

Crédit photo : Los Angeles Fire Department_CC BY-NC-ND 2.0_FlickR 2

Dossier spécial : Mobilité durable

QUAND LES VILLES PASSENT À L'ÉLECTRIQUE : GAIN ENVIRONNEMENTAL MASSIF, DÉPENDANCE AUX RESSOURCES ACCRUE

Anne de Bortoli
Professeure associée
Centre international de référence sur l'analyse du cycle de vie et la transition durable (CIRAIG)
Département de stratégie, responsabilité sociale et environnementale
Université du Québec à Montréal

Susie Wu
Chercheuse post-doctorale
CIRAIG
Département de stratégie, responsabilité sociale et environnementale
Université du Québec à Montréal

Fabien Durif
Professeur
Département de marketing
Université du Québec à Montréal

Cécile Bulle
Professeure
CIRAIG
Département de stratégie, responsabilité sociale et environnementale
Université du Québec à Montréal

On les voit circuler tous les jours sans vraiment y prêter attention : voitures de police, camions d'incendie et de collecte de déchets, balayeuses, fourgonnettes municipales… Ces véhicules structurent le fonctionnement quotidien de nos villes. Pourtant, leur rôle dans la transition climatique est rarement discuté. De nombreuses municipalités québécoises ont intégré des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans leurs stratégies climatiques, et l'électrification de leurs flottes est apparue comme une solution évidente. Le premier réflexe des municipalités est souvent l'achat de voitures électriques. Toutefois, est-ce vraiment le meilleur choix d'électrification à faire ? Quels sont les bénéfices environnementaux de l'électrification ? Et à quel prix matériel et financier ?

Une méthodologie intégrée, modulaire et prospective, adaptée au contexte québécois

Pour répondre à ces questions, nous avons développé un modèle d'évaluation prospectif adapté au contexte québécois, permettant d'évaluer les effets environnementaux et financiers sur le cycle de vie des véhicules municipaux qui peuvent être électrifiés à court terme. L'étude repose sur une analyse de cycle de vie complète de 11 catégories de véhicules disponibles en versions électriques ou hybrides sur le marché nord-américain : voitures de police, voiture particulière, camionnettes (pick-up), fourgonnettes, camions de collecte de déchets et camions d'incendie, camions de classe 6 et 8, balayeuses de rue, véhicules à basse vitesse et deux-roues motorisés. Jusqu'à six groupes motopropulseurs sont comparés : essence (Vth-e), diesel (Vth-d), hybride non rechargeable (Hyb-n-r), hybride rechargeable (Hyb-r), 100 % électrique à batterie (VE) et véhicule au gaz naturel comprimé (GNC). L'analyse couvre l'impact environnemental pour :

- la fabrication du véhicule ;
- la production et la fin de vie de la batterie ;
- la production des carburants et de l'électricité ;
- les émissions à l'usage, y compris les émissions à l'échappement et celles liées à l'usure des pneus et des freins ;
- les infrastructures de recharge pour les véhicules électriques.

Le modèle adopte une structure pour tester différents scénarios technologiques : chimies de batteries « NMC » (dont les cathodes sont faites de nickel-manganèse-cobalt) ou LFP (cathodes en lithium fer-phosphate), différents kilométrages annuels, différentes durées de vie et différents contextes. Le modèle est disponible en libre accès pour utilisation dans le cadre d'autres analyses (voir : Wu, 2026).

Les carburants consommés au Québec ont été modélisés à partir de modèles reconnus — OPGEE (v2.0c) pour l'extraction pétrolière (El-Houjeiri et al., 2013), PRELIM (v1.6) pour le raffinage (Abella et al., 2016) —, afin de refléter au plus près la réalité du contexte de production et d'approvisionnement. Les facteurs d'émission à l'usage proviennent du modèle nord-américain MOVES (v4.0) (U.S. Environmental Protection Agency, 2023), recalibré sur des données empiriques de consommation énergétique des véhicules municipaux québécois.

Un point central est le caractère prospectif de l'analyse. Les véhicules achetés à court et moyen terme seront utilisés pendant potentiellement une quinzaine d'années. Nous avons donc intégré des inventaires prospectifs préparés avec l'outil Premise (Sacchi et al., 2022), permettant de tenir compte de perspectives d'évolution des secteurs fortement émissifs, tels que les secteurs de l'énergie et de l'acier. Le modèle prospectif développé précisément pour l'électricité québécoise entraîne un bouquet moyen composé d'environ 77 % d'hydroélectricité et 23 % d'éolien à l'horizon étudié, selon les projections tendancielles de l'Institut climatique du Canada (voir le CCI 2050 Pathways Explorer).

