du changement climatique sur la production hydroélectrique annuelle, mais des contrastes saisonniers plus marqués, avec une augmentation de la production en hiver et une diminution en été. Par ailleurs, l'intégration croissante d'énergies renouvelables variables modifie le profil saisonnier de production des centrales hydroélectriques et augmente la valeur de la flexibilité offerte par les réservoirs, qui deviennent un atout essentiel pour compenser l'intermittence de l'éolien et du solaire.

Notre étude met aussi en évidence d'importantes incertitudes sur les niveaux futurs de production hydroélectrique et les prix de l'électricité. La première incertitude est liée aux projections

climatiques et provient notamment des difficultés des modèles à représenter les précipitations dans les régions montagneuses. La seconde concerne l'évolution des coûts de production des centrales thermiques décarbonées, qui seront nécessaires pour couvrir les besoins de flexibilité d'un mix énergétique neutre en carbone et auront un

impact déterminant sur le prix de l'électricité. Malgré ces incertitudes, les changements saisonniers observés dans la production hydroélectrique sont un résultat robuste.

**Laboratoire d'accueil :** Laure Baratgin était attachée à l'École nationale des ponts et chaussées et a réalisé sa thèse au sein de deux laboratoires : le Laboratoire de météorologie dynamique (LMD) dirigé par Freddy Bouchet et le Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) dirigé par Philippe Quirion.

Le LMD est une unité mixte de recherche (CNRS, École polytechnique, École des ponts, ENS, Sorbonne Université) spécialisée dans l'étude de l'atmosphère et du climat. Ses travaux couvrent un large spectre allant de la compréhension des processus physiques et dynamiques de l'atmosphère terrestre à la modélisation du climat. Une part importante de ses recherches porte sur le cycle de l'eau, et vise notamment à améliorer la représentation des processus hydrologiques dans les modèles climatiques.



Le CIRED est une unité mixte de recherche (CNRS, École des ponts, EHESS, AgroParisTech, Cirad) spécialisée dans l'analyse des enjeux énergétiques, économiques et environnementaux de la transition vers un développement durable. L'économie et les sciences sociales constituent le centre de gravité disciplinaire du laboratoire, mais il dialogue aussi avec les sciences du climat, de l'environnement ou encore les sciences de l'ingénieur.



Pour plus d'informations : <https://www.lmd.ipsl.fr/> et <https://www.centre-cired.fr/>.

**Soutenance de la thèse :** La thèse a été soutenue le 18 novembre 2024 au CIRED devant un jury composé de sept membres : Anna Creti, professeure d'économie à l'Université de Paris Dauphine-PSL (présidente) ; Nathalie Voisin, chercheuse au Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) (rapporteure) ; Eric Martin, chef de projet « Environnement » à la direction de l'appui aux politiques publiques de l'INRAE (rapporteur) ; Sylvie Parey, chercheuse à EDF (examinatrice) ; Jan Polcher, directeur de recherche CNRS au LMD (directeur de thèse) ; Philippe Quirion, directeur de recherche CNRS au CIRED (directeur de thèse) ; Patrice Dumas, chercheur Cirad au CIRED (membre invité).

La thèse est disponible sur : <https://theses.fr/2024IPPAX078>.

**Et après la thèse ?** Laure Baratgin travaille actuellement à la Direction générale du Trésor, dans le bureau en charge de l'environnement, la biodiversité et l'adaptation au changement climatique. Elle participe à l'évaluation de l'impact environnemental des dépenses et à l'élaboration de recommandations de politiques publiques environnementales.