

TRANSPORT ROUTIER : QUELLES MOTORISATIONS ALTERNATIVES POUR LE CLIMAT ?

Comparaison des émissions en
cycle de vie, France et Europe

Pôle Mobilité

Stéphane Amant

Senior Manager, Responsable pôle Mobilité

Nicolas Meunier

Consultant Mobilité

Côme de Cossé Brissac

Consultant

Novembre 2020

Sommaire

	p3	Introduction
1	p7	Véhicules particuliers : l'électrification et le biogaz au-dessus du lot
	p8	Zoom sur le segment B
	p11	Zoom sur le segment D
2	p16	Véhicules professionnels
	p17	Véhicules Utilitaires Légers
	p20	Autobus
	p23	Tracteurs routiers
3	p25	Zoom sur des vecteurs énergétiques spécifiques
	p25	Zoom biocarburant
	p27	Zoom biométhane
	p30	Zoom hydrogène (et « zéro émissions »)
4	p32	Scénarios alternatifs
	p34	Segment B
	p35	Segment D
5	p36	Vision systémique : il n'y a pas que les émissions de GES !
	p44	Conclusion
	p47	Annexes



Introduction

Pourquoi cette étude ?

Pour répondre au défi climatique, le secteur de la mobilité n'a d'autre choix que de se réinventer. A travers de nouvelles technologies, via de nouveaux usages, en agissant sur la demande elle-même : le défi est tel que tous les leviers devront être actionnés.

En France, 95% des émissions de GES du transport sont imputables au transport routier¹. Voitures individuelles, véhicules utilitaires, camions : l'essentiel des flux, et donc des émissions, repose sur l'utilisation de ces véhicules. S'intéresser à la transition bas-carbone de la mobilité, c'est donc forcément mettre un focus particulier sur la transition énergétique des véhicules routiers, indépendamment des actions indispensables de report modal et de modération de la demande.

En la matière, les opérateurs de mobilité et les utilisateurs de véhicules en général ont tout intérêt à anticiper les évolutions qui vont survenir, pour en être acteurs et ne pas avoir à les subir. Pour les acteurs économiques, cette anticipation permet de devenir résilient dans le cadre de la transition, et ainsi veiller à la durabilité économique de son activité. Pour les ménages, c'est la garantie de pouvoir accéder à une mobilité individuelle compatible avec un engagement citoyen.

Toutefois, malgré les annonces gouvernementales et les prises de position de grands acteurs industriels, le chemin technologique de la transition énergétique n'est pas encore clairement tracé : nul ne saurait dire aujourd'hui avec certitude quelles seront à l'avenir les alternatives aux carburants actuels les plus pertinentes. Est-ce que la technologie hydrogène avec pile à combustible n'est pas préférable à l'électrification par batterie ? Les technologies au gaz ne devraient-elles pas être privilégiées, notamment via le bioGNV ? Les biocarburants liquides n'ont-ils pas un rôle décisif à jouer dans cette transition ?

Afin de hiérarchiser ces différentes options énergétiques accessibles, l'un des juges de paix sera l'empreinte carbone en cycle de vie, évaluée pour différents types de véhicules : la voiture individuelle, le véhicule utilitaire léger, l'autobus, le tracteur routier. Cette publication résume les résultats les plus récents obtenus par Carbone 4, pour éclairer le débat et aider les acteurs à prendre les meilleures décisions en toute connaissance de cause.

Glossaire

FE	Facteur d'Emissions
EnR	Energies Renouvelables
VTH	Véhicule Thermique
VHR	Véhicule Hybride Rechargeable
VEB	Véhicule à Batteries
VEH	Véhicule à Hydrogène (Pile à Combustible)
MHEV	Véhicule Thermique à hybridation légère (<i>Mild Hybrid</i>)
GNV / GNC / GNL	Gaz Naturel Véhicule / Comprimé / Liquéfié

1. Analyses Carbone 4 d'après chiffres clés du climat MEEAM, CITEPA et Comptes des Transports du SDES. Émissions au périmètre Kyoto, France métropolitaine + DROM appartenant à l'UE, sans les routes maritimes et aériennes internationales ; répartition des émissions hors utilisation des terres, leurs changements et la forêt (UTCf).

Les émissions de GES du transport routier en France et en Europe, aujourd'hui ... et demain

L'évaluation de l'empreinte carbone est réalisée pour l'ensemble de la vie d'un véhicule, en prenant en compte la fabrication, l'usage et la fin de vie, et ce pour l'ensemble des gaz à effet de serre. Elle est considérée en équivalent CO₂ (CO₂e) et est ensuite ramenée à une unité fonctionnelle classique, le km parcouru par le véhicule. Cette même unité permet une comparaison en intensité carbone des différentes motorisations au sein d'une catégorie de véhicules.

