

L'innovation via le covoiturage multimodal avec le projet Mu-CAR : un outil pour lutter contre le changement climatique et les fractures territoriales

Fihavanantsoa K. Manitriniaina ^{1,*}, Vincent Bertrand ^{2,3,4,†}

- **Mu-CAR** propose une solution innovante qui repose sur l'intégration du covoiturage dans un système de transport collectif multimodal, afin de donner accès aux transports publics pour les populations rurales et périurbaines qui en sont éloignées
- Dans le contexte de la lutte contre le changement climatique, Mu-CAR, par rapport au covoiturage classique, permet de réduire jusqu'à 4 fois plus les émissions de gaz à effet de serre en augmentant les opportunités de covoitages et en s'appuyant sur des trajets multimodaux optimisés
- Mu-CAR permet également de réduire la fracture territoriale et de limiter la précarité énergétique pour les populations rurales, vulnérables aux effets du changement climatique, qui restent fortement exposées au renchérissement du coût de l'énergie parce qu'elles n'ont pas accès aux transports publics
- Ce projet s'appuie sur des chercheurs de différents domaines scientifiques, avec pour objectif le déploiement dans un territoire démonstrateur de l'application Mu-CAR, issue de la recherche en sciences informatiques
- Mu-CAR permettra au territoire pionnier d'être le terrain de recherches expérimentales en sciences économiques et en sciences informatiques, en plus d'accéder à une solution efficace et innovante pour réduire ses émissions de CO₂ et lutter contre la fracture territoriale pour les populations rurales et périurbaines
- Cette note présente quelques résultats issus d'un exercice de simulation préliminaire sur des données pour le Nord Franche-Comté, qui illustre le potentiel de réduction des émissions de CO₂, avec un coût moindre par rapport à l'alternative que constitue de covoiturage classique

L'initiative Mu-CAR propose un package de solutions pratiques et de travaux de recherche autour de l'inclusion du covoiturage dans des systèmes de transport collectifs multimodaux, comme un moyen de réduire les émissions de CO₂ et de lutter contre la précarité énergétique en zones rurales. Mu-CAR est porté par une équipe pluridisciplinaire composée de Philippe Canalda (chercheur en sciences informatiques, FEMTO-ST DISC, UMLP), Vincent Bertrand (chercheur en sciences économiques, CRESE, UMLP), Claire Papaix (chercheur en sciences économiques, MRE, Université de Montpellier), Igo Agbossou (chercheur en aménagement du territoire et urbanisme, ThéMA, UMLP). Mu-CAR (ANR- 17-EURE-0002&ANR-20-SFRI-0008) bénéficie du soutien de la Région Bourgogne Franche-Comté et des Graduate Schools EIPHI et TRANSBIO.



MOTS CLÉS :

COVOITURAGE MULTIMODAL # DÉCARBONATION # FRACTURE TERRITORIALE # TERRITOIRES
PRÉCARITÉ ÉNERGÉTIQUE # CHANGEMENT CLIMATIQUE # INNOVATION # RECHERCHE PARTICIPATIVE

¹ Chargé de recherche stagiaire, Réseau EDEN.i, CRESE, Master BDEEM, Université Marie & Louis Pasteur

² Maître de conférences HDR et chercheur en économie de l'énergie, UFR STGI, CRESE, Université Marie & Louis Pasteur

³ Fondateur du Réseau EDEN.i, Université Marie & Louis Pasteur

⁴ Chercheur associé au FCLAB, Université Marie & Louis Pasteur

* manitrafi@gmail.com / † vincent.bertrand@univ-fcomte.fr



1. Introduction : Le défi climatique de la mobilité

Le secteur des transports est la première source d'émissions de gaz à effet de serre en Europe, et la plus dynamique (European Parliament, 2025). Le transport routier représente environ 20% des émissions totales, les véhicules particuliers en constituant plus de 60%. Les objectifs climatiques pour 2050 exigent des réductions urgentes, mais les zones rurales, comme le Nord Franche-Comté, dépendent encore fortement de la voiture individuelle. L'usage des transports en commun y reste faible (3–8%) (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA), 2024).

Le projet Mu-CAR, collaboration entre deux laboratoires de recherche (FEMTO-ST/DISC et CRESE), deux laboratoires associés (THEMA et CRJFC) et le réseau EDEN.i, propose une solution locale : intégrer le covoiturage au transport public à travers une coordination numérique et des incitations ciblées. Cette note présente ses impacts potentiels en matières environnementales et économiques.