Les effets des différents véhicules sont ensuite calculés avec la méthode IMPACT World+ (Bulle et al., 2019) pour quatre indicateurs d'impacts environnementaux différents : l'empreinte carbone, l'utilisation des ressources minérales, les dommages à la santé humaine (exprimés en DALY, pour *disability-adjusted life years*, soit le nombre d'années de vie en bonne santé perdues) et les dommages aux écosystèmes (exprimés en PDF·m^2·an, soit la fraction potentiellement disparue d'espèces sur une surface donnée pendant une année). Les émissions sont également réparties selon les scopes 1 (émissions directes), 2 (≈émissions de l'électricité) et 3 (le reste), conformément au cadre de comptabilisation organisationnelle des émissions de GES (WBCSD et WRI, 2004).

En parallèle, une analyse des coûts en cycle de vie (ACCV) a été réalisée. Elle distingue trois catégories de coûts :

- coûts capitaux (achat du véhicule, incluant la batterie)
- valeur de revente (10 % du prix d'achat par défaut)
- coûts d'exploitation (carburants et/ou électricité)

Les flux financiers sont actualisés sur la durée de vie du véhicule et exprimés en coût par kilomètre parcouru. Le modèle calcule également la période de retour sur investissement des versions électriques et hybrides rechargeables par rapport aux versions thermiques.

La durée de vie kilométrique des véhicules constitue un paramètre central du bilan environnemental et financier. Les hypothèses retenues sont présentées dans le Tableau 1. Par défaut, aucun remplacement de batterie n'est considéré sur la durée de vie du véhicule. Des analyses de sensibilité ont toutefois été réalisées afin d'évaluer l'effet d'un éventuel remplacement. Pour les véhicules hybrides rechargeables, la part d'utilisation en mode électrique par rapport au mode thermique influence fortement les résultats. Nous avons retenu une

hypothèse de 50 % des kilomètres parcourus en mode électrique et 50 % en mode thermique. Cette hypothèse demeure sensible : dans certains contextes, les hybrides rechargeables sont majoritairement utilisés en mode thermique, ce qui réduit fortement leurs bénéfices environnementaux (Transport & Environment, 2025).

Un gain environnemental massif, robuste et généralisé

Globalement, les résultats montrent que le passage d'un véhicule thermique à un véhicule électrique à batterie permet des réductions d'impacts de l'ordre de 64 à 94 %, selon la catégorie de véhicule (Tableau 1, voir aussi Tableaux 2 et 3). Ces bénéfices concernent toutes les catégories analysées, des véhicules légers aux camions lourds spécialisés. Les gains en GES (82 à 94 %, Tableau 2) sont meilleurs pour les véhicules lourds, malgré des émissions plus élevées lors de la fabrication. La cible de réduction d'impact pour atteindre la neutralité climatique sectorielle proposée par l'Initiative Science-Based Target — soit -90 à -95 % d'émissions de GES — n'est pas atteinte pour tous les véhicules, ce qui montre la limite de la simple électrification, sous réserve d'autres facteurs. L'ampleur des gains d'émissions tient également au contexte québécois, où l'électricité est majoritairement d'origine hydraulique, donc faiblement émettrice. Les émissions supplémentaires liées à la production des batteries sont rapidement compensées par une utilisation très peu carbonée. En réalité, les véhicules électriques produisent actuellement sur l'ensemble de leur cycle de vie moins

