LE RÔLE DE LA MODÉLISATION DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES POUR APPUYER LA DÉCARBONATION DU CANADA

RÉSUMÉ : Longtemps le domaine de la recherche opérationnelle et des économistes, la modélisation des systèmes énergétiques a tout à gagner de la contribution de la physique.



Par **NORMAND MOUSSEAU** <normand.mousseau@umontreal.ca>

Département de physique, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada

Les systèmes énergétiques représentent l'ensemble des sources d'énergie utilisées par nos sociétés, ainsi que les infrastructures et les technologies associées à leur production, à leur transport, à leur transformation et à leur utilisation dans leur service final, ce qui inclut : chauffage, un bâtiment, transport de personne et de marchandise, fabrication d'un bien et autres [1]. Ces systèmes sont complexes, interconnectés et, dans la plupart des cas, se sont développés au fil du temps dans un mélange de croissance organique, de planification publique et de lutte pour la protection de divers intérêts. Le rôle central des systèmes énergétiques dans nos sociétés est devenu évident après les premières crises pétrolières du début des années 1970. Les interruptions brutales de livraison de pétrole ont fait apparaître la nécessité de comprendre le système énergétique, ce qui a propulsé le développement des premiers modèles, basés sur une représentation ascendante de ce système. Ces modèles, qui décrivent avec détails les représentations et les relations techniques et économiques de la production à la consommation finale, jouent différents rôles dans la compréhension et la planification des systèmes énergétiques.

Plusieurs familles de modèles existent : des modèles de simulation, qui évaluent, à partir de diverses règles, l'évolution des besoins énergétiques en fonction de la croissance démographique et économique, en plus des transformations technologiques [3] ; des modèles d'optimisation ascendants, qui partent de l'état actuel du système énergétique (de la production aux technologies de consommation) [4] et qui évaluent, souvent en fonction des demandes évaluées par simulation, les choix énergétiques et technologiques optimaux afin de réduire les coûts du système tout en répondant aux demandes affichées; des systèmes descendants [5], souvent basés sur une théorie classique d'équilibre général, qui partent d'une description globale et à haut niveau du système économique pour évaluer le lien entre ces transformations et le reste de l'économie. En parallèle, bien sûr, d'autres modèles techniques ont été développés pour représenter, entre autres, les réseaux électriques, les

réseaux gaziers et le système pétrolier, en appui à la planification et à la gestion de ces réseaux complexes.

Après une période relativement tranquille dans le domaine énergétique, l'intérêt pour les modèles systémiques fut relancé avec les grands traités internationaux sur le climat, et la volonté affichée par de nombreux pays de réduire de manière importante leurs émissions de gaz à effet de serre, et même, avec l'Accord de Paris, signé en 2015, de viser la carboneutralité à l'horizon 2050 (Fig. 1) [5]. Puisque le secteur énergétique est responsable des deux tiers des émissions mondiales, il allait de soi que toute réduction allait impliquer des transformations du système énergétique tout en élargissant les variables considérées pour inclure des enjeux climatiques, environnementaux et de cycle de vie, avec les modèles d'évaluation intégrée [6].

