

الجمهورية الشعبية الديمقراطية الجزائرية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة العليا للإعلام الآلي 08 ماي 1945، سيدي بلعباس
École Supérieure en Informatique
-08 Mai 1945- Sidi Bel Abbès



THESIS

To obtain the diploma of **Engineer**
Field: **Computer Science**
Specialty: **Intelligence Artificielle et Science des Données (IASD)**

Theme

**Learned Energy Routing in the Energy Internet:
A Graph Neural Policy Measured Against a Proven Optimum**

Presented by:
OUCHENE HibetElrahmane

Submission Date: **1 October 2026**
In front of the jury composed of:

Dr. TAOULI Amina	President
Dr. NEMDILI Amel Kahina	Examiner
Dr. Souleyman Chaib (ESI-SBA)	Supervisor
Dr. Khadidja Henni (TÉLUQ)	Co-Supervisor
Dr. Khalid Benabdeslem (Lyon 1)	Co-Supervisor

Academic Year : 2025/2026

Abstract

The Energy Internet replaces the one-directional power grid with a network of converter-mediated *energy routers* that can decide, at each instant, which producer serves which consumer and along which corridor the power flows. The resulting routing problem is combinatorial, physically constrained and repeated continuously, which has made metaheuristics the dominant approach in the literature. Those methods are evaluated against one another, so how far any of them lies from the best achievable routing has remained unknown.

This thesis provides that reference and then learns to approach it. We formulate joint energy routing as a path-based mixed-integer linear program that decides all transactions simultaneously and to *proven* optimality, giving both a ground truth for evaluation and a supervision signal for learning. A message-passing graph neural network is trained on 100,000 exactly-solved instances, fine-tuned by policy-gradient reinforcement learning, and equipped with a destroy-and-repair decoder that lets it revise an early commitment once its consequences become visible. Every feature the network reads is a ratio rather than a node identity, so a single set of weights applies to networks of any size.

On the 17-node test network published by Hebal et al. (2021) the learned router reaches 13.52 % of the exact optimum against 18.05 % for that paper’s sequential heuristic: an advantage of +4.53 points over 119 paired scenarios, with a bootstrap confidence interval of $[+3.03, +6.18]$ and a Wilcoxon signed-rank $p < 0.0001$. A single decode is $18\times$ to $53\times$ faster than the exact solver between 30 and 100 routers, and beyond 100 routers the exact solver returns no proved solution at all within its time limit while the learned router still produces a complete, feasible routing in under 0.7 s.

We also report a negative result. Transfer to the 30-node network published in the same paper is positive in direction but not statistically separable from noise. The natural explanation (that the training distribution excluded that network’s structure) was tested by rebuilding the instance generator so that its measured structural envelope contains both published networks, and by retraining from scratch. The gap persisted, and the structural hypothesis is therefore rejected rather than assumed.

Keywords: Energy Internet, energy routing, peer-to-peer energy trading, mixed-integer linear programming, graph neural networks, imitation learning, reinforcement learning, large neighbourhood search, combinatorial optimisation.

Résumé

L'Internet de l'Énergie remplace le réseau électrique unidirectionnel par un réseau de *routeurs d'énergie* capables de décider, à chaque instant, quel producteur alimente quel consommateur et par quel corridor l'énergie transite. Le problème de routage qui en découle est combinatoire, physiquement contraint et répété en continu, ce qui a fait des métaheuristiques l'approche dominante dans la littérature. Ces méthodes étant évaluées les unes par rapport aux autres, la distance qui les sépare du routage optimal est restée inconnue.

Cette thèse fournit cette référence puis apprend à s'en approcher. Nous formulons le routage énergétique conjoint comme un programme linéaire en nombres entiers mixtes fondé sur les chemins, qui décide toutes les transactions simultanément et à optimalité *prouvée*, ce qui fournit à la fois une vérité de terrain pour l'évaluation et un signal de supervision pour l'apprentissage. Un réseau de neurones sur graphe à passage de messages est ensuite entraîné sur 100 000 instances résolues exactement, affiné par apprentissage par renforcement, et doté d'un décodeur *destroy-and-repair* qui lui permet de réviser un engagement précoce une fois ses conséquences visibles. Chaque caractéristique lue par le réseau est un rapport et non une identité de nœud, de sorte qu'un unique jeu de poids s'applique à des réseaux de taille quelconque.

