



ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE, ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

POUR LES TECHNOLOGIES DU TRANSPORT
ROUTIER FRANÇAIS À HORIZON 2040

Une étude





ORGANISATION ET OBJECTIFS

La baisse des émissions de CO₂ provenant des véhicules routiers est un élément essentiel et nécessaire pour réduire durablement les émissions de gaz à effet de serre (GES) en France. En plus de réduire l'impact climatique, le développement de nouvelles motorisations permet d'améliorer l'impact de la circulation sur la qualité de l'air (particulièrement tangible dans le cas des véhicules électrifiés en ce qui concerne les émissions liées à la circulation), de réduire le coût du carburant pour les utilisateurs et enfin de diminuer les importations de pétrole.

Afin d'analyser les technologies disponibles pour les systèmes de propulsion des véhicules d'aujourd'hui et de demain, IFPEN, dans le cadre du projet E4T 2040 cofinancé par l'ADEME, s'est doté de méthodes et d'outils permettant à terme de réaliser des analyses prospectives concernant le secteur du transport. Ces méthodes et outils ont permis d'évaluer, dans le cadre du présent projet, les performances économiques, énergétiques et environnementales des technologies véhicules en fonction des conditions d'usage.

La diversité des segments du transport routier (véhicule léger, véhicule utilitaire léger, poids lourds, bus et deux roues) ainsi que les évolutions technologiques et économiques à un horizon moyen terme (cible 2040) ont été prises en compte dans l'analyse. Ainsi, à l'aide d'outils de modélisation décrits dans ce rapport, de nouvelles technologies et leurs évolutions ont pu être évaluées, permettant d'anticiper les besoins futurs et les orientations stratégiques du secteur.

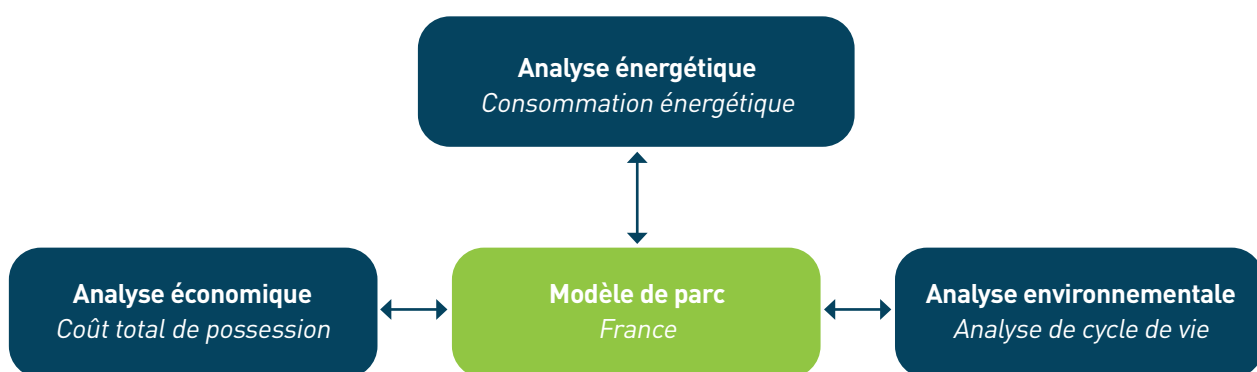
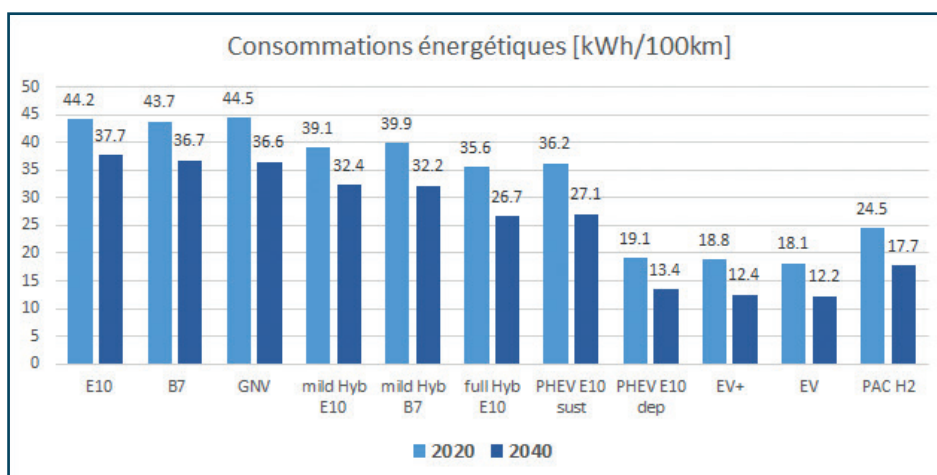


