

Analyse technico-économique et environnementale des énergies alternatives :

Électricité, hydrogène, biocarburant, e-carburant : quelles énergies pour le transport routier de demain ?

Contexte

Le transport routier, fortement dépendant des carburants fossiles, est responsable d'un tiers des émissions de GES en France. Ceci a un impact significatif sur la qualité de l'air et la santé publique. L'Union européenne et la France se sont engagées dans des actions concrètes pour décarboner les transports (i.e. fin de ventes de voitures thermiques en Europe en 2035, des poids lourds en France en 2040). Plusieurs énergies alternatives sont envisagées pour une mobilité plus propre : électricité, bio-carburants, hydrogène et e-carburants. Différentes études ont été publiées sur la faisabilité des énergies alternatives, en termes d'émissions de GES et/ou de particules fines et/ou du coût total de la possession des véhicules, mais les résultats sont hétérogènes.

Pour cette raison, l'UFE et l'Avere-France avec CentraleSupélec ont décidé de comparer les résultats de 14 études en se focalisant sur une analyse technique, économique et environnementale des différentes énergies. Il est important de noter que cette analyse retient les hypothèses utilisées dans les études considérées, même si certaines risquent de ne plus être actuelles. Cette approche vise à permettre une comparaison objective des résultats.

Hypothèses

Segments de véhicules étudiés

	C - Compacte
	D - Berline
	Véhicule utilitaire léger (VUL)
	Autobus
	Poids lourd (PL)

Energies alternatives considérées

	Electricité Véhicule électrique à batterie (VEB)
	Biocarburant 100 % bio-GNV, E85
	Hydrogène Mix FR, Mix 100 % ENR
	Electro-carburant e-essence, e-diesel

Critères d'évaluation



Emissions de gaz à effet de serre
en analyse de cycle de vie
(en gCO₂eq/km)



Coût total de possession
(en €/100km)



Emissions de polluants
atmosphériques
(en mg/km)

- 1 Construction & maintenance
- 2 Équipements spécifiques (batterie, pile à combustible ou réservoir de gaz)
- 3 Énergie de roulage (carburant)
- 4 Changement d'usage des sols (notamment pour les biocarburants)
- 5 Fin de vie

- 1 Coût à l'achat (coût du véhicule, équipements spécifiques et taxes)
- 2 Coût à l'utilisation (coût du carburant, distribution et taxes)
- 3 Autres coûts (assurance, entretien, infra privées, remplacement des équipements spécifiques)

- | | |
|------|------------------------|
| NOx | Oxydes d'azote |
| CO | Monoxyde de carbone |
| HC | Hydrocarbures imbrulés |
| NH3 | Ammoniac |
| PN23 | Particules fines |

Analyse technico-économique et environnementale des énergies alternatives :

Électricité, hydrogène, biocarburant, e-carburant : quelles énergies pour le transport routier de demain ?

Liminaire

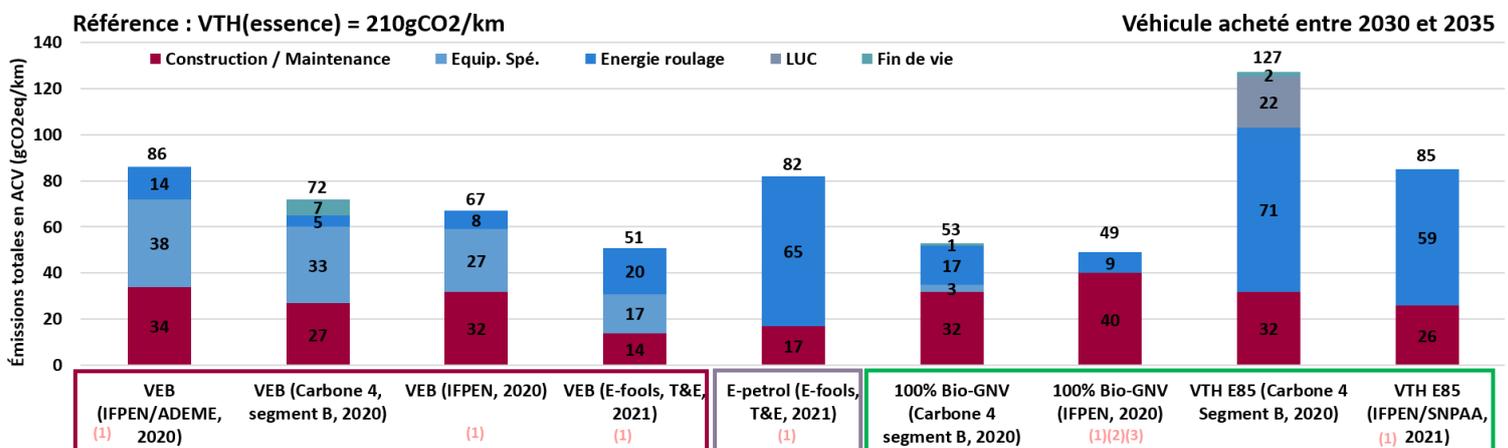
Malgré l'hétérogénéité de résultats des études considérées, **une conclusion similaire se dégage en termes de classement d'énergies les moins émettrices**. Chaque segment de véhicules présente son propre classement en fonction des énergies auxquelles sont appliqués plusieurs critères (1 correspond au niveau le plus haut dans le classement). **Il convient de mentionner que cette analyse comparative ne prend pas en compte la disponibilité de ressources ni l'aspect économique. Le 100% bio-GNV n'existe actuellement pas et risque de ne pas apparaître avant 2030, faute de gisement disponible pour couvrir les besoins de tous les secteurs dont le transport routier.** Selon les prévisions, **le taux d'incorporation du bio-GNV dans le GNV ne représentera que 10 % en 2030**. Ainsi, cette analyse se compose de parties suivantes : analyse environnementale (comparaison des études et calculatrice moyenne), analyse économique et analyse de pollution atmosphérique.

Analyse environnementale - Comparaison des études

Dans cette partie, les 14 études ont été comparées en fonction de leurs émissions de CO2 de la production jusqu'à la fin de vie des véhicules. Les couleurs correspondent à une étape de la chaîne de valeur des véhicules : rouge - construction et maintenance, bleu clair - équipements spécifiques, bleu marine - énergie roulage et turquoise - fin de vie. Les valeurs chiffrées représentent les émissions de GES en gCO2eq./km. Chaque segment affiche l'année d'achat de véhicules et la référence des émissions de GES de véhicules à carburant fossile.

Segment B/C

1. 100% bio-GNV, 2. Electricité, 3. E-essence, 4. E85.