2. Réduire les émissions : le cadre «Avoid–Shift–Improve»

Mu-CAR s'inscrit dans la stratégie largement utilisée « Avoid–Shift–Improve » (ASI) (Bakker *et al.*, 2014; Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2012) :

- Avoid : Réduire le besoin de déplacements (télétravail, taxes carburant)
- Shift : Encourager le passage de la voiture individuelle vers les transports en commun ou le covoiturage.
- Improve : Promouvoir des véhicules plus propres et des modes plus efficaces.

3. Modélisation des émissions : de l'existant à l'impact Mu-CAR¹

¹ Les modèles de base de calcul des émissions utilisés proviennent notamment des méthodes développées par Global Carbon Council (2025) et Verra (2025).

Comment les émissions sont-elles calculées ?

Les émissions de CO₂ sont calculées selon :

$$\text{Émissions} = \text{Distance} \times \text{Facteur d'émission} \times \text{part du mode de transport dans le trajet}$$

L'abattement de CO₂ s'obtient ensuite par la différence entre les émissions de référence, qui reflètent les comportements actuels, et les émissions du projet, qui reflètent les conditions avec Mu-CAR.

Dans cette étude, les facteurs d'émission varient selon le mode et le taux d'occupation.

Comment Mu-CAR réduit-il les émissions ?

- Changement modal : Des incitations (rente carbone, taxe carburant) poussent les usagers vers le covoiturage ou les transports en commun.
- Véhicules plus propres : Les véhicules anciens et polluants sont remplacés par des trajets partagés plus propres.
- Incitations ciblées : La rente carbone est maximale pour les anciens véhicules, incitant les plus polluants à covoiturer et augmenter leurs niveaux d'effort

4. Dynamique du choix modal : pourquoi change-t-on de mode ?

Mu-CAR augmente la satisfaction perçue des trajets multimodaux en introduisant :

- Une rente carbone : incitations financières indexées aux émissions de CO₂ évitées. Elle varie selon l'âge du véhicule. Les véhicules plus anciens obtiennent une rente carbone plus élevée, incitant à changer.
- Une réduction du coût du trajet
- Et une simplicité de coordination grâce à une plateforme numérique

Ces éléments sont modélisés dans notre étude en prenant en compte le coût, le confort et les incitations pour les usagers et les autorités publiques (Fielbaum and Pudāne, 2024; Le Goff *et al.*, 2024).

5. Adapter au territoire : distance et densité comptent

La densité de population diminue avec l'éloignement des centres urbains. Mu-CAR modélise cela avec une fonction spatiale décroissante (Aissat and Varone, 2015).

- En covoiturage classique : Le taux de covoiturage baisse fortement en zone peu dense.
- Avec Mu-CAR : Le covoiturage est couplé aux transports publics pour maintenir le service, de sorte que le taux de covoiturage ne diminue pas avec la baisse de la densité (le covoiturage permettant, dans ce cas, d'accéder aux transports publics).

6. Évaluation économique : coût d'abattement et rentabilité

Le coût d'abattement correspond au coût d'une tonne de CO₂ évitée.

Coût d'abattement = coût associé à l'effort de réduction des émissions ÷ nombre de tonnes de CO₂ évitées.

Ce coût comprend :

- Coûts privés : temps, carburant, billet de transport, rente carbone.
- Coûts publics : subventions, entretien routier, recettes perçues des tickets de transports, ajusté par le coût d'opportunité du fonds public (France Stratégie, 2021; Le Goff *et al.*, 2022).

7. Modèle de simulation : sept scénarios testés

Une population de 100 000 usagers est simulée, étant composée de deux groupes afin de pouvoir faire une analyse de sensibilité : 25% sensibles aux incitations, 75% faiblement sensibles.

Sept scénarios ont été testés :

1. Référence (status quo)
2. Covoiturage (RC)

3. Covoiturage + rente carbone (RC + CR)
4. Covoiturage + rente carbone + taxe carburant (RC + CR + FT)
5. Mu-CAR (sans incitations) (MC)
6. Mu-CAR + rente carbone² (MC + CR)
7. Mu-CAR + rente carbone + taxe carburant³ (MC + CR + FT)

Les données utilisées lors de la simulation proviennent notamment de l'ADEME (2025) et des articles traitant le sujet.