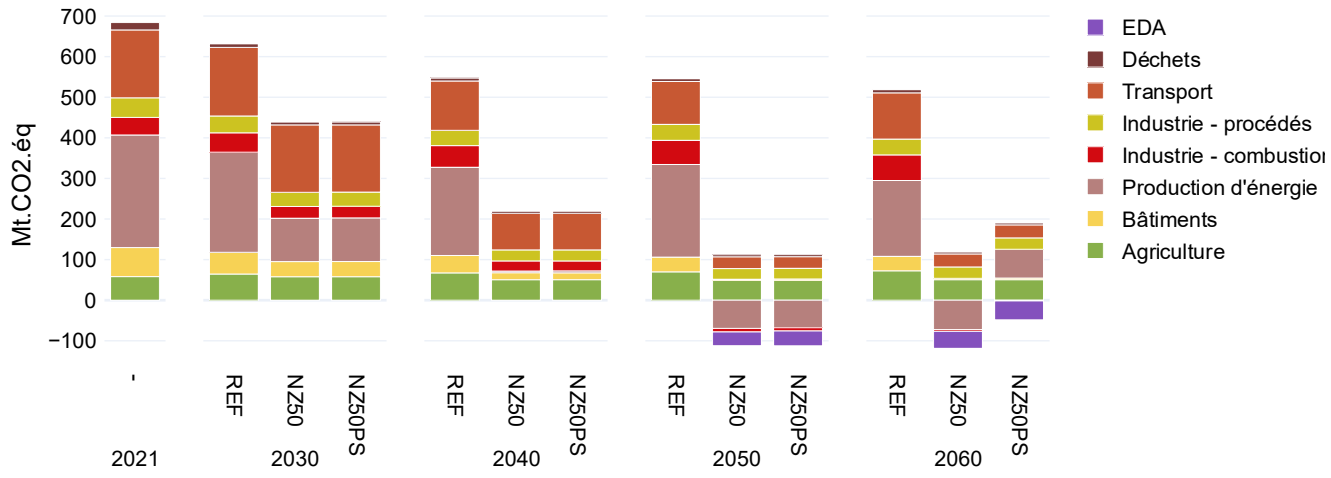


Figure 1. Émissions totales de gaz à effet de serre par secteur entre 2021 et 2060 pour le Canada dans un contexte de carboneutralité pour 2050 obtenu avec le modèle ascendant d'optimisation technico-économique NATEM de la firme ESMIA Consultants. On remarque, à partir de 2050, une quantité importante d'émissions négatives, c'est-à-dire retirées de l'atmosphère. REF est le scenario de référence sans objectifs de réduction des émissions de gaz d'effets de serre. NZ50 vise la carboneutralité d'ici 2025, tandis que NZ50PS ajoute au NZ50 les coûts des petits réacteurs nucléaires (Source: Fig. 4.1 de Ref. [2])

Si, dans un premier temps, avec des objectifs de réduction marginaux, les efforts se sont d'abord concentrés sur une meilleure utilisation des sources énergétiques et des technologies qui leur sont associées, suivant les politiques d'efficacité énergétique développées dans la foulée des deux premières crises pétrolières, une telle approche n'est plus appropriée lorsqu'on vise la carboneutralité : il faut alors changer de source d'énergie, et non simplement en réduire l'utilisation à la marge. L'adoption d'objectifs de carboneutralité, couplée à l'intégration massive de nouvelles sources d'énergie, principalement olienne et solaire, avec des caractéristiques très différentes des sources traditionnelles, a donc relancé l'intérêt pour la modélisation de systèmes énergétiques, incluant le développement de nouveaux outils, d'approches et de paramétrisation, ainsi que de nouvelles technologies énergétiques pour le transport, le chauffage, etc., dans le but de faciliter la planification et le développement de politiques publiques. Cette relance d'efforts pour modéliser les systèmes énergétiques survient alors que la communauté scientifique se tourne de plus en plus vers le développement de modèles ouverts, des codes aux données, alors que les codes historiques sont majoritairement privés et fermés.

On a donc assisté, au cours des dernières années à un renouveau dans la communauté de la modélisation énergétique, avec la participation de nombreux nouveaux joueurs. Longtemps réservés aux spécialistes de la recherche opérationnelle, aux économistes et aux ingénieurs, particulièrement provenant du génie électrique, ce domaine attire maintenant des chercheurs de plusieurs autres disciplines, dont des physiciens, alors que les méthodes de simulation se diversifient avec, par exemple, des modèles stochastiques ou par agents [7], qui rejoignent les approches traditionnellement développées par les physiciens, mais aussi pour leur expérience avec des calculs plus importants.

La nouvelle philosophie de modélisation offre la possibilité de mieux intégrer les approches non linéaires ou basées sur les systèmes complexes et d'aller au-delà des modèles d'optimisation habituels dans le domaine, qui s'appuient essentiellement sur la minimisation de choix discrets, c'est-à-dire qui imposent de choisir une ou l'autre technologie, pas un mélange continu des deux. Ce type d'optimisation ne permet pas l'utilisation de dérivées et requiert souvent une formulation linéaire et l'utilisation d'outils privés et fermés pour leur solution.

Malgré les efforts considérables, que nous avons observés dans le domaine ces dernières années, de nombreux défis persistent pour la communauté. Des défis qui peuvent en partie intéresser les physiciens. Du côté des enjeux techniques, le développement de méthodes qui permettent d'aller au-delà des solutions linéaires de variables discrètes faciliterait certainement le développement de systèmes plus complexes. On peut imaginer, par exemple, que des approches stochastiques ou même les ordinateurs quantiques permettraient une exploration beaucoup plus riche de problèmes de ce type. De même, historiquement, les modèles de systèmes énergétiques sont généralement conçus pour rouler sur des infrastructures de calcul relativement légères, souvent des serveurs locaux. Repenser ces problèmes et les codes qui viennent avec pour l'utilisation sur des superordinateurs permettrait certainement de traiter des problématiques plus complexes.

Au cœur de ces enjeux techniques, se trouve également la question des données. Comment générer ces données alors qu'elles ne sont souvent pas disponibles publiquement? Est-ce que des approches

permettant de séparer des données assemblées, de retirer le bruit, d'utiliser des approches statistiques similaires aux traitements dans diverses branches de la physique permettrait de reconstruire certaines de ces données?