Véhicule	Masse moyenne (kg)				Accessoires (kg)	Correspondance dans MOVES	Durée de vie (km)	Durée de vie (ans)
	Thermique	100 % batterie	Hybride rechargeable	Hybride non rechargeable				
1. Voiture de police	1683	2050	1990	2215	183	Voiture particulière	220 000	4,4
2. Voiture particulière	1281	1573	1717	1706	Non applicable	Voiture particulière	300 000	20
3. Camionnette (pick-up)	2217	2236	2563	2502	Non applicable	Camionnette (pick-up)	300 000	20
4. Fourgonnette (van)	1641	2209	2425	1900	Non applicable	Véhicule utilitaire léger	400 000	20
5. Camion poubelle	7704	8569	8137	7704	5656	Camion de collecte de déchets	800 000	16
6. Camion d'incendie	5824	6461	6143	5824	8598	Camion — courte distance	300 000	20
7. Camion de classe 6	4549	4918	4734	4549	Non applicable	Semi-remorque — longue distance	500 000	12,5
8. Camion de classe 8	9150	7938	8544	9150	Non applicable	Semi-remorque longue distance	800 000	8
9. Balai de rue	1948	2563	2255	1948	752	Camion — courte distance	300 000	10
10. Véhicule basse vitesse	507	551	Non applicable	Non applicable	Non applicable	Voiture particulière	150 000	15
11. Deux roues	Non applicable	35	Non applicable	Non applicable	Non applicable	Non applicable	50 000	10

Tableau 1. Caractéristiques clés des catégories de véhicules modélisés.

d'émissions que les véhicules hybrides (et donc que les véhicules thermiques), quasiment partout dans le monde (Sacchi, Bauer, et al. 2022). Selon les catégories, la « distance de retour carbone » de l'électrification des véhicules municipaux au Québec se situe de 4000 à 20 000 km parcourus. Pour certains véhicules municipaux parcourant 30 000 à 50 000 km par an, cela correspond à quelques mois d'utilisation.

Outre les effets sur le climat, les dommages à la santé humaine et aux écosystèmes diminuent également fortement (Tableau 2). La suppression des émissions à l'échappement réduit l'exposition locale aux particules fines, aux oxydes d'azote et autres polluants. Les bénéfices sont donc à la fois globaux (climat) et locaux (qualité de l'air).

Le déplacement des conséquences vers l'amont

L'électrification ne supprime pas complètement les conséquences : elle en modifie la structure (Tableaux 2 et 3). Les véhicules thermiques concentrent une bonne partie de leurs conséquences dans la phase d'usage, tandis que les véhicules électriques déplacent une part significative des conséquences vers la fabrication, en particulier celle des batteries (scope 3), liées aux chaînes d'approvisionnement. Dans le contexte québécois, ce déplacement reste très favorable au climat, mais il implique une transformation de notre dépendance matérielle.

Une dépendance accrue aux ressources minérales

La quasi-totalité des catégories étudiées montre une augmentation de l'utilisation de ressources minérales pour les versions électriques (Tableau 2). Les batteries constituent souvent le principal facteur explicatif, en raison des besoins en lithium, en nickel, en cobalt, et en cuivre. Toutefois, la taille (et donc la masse) souvent supérieure des véhicules électriques par rapport aux options thermiques augmente également cette pression sur les ressources minérales. Cette évolution traduit un changement de nature des pressions environnementales. Nous réduisons fortement les émissions liées aux combustibles fossiles, mais nous augmentons la demande en minerais, et particulièrement en métaux critiques.

Ce constat impose de penser simultanément à la décarbonation et à la sobriété matérielle (Bieuville et al., 2026), ce qui passe par le soutien à des véhicules et à des batteries de plus petites tailles lorsque cela est possible, par l'orientation vers des chimies de batterie moins gourmandes en métaux critiques, comme les batteries LFP ou sodium-ion, par la prolongation de la durée de vie des véhicules et des batteries, ainsi que par le développement des filières de recyclage.

Véhicule	Mode thermique de référence	Empreinte carbone réf. (g CO_2 – éq/km)	Empreinte carbone VE (g CO_2 – éq/km)	Réduction GES	Gain santé humaine	Gain biodiversité	Hausse ressources minérales
Voiture de police	Essence	565	103	82 %	64 %	73 %	198 %
Voiture particulière	Essence	348	53	85 %	68 %	77 %	198 %
Camionnette	Essence	685	81	88 %	74 %	82 %	138 %
Fourgonnette	Essence	661	58	91 %	78 %	87 %	148 %
Camion poubelle	Diesel	2 943	172	94 %	83 %	92 %	5 %
Camion d'incendie	Diesel	2 808	309	89 %	78 %	84 %	18 %
Camion de classe 6	Diesel	897	107	88 %	71 %	84 %	19 %
Camion de classe 8	Diesel	1 560	120	92 %	75 %	89 %	15 %
Balai de rue	Diesel	1 478	98	93 %	78 %	90 %	10 %
Véhicule basse vitesse	Essence	340	32	90 %	78 %	86 %	127 %
Deux-roues	Essence	172	22	87 %	77 %	80 %	219 %

Tableau 2. Comparaison des bénéfices et coûts environnementaux de l'électrification, par catégorie de véhicule municipal.