Schéma de l'articulation des lots du projet E4T 2040

LOT ÉNERGÉTIQUE

La figure suivante présente les résultats des consommations énergétiques (exprimées du réservoir à la roue et non en énergie primaire) pour les différentes architectures du segment C sur le cycle WLTC pour les horizons 2020 et 2040. L'évolution des rendements énergétiques, des densités énergétiques et des caractéristiques des véhicules projetées dans cette étude entraînent des réductions moyennes des consommations énergétiques par rapport à 2020 de 16 % pour les conventionnels, de 22 % pour les hybrides, de 33 % pour les électriques et de 29 % pour le véhicule PAC. Ces réductions constatées dépendent du cycle d'usage.

En effet, la dépense énergétique sur un roulage « urbain » est fortement impactée par la masse du véhicule, les progressions attendues sur l'augmentation de la densité énergétique des batteries - couplées à l'amélioration des efficacités énergétiques des composants - permettent d'envisager des réductions significatives des consommations des VE (39 % de réduction par rapport à 2020 pour une même capacité batterie, mais seulement 11 % pour les véhicules conventionnels sur cycle urbain).



Consommations énergétiques des véhicules du segment C sur WLTC

D'une manière générale, les résultats des simulations ont placé les architectures « tout électrique » comme étant les plus sobres énergétiquement, en raison des rendements moyens élevés de ses composants et la possibilité de récupérer une grande partie de l'énergie cinétique sur les phases de décélération.

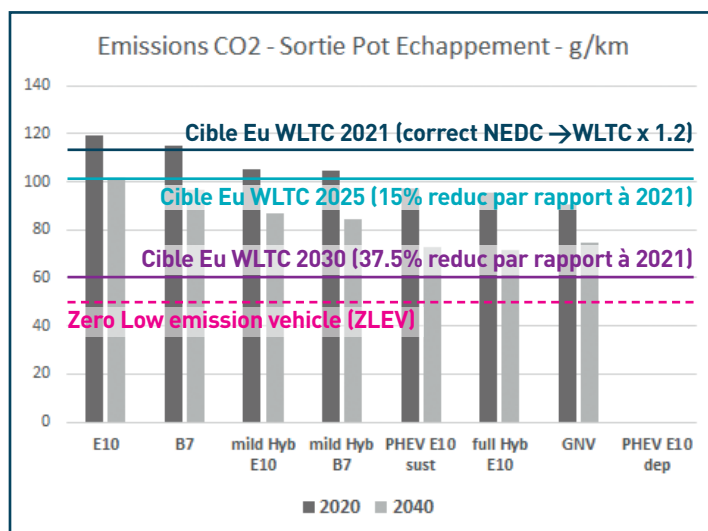




L'analyse énergétique a également montré l'intérêt de l'électrification des groupes motopropulseurs, en particulier sur les roulages urbains sur lesquels les « *mild hybrid* » (ou hybride 48 V) présentent des consommations 20 % plus faibles que l'équivalent tout-thermique, et au moins 40 % plus faibles avec les versions « *full hybrid* ». Cet intérêt s'amenuise sur les cycles à haute vitesse moyenne, notamment pour les applications lourdes.

Les hypothèses retenues pour 2040 font apparaître une réduction d'au moins 30 % des consommations énergétiques des véhicules électriques pour l'ensemble des applications. Cette progression s'explique notamment par la réduction de moitié de la masse batterie pour une même capacité embarquée.

Ces évolutions améliorent également la consommation des véhicules hybrides, mais **les émissions de CO₂ associées montrent que ces gains ne sont pas suffisants pour passer sous la barre des objectifs de réduction des émissions de CO₂ imposés par l'Union européenne pour 2030**, ce qui explique le virage « électrique » pris par les constructeurs automobiles. C'est ce que montre la figure suivante.



