

L'apport du numérique dans la décarbonation des mobilités : le cas de l'automobile

Par Christophe MIDLER

Directeur de recherche émérite, Centre de recherche en gestion de l'École polytechnique-i3, CNRS-IPP, membre de l'Académie des technologies

Et Patrick PÉLATA

Ancien directeur général délégué de Renault, ancien Chief Automotive Officer de Salesforce, membre de l'Académie des technologies

Les technologies numériques ont fortement impacté les automobiles sur le plan de leurs émissions de CO₂, essentiellement à travers l'amélioration de la gestion des moteurs, et ce depuis le début des années 1990. L'effet cumulé de ces trente années d'innovation est de l'ordre de 200 MtCO₂ par an pour l'Europe.

Mais, en dehors des véhicules électriques, où, pour l'essentiel, les innovations viennent de la chimie et de l'électronique de puissance, celles que nous connaissons aujourd'hui et qui s'appuient sur le numérique (télétravail, e-commerce, auto-partage, VTC, mobilités partagées, douces ou pas) sont d'un bien moindre impact sur la décarbonation des mobilités.

Ce que le futur nous réservera est encore bien incertain. Mais la conduite autonome, en particulier appliquée à des robotaxis partagés, pourrait contribuer significativement et même accélérer la mutation majeure que constituent l'électrification et la réduction du parc automobile.

Alors que les technologies numériques impactent notre vie de tous les jours, la question se pose sur ce qu'elles ont fait, font et feront en matière de décarbonation des mobilités. Ce secteur est le plus gros émetteur de gaz à effet de serre en France, essentiellement à travers le CO₂ émis par les moteurs à combustion ou les turbines des avions. Dans cet article, nous nous contenterons d'en examiner et d'en quantifier les effets (lorsque cela est possible) sur les mobilités aujourd'hui assurées par l'automobile en revenant sur le passé récent, sur ce qui est en cours et sur ce que l'on peut percevoir pour demain.

Le passé récent, la période 1990-2020

Avec la crise du pétrole des années 1970, puis l'arrivée des réglementations anti-pollution, les moteurs à combustion ont fortement évolué, passant des carburateurs (moteurs à essence) à des injections mécaniques dans l'admission d'air, puis directes dans la chambre de combustion et, enfin, à des injections électroniques

directes et à très haute pression, et donc pilotées par un calculateur numérique (Engine Control Unit – ECU) prenant en compte de nombreux paramètres, comme l'enfoncement de la pédale d'accélérateur, la température de l'air admis, celle du moteur, le taux d'oxygène, les mesures en sortie moteur (sonde lambda), etc. Cette numérisation du contrôle moteur s'est peu à peu complexifiée avec de multiples injections en cours de combustion, en particulier pour les moteurs diesel (plus de dix injections par compression). Plus récemment encore, d'autres acteurs ont été ajoutés dans le moteur (soupape de décharge du turbo, ouverture variable des soupapes...), qui nécessitent une optimisation en temps réel par le calculateur.

Enfin, certaines de ces améliorations n'auraient pas été possibles sans des simulations très sophistiquées portant sur l'arrivée d'air, sur le jet d'injection et la propagation du front de flamme dans la chambre de combustion et réalisées dans des conditions de charge moteur, de pression et de température très différentes. Mais, finalement, quel a été l'effet réel de toutes ces innovations permises par la numérisation ?



Figure 1 : Éclaté de la partie Motorisation et transmission de l'e-Tech hybride de Renault – Source : Renault.

Pour les moteurs diesel, les améliorations ont été fulgurantes : une réduction de 33 % de la consommation entre une Renault Megane de 1998 à moteur diesel turbo et à injection indirecte mécanique et la Megane 3 de 2009, à injection directe, et en dépit d'un poids plus important (plus lourde de 140 kg). Des gains plus conséquents ont encore été constatés si l'on compare la Golf 2 GTD de 1984, avec son moteur diesel de 1,6 l turbo à injection mécanique qui développait 51 kW et 130 N.m et consommait 5,7 l/100 km en mode combiné, avec une Polo V 1,2 TDI de 2010, qui pesait, malgré tout, 210 kg de plus, mais affichait une consommation inférieure de 40 % grâce à son moteur turbo diesel à injection électronique et à une rampe d'alimentation à très haute pression (*common rail*)¹.