8. Résultats clés

Les résultats montrent que Mu-CAR peut réduire les émissions tout en générant des économies publiques (coûts d'abattement négatifs).

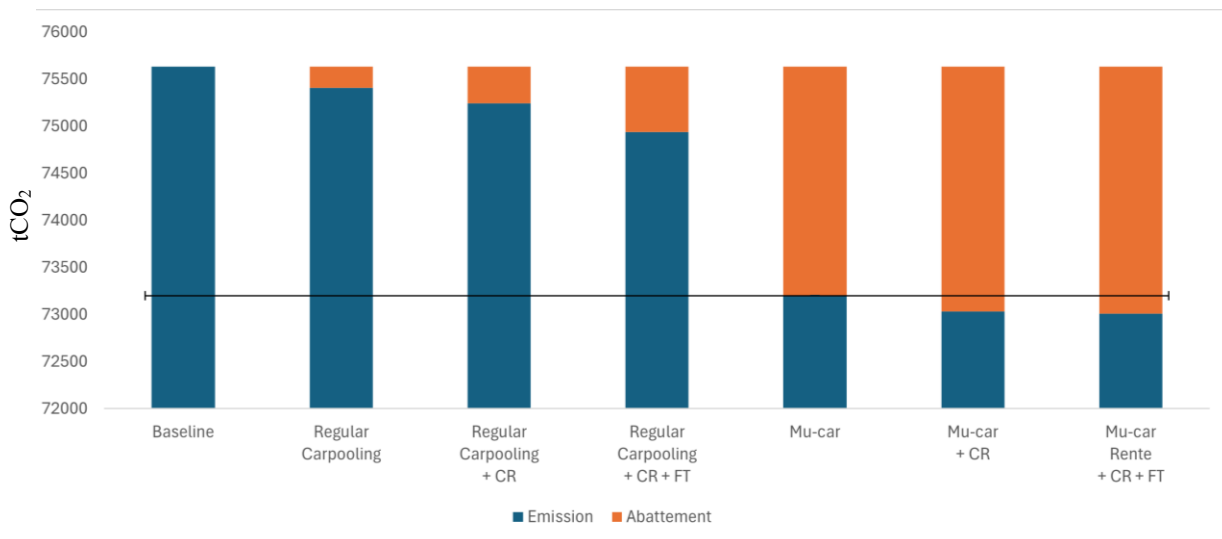


Figure 1: Emissions et abattement de CO₂

² Une subvention minimale de 1€ est garantie afin d'encourager le report modal vers la multimodalité. Pour inciter davantage les propriétaires de véhicules anciens à participer, cette subvention augmente de 0,02€ par année supplémentaire d'ancienneté du véhicule (par exemple, 1€ pour une voiture de 2020, 1,50€ pour une voiture de 1995). Cette modulation reflète une rente carbone plus élevée pour les véhicules plus anciens et plus polluants. Dans le modèle, la valeur finale de la subvention dépend également de la répartition des véhicules par type et par année dans la population, la subvention moyenne étant alors pondérée en fonction de cette distribution.

³ La taxe sur le carburant est ici calculée comme la moyenne des différentes valeurs à la pompe prévues dans le cadre de l'ETS2, sur la base d'une publication du Parlement européen (Hernández, 2025).

Réduction des émissions

- Emissions de Référence : 75 629 tonnes
- Abattement Mu-CAR : 2 430 t
- Abattement Mu-CAR + rente carbone + taxe : 2 619 t