Les différents types de véhicules considérés sont représentés sur le **Tableau 1** ci-dessous. Ils sont donc cinq au total. Selon leur type, différentes motorisations et énergies sont considérées : carburants liquides (avec part variable de biocarburant), GNV et bioGNV, électricité (avec ou sans hybridation), hydrogène. C'est une approche du « puits à la roue » (Well-To-Wheel dans le jargon automobile) qui a été retenue pour notre analyse spécifique sur les énergies de propulsion. A titre d'exemple, pour l'hydrogène, le périmètre prend en compte la production (par vaporeformage de méthane ou électrolyse d'eau), la compression, le transport, et la distribution.

	Voiture		Utilitaire	Autobus	Camion
	Citadine Segment B	Berline Segment D	Grand fourgon	12 m	PTRA 40 t
Essence	✓	✓			
Gazole		✓	✓	✓	✓
GNC ¹	✓	✓	✓	✓	✓
GNL ¹					✓
Électrique ²	✓	✓	✓	✓	✓
VHR ³	✓	✓			✓
Hydrogène ⁴		✓	✓	✓	✓

Notes : 1 Part de « bio » variable, différents scénarios envisagés ; 2 Électrique avec batteries ; 3 Véhicule Hybride Rechargeable, ie Plug-in Hybrid ; 4 Différentes filières production envisagées



Tableau 1 – Motorisations considérées par segment de véhicule

Les évaluations sont réalisées pour toute mise en circulation d'un véhicule neuf entre 2020 et 2030, en tenant compte d'une part des évolutions les plus probables sur les caractéristiques des véhicules, et d'autre part d'une approche prospective pour l'empreinte CO₂e liée à la fabrication.

Pour la phase d'utilisation des véhicules, des séries temporelles ont été établies jusqu'en 2041 afin d'intégrer également l'évolution de l'empreinte carbone des différents vecteurs énergétiques au cours du temps. Par exemple, pour un véhicule vendu en 2021, les émissions liées à son utilisation sont moyennées sur 12 ans, de 2021 à 2032.

Par ailleurs, pour apporter plus de hauteur de vue que le seul périmètre français, nous avons étendu l'analyse à la vision moyenne de l'UE.

Enfin, la démarche mise en œuvre a été pensée de sorte à ce que les résultats traduisent non pas des spécificités, mais des situations plus globales, reflets des performances des différents types de véhicules, à l'échelle d'un pays ou d'une région (en l'occurrence ici, l'UE). C'est pourquoi, sauf exception, nous n'avons pas mis l'accent sur des cas particuliers, potentiellement intéressants dans des contextes très précis, mais non reproductibles à large échelle (ex. du 100% biodiesel ou bioéthanol pour les véhicules particuliers).

L'ensemble des sources utilisées pour nos travaux peut être consulté dans la liste figurant en annexe.

Une évaluation de la sensibilité pour limiter les incertitudes

Dans ce type d'exercice, il existe inévitablement des incertitudes liées aux différentes sources d'une part, ainsi qu'à la dimension prospective de l'étude d'autre part.

Pour pallier cette difficulté et rendre les conclusions aussi robustes que possible, nous avons donc mis en œuvre une approche reposant sur trois analyses complémentaires :

- ✓ **un contrôle de cohérence** général et plus approfondi sur la masse et la consommation des véhicules, afin de renforcer la consistance globale des hypothèses ;
- ✓ **une analyse de sensibilité** afin d'identifier les paramètres du modèle les plus influents sur l'empreinte carbone des véhicules ;
- ✓ **la construction de scénarios faisant varier exclusivement ces paramètres les plus influents** pour déterminer l'enveloppe dans laquelle évoluent les résultats.

De la sorte, les résultats présentés dans cette publication sont pour l'essentiel issus du scénario central, dont les hypothèses ont été passées au crible de nos tests de cohérence. Dans le chapitre Scénarios alternatifs, toutefois, les résultats concernent deux autres scénarios, basés sur des jeux d'hypothèses différents.

Principales hypothèses communes aux différents types de véhicules (énergies, autres caractéristiques)

Les principales hypothèses communes à l'ensemble des segments sont détaillées dans le tableau ci-dessous. Les hypothèses spécifiques à chaque segment de véhicule sont explicitées dans chacune des parties dédiées. Par ailleurs, l'analyse de sensibilité sur ces différentes hypothèses évoquée ci-dessus est détaillée en annexe.