Pour les moteurs essence, le passage du carburateur à l'injection et l'ajout quasi systématique du turbo, puis plus récemment de l'injection directe ont produit des résultats du même ordre, mais sur une période plus longue : un peu plus de 30 % de réduction, par exemple, entre une Clio 1 de 1990 et une Clio 5 de 2019, là encore malgré une masse qui est passée de 850 kg à 1 080 kg pour le modèle le moins équipé.

Une nouvelle vague de réduction de la consommation est arrivée dans les années 2010, avec les transmissions CVT (Continuously Variable Transmissions) et DSG (Direct Shift Gearbox) qui ont remplacé les anciennes boîtes automatiques, puis les motorisations hybrides et leur couplage intelligent avec les moteurs. Là aussi, un pilotage fin du moteur et des rapports de transmission, guidé par la recherche des meilleurs points de fonctionnement du moteur, permet des gains importants, en particulier en roulage urbain et péri-urbain. Un exemple particulièrement sophistiqué et efficace en est l'e-Tech hybride de Renault qui permet

au calculateur de choisir et d'enchaîner quinze combinaisons sans aucune rupture de couple afin d'optimiser en toutes circonstances la consommation de la voiture (voir la Figure 1 ci-dessus). Le gain est significatif : - 20 % pour les émissions de CO₂ par rapport à un moteur de cylindrée moindre, à injection directe essence et à transmission manuelle, et ce pour une même voiture, une Clio 5 de 2021. C'est aussi 9 % de mieux qu'un petit moteur diesel particulièrement abouti équipant la même voiture.

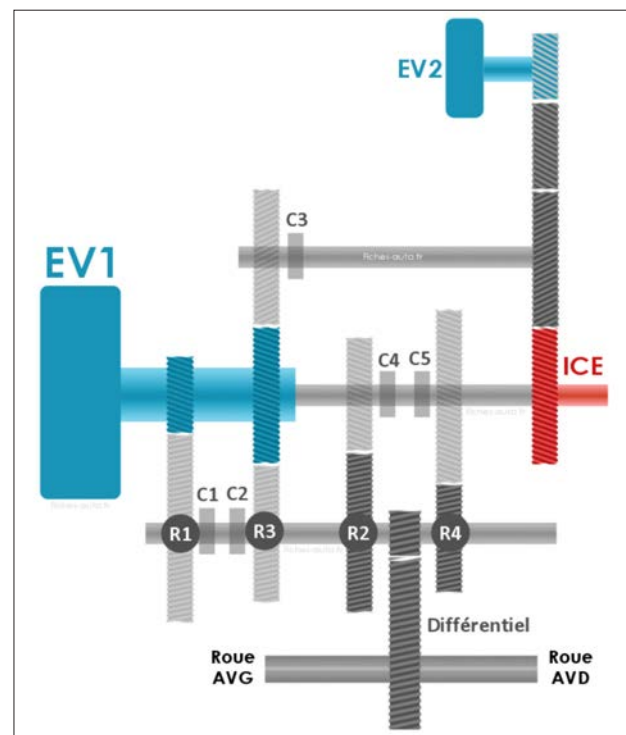


Figure 2 : Schéma conceptuel de l'e-Tech de Renault : EV1, EV2 : moteurs électriques ; C1 à C5 : crabots ; R1 à R4 : rapports ; ICE : arbre moteur – Source : Fiches-auto.fr.

¹ Pour être comparables, toutes ces données concernent des voitures avec des transmissions manuelles.

Mais, l'on sait, par ailleurs, que les standards de mesure des consommations et des émissions de CO₂ se sont peu à peu éloignés des conditions réelles d'usage des voitures. Pour recouper ces progrès, il faut donc revenir à l'impact global de cette évolution, en Europe par exemple. C'est ce qu'a fait l'Agence européenne de l'environnement² dans une étude ayant pour périmètre l'Europe des 27, plus le Royaume-Uni. Voici les résultats de cette étude au regard de l'évolution des grands agrégats du parc automobile européen sur la période 1990-2015 :

- le nombre des voitures particulières a augmenté : + 62 % ;
- la distance totale parcourue par ce parc a progressé : + 45 % ;
- ainsi que les émissions totales de CO₂ : + 11 %³. Mais ces émissions rapportées aux kilomètres parcourus ont baissé de 23 %.

