

Théorie des Jeux pour la Décarbonation du Système Électrique

1) Le sujet de recherche choisi et son contexte scientifique et économique

Contexte

Le développement de la production des énergies renouvelables (solaire, éolien) définit de nouveaux défis dans la gestion des systèmes de production et de transport d'énergie, ainsi que sur le fonctionnement des marchés de l'électricité.

Actuellement, ces marchés sont opérés de façon centralisée par un opérateur de marché, dont l'objectif est de maximiser le bien-être social (ou de façon équivalente, minimiser le coût social) des participants, tout en garantissant l'équilibre de l'offre et de la demande. La mise en relation des producteurs et des consommateurs se fait via un système d'enchères.

Le but de cette thèse est de proposer un outil d'aide à la décision pour la définition des enchères permettant la prise en compte des aspects environnementaux quantifiés via la pollution engendrée par les technologies activées par l'opérateur de marché, en plus des aspects économiques quantifiés via le coût social. Nous nous intéresserons en particulier à l'arbitrage réalisé par l'opérateur de marché entre critères économiques et environnementaux via la formulation du système d'enchères comme un jeu non-coopératif, et à l'impact de cet arbitrage sur les équilibres de marché.

Problème

Nous considérons un marché d'électricité faisant intervenir des producteurs d'électricité ayant des technologies différentes. Nous supposons que les producteurs sont stratégiques (leurs parts de marché pouvant varier) et que leurs décisions sont susceptibles d'influencer le prix du marché. En outre, un même producteur peut avoir à sa disposition plusieurs technologies et certains producteurs peuvent également être consommateurs (dans ce cas ils sont appelés "prosumers"). Ces producteurs et prosumers seront appelés "agents" ou « joueurs » dans le contexte de la théorie des jeux. Notons qu'ils ont en outre à leur disposition de la flexibilité induite par exemple, par les batteries déployées pour le stockage du surplus de production, ou via des technologies d'effacement de la demande.

Ces agents doivent définir, un jour à l'avance (en "day ahead"), des enchères en prix et en quantité. Ces enchères sont soumises à l'opérateur de marché qui définit le prix du marché de façon à minimiser le coût total du système électrique. De façon générale deux stratégies sont considérées : "pay as clear" ou "pay as bid".

Ce problème peut être modélisé comme un jeu de Stackelberg (multi-leader single follower) impliquant plusieurs meneurs (les producteurs) et un suiveur (l'opérateur de marché). Plus précisément, les agents interagissent selon un équilibre de Nash au premier niveau. Chacun d'entre eux a pour but de déterminer la stratégie (prix, quantité) lui permettant de maximiser son profit. Chaque agent cherche alors à résoudre un problème d'optimisation

bi-niveaux. Autrement dit les agents sont en compétition les uns avec les autres mais chaque agent séparément intègre le comportement de l'opérateur de marché lors de sa prise de décision.

Les aspects novateurs de cette thèse sont : i) intégrer des mesures de pollution dans le modèle de prise de décision de l'opérateur de marché. Plus précisément la forme de ces contraintes complexifie la reformulation des problèmes d'optimisation bi-niveaux de chaque agent sous forme d'un problème d'optimisation à un seul niveau avec contraintes de complémentarité, ii) intégrer des notions de flexibilité lors de la définition des enchères, iii) intégrer de l'incertitude par rapport à la production d'énergie renouvelable. De plus, nous considérerons iv) différentes stratégies pour représenter l'incertitude liée aux stratégies des agents concurrents lors de la prise de décision d'un agent. Une première approche inspirée de la littérature des jeux Bayésiens, consiste à considérer une formulation stochastique où les stratégies des concurrents sont représentées via des distributions de probabilité. Une autre approche repose sur l'utilisation de méthodes d'apprentissage multi-agents par renforcement du type acteur-critique. Nous chercherons en particulier à établir des garanties de convergence pour des jeux continus à somme non nulle.

Il s'agit donc d'un vrai défi au niveau scientifique et applicatif. Le fait que les enchères se répètent chaque jour, produit un modèle dynamique de théorie des jeux, dans lequel un processus d'apprentissage par les producteurs peut être introduit, dont les équilibres sont complexes à calculer. Cela nous amènera à déplacer le problème du concept d'équilibre vers la façon dont les joueurs pourraient atteindre cet équilibre par le biais d'un processus d'apprentissage en ligne ou adaptatif. Sur le plan algorithmique, nous serons confrontés à des problèmes non linéaires de grande taille.

2) L'état du sujet dans le laboratoire d'accueil

Ce sujet fait partie des objectifs de l'équipe INOCS (Integrated Optimization in complex Structure). Hélène Le Cadre et Luce Brotcorne travaillent sur les problèmes d'équilibre dans le domaine de l'énergie depuis de nombreuses années.

Une des priorités du centre INRIA de l'université de Lille, du laboratoire Cristal et de la Région des Hauts de France est le développement durable. Ce sujet de thèse intégrant des pénalisations de pollution dans les enchères rentrent donc dans ces priorités.