Sur le réseau à 17 nœuds publié par Hebal et al. (2021), le routeur appris atteint 13,52 % de l'optimum exact contre 18,05 % pour l'heuristique séquentielle de ce même article : un avantage de +4,53 points sur 119 scénarios appariés, avec un intervalle de confiance [+3,03; +6,18] et un test de Wilcoxon $p < 0,0001$. Un décodage unique est 18 à 53 fois plus rapide que le solveur exact entre 30 et 100 routeurs, et au-delà de 100 routeurs le solveur exact ne renvoie plus aucune solution prouvée tandis que le routeur appris produit encore un routage complet et réalisable en moins de 0.7 s.

Nous rapportons également un résultat négatif : le transfert vers le réseau à 30 nœuds publié dans le même article est positif en direction mais non séparable statistiquement du bruit. L'hypothèse structurelle qui l'expliquait naturellement a été testée puis rejetée.

Mots-clés : Internet de l'Énergie, routage énergétique, échange d'énergie pair-à-pair, programmation linéaire en nombres entiers mixtes, réseaux de neurones sur graphe, apprentissage par imitation, apprentissage par renforcement, recherche à grand voisinage, optimisation combinatoire.

الملخص

يستبدل إنترنت الطاقة الشبكة الكهربائية أحادية الاتجاه بشبكة من موجهات الطاقة القادرة على أن تقرّر، في كل لحظة، أي منتج يغذي أي مستهلك وعبر أي ممر تنتقل الطاقة. ومسألة التوجيه الناتجة عن ذلك مسألة توافقية ومقيّدة فيزيائياً وتتكرّر باستمرار، وهو ما جعل الخوارزميات الاستدلالية الفوقية النهج السائد في الأدبيات. غير أن هذه الطرق تُقارَن بعضها ببعض فحسب، ولذلك ظلّت المسافة التي تفصلها عن التوجيه الأمثل مجهولة.

تقدّم هذه الأطروحة هذا المرجع ثم تتعلّم الاقتراب منه. نصوغ التوجيه المشترك للطاقة بوصفه برنامجاً خطياً عددياً صحيحاً مختلطاً قائماً على المسارات، يقرّر جميع المعاملات في آنٍ واحد وبأمثلية مُبرهنة، ممّا يوفر حقيقةً مرجعيةً للتقييم وإشارةً إشرافاً للتعلّم. ثم تُدرّب شبكة عصبية على الرسوم البيانية تعتمد تمرير الرسائل على 100000 نموذج محلول حلاً دقيقاً، وتُصقل بالتعلّم المعزّز، وتزوّد بمفكّك يعتمد الهدم وإعادة البناء يتيح لها مراجعة قرار مبكّر بعد أن تتّضح نتائجه. وكلّ سمة تقرأها الشبكة نسبةً لا هويةً عقدة، ولذلك تصلح مجموعة أوزان واحدة لشبكات من أي حجم.

على شبكة الاختبار ذات السبع عشرة عقدة المنشورة في المرجع، يبلغ الموجه المتعلّم 13.52% من الأمثل الدقيق مقابل 18.05% للطريقة التسلسلية، أي بتفوّق قدره 4.53 نقطة على 119 سيناريو مقترناً، مع فترة ثقة قدرها [3.03, 6.18] واختبار ويلكوكسن بقيمة احتمالية أصغر من 0.0001. والفكّ الواحد أسرع من الحلّ الدقيق بمقدار 18 إلى 53 مرة بين 30 و100 موجه، وفيما وراء 100 موجه لا يعيد الحلّ الدقيق أي حلّ مبرهن، بينما يواصل الموجه المتعلّم إنتاج توجيه كامل وقابل للتحقيق في أقلّ من 0.7 ثانية.

كما نعرض نتيجة سلبية: الانتقال إلى الشبكة ذات الثلاثين عقدة المنشورة في المقال نفسه إيجابيّ في الاتجاه لكنّه غير قابل للفصل إحصائياً عن الضجيج. وقد اختُبرت الفرضية البنيوية المفسّرة لذلك ثم رُفِضت.

الكلمات المفتاحية: إنترنت الطاقة، توجيه الطاقة، تداول الطاقة بين النظراء، البرمجة الخطية بالأعداد الصحيحة المختلطة، الشبكات العصبية على الرسوم البيانية، التعلّم بالتقليد، التعلّم المعزّز، البحث في الجوار الواسع، الأمثلية التوافقية.