Quels effets au regard de différents paramètres ?

Le parc automobile, sur la période précitée, est passé d'un mix intégrant 11 % de diesel à 41 %. Cela a bien sûr eu un impact, mais seulement après l'arrivée en masse des moteurs diesel à injection directe, qui sont plus efficaces (de l'ordre de 15 %) en termes d'émissions de CO₂ que les moteurs essence..., et plus encore avec l'arrivée, beaucoup plus tardive, des moteurs essence turbo à injection directe. Cette substitution a aussi été associée à l'arrivée de calculateurs capables de gérer cette injection directe.

Inversement, les voitures neuves ont pris du poids jusqu'en 2007 (en France), pour baisser, puis se stabiliser ensuite aux environs de 2004⁴. Mais cette augmentation de leur poids est de près de 300 kg au-dessus de la masse moyenne des voitures vendues en 1990, soit 950 kg. On peut donc estimer la prise de poids du parc véhicules de 2015 à + 30 %, ce qui suppose une hausse induite de la consommation de l'ordre de 15 %, toutes choses étant égales par ailleurs.

Au-delà de cette prise de poids, les taux accrus d'équipement en climatisation (air conditionné) ou en boîtes de vitesses automatiques ont aussi significativement poussé à la hausse les consommations. L'amélioration des frottements (des pneus, des moteurs, des liaisons au sol), voire celle de l'aérodynamique ont aussi joué un rôle, mais qui est beaucoup plus limité que les avancées réalisées en matière de gestion des moteurs et des transmissions. Elles sont néanmoins suffisantes pour contrebalancer l'accroissement du nombre des équipements et peut-être une partie de l'augmentation induite de la masse des voitures.

Au total, l'on peut estimer que l'amélioration de la gestion moteur, qui est intimement liée à l'injection directe et aux turbos tant pour les véhicules essence que diesel, a permis une réduction d'au moins 20 à 25 % des émissions CO₂ des voitures particulières en circulation en Europe, de 1990 jusqu'à 2015-2020, soit avant l'arrivée massive des véhicules hybrides et électriques. Puisque ces technologies se sont développées de la même façon pour les camions et véhicules utilitaires légers, nous pouvons affirmer que le chiffre vraisemblablement très conservateur de 20 % est aussi valable pour l'ensemble du trafic routier en Europe.

Une économie de 200 millions de tonnes de CO₂ par an

Rapporté aux émissions de CO₂ de l'ensemble du trafic routier en Europe, cela représente une économie de 200 Mt de CO₂ par an, alors que ce secteur émettait 800 Mt de gaz à effet de serre en 2019, soit 22 % des émissions brutes de l'Europe des 27⁵.

On peut donc dire, dans le cadre de cet article portant sur la numérisation, que la capacité à utiliser en temps réel des algorithmes complexes d'optimisation de la gestion des moteurs et des transmissions automobiles a eu un impact très significatif sur les émissions de gaz à effet de serre de ce secteur.

Le présent

Le champ d'influence de la numérisation dans les mobilités s'est plus récemment élargi : impact du télétravail, autopartage, VTC, flottes de vélos, de trottinettes, de scooters électriques connectés et partagés, livraisons après un e-achat, etc. Mais quel en est l'impact réel en matière de décarbonation ?

Le télétravail a enregistré une forte accélération en France sous la contrainte Covid, avec, sans doute, un effet structurel, puisqu'« en 2021, en moyenne, chaque semaine, un salarié sur cinq a télétravaillé »⁶. En moyenne, pour l'ensemble des salariés, cela a représenté 15 jours de télétravail sur l'année, soit environ 6 à 7 % de trajets domicile/travail en moins. Mais si l'on en cherche la trace au niveau du trafic automobile, on constate que celui-ci est remonté plus vite que le trafic des transports en commun. C'est flagrant aux États-Unis, où ces données sont publiées chaque semaine : le trafic routier est revenu, dès mai-juin 2021, à son niveau pré-Covid, alors que les transports en commun à la fin 2021 et encore en 2022 sont restés très en deçà : - 40 % à New York (MTA), - 50 % à Washington DC (WMATA) et - 55 % à San Francisco (BART)⁷. En France, nous savons que les transports en commun du quotidien ne sont pas encore revenus à leur niveau de 2019, mais l'on peut constater que la consommation

² EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2019), "Fuel efficiency and fuel consumption in private cars, 1990-2015", December.