Émissions de CO₂ à l'échappement pour les véhicules du segment C sur WLTC

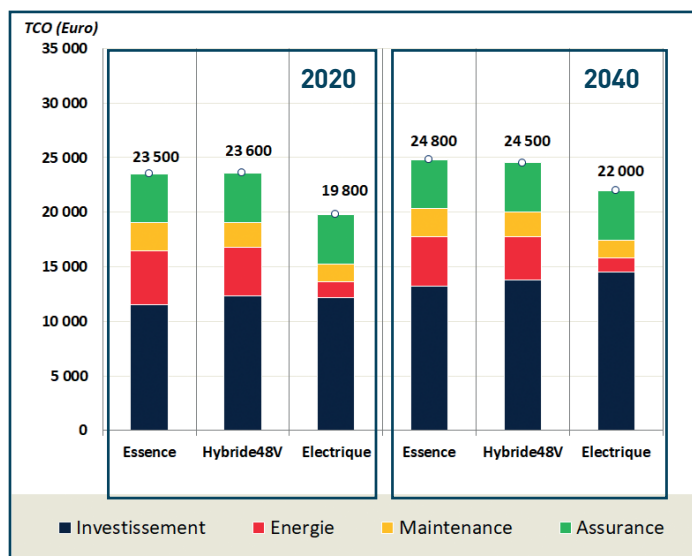
LOT ÉCONOMIQUE

Le changement important et progressif de la mobilité terrestre est aujourd'hui déjà amorcé. Cela concerne les véhicules légers, les véhicules utilitaires, les poids lourds, les bus et même les deux roues. Il apparaît donc important d'étudier si cette mutation technologique ne va pas s'accompagner d'une hausse brutale au niveau des coûts de possession. Car la transition énergétique du secteur Transport doit venir en premier lieu des utilisateurs de véhicules qui, via leurs futurs achats, vont petit à petit modifier la composition du parc français. Cette partie de l'étude porte sur l'analyse TCO (*Total Cost of Ownership*) de tous ces véhicules à l'horizon 2040.

Une analyse de TCO est extrêmement dépendante de l'usage qui est fait du véhicule. On peut néanmoins essayer d'utiliser des kilométrages annuels et des durées de possession moyens pour en déduire des tendances (*i.e* comparaison entre les technologies), et surtout projeter l'évolution à 2040.

Pour résumer ce lot économique, **les coûts des véhicules à batterie sont déjà compétitifs sur les véhicules légers type citadins ou compacts, si la capacité de la batterie reste raisonnable (typiquement < 50 kWh).**

C'est ce que montrent les graphiques ci-dessous. Les véhicules électriques bénéficient en effet d'une aide à l'achat et d'un coût d'utilisation faible, qui leur permet *in fine* d'amortir l'investissement initial plus conséquent.