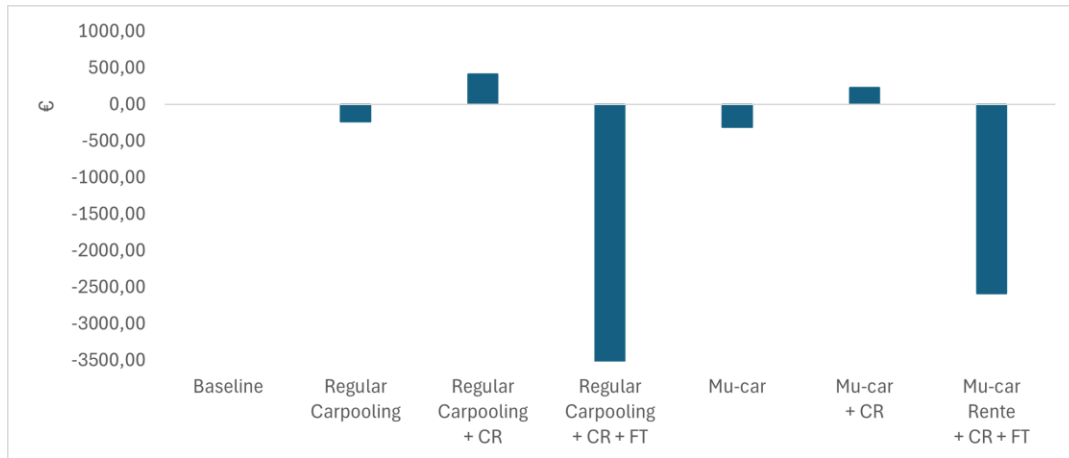


Figure 2: Coûts publics d'abattement

Coût de réduction des émissions

- Covoiturage + rente carbone : 414 €/tCO₂
- Mu-CAR + rente carbone : 227 €/ tCO₂
- Mu-CAR + rente carbone + taxe : -2 586 €/tCO₂ (économies)
- Mu-CAR est ainsi plus efficace que le covoiturage classique.

Analyse de sensibilité

Nous utilisons la méthode de Morris pour mesurer la sensibilité du volume d'abattement et du coût d'abattement aux variations de différents paramètres. Cette méthode permet d'estimer l'effet moyen (μ^*) de la variation d'un paramètre pour une fonction qui dépend de plusieurs paramètres.⁴ Dans notre cas, nous considérons trois paramètres (la distance, l'âge du véhicule

⁴ On considère une fonction qui dépend d'un nombre d de paramètres. La méthode de Morris consiste à réaliser une série de simulations où chaque run se caractérise par un changement de valeur pour un seul paramètre, les valeurs des autres paramètres restant inchangées (la méthode est dite « one at a time », parce qu'un seul paramètre voit sa valeur

et le pourcentage d'individus qui appartiennent au groupe G1 qui correspond aux personnes sensibles aux incitations) dont dépendent deux fonctions : le volume d'abattement de CO₂ et le coût de l'abattement. À titre d'illustration, si nous considérons la fonction qui rend compte du volume d'abattement (partie supérieure du tableau 1), dans le scénario RC, pour le paramètre distance, la valeur de μ^* est égale à 1029,83, ce qui rend compte de la variation moyenne de la valeur de la fonction pour le volume d'abattement, suite à une série de variations (des chocs ou « effets élémentaires ») pour la valeur du paramètre distance. De façon générale, plus la valeur de μ^* est élevée, plus la fonction étudiée est sensible aux variations du paramètre contrôlé.

Tableau 1: Analyse de sensibilité

Scénarios	Valeur de μ^* pour le paramètre considéré		
	Distance	G1_percentage	Year
Fonction étudiée : Abattement de CO₂			
RC	1029.83	0.00	1.64
RC + CR	887.78	56.85	1.92
RC + CR + FT	2173.38	64.83	2.02
Mu-car	1985.72	0.00	3.65
Mu-car + CR	2127.79	56.85	3.93
Mu-car CR + FT	2148.03	64.95	4.10
Scénarios	Valeur de μ^* pour le paramètre considéré		
	Distance	G1_percentage	Year
Fonction étudiée : Coût d'abattement			
RC	0.01	0.00	0.58
RC + CR	1578.75	0.00	93.92
RC + CR + FT	12899.82	702.26	15.56
Mu-car	364.02	0.00	0.60
Mu-car + CR	2250.28	11.77	96.04
Mu-car CR + FT	1932.82	72.93	101.15