³ Une autre donnée de l'EEA donne + 18 % pour les émissions de gaz à effet de serre (GES) des voitures sur la période 1990 à 2015, dans l'EU 27.

⁴ Source : Ademe, Car Labelling, Chiffres clés.

⁵ Émissions brutes et donc hors utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCATF) – Source : *Chiffres clés du climat, France, Europe et Monde*, ministère de la Transition écologique, édition 2022.

⁶ JAUNEAU Yves, *INSEE Focus*, mars 2022.

⁷ "Latest weekly Covid-19 – Transportation Statistics", Bureau of Transportation Statistics, DOT.

d'essence – un proxy du trafic des voitures particulières⁸ –, avait reculé de 13 % en 2020, mais a remonté dès 2021, pour se situer au-dessus de son niveau de 2019 (+ 5 %), et a continué sa progression sur les dix premiers mois de 2022 (+ 16 %). De nombreux changements se sont produits en parallèle durant cette période : une hausse donc du télétravail, mais aussi des installations hors des très grandes villes, et donc un recours moindre aux transports en commun, mais un trafic voiture accru. Dès lors, il est difficile de conclure que le télétravail a eu, *in fine*, un effet positif sur la circulation automobile, et donc sur le climat.

Il est aussi difficile de conclure sur l'impact du e-commerce, qui représente 13 % des achats en France. Une étude a conclu à un effet très positif : la tournée d'un livreur étant moins émettrice que n clients se rendant dans un magasin, en particulier hors des villes centres⁹. D'autres études, par exemple celle de Carbone 4¹⁰, contestent cette incidence positive, arguant des achats groupés réalisés par les consommateurs qui prennent leur voiture pour se rendre dans un commerce physique et de la forte proportion d'acheteurs se déplaçant autrement qu'en voiture pour faire leurs courses. Mais aucune de ces études ne mesure des cas réels.

L'autopartage facilité par les applications numériques est-il pour sa part plus impactant ? Le taux d'occupation des voitures pour des déplacements en local (< 80 km) a baissé entre 2008 et 2019. Il a par contre augmenté pour les déplacements longs, 2 % des trajets se faisant en covoiturage avec le recours à des applications pour un tiers d'entre eux¹¹. En supposant que le trajet correspondant ait été fait avec une voiture âgée de quelques années, on peut calculer un impact de l'ordre de 0,1 MtCO₂ par an en France¹². Quant aux trajets domicile-travail, l'autosolisme représente quasiment 90 % de ces déplacements. Il est vrai que la distance moyenne parcourue entre le domicile et le lieu de travail est passée de 3 à 13 km depuis le début des années 1960. Une étude détaillée portant sur l'aire urbaine de Lyon en décortique les raisons¹³.

Les mobilités partagées grâce aux diverses applications existantes (Uber, Velib, DriveNow) soit ne déplacent pas l'usage de l'automobile vers un moyen de transport moins décarboné, soit ne pèsent que très peu dans la

décarbonation des transports. Les trottinettes ou les vélos partagés cannibalisent la marche, les transports en commun et – plus marginalement – l'usage de la voiture. L'exemple le plus significatif est sans doute le service Velib, avec 20 000 vélos disponibles et 116 millions de kilomètres parcourus en 2021. En supposant une cannibalisation de la voiture, on peut calculer un impact de 0,02 MtCO₂ par an¹⁴.

On voit donc qu'au-delà de l'extension des transports en commun et de l'arrivée sur le marché des véhicules électriques pour lesquels la numérisation n'est pas un facteur déclenchant, les changements actuellement permis par la numérisation sont finalement peu impactants en matière de décarbonation, au stade où ils en sont aujourd'hui.

Le futur

Alors, quel impact peut-on envisager dans un futur visible ?

L'impact sur l'électrification, déjà évoqué en ce qui concerne les véhicules hybrides, va se poursuivre avec la croissance de cette motorisation. L'incidence sur les véhicules électriques est moindre, puisque l'essentiel du progrès provient et proviendra de la chimie des batteries et de la décarbonation de la production d'électricité. Certes, le Battery Management System (BMS) est indispensable à la bonne gestion des batteries et joue un rôle important dans leur durabilité et leur sécurité.