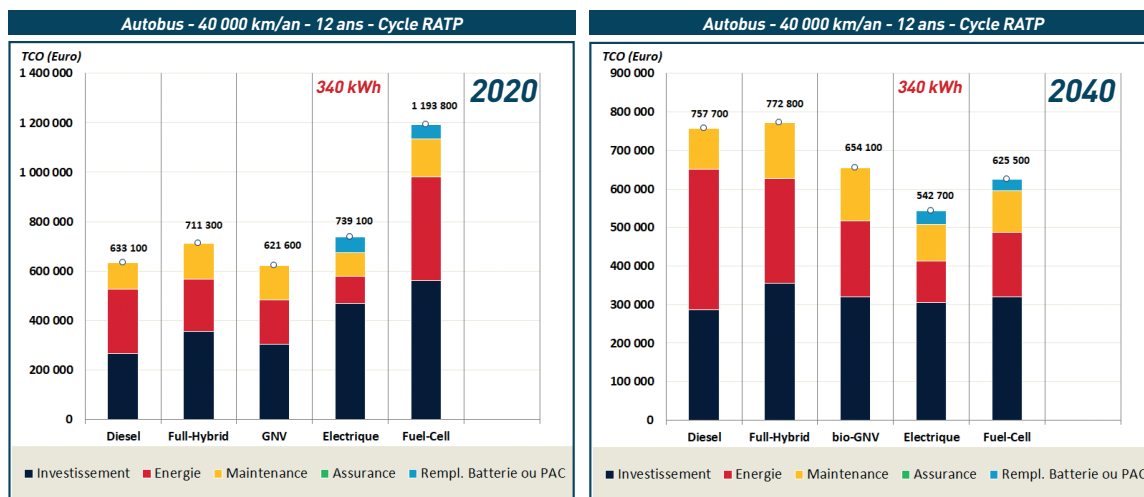


**TCO d'une citadine en 2020 et en 2040 – Cycle WLTC –
10 ans de possession – 8 000 km/an**



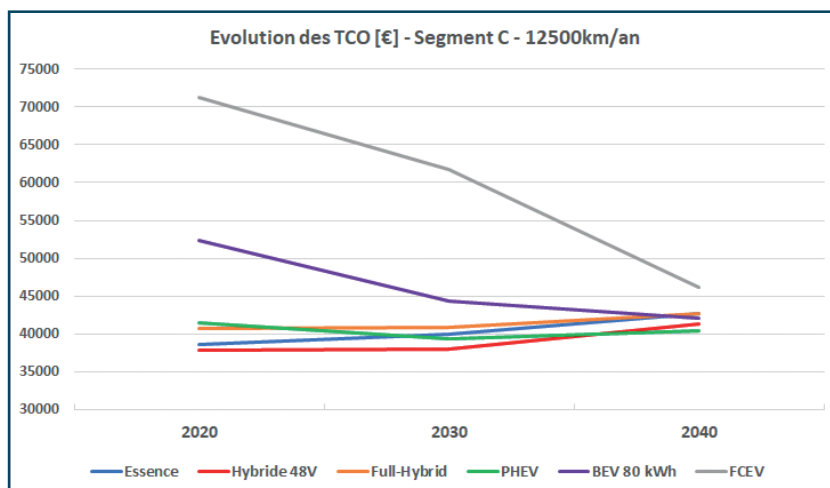


Les résultats pour le bus montrent quant à eux qu'en 2020, un bus électrique à batterie et encore davantage à hydrogène revient plus cher qu'un bus thermique (Diesel ou GNV) ou hybride Diesel (figure ci-après). En 2040, le bus électrique devient le meilleur choix et la PAC est une solution à considérer, surtout si le prix à la pompe de l'hydrogène vert devient inférieur à 6 €/kg. La réduction du poste coût « énergie » pourrait en effet profiter grandement au TCO total.



TCO d'un autobus en 2020 et en 2040 – Cycle RATP – 12 ans de possession – 40 000 km/an

En revanche, en ce qui concerne les véhicules légers, la solution PAC ne sera vraisemblablement pas rentable en 2040. On remarque que même avec un prix « à la pompe » de l'hydrogène plus faible (– 20 % soit 4,8 €/kg en 2040 au lieu de 6 €/kg – hypothèse de base) le Segment C avec pile à combustible hydrogène (FCEV) a des difficultés à être compétitif en 2040. En effet, la décomposition du TCO montre qu'au final la partie « énergie » n'est pas la plus importante. C'est aussi l'investissement (prix d'achat du véhicule moins sa revente) qui impacte majoritairement le TCO. Avec nos hypothèses le prix d'achat d'un véhicule de segment C avec technologie PAC est de 37 000 € en 2040 (en euro constant). Pour être compétitif, le prix d'achat doit être encore plus bas et se rapprocher de celui d'un véhicule électrique à batterie. Pour que ce soit le cas et en utilisant ces hypothèses, cela reviendrait à un coût de PAC sous les 60 €/kW en 2040.