Une robustesse climatique face aux incertitudes

Les données de consommation des véhicules conventionnels ont été obtenues auprès de municipalités québécoises par l'entremise de l'OBNL IVEO, spécialisé dans l'accompagnement des villes en transition. La consommation des véhicules électriques est basée sur les déclarations des constructeurs. Ces données présentent une variabilité importante liée aux conditions réelles d'exploitation. Par ailleurs, l'écart bien documenté entre performances théoriques et performances réelles des véhicules constitue un enjeu méthodologique de longue date (Transport & Environment, 2025).

Néanmoins, au Québec, les véhicules électriques conservent des impacts environnementaux stables même si leur consommation réelle s'écarte des données déclarées par les constructeurs, car leur performance dépend surtout des émissions de fabrication, donc de leur longévité kilométrique. Les véhicules thermiques sont plus sensibles : leur empreinte varie fortement selon la consommation réelle de carburant, souvent plus élevée qu'annoncé (Transport & Environment, 2025), un écart particulièrement marqué pour les véhicules lourds. L'option électrique est donc non seulement plus performante en moyenne, mais aussi plus fiable face à ces incertitudes.

Les coûts : des arbitrages différenciés selon les usages

La structure des coûts diffère fortement entre les technologies : les véhicules électriques ont des coûts capitaux plus élevés, mais des coûts d'exploitation nettement plus faibles. Le Tableau 3 montre à quel point le seuil de rentabilité varie selon l'usage. Pour les véhicules au kilométrage annuel élevé — camionnette, voiture de police —, l'électrique devient rentable en un à trois ans. Pour d'autres, comme le camion poubelle ou le camion de classe 8, il faut attendre 8 à 15 ans, soit une bonne partie ou la totalité de leur durée de vie utile. Pour trois catégories de véhicules lourds spécialisés — camion d'incendie, classe 6, balai de rue —, l'électrique ne devient jamais rentable financièrement sur le cycle de vie modélisé, même si ses bénéfices environnementaux restent significatifs (Tableau 2). Plus un véhicule roule, plus les économies de carburant peuvent s'accumuler rapidement et compenser le surcoût initial : c'est l'intensité d'usage, plus que la catégorie de véhicule elle-même, qui détermine la rentabilité. C'est ici que la question des politiques publiques devient stratégique.

#	Véhicule	Référence	Rentable après…	… soit environ	Durée de vie modélisée
1	Voiture de police	Diesel	3 ans	~150 000 km	4,4 ans — 220 000 km
2	Voiture particulière	Diesel	5 ans	~75 000 km	20 ans — 300 000 km
3	Camionnette	Diesel	1 an	~15 000 km	20 ans — 300 000 km
4	Fourgonnette	Diesel	4 ans	~80 000 km	20 ans — 400 000 km
5	Camion poubelle	Diesel	15 ans	~750 000 km	16 ans — 800 000 km
6	Camion d'incendie	Diesel	Jamais rentable	(~720 000 km)	20 ans — 300 000 km
7	Camion de classe 6	Diesel	Jamais rentable	(~710 000 km)	12,5 ans — 500 000 km
8	Camion de classe 8	Diesel	8 ans	~800 000 km	8 ans — 800 000 km
9	Balai de rue	Diesel	Jamais rentable	(~590 000 km)	10 ans — 300 000 km
10	Véhicule basse vitesse	—	Non comparé	—	Seul mode électrique modélisé
11	Deux-roues	—	Non comparé	—	Seul mode électrique modélisé

Tableau 3. Seuils de rentabilité financière par type de véhicule.

Faut-il cibler les aides publiques selon le kilométrage ?