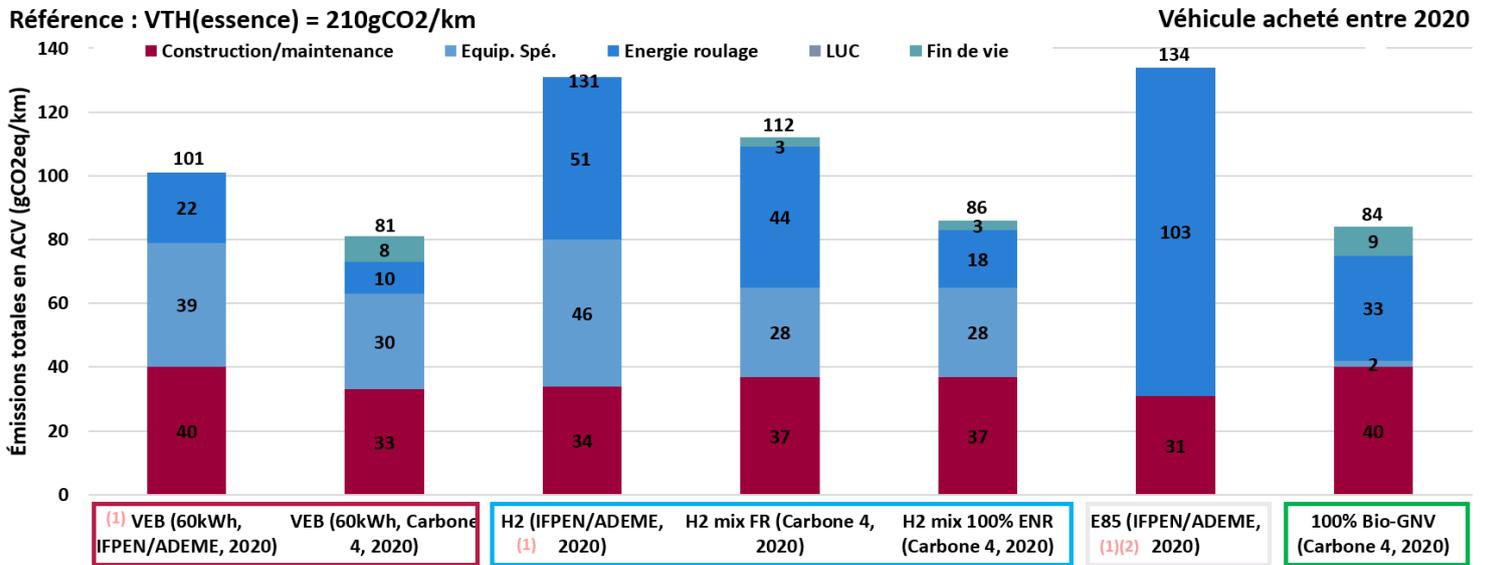
(1) EGES fin de vie compté dans ACV véhicule, (2) EGES LUC compté dans Energie roulage, (3) EGES réservoir bio-GNV compté dans ACV véhicule

Analyse technico-économique et environnementale des énergies alternatives :

Électricité, hydrogène, biocarburant, e-carburant : quelles énergies pour le transport routier de demain ?

Segment D

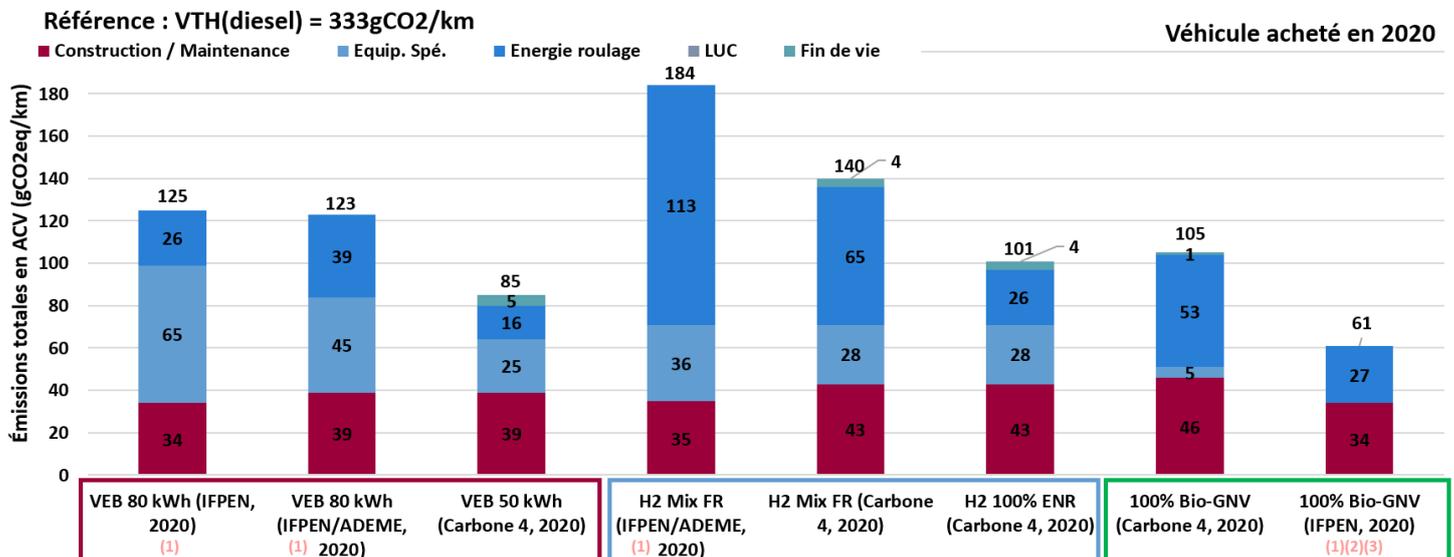
1. Electricité, 2. 100% bio-GNV, 3. Hydrogène (mix 100 % ENR), 4. Hydrogène (mix FR), 5. E85.



Véhicules Utilitaires Légers (VUL)

Les études n'ont pas de conclusion unanime sur l'énergie de propulsion la moins émettrice de GES.

Pour IFPEN/ADEME et Carbone 4, le véhicule électrique à batterie est moins émetteur de GES, alors que selon l'IFPEN, c'est le 100 % bio-GNV. Par ailleurs, le véhicule à hydrogène (mix 100% ENR) est moins émetteur que le 100% Bio-GNV pour Carbone 4.