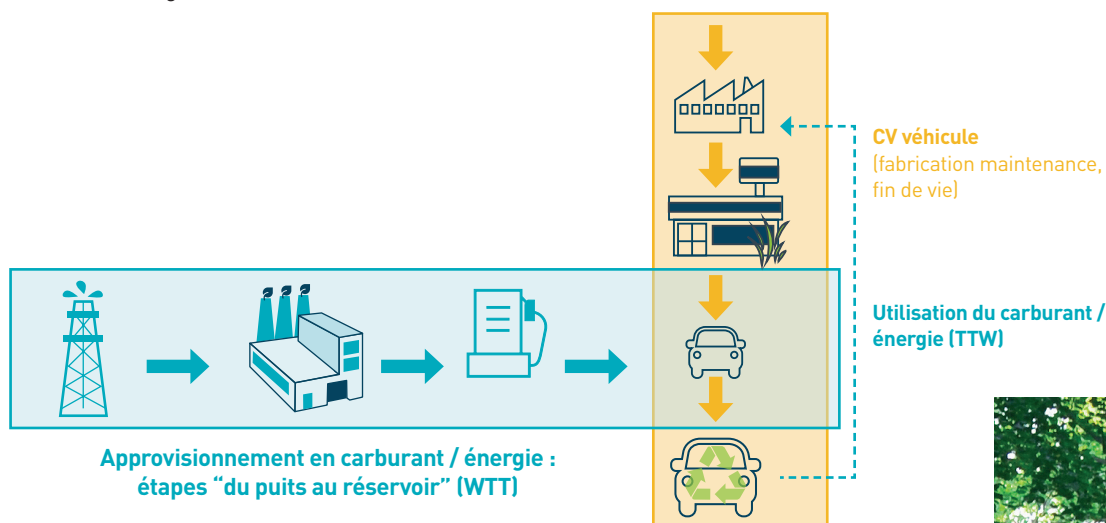


Évolution temporelle des TCO [€] pour le segment C – 12 500 km/an – 10 ans

En ce qui concerne les poids lourds, l'équilibre entre le TCO d'une motorisation thermique et électrique à batterie sera atteint entre 2025 et 2035, suivant là encore l'autonomie visée et la capacité de la batterie. La solution électrique à hydrogène (PAC), devrait devenir intéressante un peu plus tardivement, mais elle bénéficiera d'une autonomie plus grande et d'une moindre dépendance aux stations de recharge. Finalement, en 2040 les solutions électriques (que ce soit à batterie ou à hydrogène) seront compétitives sur tous les segments de l'étude. L'interdiction de vente des solutions thermiques en 2035 devrait donc se faire sans augmentation importante du TCO pour les utilisateurs, avec les hypothèses de prix et d'évolution des taxes prises dans cette étude (notamment la chute importante du prix en station de l'hydrogène).

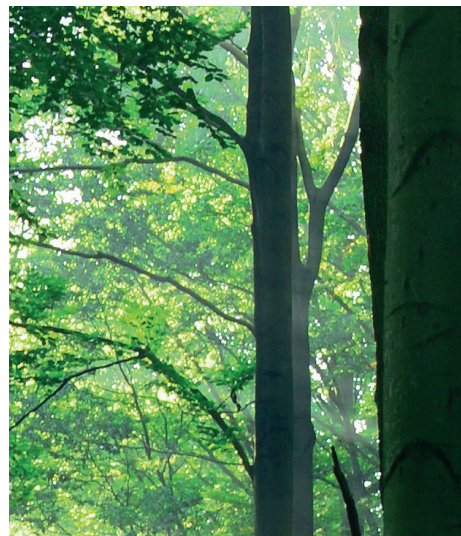
LOT ENVIRONNEMENTAL

Une analyse du cycle de vie (ACV) des différents segments de véhicules couplés aux technologies de propulsion et à leurs vecteurs énergétiques associés (carburants fossiles, mix électrique et hydrogène) permet de comparer les différentes options technologiques envisagées en fonction de l'usage et d'identifier celles les plus pertinentes d'un point de vue environnemental. L'analyse du cycle de vie permet également de prendre en compte les impacts environnementaux de façon plus large que ce qui est fait dans les réglementations, comme le montre la figure suivante.



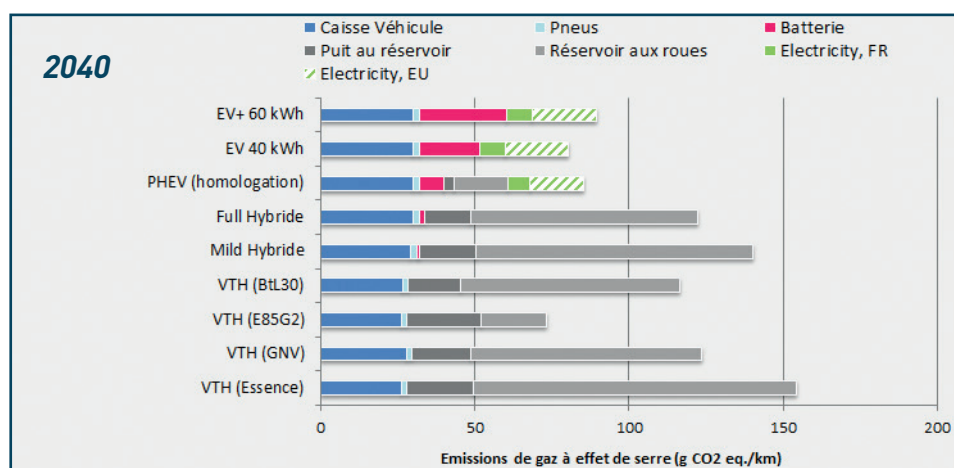
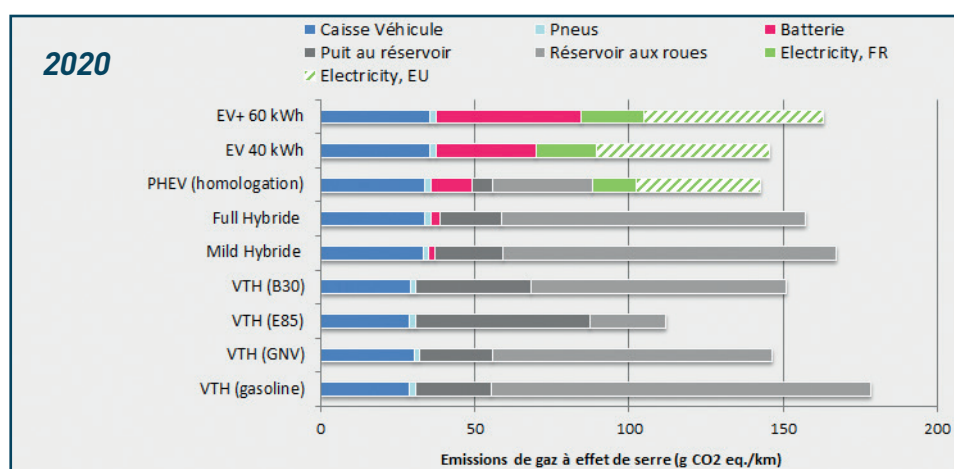
Étapes considérées dans le périmètre : WtW incluant le cycle de vie véhicule