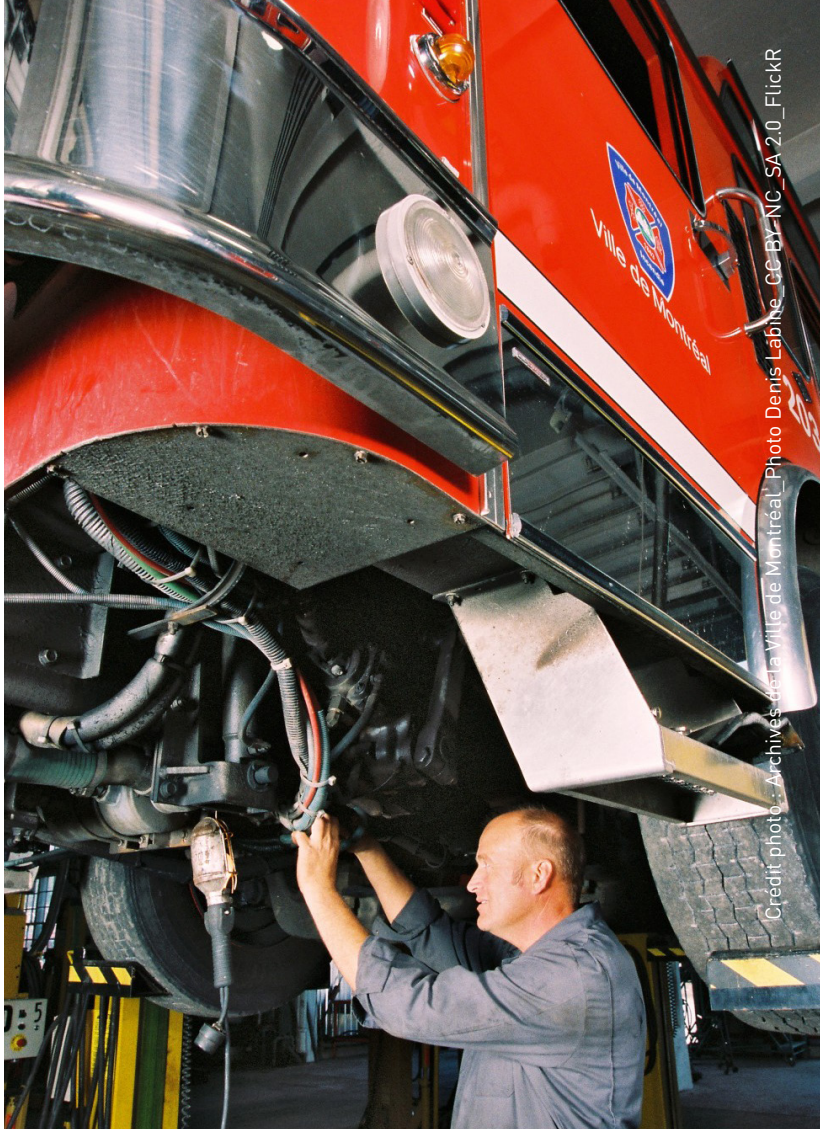
Les programmes d'aide à l'électrification reposent souvent sur des plafonds d'aide fixes et parfois sur des critères liés au prix d'achat. Bien construits, ces dispositifs peuvent favoriser des véhicules plus légers, ce qui est cohérent du point de vue de la sobriété matérielle. Cependant, ils ne tiennent pas nécessairement compte de l'intensité d'usage. Or, nos résultats montrent que tous les véhicules municipaux ne présentent pas le même potentiel de rentabilité environnementale et financière.

Certains véhicules roulent peu. D'autres parcourent plusieurs dizaines de milliers de kilomètres par an. Dans ces derniers cas, le retour sur investissement environnemental et financier est particulièrement rapide. Les réductions d'émissions cumulées sont importantes. Les bénéfices en santé publique et sur la biodiversité sont significatifs. Les économies d'énergie s'accumulent vite. À titre de comparaison, le véhicule des ménages canadiens parcourt en moyenne autour de 15 000 km par an. De nombreux véhicules municipaux dépassent largement ce seuil. Cibler en priorité les véhicules à forte intensité kilométrique permettrait d'optimiser les retombées des fonds publics, en accélérant la réduction d'émissions par dollar investi, et potentiellement en maximisant les réductions totales.

Une politique d'aide différenciée, tenant compte du kilométrage annuel par catégorie de personnes usagères, permettrait d'accélérer l'électrification là où elle est la plus efficace, tout en maintenant des critères de sobriété matérielle. Ces catégories seraient à définir rigoureusement en se basant sur des données de qualité par territoire concerné.