3) Les objectifs visés, les résultats escomptés

Le but de cette thèse est de définir et mettre en œuvre un outil d'intelligence artificielle ou plus précisément un outil d'aide à la décision pour la gestion des marchés d'électricité. Au niveau scientifique, l'intégration de contraintes de pollution et de modèles d'apprentissage dans les modèles d'optimisation « multi-leader single follower » représente un important défi. Au niveau applicatif, cet outil pourrait être utilisé comme prototype pour accélérer la décarbonation du système électrique.

4) Le programme de travail avec les livrables et l'échéancier prévisionnel

Soit T_0 la date de démarrage du projet de thèse.

Etape 1 [T0 - T0+6 mois] : Revue de littérature détaillée des modèles multi-leader single follower en considérant tout particulièrement les modèles comprenant une composante d'apprentissage.

Etape 2 [T0 - T0+12 mois] : Définition du premier modèle simplifié incluant uniquement des contraintes de pollution (en supposant que les stratégies des autres joueurs sont connues, pas de composante stochastique). Étude des propriétés du modèle . Mise en œuvre. Test sur des données synthétiques.

Etape 3 [T0+12 mois - T0+24 mois] : Extension du modèle de l'étape 1 en incluant une composante stochastique et la notion de risque. Étude des propriétés du modèle . Mise en œuvre. Test sur des données synthétiques.

Etape 4 [T0+24 mois - T0+36 mois] : Extension du modèle de l'étape 3 en intégrant une composante dynamique et d'apprentissage des stratégies des autres agents. Étude des propriétés du modèle . Mise en œuvre. Génération de cas d'usage. Tests .

Remarques

Les données et certains paramètres des modèles sont estimés à partir des informations publiques disponibles au Chili et en France. Au Chili, CEN (coordinateur national de l'énergie <https://www.coordinador.cl/>), et en France (RTE <https://www.rte-france.com/en/home>).

Les livrables seront constitués par les trois articles soumis en Étapes 2, 3 et 4.

5) Les collaborations prévues (préciser le cadre, la nature des collaborations, l'ancrage régional, national, international, la transdisciplinarité éventuellement)

Des collaborations sont prévues avec Alejandro Jofre de l'Université du Chili.

6) Une liste de 10 publications maximum portant directement sur le sujet en soulignant celles du laboratoire

J. De Boeck, L. Brotcorne, B. Fortz, Strategic Bidding in Price Coupled Region, Mathematical Methods of Operations Research, 1-43, 2021.
<https://inria.hal.science/hal-03504986/document>

N. Hernandez-Santibanez, A. Jofré, D. Possamai, Pollution regulation for electricity generators in a transmission network, SIAM Journal on Control and Optimization, vol. 61, no. 2, pp. 788-819, 2023.
<https://arxiv.org/abs/2111.13505>

M. Tostado-Véliz, J. S. Giraldo, D. Icaza Álvarez, C. Cruz, F. Jurado, Robust Day-ahead Scheduling of Cooperative Energy Communities Considering Multiple Aggregators, Sustainable Cities and Society, 2024.

B. Heymann, A. Jofré, Reverse auctions with transportation and convex costs, Computational Management Science, 21:20, 2024.
<https://hal.science/hal-04442630v1>

A. Solomon, H. Sahin, C. Breyer, The pitfall in designing future electrical power systems

without considering energy return on investment in planning, *Applied Energy*, vol. 369, 2024.

F. Morri, H. Le Cadre, P. Gruet, L. Brotcorne, Learning in Stackelberg Games with Application to Strategic Bidding in the Electricity Market, *Proceedings of IEEE 20th International Conference on the European Electricity Market (EEM)*, Istanbul, Turkey, June 10-12, 2024.

<https://hal.science/hal-04515557/document>

H. Le Cadre, M. Datar, M. Guckert, E. Altman, Learning Market Equilibria Preserving Statistical Privacy Using Performative Prediction, forthcoming at *IEEE Transactions on Automatic Control*.

<https://inria.hal.science/hal-04343535>

H. Höschle, H. Le Cadre, Y. Smeers, A. Papavasiliou, R. Belmans, Using ADMM for Risk-Averse Equilibrium Computation, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 5, pp. 4819-4830, 2018.

<https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/en/object/boreal%3A217350>

J. P. Sepulveda, L. Brotcorne, H. Le Cadre, A Reverse Stackelberg Model for Demand Response in Local Energy Markets, under revision at *EJOR*.

<https://hal.science/hal-04525404/document>

A. Garmendia, F. Morri, Q. Cappart, H. Le Cadre, Winning the 2023 CityLearn Challenge: a Community-based Hierarchical Energy Systems Coordination Algorithm, *Proceedings of the 27th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI)*, Santiago de Compostela, Spain, October 19-24, 2024.

<https://hal.science/hal-04685791/document>