Pour l'indicateur de réchauffement climatique (exprimé en $\text{g CO}_{2\text{eq}}/\text{km}$), les résultats ci-dessous démontrent le potentiel de l'électrification (à batterie ou à pile à hydrogène) combinée à un mix électrique français quels que soit le segment de véhicule et le cycle de conduite. Hormis les véhicules électriques, les véhicules hybrides rechargeables ressortent comme de très bons candidats à la réduction des émissions de GES sous réserve d'un comportement de recharge systématique de la part des utilisateurs : tout trajet inférieur à l'autonomie électrique doit être effectué en mode « zéro émission ».





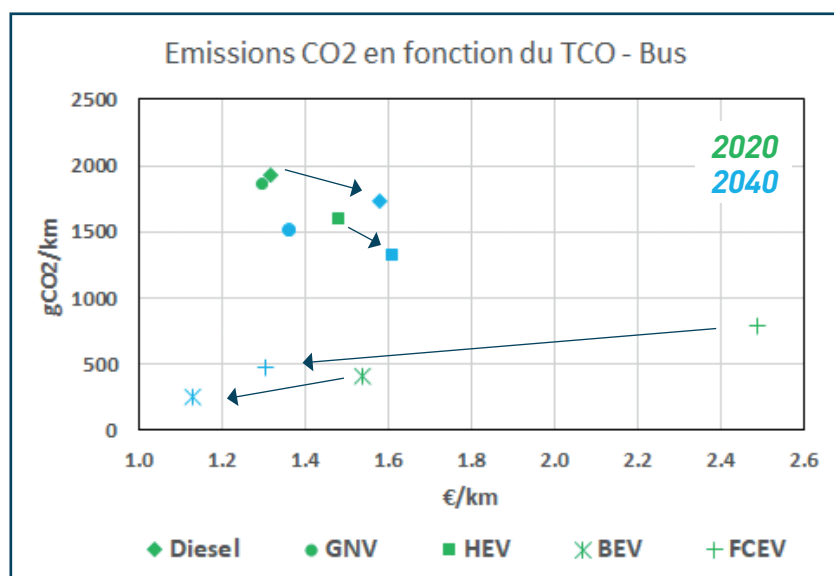
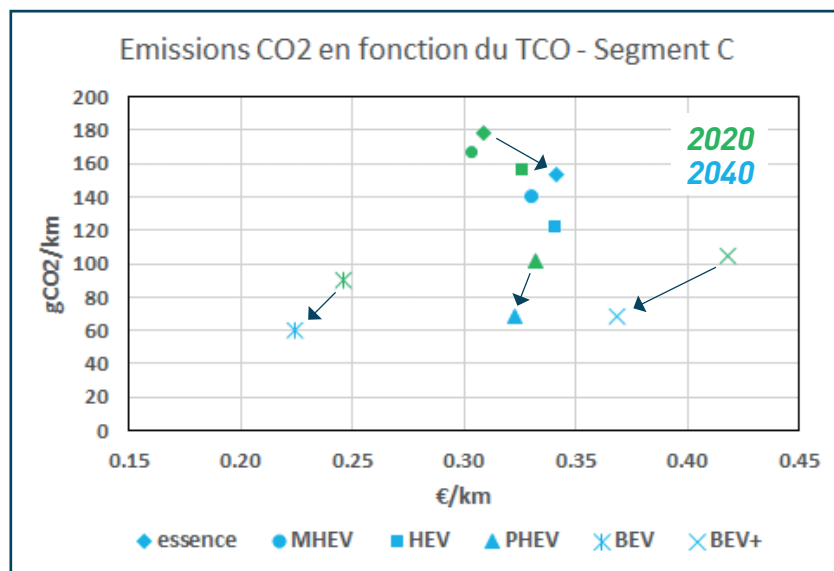
De même, l'apport des biocarburants dans les *pools* carburants pourrait à court et moyen terme apporter une réelle solution à la baisse des émissions GES en France dans les hypothèses de l'étude (biocarburants excluant les filières lignite de l'éthanol pour 2020, et 100 % gen2 en 2040). On note par exemple les très bons résultats en termes de réduction de GES de l'E85, qui utilise une large part de bioéthanol. Celui-ci possède un facteur d'émission très avantageux d'un point de vue cycle de vie (réduction de 46 % en 2020 et 77 % en 2040 des émissions par rapport à la référence fossile à 88,3 gCO_{2eq}/MJ). Pour mettre pleinement en évidence ce potentiel, la réglementation devra tenir compte de la nature biogénique d'une fraction des émissions de CO₂ provenant de la combustion des biocarburants, ou établir un affichage conjoint.