Allier électrification et sobriété

Nos résultats sont clairs : l'électrification permet des gains environnementaux massifs, climatiques comme sanitaires et écosystémiques, et constitue un levier puissant pour les municipalités québécoises et autres. Cependant, elle présente deux limites. D'abord, elle accroît la pression sur la disponibilité des ressources minérales, un résultat déjà bien documenté dans la littérature récente (Bieuville et al., 2026) : la transition n'est pas un simple échange entre « propre » et « sale », elle déplace et transforme les impacts. Ensuite, électrifier l'ensemble des usages — véhicules municipaux, mais aussi transport individuel, chauffage, industrie — suppose une augmentation importante de la capacité de production électrique, un enjeu de planification énergétique à part entière, alors que la trajectoire vers la neutralité carbone reste, à ce jour, largement hors cible. Enfin, l'électrification seule ne suffit pas nécessairement à atteindre les cibles fixées par les programmes de neutralité carbone.



Crédit photo : Archives de la Ville de Montréal_Photo Denis Labine_CC BY-NC-SA 2.0_FlickR

Tout ceci appelle donc une réflexion sur les usages : il s'agit de dimensionner les flottes au plus près des besoins réels, en réduisant la taille des véhicules et des batteries lorsque c'est possible – ce qui limite à la fois les conséquences liées à la fabrication et la consommation à l'usage –, en limitant le nombre de véhicules par flotte et en privilégiant, lorsque c'est pertinent, la micromobilité ou les transports collectifs plutôt que la multiplication de véhicules individuels. Allier électrification et sobriété, c'est reconnaître que la transition énergétique ne se joue pas uniquement dans le choix d'une technologie, mais dans la cohérence entre choix techniques, politiques publiques et besoins réels. La question n'est donc plus de savoir s'il faut électrifier, mais de déterminer comment, pour quels véhicules en priorité, et avec quelles politiques d'accompagnement.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a bénéficié du soutien financier du Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT), dans le cadre de la subvention n° 351338, « Prioriser les investissements d'électrification ». L'auteur et les autrices remercient l'OBNL IVÉO, en particulier Benoit Balmana, Francis Lepage et Julien Drouet, ainsi que les municipalités québécoises qui ont accepté de fournir les données nécessaires à cette recherche.

RÉFÉRENCES

Abella, J., Motazedi, K., Guo, J. et Bergerson, J. (2016.) Petroleum Refinery Life Cycle Inventory Model (PRELIM) PRELIM v1.1. User guide and technical documentation. Repéré à https://www.ucalgary.ca/sites/default/files/teams/477/prelim-v1-1-documentation.pdf.

Bieuville, P., Majeau-Bettez, G., et De Bortoli, A. (2026). Technology Flexibility and Sobriety to Address Shortage of Energy-Transition Metals. *Nature Sustainability*, ahead of print, January 28. https://doi.org/10.1038/s41893-025-01762-y.

Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L. et al. (2019). IMPACT World+: A Globally Regionalized Life Cycle Impact Assessment Method. *The International Journal of Life Cycle Assessment 24*(9): 9. https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0.

El-Houjeiri, H., McNally, S. et Brandt, A. (2013). Oil Production Greenhouse Gas Emissions Estimator OPGEE v1.1 DRAFT A - User Guide & Technical Documentation. California Environmental Protection Agency, Air Resources Board. Repéré à https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.363.520&rep=rep1&type=pdf.

Sacchi, R., C. Bauer, B. Cox, et Mutel, C. (2022). When, Where and How Can the Electrification of Passenger Cars Reduce Greenhouse Gas Emissions? *Renewable and Sustainable Energy Reviews 162* (July): 112475. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112475.

Sacchi, R., T. Terlouw,Siala, K. et al. (2022). PRospective Environmental Impact asSEment (Premise): A Streamlined Approach to Producing Databases for Prospective Life Cycle Assessment Using Integrated Assessment Models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 160* (May): 112311. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112311.

Transport & Environment. (2025). Smoke Screen: The Growing PHEV Emissions Scandal. Repéré à https://www.transportenvironment.org/articles/smoke-screen-the-growing-phev-emissions-scandal.

U.S. Environmental Protection Agency. (2023). "Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES4): User Guide and Technical Documentation." Office of Transportation and Air Quality. Repéré à https://www.epa.gov/moves.

WBCSD et WRI, eds. (2004). *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*. Rev. ed. World Business Council for Sustainable Development ; World Resources Institute.

Wu, S. 2026. *MUFootprinter*. Repéré à https://github.com/susierwu/MUFootprinter

© Auteur(s), 2026. Le Climatoscope dispose d'une licence non exclusive de publication et de diffusion. Article publié sous licence CC BY 4.0.



Crédit photo : Lion Électrique