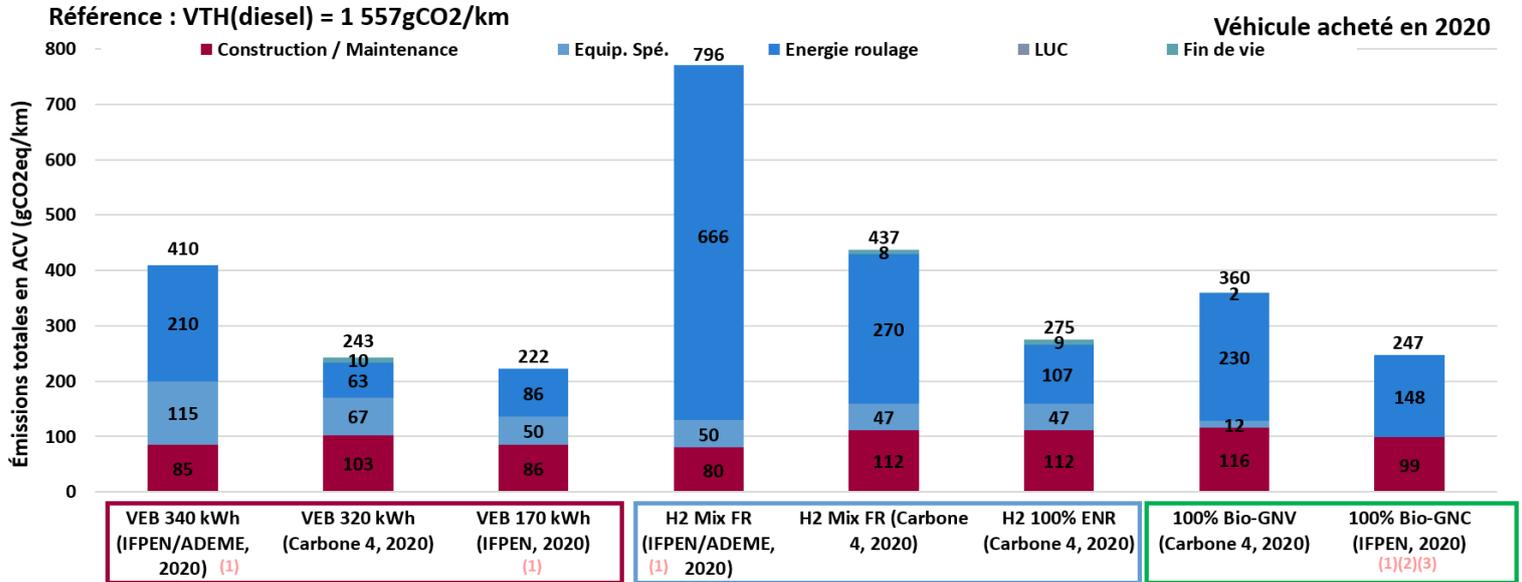
(1) EGES fin de vie compté dans ACV véhicule, (2) EGES LUC compté dans Energie roulage, (3) EGES réservoir bio-GNV compté dans ACV véhicule

Analyse technico-économique et environnementale des énergies alternatives :

Électricité, hydrogène, biocarburant, e-carburant : quelles énergies pour le transport routier de demain ?

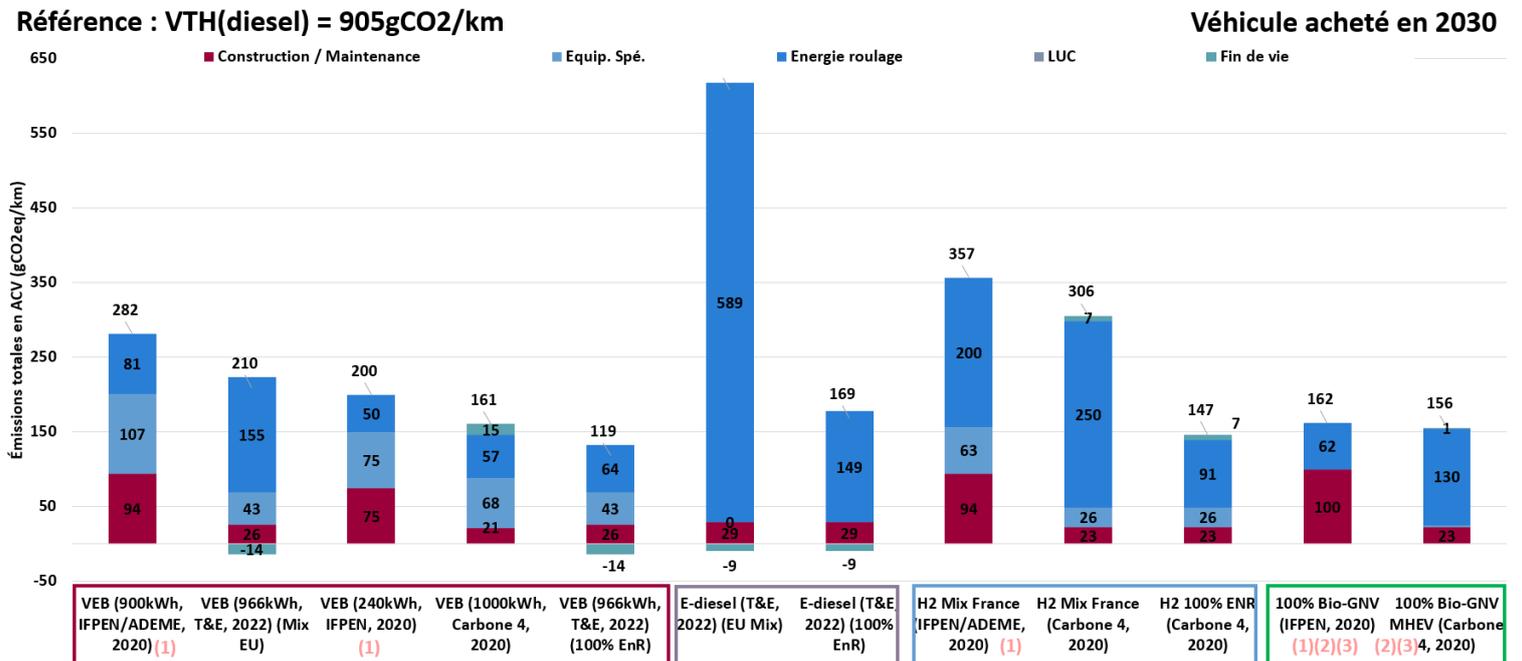
Autobus

1. Electricité, 2. Hydrogène (mix 100% ENR), 3. 100% bio-GNV, 4. Hydrogène (mix FR).



Poids lourds

1. Hydrogène (mix 100% ENR), 2. 100% bio-GNV, 3. Electricité, 4. Hydrogène (mix FR), 5. E-carburant.



(1) EGES fin de vie compté dans ACV véhicule, (2) EGES LUC compté dans Energie roulage, (3) EGES réservoir bio-GNV compté dans ACV véhicule

Analyse technico-économique et environnementale des énergies alternatives :