Les résultats indiquent que la distance est le paramètre le plus déterminant, à la fois pour le volume et le coût d'abattement. Par exemple, dans le scénario RC+CR, concernant l'impact

modifiée à chaque run). On définit alors un « effet élémentaire » pour chaque run, qui correspond à la différence pour la valeur de la fonction quand on passe de l'ensemble de paramètres sans le choc (*i.e.* sans le changement de valeur pour le paramètre dont on veut contrôler l'effet) au nouvel ensemble de paramètres avec le choc. L'opération est répétée n fois (en général, $n = 10 \times (d + 1)$, pour une fonction avec d paramètres), ce qui donne une série d'effets élémentaires dont on peut calculer la moyenne (μ^*) et l'écart type. Alors, μ^* nous renseigne sur la variation moyenne de la valeur de la fonction suite à une série de chocs sur le paramètre qu'on contrôle, les valeurs des autres paramètres restant constantes. Dans ce cas, plus la valeur de μ^* est élevée, plus la fonction est sensible aux variations du paramètre qu'on contrôle.

sur les coûts d'abattement (partie inférieure du tableau 1), la valeur de μ^* pour la distance s'élève à 1578,75, soit plus de 15 fois celle associée à l'âge du véhicule, 93,92. Cela montre que la distance est de loin le paramètre le plus important.

Points de bascule (break-even points)

