

Bornes de recharge pour véhicules électriques : méthodes pour la localisation optimale et le calcul de l'impact environnemental

27 février 2025

Auteurs :

Ashraf Uz Zaman Patwary, Polytechnique Montréal

Jade Dubois, École Centrale Lille

Anne De Bortoli, Polytechnique Montréal (CIRAIG)

Francesco Ciari, Polytechnique Montréal

Table de Matières

Introduction	2
Volet localisation des bornes	2
Volet impact environnementale :	4
Conclusions.....	6

Introduction

Cette étude se concentrait sur les bornes de recharge pour les véhicules électriques et prévoyait deux volets. Le premier volet regardait la localisation des bornes, tandis que le deuxième s'est focalisé sur l'évaluation de leur impact environnementale. Grâce au financement de cette étude de la part de Vinci, il a été possible de financer Mr Ashraf Uz Zaman Patwary, qui a travaillé sur le premier volet en tant que post-doctorant pour une période de 8 mois. Il a aussi été possible de recruter Mme Jade Dubois en tant que stagiaire pendant 4 mois et qui a travaillé sur le deuxième volet.

Le travail sur la localisation des bornes de recharge a été soumis pour présentation et publication au « International Symposium on Transportation Data and Modelling ». Le travail sur l'impact environnemental, étant donné qu'il s'est déroulé sur une période de temps plutôt brève, a pour le moment été décrit en détail dans un rapport. Une valorisation dans une conférence ou publication suivra. Les deux documents sont annexés au présent rapport.

Volet localisation des bornes

Contexte et Objectifs

L'essor des véhicules électriques (VÉ) entraîne une demande croissante en infrastructures de recharge. Un défi majeur en milieu urbain est que le choix d'où et quand recharger dépend davantage des durées des activités des utilisateurs que du simple temps de recharge. Cette étude propose une approche séquentielle en deux étapes pour optimiser la localisation des bornes de recharge, en tenant compte des infrastructures existantes et des activités des usagers.

La méthodologie repose sur un algorithme K-means modifié pour identifier les meilleurs emplacements candidats pour les bornes et un modèle d'optimisation basé sur un métamodèle pour déterminer le type et le nombre de bornes à installer, en respectant les contraintes budgétaires et énergétiques. Appliqué à un scénario de simulation MATSim de Montréal, ce modèle permet une réduction de 40 % des files d'attente en heures de pointe tout en optimisant le déploiement des bornes.

Méthodologie

Les deux étapes de la méthodologie sont :

1. Étape 1 : Algorithme K-Means Modifié

- Sélectionne les meilleurs emplacements candidats pour les nouvelles bornes.
- Tient compte des localisations des activités, du taux de participation et des durées d'activité.
- Différencie les bornes existantes (clusters statiques) et les nouvelles bornes potentielles (clusters dynamiques).
- Garantit que les centres des clusters correspondent aux lieux d'activités à forte demande.

2. Étape 2 : Optimisation Basée sur un Métamodèle

- Détermine le nombre optimal et le type de bornes à chaque emplacement sélectionné.
- Formule un problème non linéaire de minimisation des files d'attente, sous contraintes budgétaires et énergétiques.
- Utilise MATSim, un modèle multi-agent de microsimulation, pour simuler la demande de recharge et les files d'attente.
- Emploie un modèle d'allocation de la demande basé sur l'équilibre stochastique des utilisateurs (SUE), assurant une distribution réaliste des requêtes de recharge.

Étude de cas : Montréal

L'approche a été testée sur un échantillon de 10 % du scénario MATSim Montréal, selon les hypothèses suivantes :

- 74 542 utilisateurs de VE
- 1 392 bornes publiques existantes
- Aucune recharge à domicile disponible (créant un scénario à forte demande)

Le processus d'optimisation était soumis aux contraintes suivantes :

- Budget d'installation et d'exploitation limité à 60 % des coûts actuels des infrastructures.
- Consommation énergétique limitée à 1,6 fois celle du réseau existant.

Résultats

- Réduction de 40 % des files d'attente en heures de pointe malgré les contraintes budgétaires.
- Élasticité de la demande : Une meilleure infrastructure a entraîné une augmentation des demandes de recharge, soulignant la nécessité d'une modélisation dynamique du comportement des utilisateurs.
- La stratégie de privilégier les bornes de niveau 1 dans les zones moins congestionnées et les bornes rapides dans les zones à forte demande a permis une meilleure utilisation des ressources.