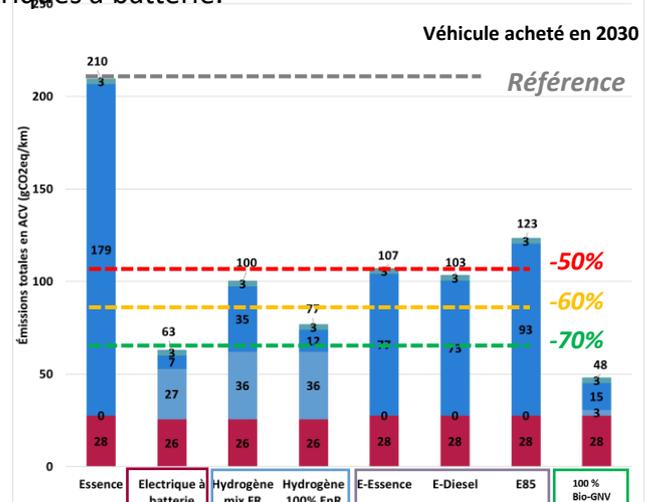
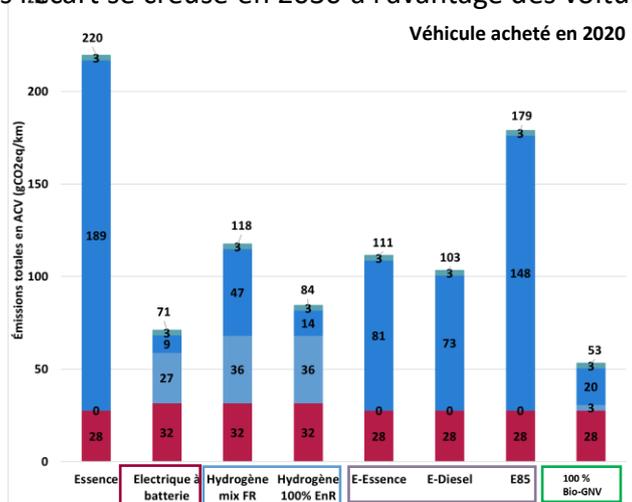
Électricité, hydrogène, biocarburant, e-carburant : quelles énergies pour le transport routier de demain ?

Analyse environnementale - Calculatrice moyenne

Sachant que chaque étude se base sur des hypothèses différentes (année d'achat du véhicule, année de la réalisation de l'étude, contexte politique français et européen, pays d'application, etc.), leur comparaison devient plus difficile. Les différences de résultats pour une même énergie s'expliquent par la variation des hypothèses, notamment le facteur d'émission, la consommation du véhicule, la durée de vie considérée, la masse de la carcasse. Afin d'aboutir à une comparaison objective concernant les différents types de segments de véhicules, nous avons identifié une méthode de calcul simplifiée pour le chiffrage des CO2 émises en ACV en prenant en compte la moyenne des valeurs des hypothèses mentionnées dans les différentes études.

Véhicules particuliers (Segment B/C/D)

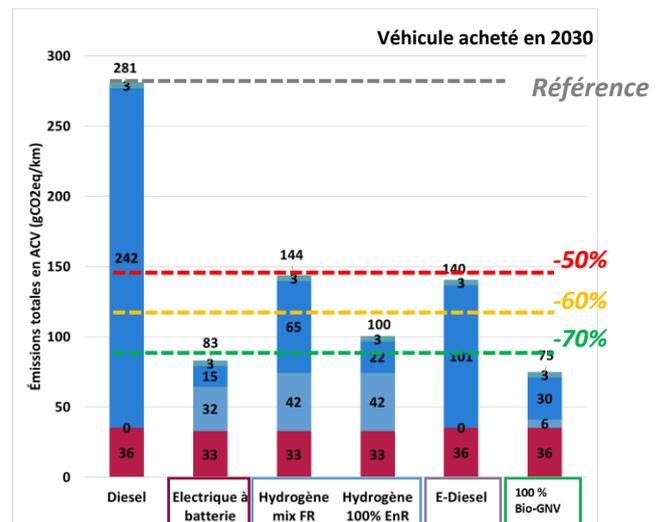
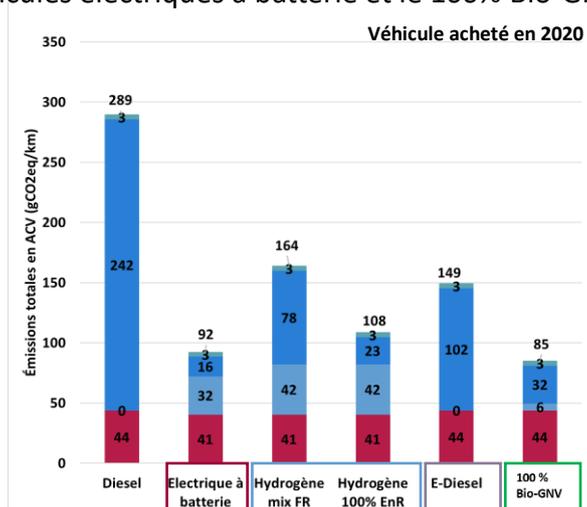
1. 100% bio-GNV, 2. Electricité, 3. Hydrogène (mix 100% ENR), 4. Hydrogène (mix FR), 5. E-carburants, 6. E-85. En 2020, les performances des voitures électriques et voitures à hydrogène (mix 100% ENR) sont très proches, mais l'écart se creuse en 2030 à l'avantage des voitures électriques à batterie.



■ Construction / maintenance ■ Équipements spécifiques ■ Energie roulage ■ Fin de vie

Véhicules Utilitaires Légers (VUL)

1. 100% bio-GNV, 2. Electricité, 3. Hydrogène (mix 100% ENR), 4. E-carburants, 5. Hydrogène (mix FR). L'écart entre les technologies se creuse entre 2020 et 2030, avec une réduction importante des émissions pour les véhicules électriques à batterie et le 100% Bio-GNV.



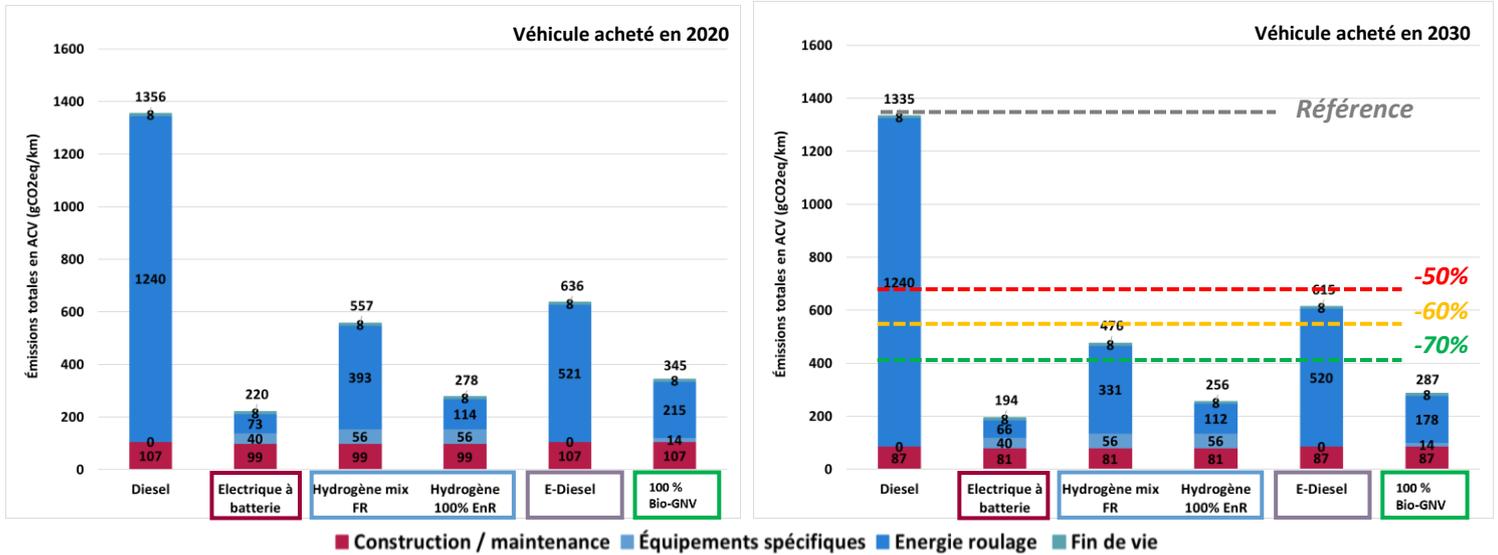
Analyse technico-économique et environnementale des énergies alternatives :