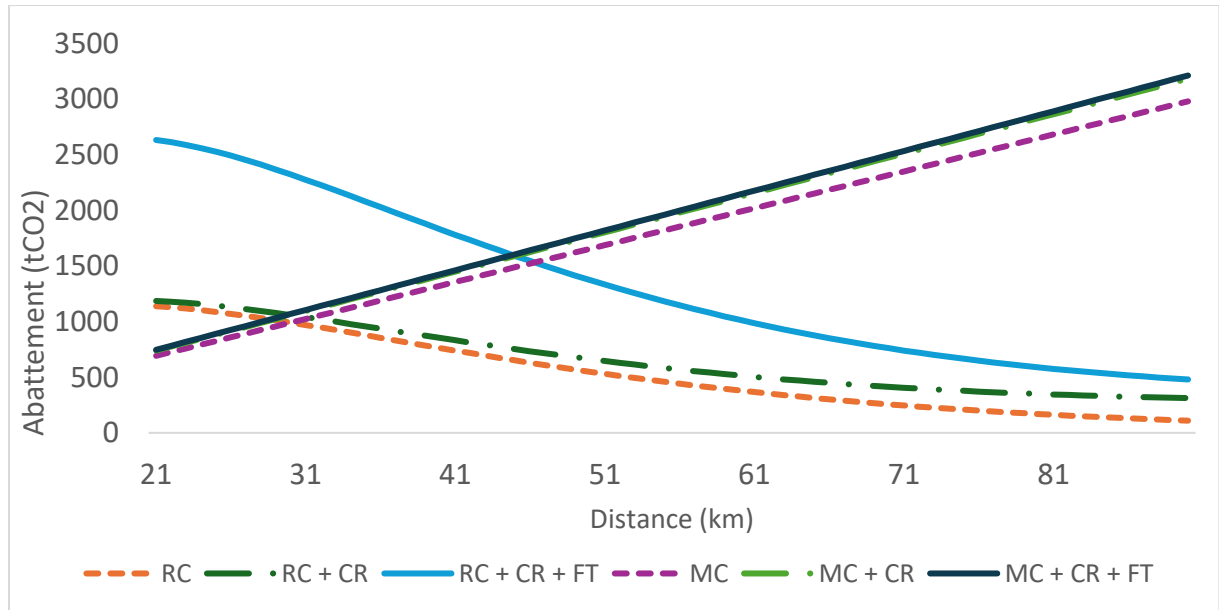


Figure 3: Abattement de CO₂ par km

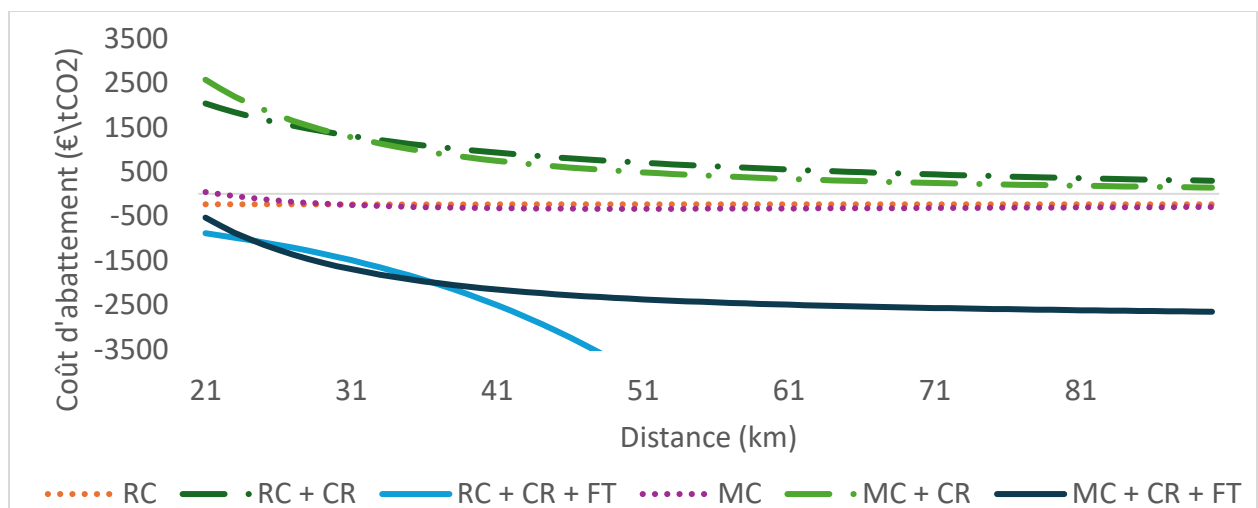


Figure 4: Coûts publics d'abattement par km

Mu-CAR devient plus efficace que le covoiturage classique dès 30 km, et dès 44-45 km avec taxe carburant.

Comparaison entre part de conducteurs solo et sensibilité aux incitations

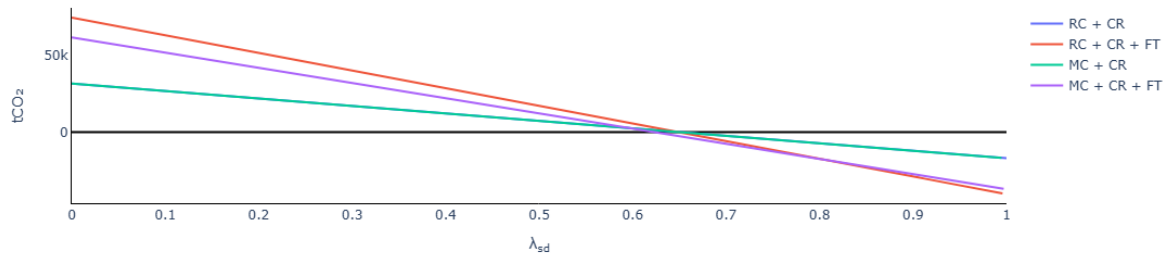


Figure 5: Abattement relatif à la part de trajets en voiture individuelle (λ_{sd})

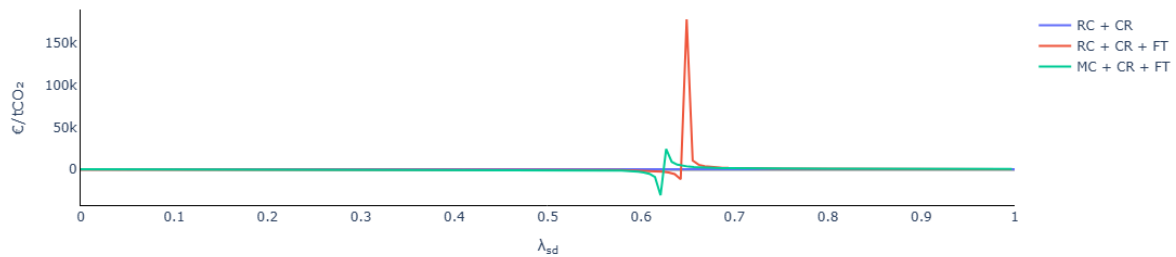


Figure 6: Coûts publics d'abattement relatif à la part de trajets en voiture individuelle (λ_{sd})

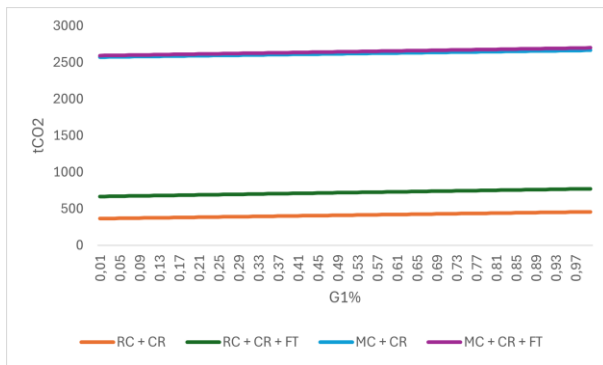


Figure 8: Abattement en fonction de la part des usagers plus sensibles aux incitations ($G1\%$)