Vecteur énergétique	Hypothèse sous-jacente		2020	2035
Esence & Bioéthanol	Conventionnel ¹ : 50% maïs / 25% blé / 25% betterave en	Taux d'incorporation	66% E10	60% E10 40% E20
	Avancé : paille de blé	Part de bioéthanol	4,3% convent. 0% avancé	7,5% convent. 2,5% avancé
Diesel & Biodiesel	Conventionnel ¹ : 50% colza / 25% soja / 25% palme	Taux d'incorporation	73% B7	45% B7 55% B10
	Avancé : déchets-résidus	Part de biodiesel avancé	4,9% convent. 0% avancé	5,9% convent. 2,5% avancé
Gaz naturel & Biogaz	Biogaz 2020 : 96% d'origine agricole & élevage / 2% de STEP / 2% de biodéchets	Taux d'incorporation	0,5%	11%
	Biogaz 2050 : 70% d'origine agricole & élevage / 15% de STEP / 15% de biodéchets	Facteur d'émission du gaz naturel & du biogaz	225 gCO ₂ e/kWh 51 gCO ₂ e/kWh	203 gCO ₂ e/kWh 40 gCO ₂ e/kWh
Électricité	Projections du mix électrique fondées sur les études de l'AIE et les plans nationaux des pays	Facteurs d'émissions	100% ENR	18 gCO ₂ e/kWh
		France	51 gCO ₂ e/kWh	39 gCO ₂ e/kWh
		UE	306 gCO ₂ e/kWh	126 gCO ₂ e/kWh
Hydrogène	Vaporeformage centralisé (rendement de 75%)	Électrolyse UE	714 gCO ₂ e/kWh	345 gCO ₂ e/kWh
	Électrolyse réalisée sur site (rendement de 53%)	Électrolyse FR	119 gCO ₂ e/kWh	97 gCO ₂ e/kWh
	Compression électrique	Vaporef. GN UE	447 gCO ₂ e/kWh	342 gCO ₂ e/kWh
		Vaporef. biométh.	206 gCO ₂ e/kWh	127 gCO ₂ e/kWh

¹La part relative des intrants de l'éthanol conventionnel évolue pour donner 33%/33%/33% en 2035

²La part relative des intrants du biodiesel conventionnel évolue pour donner 100% de colza en 2035



Tableau 2 – Hypothèses énergétiques communes à tous les segments étudiés²

	FE fabrication châssis ¹		FE fabrication réservoir			FE de fabrication batterie kgCO ₂ e/kWh	FE de fin de vie véhicule kgCO ₂ e/kg
	Véhicule thermique kgCO ₂ e/kg	Véhicule électrique kgCO ₂ e/kg	Hydrogène ² kgCO ₂ e/kg	GNC kgCO ₂ e/kg	GNL kgCO ₂ e/kg		
2020	5,2	4,8	420	11	5,1	101	0,4
2030	4,2	3,9	380	10	4,6	81	0,4

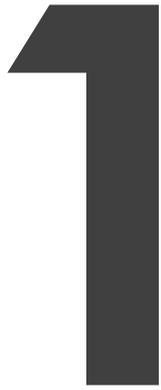
¹Facteur d'émissions de la fabrication du véhicule hors réservoir hors batterie

²Même empreinte carbone pour les types III (350 bars) et les types IV (700 bars)



Tableau 3 – Hypothèses communes à tous les segments étudiés, hors énergie

2. Les kWh se rapportent au contenu énergétique de chaque vecteur énergétique. Le mix 100% ENR est composé de 50% d'électricité éolienne, 15% d'électricité photovoltaïque, et 35% d'électricité de barrages hydrauliques, ce qui correspond au mix actuel de l'Union Européenne.



Véhicules particuliers : l'électrification et le biogaz au-dessus du lot

Ce qu'il faut retenir

Les véhicules particuliers à la plus faible empreinte carbone sont :

- ✓ Les **véhicules au bioGNV**

L'empreinte carbone très faible est due à l'hypothèse que les véhicules au gaz seraient développés avec une hybridation légère (comme pour les véhicules thermiques conventionnels, qui permet récupérer une partie de l'énergie de décélération et de freinage sous forme électrique). Le facteur d'émissions du biométhane varie par ailleurs peu selon les pays de production.

- ✓ Les **véhicules électriques à batterie, quel que soit le mix électrique** de la région considérée.