Électricité, hydrogène, biocarburant, e-carburant : quelles énergies pour le transport routier de demain ?

Autobus

1. Electricité, 2. Hydrogène (mix 100% EnR), 3. 100% bio-GNV, 4. Hydrogène (mix FR), 5. E-carburants.

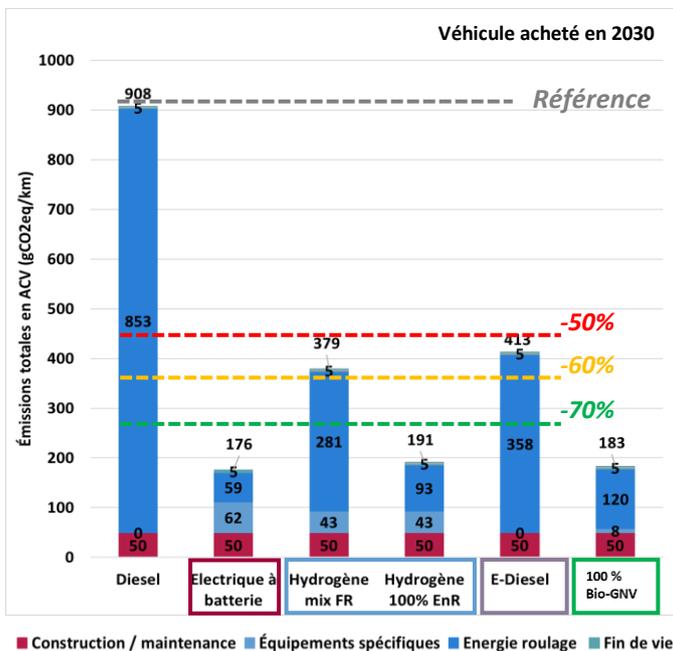
L'autobus électrique est le moins émetteur du fait qu'il a une petite batterie (245 kWh), qui est amortie par un grand nombre de kilomètres parcourus.



Poids lourds

1. Electricité, 2. 100% bio-GNV, 3. Hydrogène (mix 100% ENR), 4. Hydrogène (mix FR), 5. E-carburants.

Les données de 2020 ne sont pas disponibles.



Analyse technico-économique et environnementale des énergies alternatives :

Électricité, hydrogène, biocarburant, e-carburant : quelles énergies pour le transport routier de demain ?

Analyse économique

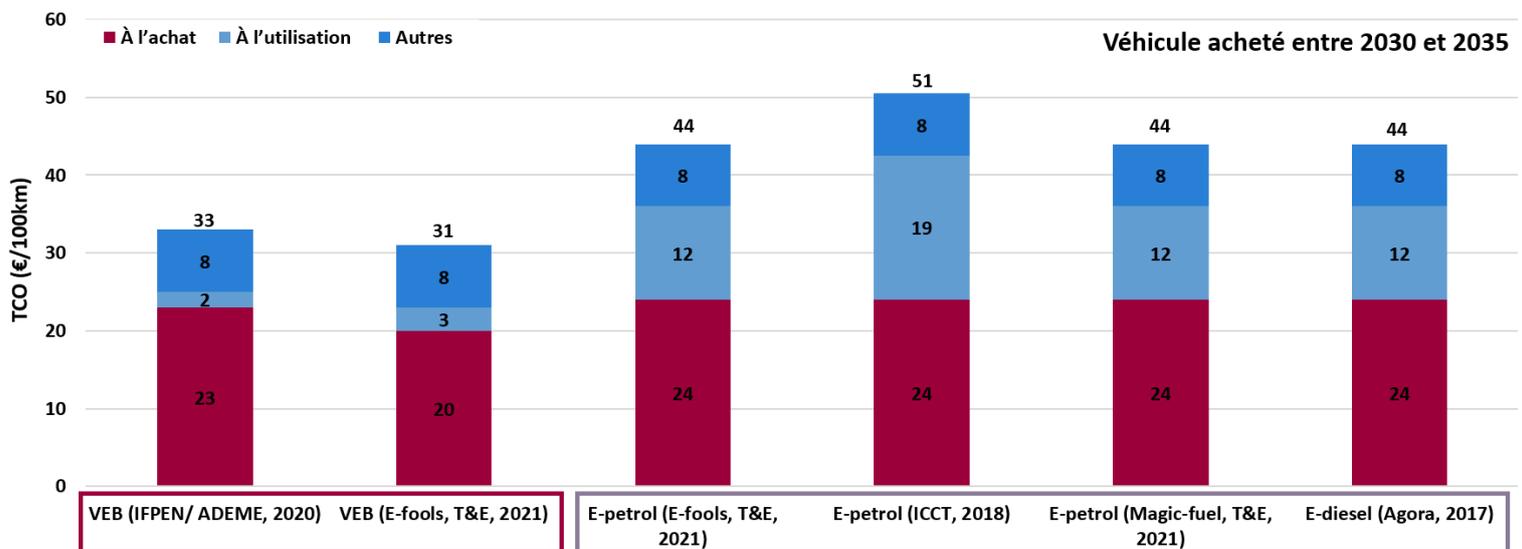
Cette analyse compte trois catégories qui permettent de reconstruire le coût total de la possession des véhicules : le coût à l'achat, le coût à l'utilisation et les autres coûts. Le coût à l'achat comprend le coût du véhicule incluant le châssis, les roues et les équipements spécifiques (batterie, pile à combustible, moteur, etc.). On y ajoute évidemment les taxes qui s'appliquent sur tous ces produits. Ensuite, le coût à l'utilisation comprend le prix de l'énergie utilisée, les différentes taxes qui s'y appliquent et le cas échéant, les taxes et tarifs liés à la recharge. Finalement, les autres coûts prennent en compte le prix de l'assurance, de la maintenance du véhicule, du remplacement des équipements spécifiques, et aussi le coût des infrastructures de recharge dédiées.