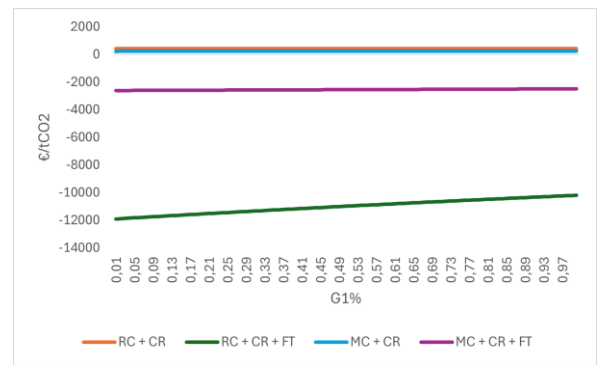


Figure 7: Coûts publics d'abattement en fonction de la part des usagers plus sensibles aux incitations ($G1\%$)

Réduire la voiture individuelle (donc augmenter le nombre d'utilisateur des autres modes de transport) a beaucoup plus d'impact que d'augmenter la part des usagers sensibles aux incitations.

9. Discussion : Pourquoi Mu-CAR est plus performant ?

Plusieurs raisons peuvent être avancées sur la performance du projet Mu-CAR :

- Le covoiturage classique est limité par le manque de passagers (Le Goff *et al.*, 2022)
- Mu-CAR coordonne la demande entre modes via une plateforme numérique
- Les incitations sont plus efficaces qu'en situation de covoiturage classique, notamment la taxe carburant qui améliore fortement les résultats mais soulève des enjeux d'acceptabilité sociale (Salihou *et al.*, 2022)
- Les longues distances (fréquentes en zones rurales) renforcent l'efficacité du modèle mixte (Silva-Send *et al.*, 2013)

Nous avons tenu à inclure dans notre étude la taxe sur les carburants car avec la mise en place du système ETS2 en Europe, qui vise à taxer le contenu carbone des carburants, il se peut que dans les années à venir, cela impacte grandement les passagers et voyageurs sur route. Selon l'adoption qu'en décide l'Etat, elle pourra venir remplacer l'actuelle contribution climat énergie.

10. Enjeux politiques et environnementaux

Pourquoi Mu-CAR fonctionne ?

Mu-CAR est non seulement efficace pour la réduction des émissions des CO2 et la favorisation de l'accès aux mobilités, mais est également coût-efficace, et cela pour plusieurs raisons, il :

- Combine covoiturage et transport pour une meilleure couverture du territoire, ce qui augmente l'accès aux transports pour les populations en zones rurales (qui peuvent subir une précarité énergétique liée aux effets du changement climatique)
- Utilise des incitations ciblées et justes (voitures anciennes = plus de rente carbone), et
- S'aligne avec les politiques européennes à venir (ETS2) (International Carbon Action Partnership (ICAP), 2025)

Recommandations politiques

Cette étude permet donc de faire les recommandations ci-après :

- Lancer des projets pilotes dans les zones peu desservies
- Utiliser des leviers comportementaux, pas seulement financiers
- Communiquer clairement pour garantir l'adhésion publique

11. Conclusion : Une solution climatique, prête pour les territoires ruraux

Cette étude montre que l'intégration du covoiturage avec les transports publics via le projet Mu-CAR est une stratégie efficace pour décarboner la mobilité des passagers. Les simulations indiquent que les scénarios Mu-CAR surpassent le covoiturage traditionnel, en réduisant davantage les émissions de CO₂ tout en étant plus économiquement efficaces, avec des coûts publics plus faibles voire négatifs.

Les incitations financières, notamment des rentes carbone liées aux caractéristiques des véhicules, jouent un rôle clé pour augmenter la participation et favoriser l'usage de véhicules plus propres dans Mu-CAR. Ainsi, Mu-CAR génère des réductions d'émissions nettement supérieures, même avec des dépenses publiques similaires ou moindres.