Impacts potentiels sur le changement climatique pour les véhicules du segment C.
Cycles de conduite WLTC.
Horizons temporels 2020 et 2040 (12 500 km/an)

Au regard des autres indicateurs environnementaux (particules, acidification, etc.), le véhicule électrique et le véhicule hydrogène à pile à combustible ne présentent pas le même bilan et ont, pour la plupart des indicateurs, des impacts plus élevés que les véhicules thermiques, utilisant notamment des biocarburants.

Ces travaux permettent également de mettre en relation les aspects environnementaux étudiés via ce lot, avec les aspects coûts issus du lot Économique. En effet, une approche croisée des deux axes de recherche permet de proposer des solutions économiquement et environnementalement optimisées. Cette analyse croisée est présentée sur la figure suivante. On peut voir sur ces deux illustrations (segment C et bus) les principaux effets à retenir. Les motorisations à base majoritairement thermique (ICE, MHEV et HEV) vont voir leur coût augmenter d'ici 2040, en parallèle d'une réduction mesurée des émissions de CO₂. À l'inverse, les solutions électriques (à batterie ou hydrogène) vont voir leurs coûts diminuer de façon importante, tout en apportant des réductions des émissions de CO₂.



Analyse croisée du TCO et des émissions CO₂ (WTW) pour le segment C (en haut) et le bus (en bas)