Cette partie prévoit également un classement des énergies pour chaque segment de véhicules en fonction de leur TCO. Le 1 correspond au résultat le plus haut. Les couleurs correspondent à chaque type de coût : rouge - achat, bleu clair - utilisation et bleu marine - autres (coût de l'assurance, de la maintenance, et des bornes de recharge privées le cas échéant). Les chiffres correspondent au coût total de la possession en €/100 km. De même, pour chaque segment, il y a des informations concernant l'année d'achat.

Véhicules particuliers

Le coût à l'achat est considéré équivalent grâce à un taux d'apprentissage important sur les batteries d'ici à 2030. À noter que plus les batteries sont de faible capacité, plus les véhicules électriques sont compétitifs. **Par manque d'information dans les études, seuls les véhicules électriques et ceux roulant aux e-carburants sont présents sur ce graphique.** Il est important de signaler que les différentes études n'évaluent pas le TCO de l'utilisation du 100 % bio-GNV pour les Segments B et C.

1. Electricité, 2. E-carburants.



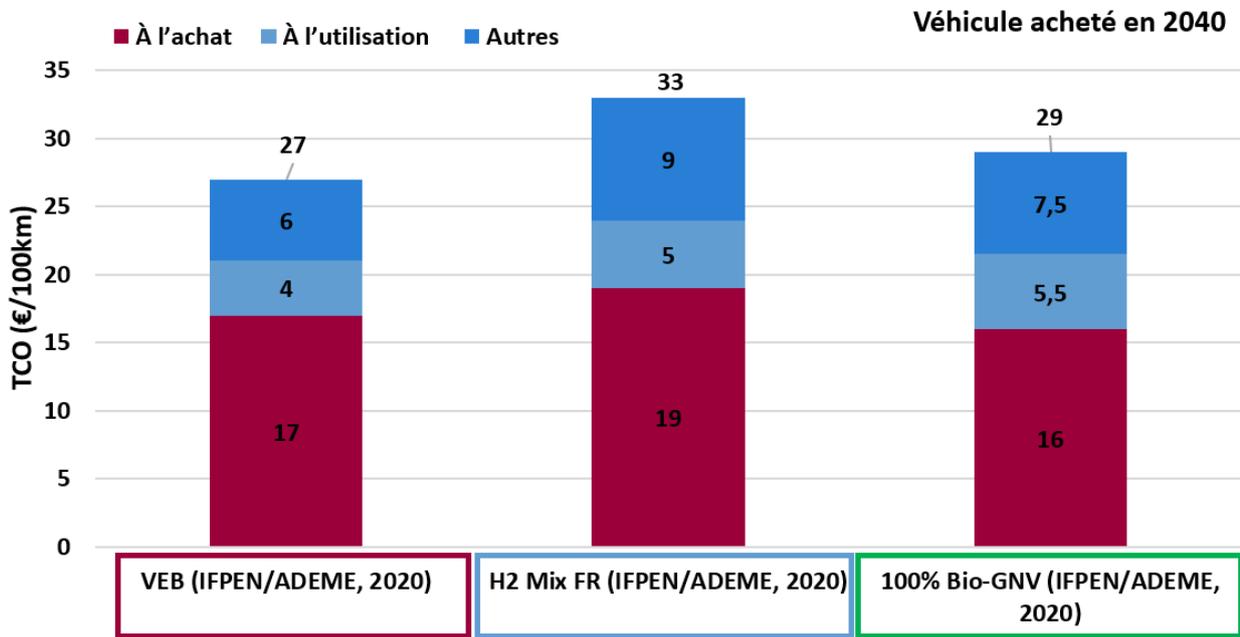
Analyse technico-économique et environnementale des énergies alternatives :

Électricité, hydrogène, biocarburant, e-carburant : quelles énergies pour le transport routier de demain ?

Véhicules Utilitaires Légers (VUL)

Seule l'étude de l'IFPEN/ADEME analyse le TCO des VUL donc une comparaison entre les études ne peut pas être effectuée.

1. Electricité, 2. 100% bio-GNV, 3. Hydrogène (mix FR).

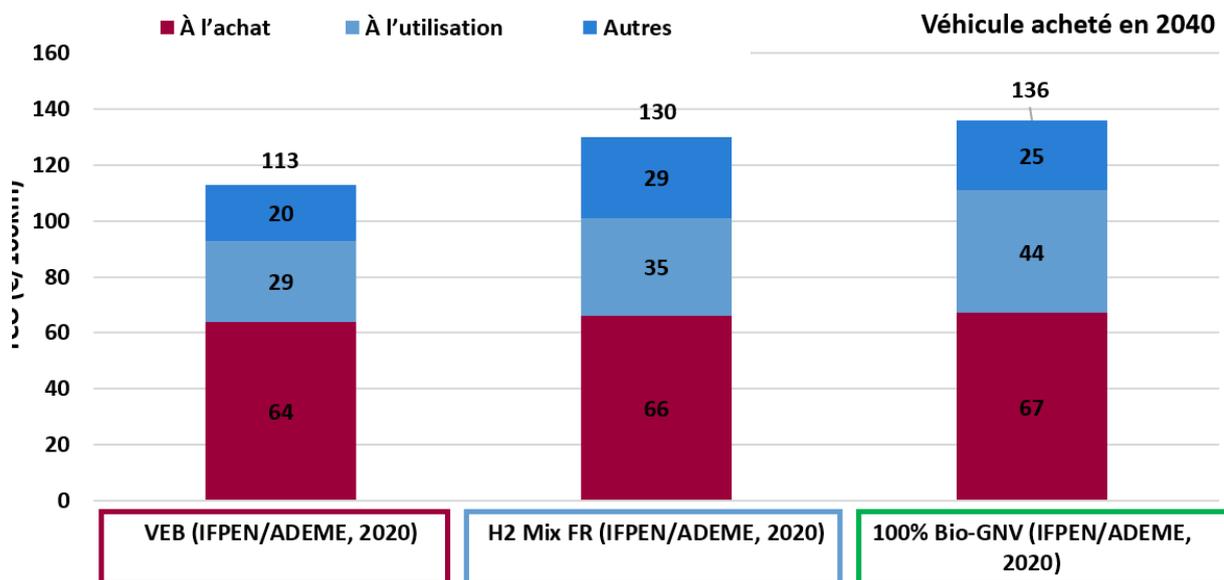


Autobus

Uniquement l'étude de l'IFPEN/ADEME propose une comparaison de TCO. Ainsi, le classement est suivant :

1. Electricité, 2. Hydrogène (mix FR), 3. 100 % bio-GNV.

On notera qu'à horizon 2040, les bus à hydrogène pourrait rencontrer des difficultés pour être compétitives, tant que le prix de l'hydrogène sera au-dessus de 3€/kg.