L'ajout d'une taxe sur le carburant améliore encore les réductions d'émissions et les changements de mode, mais soulève des questions d'acceptabilité sociale, notamment pour les conducteurs seuls et les ménages vulnérables. Cela souligne la nécessité d'un design prudent des politiques et d'études sociales complémentaires pour garantir équité et acceptation.

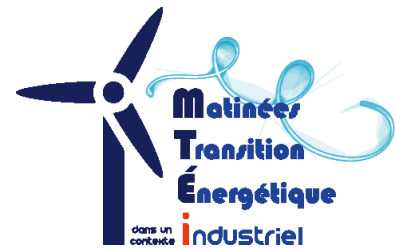
Mu-CAR propose donc une approche innovante et rentable pour décarboner la mobilité rurale. Les collectivités du Nord Franche-Comté et d'ailleurs peuvent s'approprier ce modèle pour atteindre leurs objectifs climatiques tout en améliorant le quotidien des personnes n'ayant pas accès aux transports.

Références

- ADEME (2025). Évolution du taux moyen d'émissions de CO2 en France. Accessed: 2025-06-26.
- Aissat, K. and S. Varone (2015). Carpooling as complement to multi-modal transportation. In International Conference on Enterprise Information Systems, pp. 236–255.
- Springer. Bakker, S., M. Zuidgeest, H. De Coninck, and C. Huizenga (2014). Transport, development and climate change mitigation: Towards an integrated approach. *Transport Reviews* 34(3), 335–355.
- Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) (2024, December). Nord Franche-Comté: la voiture toujours reine malgré un recul des déplacements. Le Trois. Accessed June 26, 2025.
- European Parliament (2025). Émissions de CO2 des voitures: faits et chiffres (infographie).
- Fielbaum, A. and B. Pudāne (2024). Are shared automated vehicles good for public-or private transport-oriented cities (or neither) ? *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 136, 104373.
- France Stratégie (2021). Les coûts d'abattement – Partie 2 : Transports. Rapport, France Stratégie.
- Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (2012). Sustainable Urban Transport : Avoid Shift-Improve (A-S-I). Accessed : 2025-06-18.
- Global Carbon Council (2025). Methodology for Private Carpooling for Long-Distance Inter Urban Travel. Methodology Report GCCM007.
- Hernández, J. F. L. (2025, May). EU Emissions Trading System for buildings, road transport and additional sectors (ETS2). EPRS Briefing PE 772.878, European Parliamentary Research Service, European Parliament.
- International Carbon Action Partnership (ICAP) (2025). EU Emissions Trading System for Buildings and Road Transport ("ETS2"). Online factsheet. Accessed 2025-06-27.
- Le Goff, A., M. Koning, G. Monchambert, C. Marchal, and J.-B. Ray (2024). Promoting urban carpooling: a total social cost approach based on the Lyon case study.
- Le Goff, A., G. Monchambert, and C. Raux (2022). Are solo driving commuters ready to switch to carpool ? Heterogeneity of preferences in Lyon's urban area. *Transport Policy* 115, 27–39.
- Salihou, F., R. Le Boennec, J. Bulteau, and P. Da Costa (2022). Incentives for modal shift towards sustainable mobility solutions: A review. *Revue d'économie industrielle* 178179(2), 199–246.
- Silva-Send, N., S. Anders, and A. Narwold (2013). Cost effectiveness comparison of certain transportation measures to mitigate greenhouse gas emissions in San Diego County, California. *Energy policy* 62, 1428–1433.
- Verra, V. C. S. (2025). Methodology for Carpooling. Methodology Report VM0028



“ Le Réseau EDEN.i est une initiative de l'Université Marie & Louis Pasteur avec le soutien de la Région Bourgogne Franche-Comté. Le Réseau est lauréat du dispositif « Soutien aux actions structurantes et d'animation scientifique » de la Région Bourgogne Franche-Comté. ”



Le Réseau EDEN.i est organisateur des Matinées de la Transition Énergétique dans un contexte industriel



The REEL.i Chair is hosted by Université Marie et Louis Pasteur under the auspice of the FC'INNOV Foundation and with the support of Origo.

Associated to the Réseau EDEN.i research network, REEL.i adopts a multidisciplinary approach to analyze the economic and legal questions related to renewable energy, with a special interest for energy decentralization in industrial territories.



Site internet



Scannez-moi !