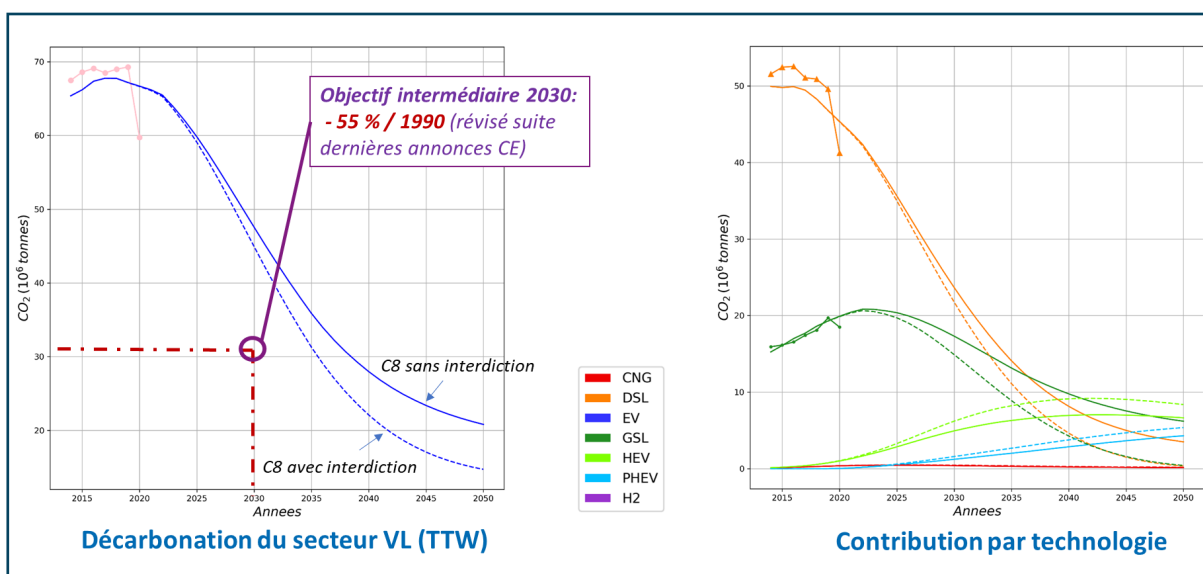




PROJECTION DU PARC FRANÇAIS À 2050

Enfin, la dernière partie de l'étude a permis d'intégrer les résultats des trois premiers lots dans le modèle de parc. Afin d'analyser les différentes politiques publiques permettant la décarbonation du secteur du transport et d'étudier les scénarios permettant d'atteindre les objectifs d'émissions de CO₂ fixés par la SNBC, IFPEN a en effet développé un modèle de choix d'achat de véhicules : le modèle de parc automobile DRIVERS (*DiscRete choice modeling for low-carbon VEHicles fleet scenaRioS*).

Les résultats de consommations (lot Énergétique), de TCO (lot Économique) et d'ACV (lot Environnemental) ont été intégrés dans le modèle. Plusieurs hypothèses contextuelles (évolution du prix du baril, du nombre de bornes de recharge rapide sur le territoire...) et de politiques publiques (évolution de la TICPE, taxe carbone, aide à l'achat) ont permis d'élaborer des scénarios 2050.



Les résultats montrent que même dans le cas du scénario le plus favorable à la vente de véhicule électrifié, les objectifs du *Green Deal* (– 90 % d'émissions de CO₂ du parc en 2050 par rapport à 1990) ne sont pas atteints. En effet les émissions de CO₂ seront égales en 2050 à 21 Mt. Pour rappel, elles étaient de 70 Mt en 1990. Il faut ajouter à ce scénario l'interdiction des ventes de véhicules thermiques en 2035 pour se rapprocher de l'objectif. Dans ce dernier scénario, les émissions de CO₂ atteindront 11,4 Mt en 2050. Avec des politiques de soutien à l'autopartage, et/ou l'utilisation accrue de biocarburants avancés, l'objectif du Green Deal pourrait ainsi être tenu.

L'étude montre également qu'une baisse de la demande de véhicules due à un changement de comportements (– 10 % de mobilité automobile en 2040) n'a que peu de conséquences sur la décarbonation du secteur.

En effet, cette baisse de la demande de mobilité ralentit le renouvellement du parc (les véhicules devenant moins vite obsolètes) et freine ainsi la pénétration des véhicules bas carbone. Enfin, l'objectif récent fixé par la Commission Européenne « *Fit for 55* », à savoir une baisse des émissions de CO₂ de 55 % dès 2030, est difficilement atteignable.

En moins d'une décennie il apparaît difficile de changer suffisamment le parc français pour valider cet objectif.

À court terme, l'incorporation de biocarburants (directement utilisables par la grande majorité des véhicules du parc) et un changement de réglementation (prenant en compte l'origine biogénique d'une fraction du CO₂ émis par la combustion des biocarburants) pourraient améliorer ce constat.

Les conclusions de ce projet permettront d'élaborer des recommandations portant sur les choix technologiques à faire pour répondre aux besoins de mobilité d'ici à 2040, en s'appuyant sur des critères économiques, énergétiques, environnementaux et également en prenant en compte les futures réglementations nationales (SNBC) ou européennes (*Fit for 55* et *Green deal*).

Rédacteurs IFP Energies nouvelles

- Benoit Chèze
- Xavier Guichet
- Olivier Guyon
- Joris Melgar
- Manh Quan N'Guyen

Chef de projet

- Cyprien Ternel

Comité de suivi et de pilotage ADEME

- Bertrand-Olivier Ducreux
- Ariane Rozo





ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE, ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

POUR LES TECHNOLOGIES DU
TRANSPORT ROUTIER FRANÇAIS
À HORIZON 2040

Une étude