Analyse technico-économique et environnementale des énergies alternatives :

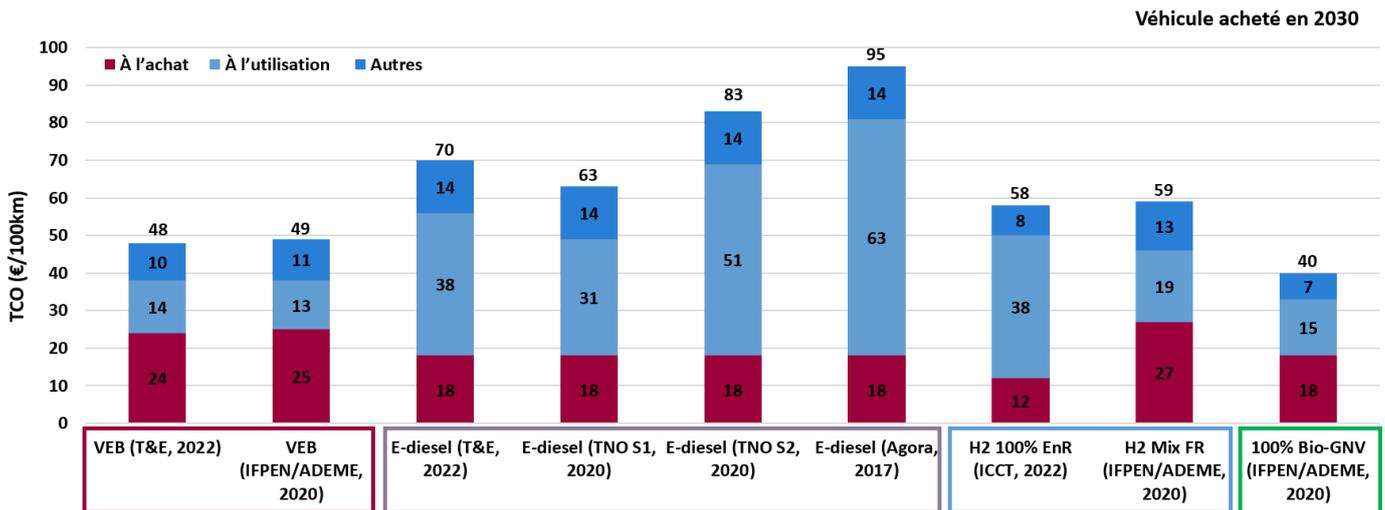
Électricité, hydrogène, biocarburant, e-carburant : quelles énergies pour le transport routier de demain ?

Poids lourds

1. 100 % bio-GNV, 2. Electricité, 3. Hydrogène (mix 100% EnR), 4. Hydrogène (mix FR), 5. e-carburants.

Les TCO des énergies électriques à batterie et 100 % bio-GNV sont très proches.

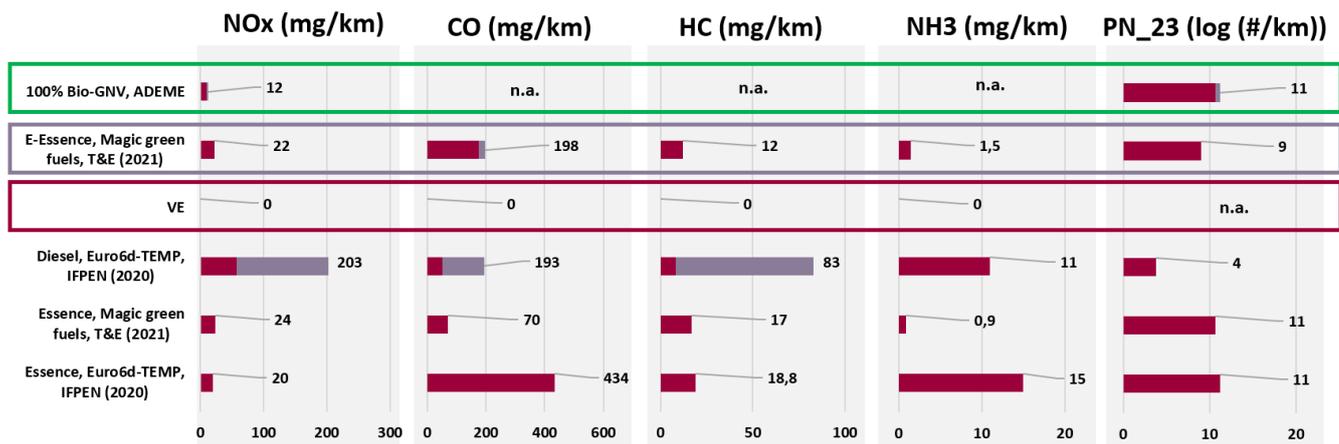
Contrairement aux autres segments de véhicules, le poids lourd électrique ne finit pas en tête du classement car il est pénalisé par la taille importante de sa batterie (entre 600 et 1000 kWh) qui se reflète dans le coût à l'achat, et aussi dans le coût de remplacement des équipements spécifiques. Les variations des TCO sont liées à des hypothèses différentes sur les coûts de l'électricité et du CO2.



Analyse environnementale - pollution atmosphérique

Les études considérées n'ont pas d'information sur tous les segments de véhicules en termes de polluants atmosphériques, sauf les voitures particulières. Le tableau ci-dessous ne représente donc que la comparaison d'émissions de polluants atmosphériques pour les véhicules particuliers.

Les voitures électriques n'émettant pas de particules fines à l'échappement, elles représentent la meilleure solution. Malgré quelques divergences dans les résultats des études pour certains polluants, il semblerait que les e-carburants n'apportent pas d'avantage significatif d'un point de vue des émissions de polluants atmosphériques.



Analyse technico-économique et environnementale des énergies alternatives :

Électricité, hydrogène, biocarburant, e-carburant : quelles énergies pour le transport routier de demain ?

Conclusion

Grâce à notre analyse de 14 rapports, nous avons pu évaluer les énergies alternatives pour chaque segment de véhicules du transport routier en termes d'émissions de GES (notamment avec la calculatrice moyenne), de polluants atmosphériques, de coût total de possession et de disponibilité de gisement.

La matrice ci-dessous présente ainsi un résumé des critères de comparaison : technique, économique et pour les 4 segments de véhicules (VL, VUL, autobus et PL), et ce pour les 6 énergies (électricité, 100% bio-GNV, hydrogène mix 100% ENR, hydrogène mix FR, e-carburant, E-85).