Les Google Maps et autres applications, qui permettent d'emprunter les routes les moins encombrées ou bien de limiter un détour pour trouver une borne de recharge, jouent sans aucun doute un rôle dans la décarbonation, mais selon un ordre de grandeur moindre que ce qui a été évoqué jusqu'ici.

Les aides à la conduite automatisées (Automated Driving Assistance Systems – ADAS) jouent déjà et joueront de plus en plus un rôle important dans la réduction de la fréquence des accidents. Autant la valeur sociale en sera donc élevée, autant son impact sur la décarbonation sera limité tant que l'on en restera aux niveaux 2 et 3 de la conduite automatisée (voir le Tableau 1 de la page suivante). Le niveau 3 pourrait néanmoins permettre des vitesses régulées sur des portions d'autoroute très chargées, évitant ainsi des bouchons par un réduction des à-coups accélération-freinage. Ou bien, pour les camions, il permettrait le roulage en peloton (*platooning*), deux camions ou plus se suivant de très près et consommant ainsi de 10 à 15 % de carburant en moins.

Il en ira différemment lorsque les développements de niveau 4 de la conduite autonome par Google-Waymo, Cruise (General Motors-Honda-Microsoft-Softbank), Zoox (Amazon), Motional (Hyundai-Aptiv et Uber) ou Aurora aux États-Unis ou bien encore Baidu (le Google chinois) ou Pony.ai (toujours en Chine) permettront de faire massivement ce qu'ils font déjà dans plusieurs grandes villes, à savoir faire rouler des robotaxis avec

⁸ "Gross inland deliveries – observed – of motor gasoline France", Eurostats.

⁹ WYMAN O. and Institute of Supply Chain Management (2020), "Is e-commerce good for Europe Economic and environmental impact", An independent study commissioned by Amazon, University of S' Gallen, p. 64.

¹⁰ SORRET J. (2021), « Le e-commerce est-il vraiment un élément clé de la décarbonation du transport de marchandises ? », Carbone 4, juin.

¹¹ BRAHMI Laura (ENSAE Paris), FUMAT Victoria (SDES) & TREVIEN Corentin (SDES) (2022), « Se déplacer en voiture : seul, à plusieurs ou en covoiturage ? », ministère de la Transition écologique, juillet.

¹² $89,5 \times 10^9 \text{ km} \times 2 \% \times 1/3 \times 150 \text{ gCO}_2/\text{km} = 0,60 \times 10^9 \text{ km} \times 150 \times 10^{-6} \text{ tCO}_2/\text{km} = 90 \times 10^3 \text{ tCO}_2$.

¹³ COLDEFY J., PAPET L. & CHEVREUIL M. (2021), « Décarboner la mobilité : quelles solutions, quels financements ? », ATEC ITS France, janvier.

¹⁴ $116 \times 10^6 \text{ km} \times 150 \text{ g/km} = 116 \times 10^6 \text{ km} \times 150 \times 10^{-6} \text{ t/km} = 17 400 \text{ t}$.

Niveaux		Tâches de conduite		Rattrapage en cas de situation de conduite difficile	Operational Design Domains (ODD)
		Contrôle latéral et longitudinal continu du véhicule	Détection d'objet ou d'évènement et réaction		
1	Assistance Conducteur	Conducteur et Système	Conducteur	Conducteur	Limités
2	Automation Partielle	Système	Conducteur	Conducteur	Limités
3	Automation Sous Conditions	Système	Système	Le Conducteur doit reprendre la main	Limités
4	Automation de Haut Niveau	Système	Système	Système	Limités
5	Automation Complète	Système	Système	Système	Sans Limites

Tableau 1 : Définition des niveaux de conduite automatisée selon la Société internationale des ingénieurs de l'automobile.

et sans chauffeur de sécurité et, pour certains, avec des clients.