Finalement, se pose la question des approches de modélisation, des questions traitées. Par construction, les modèles de systèmes énergétiques ont tendance à se concentrer sur des systèmes grands, des provinces, des pays, des continents. Or, la transformation du système énergétique se passe aussi au niveau très local avec des impacts parfois très différents. L'intégration, des nouvelles technologies de consommation, mais aussi de production et de stockage d'énergie délocalisées implique des solutions et des analyses qui vont dans les deux directions et qui impliquent des échanges fortement non linéaires. Est-ce que des méthodes développées par des physiciens, que ce soit pour l'analyse des matériaux, l'approche multiéchelle à des problèmes complexes, seraient pertinentes ici? Dans ce contexte, l'analyse de ces systèmes complexes rejoint celles faites par les physiciens, spécialistes des systèmes complexes.

À ces questions techniques, il faut ajouter les questions comportementales, individuelles. Trop souvent, les modèles ont tendance à oublier les choix et les comportements des consommateurs, qu'ils soient des individus ou des personnes morales. Or, dans les contextes, bidirectionnels actuels, leur rôle devient crucial. Plutôt que d'imposer aux citoyens des comportements, qui permettent de reproduire les solutions optimisées des modèles, il est nécessaire de revoir les algorithmes et les méthodes de simulation afin d'intégrer les réalités individuelles pour une planification plus réaliste des transformations à venir.

ICI AU CANADA

Au fil des décennies, les chercheurs canadiens ont contribué de manière significative au développement de nombreux modèles, dont le modèle MARKAL-TIMES. Comme ailleurs dans le monde, l'importance renouvelée de la modélisation énergétique pour la planification de la transition énergétique a renforcé l'intérêt des gouvernements pour la modélisation énergétique. Cet intérêt a mené à la création du Carrefour de modélisation énergétique [8] en 2022, une structure initialement pilotée par Louis Beaumier et moi-même de l'Institut de l'énergie Trottier à Polytechnique Montréal, Madeleine MacPherson de l'Institut for Integrated Energy Systems à l'Université de Victoria et Blake Shaffer de la School of Public Policy de l'Université de Calgary et dont le financement par Ressources naturelles Canada a été renouvelé pour quatre ans en 2025, avec l'ajout de partenaires de l'Université York et de l'Université Carleton. En plus de rassembler les chercheurs et les parties prenantes intéressées par la modélisation énergétique, cette organisation développe et maintient une base de données énergétiques et des modèles ouverts accessibles à l'ensemble de la communauté canadienne. En parallèle, Ressources naturelles Canada a lancé quelques appels à projets au cours de dernières années pour favoriser le développement de modèles ouverts dont plusieurs seront intégrés, à divers niveaux, dans les outils du CME.

Ce contexte collaboratif canadien permet aux divers chercheurs intéressés par le domaine de s'intégrer facilement et de participer au développement d'outils sans avoir à commencer à zéro. C'est donc un excellent moment pour les physiciens intéressés par ces questions de s'intégrer dans cette

communauté croissante et de contribuer à faire progresser un domaine crucial pour la transformation du système énergétique canadien, mais aussi de celui de la planète toute entière.

BIBLIOGRAPHIE

1. Pour des raisons historiques, l'alimentation, qui représente la source d'énergie primaire essentielle à la survie des individus au quotidien, n'est pas incluse directement dans cette description du système énergétique.
2. S. Langlois-Bertrand, N. Mousseau, K. Vaillancourt, et M. Bourque, Trajectoires pour un Canada carboneutre – Horizon 2060, dans Langlois-Bertrand, S., Mousseau, N., Beaumier, L. (Dir.), Perspectives énergétiques canadiennes 3e édition, Institut de l'énergie Trottier – Polytechnique Montréal (2024). [En ligne] http://iet.polymtl.ca/perspectives-energetiques/.
3. B. Lapillonne et B. Château, The medee models for long term energy demand forecasting, Socio-Economic Planning Sciences **15**, 53-58 (1981).
4. ETSAP/IEA (2025). Introduction to TIMES. https://iea-etsap.org/times-the-integrated-markal-efom-system/
5. L. Taylor et S. L. Black, Practical General Equilibrium Estimation of Resources Pulls under Trade Liberalization, Journal of International Economics **4(1),** 37–58 (1974).
6. Organisation des Nations Unies, *Integrated Assessment Models (IAMs) and Energy-Environment-Economy (E3) models*, https://unfccc.int/topics/mitigation/workstreams/response-measures/modelling-tools-to-assess-the-impact-of-the-implementation-of-response-measures/integrated-assessment-models-iams-and-energy-environment-economy-e3-models.
7. J. Fouladvand, Why and how can agent-based modelling be applied to community energy systems? A systematic and critical review, Energy Research & Social Science **114**, 103572 (2024).
8. Carrefour de modélisation énergétique, https://cme-emh.ca.