Facteurs de choix	VL				VUL			Autobus			PL		
	EGES	Pollution atmosphérique	Coût	Gisement potentiel	EGES	Coût	Gisement potentiel	EGES	Coûts	Gisement potentiel	EGES	Coûts	Gisement potentiel
Electricité	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert
100% Bio-GNV	Vert	Jaune	n.a.	Rouge	Vert	Vert	Rouge	Jaune	Jaune	Rouge	Vert	Vert	Rouge
H2 (mix 100% ENR)	Jaune	n.a.	n.a.	Jaune	Jaune	n.a.	Jaune	Vert	n.a.	Jaune	Jaune	Jaune	Jaune
H2 (mix FR)	Rouge	n.a.	n.a.	Vert	Rouge	Jaune	Vert	Rouge	Jaune	Vert	Rouge	Jaune	Vert
E-carburant	Rouge	Rouge	Jaune	Jaune	Rouge	n.a.	Jaune	Rouge	n.a.	Jaune	Rouge	Rouge	Jaune
E85	Rouge	n.a.	n.a.	Rouge	n.a.	n.a.	Rouge	n.a.	n.a.	Rouge	n.a.	n.a.	Rouge

Ainsi, **le véhicule électrique à batterie est la technologie la plus prometteuse** en matière d'émissions de GES, de coût, de pollution atmosphérique et de disponibilité d'énergie. En outre, il offre la possibilité de fournir des services système au réseau électrique (pilotage de la recharge simple et bidirectionnel).

Bien que **le véhicule 100% bio-GNV** soit faiblement émetteur de GES, **il a une disponibilité limitée***. **L'hydrogène est une option viable pour les autobus**, mais elle **nécessite un approvisionnement rapide** en hydrogène **bas carbone** à un coût raisonnable. **Les e-carburants sont peu intéressants** en raison de leurs émissions de GES, de leur efficacité énergétique moindre et de leur coût plus élevé par rapport aux autres énergies alternatives.

*Les contraintes naturelles pesant sur la production de biogaz et de biocarburants contraindront à privilégier leurs utilisations dans les secteurs ne disposant d'autres alternatives. Pour les biocarburants, l'usage le plus adapté semble être dans le secteur de l'aviation (au côté des e-carburants dans le cadre des Sustainable Aviation Fuels (SAF)). Le biogaz, quant à lui, sera fortement utilisé dans la décarbonation de l'industrie.

Analyse technico-économique et environnementale des énergies alternatives :

Électricité, hydrogène, biocarburant, e-carburant : quelles énergies pour le transport routier de demain ?

Bibliographie

Auteur(s)	Titre de l'étude	Année	Energie	Segment
T&E	E-fools: why e-fuels in cars make no economic or environmental sense	2021	E-carburants	VL
T&E	E-fuels in trucks: expensive, scarce, and less green than batteries	2021	E-carburants	PL
T&E	Magic green fuels: Why synthetic fuels in cars will not solve Europe's pollution problems	2022	E-carburants	VL
TNO	E-fuels: Towards a more sustainable future for truck transport, shipping and aviation	2020	E-carburants	PL
Concawe	Role of e-fuels in the European transport system – Literature review	2020	E-carburants	VL, PL
IFPEN	Etude Emissions Euro 6d-TEMP pour le MTE	2020	E-carburants	VL
Brynolf et al.	Electrofuels for the transport sector : A review of production costs	2017	E-carburants	n.a.
Agora Energiewende x Frontier Economics	PtG/PtL calculator : An interactive tool to determine the cost of Power-to-Gas and Power-to-Liquid	2017	E-carburants	n.a.
ICCT	Decarbonization potential of e-fuel in the European Union	2018	E-carburants	n.a.
ICCT	Fuel-cell hydrogen long-haul trucks in Europe: a total cost of ownership analysis	2022	VEH	PL
SNPAA	Présentation sur le bioéthanol et le Superéthanol-E85	2021	E85	VL
IFPEN & SNPAA	Analyse du cycle de vie de véhicules particuliers fonctionnant à l'E85	2020	E85	VL
IFPEN	Etude Emissions Euro 6d-TEMP pour le MTE	2020	VE et Bio-GNV	C, VUL, autobus et PL
IFPEN & ADEME	Etude énergétique, économique et environnementale pour les technologies du transport routier français à horizon 2040	2020	VE, VEH, Bio-GNV	B, C, VUL, autobus et PL
Carbone 4	Transport routier : Quelles motorisations alternatives pour le climat ?	2020	E85, bio-GNV, VE et VEH	B, D, VUL, autobus, PL

Analyse technico-économique et environnementale des énergies alternatives :

Électricité, hydrogène, biocarburant, e-carburant : quelles énergies pour le transport routier de demain ?

Remerciements

Cette étude présente un projet de fin d'année dans le cadre du cursus ingénieur CentraleSupélec réalisée par 4 élèves-ingénieurs : Emma Menegatti, Cyril Douady, Tom Gagnebet et Geoffrey Daugé. Les membres du comité de pilotage sont : Bassem Haidar (Avere-France), Antoine Herteman (Avere-France), Victoria Leonenko (UFE), Pierre Leclerq (Ufip Énergies et Mobilités) et Marc Petit (CentraleSupélec).

Les élèves-ingénieurs souhaitent remercier chaleureusement Carbone 4, l'IFPEN et Transport & Environnement pour leurs disponibilités.

Avere-France

Association nationale pour le développement de la mobilité électrique

Depuis 1978, l'**Avere-France** fédère l'ensemble des acteurs de l'écosystème de la mobilité électrique dans les domaines industriel, commercial, institutionnel et associatif. Elle adresse ainsi la mobilité électrique utilisant des véhicules à batterie, hybrides rechargeables ou pile à combustible, des deux-roues, véhicules légers ainsi que les poids lourds et bus.

La présence, parmi nos **250 adhérents**, de constructeurs, d'énergéticiens, d'utilisateurs mais aussi de collectivités territoriales nous permet de disposer d'une expertise sur tous les axes de la chaîne de valeur de l'écosystème, des types d'énergie, et des moyens de mobilité. L'Avere-France est également depuis 2016 le pilote d'Advenir, un programme de financement de points de recharge, de formation et de sensibilisation du grand public.

Contact : Bassem Haidar (bassem.haidar@avere-france.org)

UFE

Union Française de l'Électricité

L'**Union Française de l'Électricité (UFE)** est l'association professionnelle du secteur de l'électricité. Elle représente les entreprises de l'ensemble de la chaîne de valeur du secteur électrique français : producteurs, gestionnaires de réseaux, fournisseurs d'électricité et de services d'efficacité énergétique.

Elle regroupe plus de **500 entreprises**, avec plus de **300 000 emplois directs et indirects** sur l'ensemble du territoire français. Acteur français et européen majeur engagé dans la lutte contre le changement climatique, l'UFE déploie son expertise pour accélérer la transition vers une société neutre en carbone. Elle représente aussi les employeurs du secteur au sein de » la branche des industries électriques et gazières.

Contact : Rudy Cluzel (rudy.cluzel@ufe-electricite.fr)

CentraleSupélec

CentraleSupélec est un Établissement public à caractère scientifique, culturel et professionnel (EPSCP) constitué sous la forme d'un Grand Établissement, relevant de la tutelle conjointe du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et du ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique.

Née de la fusion de l'École Centrale Paris et de l'École Supérieure d'Électricité, deux grandes écoles d'ingénieurs françaises, d'intensifier leurs collaborations et réalisations communes dans leurs domaines d'activité : formation initiale, formation continue et recherche.

Contact : Marc Petit (marc.petit@centralesupelec.fr)