En effet, dans ces zones péri-urbaines souvent très étendues, où les transports publics sont inexistantes ou peu efficaces, et où la voiture, souvent sans passager, est la seule solution de mobilité, des robotaxis partagés (niveau 4) pourraient profondément améliorer le coût de la mobilité, tout en réduisant à la fois le nombre des voitures et les kilomètres parcourus par celles-ci. Les simulations sur ce thème laissent pantois. Elles décrivent ainsi un monde où les voitures individuelles sont en partie remplacées par des robotaxis partagés, qui vont chercher un ou plusieurs clients, pour, dans ce dernier cas, opérer des transports groupés en particulier vers les gares des transports publics lourds, vers les établissements scolaires, les centres commerciaux, de santé, de loisirs et autres pôles d'attraction, vers les sites sportifs et autres aéroports. Le parc automobile serait diminué de 30 à 40 % selon certaines études et les kilomètres-véhicules diminueraient également, mais dans des proportions moindres. Cela permettrait une décongestion des infrastructures routières et une réduction des surfaces dédiées au stationnement. Ces robotaxis seraient 100 % électriques et la réduction des émissions carbone qui s'en suivrait serait d'un tout autre ordre de grandeur que ce que nous venons de décrire. Le fait que les véhicules concernés pourraient rapidement être 100 % électriques, que le parc total de véhicules et donc la production pourraient diminuer et le fait que cette solution concernerait les plus faibles distances (véhicules.km) parcourues constituent trois facteurs majeurs de réduction des émissions de CO₂ dans l'automobile.

La zone de prédilection des robotaxis serait les aires d'attraction au sens de l'Insee¹⁵ : c'est-à-dire autour des grandes villes, en excluant les villes centres, dans des zones déjà bien desservies par les transports et où la navigation pour un véhicule autonome est compli-

¹⁵ L'aire d'attraction d'une ville désigne un ensemble de communes, d'un seul tenant et sans enclave, constitué d'un pôle de population et d'emploi, et d'une couronne qui regroupe les communes dont au moins 15 % des actifs travaillent dans le pôle. La commune la plus peuplée du pôle est appelée commune-centre (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/5039879?sommaire=5040030>).

quée. C'est dans ces zones que s'effectuent 50 % des 334 milliards de kilomètres de trajets locaux (< 80 km) réalisés en voiture en France. C'est aussi là que l'on trouve 63 % du parc automobile français¹⁶. Pour évaluer l'impact potentiel, nous faisons l'hypothèse que des flottes de robotaxis arriveraient à capturer 30 % de ce trafic et à réduire de 20 % le parc automobile précité, dès 2035. Deux effets se cumuleraient : d'une part, moins de nouvelles voitures seraient produites et, d'autre part, moins de déplacements seraient assurés par des véhicules non encore électrifiés composant pour partie ce parc automobile péri-urbain au sens large. En assumant l'idée que ce parc ne serait électrifié qu'à environ 40 % en 2035, on peut évaluer l'impact annuel potentiel cumulé à une économie d'environ 6 MtCO₂/an pour la France¹⁷, ce qui, étendu à l'Europe, correspondrait à environ 30 à 35 MtCO₂/an. Ce qui est significatif et serait une victoire majeure des technologies numériques concernées, encore en devenir...

Est-ce vraiment un rêve ? Les développements sur les véhicules autonomes mobilisent aujourd'hui, grâce à d'énormes moyens, une foule de technologies du numérique : *Big Data*, *machine learning*, intelligence artificielle dite de confiance, simulations complexes, y compris le recours à du *hardware in the loop*, à des capteurs, etc. Nous sommes encore loin du compte et les avis sont très partagés sur l'horizon auquel ces technologies seront assez sûres et matures pour permettre le passage à grande échelle de cette automatisation de la conduite, dont nous venons d'évoquer une toute petite partie du potentiel, notamment en matière de décarbonation des mobilités.

¹⁶ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-sur-la-mobilite-des-personnes-2018-2019>

¹⁷ Une réduction de 20 % du parc se traduirait par un gain en termes d'émissions de CO₂ correspondant à : - 20 % x 63 % des ventes annuelles en France (2 M), soit 6 tCO₂ pour produire une voiture (250 000 x 6 t = 1,5 MtCO₂/an). Pour le trafic capturé (30 % dans les zones considérées), il remplacerait 60 % des trajets réalisés avec des voitures thermiques (nous assumons l'hypothèse que le parc automobile des aires d'attraction des villes hors communes centres sera composé à 40 % de véhicules électriques à l'horizon de 2035), soit un gain de 4,5 MtCO₂ (= 334 Mds/km x 50 % x 30 % x 60 % x 150 gCO₂/km).