Conclusion et perspectives

Cette étude propose une approche scalable et basée sur les activités pour l'allocation des bornes de recharge en milieu urbain, équilibrant accessibilité et efficacité des infrastructures. Les conclusions principales sur la base des résultats sont que :

1. L'intégration des méthodes basées sur la demande et la capture de flux permet une implantation plus efficace des bornes.
2. La durée des activités des utilisateurs joue un rôle crucial dans la localisation optimale des bornes.
3. Une optimisation sous contrainte budgétaire permet des gains significatifs en matière de performance, même dans un scénario à forte demande.

Dans des travaux futurs on envisage traiter :

- Optimisation multi-objectifs (ex. réduction des émissions sur le cycle de vie).
- Amélioration des modèles comportementaux pour intégrer l'élasticité de la demande.
- Intégration du machine learning pour une planification plus dynamique.
- Stratégies de tarification dynamique pour gérer la congestion en heures de pointe.

En combinant des méthodes traditionnelles et des approches basées sur les données, ce cadre offre une solution pratique et optimisée pour la planification des réseaux de recharge en milieu urbain.

Volet impact environnemental

Contexte et Objectifs

Pour réduire son impact sur la triple crise planétaire, le secteur des transports s'électrifie rapidement, augmentant la demande en véhicules électriques (VE) et en infrastructures de recharge. Alors que les VE ont été largement évalués par l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), l'impact environnemental des infrastructures de recharge reste peu étudié.

Ce projet vise à :

1. Réaliser une revue systématique des ACV appliquées aux infrastructures de recharge des VE, en comparant leurs méthodologies et empreintes carbone.
2. Développer une base de données d'inventaire de cycle de vie (ICV) avec Brightway2 pour standardiser les données.
3. Normaliser les résultats d'ACV et effectuer des analyses prospectives avec premise, en fonction des scénarios climatiques du GIEC (SSP & RCP).

Revue de la Littérature

Nous avons identifié 11 études (2001–2021) sur l'impact environnemental des infrastructures de recharge des VE :

- 64% portent sur des bornes filaires reliées au réseau,
- 18% analysent des technologies mobiles alimentées par des énergies renouvelables,
- 18% étudient la recharge par induction.

Parmi 7 études clés, 15 technologies ont été évaluées :

- 20% chargeurs de niveau 1 (lents/AC),
- 33% chargeurs de niveau 2 (semi-rapides/AC),
- 47% chargeurs de niveau 3 (rapides/DC),
- 71% dédiés aux véhicules légers, 29% aux autobus.

D'un point de vue méthodologique :

- 57% utilisent comme unité fonctionnelle un chargeur, 43% considèrent 1 kWh délivré.
- 71% suivent une approche cradle-to-grave, les autres une cradle-to-gate.
- Les méthodologies ACV varient, avec 43% d'études manquant de transparence.

Les émissions proviennent principalement de la phase d'utilisation, suivie par la fabrication (jusqu'à un tiers des émissions), avec un impact négligeable en fin de vie. Après normalisation :

- Chargeurs de niveau 1 : 183 kgCO₂e/chargeur, 5.5 gCO₂e/kWh,
- Chargeurs de niveau 3 : 8 770 kgCO₂e/chargeur, 32.2 gCO₂e/kWh,
- Chargeurs de niveau 2 : 18 200 kgCO₂e/chargeur, 141 gCO₂e/kWh.

Ces résultats suggèrent un besoin d'harmonisation méthodologique des ACV.

Base de Données et ACV Prospective

Une base de données sur 11 types de chargeurs a été développée avec ecoinvent 3.8–3.10, en standardisant plusieurs paramètres (puissance, durée de vie, efficacité, matériaux). Les résultats confirment que :

- Les chargeurs de niveau 1 sont les moins émissifs, suivis des niveaux 2 et 3.
- L'empreinte carbone par kWh est similaire entre technologies (1.4–6.1 gCO₂e/kWh).

Concernant les émissions du cycle de vie des VE :

- Un VE standard consomme 20 kWh/100 km, émettant 150 gCO₂e/km.
- L'infrastructure de recharge contribue à ≤1% des émissions totales (*max 1.2 gCO₂e/km* pour les chargeurs de niveau 3).

Les projections ACV indiquent une baisse future de cet impact, bien que des risques subsistent :

1. Une décarbonation lente de la production de métaux (aluminium, cuivre, acier).
2. Une demande croissante en métaux, accentuant la pression environnementale (extraction, stress hydrique).

L'optimisation de la conception et de l'approvisionnement des chargeurs sera essentielle pour minimiser leurs impacts futurs.

Conclusions

Ce rapport a présenté les principaux travaux menés dans le cadre de la chaire Vinci. Deux volets principaux ont été développés, une approche pour la recherche de localisations optimales de bornes de recharge, et une méthode pour le calcul de l'impact environnementale de bornes. Étant les deux travaux de nature méthodologique, et étant donné que le code produit est open-source, leur application à de cas d'études localisés en France serait facilement possible.