Un mix décarboné (France, électricité renouvelable) permet les meilleures performances, mais même un véhicule électrique vendu aujourd'hui en Allemagne, voire en Pologne, reste moins émissif qu'un véhicule thermique.

- ✓ Les **véhicules électriques à hydrogène produit par électrolyse ou par vaporeformage de biométhane, avec une électricité décarbonée** (réseau français ou renouvelable)

L'empreinte carbone dépend très fortement du mix électrique, avec des performances similaires au véhicule électrique avec une électricité décarbonée, et similaire voire supérieure au véhicule thermique dans le cas contraire.

La vision prospective en 2030 diminue les écarts d'émissions entre les motorisations, sans pour autant changer les conclusions déjà visibles en 2020

- ✓ *L'hybridation légère permet de rattraper une partie du retard sur les VEB, ces derniers s'améliorant plus lentement du fait de la hausse de capacité des batteries qui contrebalance la baisse du FE de l'électricité.*
- ✓ *En particulier pour les véhicules à hydrogène, la décarbonation de l'électricité de réseau européenne n'est pas suffisante pour égaler la performance CO₂ du véhicule électrique ou au bioGNV.*



Zoom sur le segment B

Segment B Motorisation	Invariant au cours du temps		Variant au cours du temps	2020	2030
	Poids	Durée de vie			
VTH Essence	1 145 kg	150 000 km 12 ans	Conso réelle (MHEV)	6,3 L/100 km	4,7 L/100 km
			Part éthanol*	9%	13%
VTH GNV	1 214 kg dont réservoir : 69 kg	150 000 km 12 ans	Conso réelle (MHEV)	4,4 kg/100 km	3,3 kg/100 km
			Part bioGNV*	5%	11%
VHR Essence	1 268 kg dont batterie : 63 kg	150 000 km 12 ans	Conso réelle	6,3 L/100 km 16 kWh/100 km	4,7 L/100 km 15,2 kWh/100 km
			Capacité batterie	10 kWh 30% km élec	17 kWh 50% km élec
VEB	1 333 kg dont batterie : 313 kg	150 000 km 12 ans	Conso réelle	16 kWh/100 km	15,2 kWh/100 km
			Capacité batterie	50 kWh	60 kWh

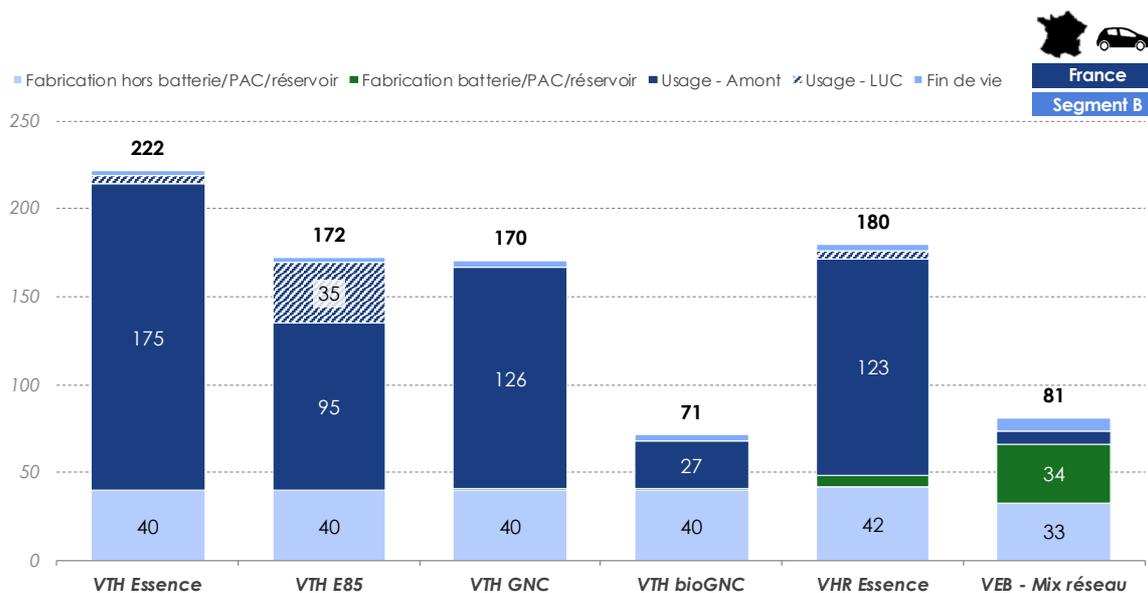
*La part d'éthanol (en volume) et de bioGNV est moyennée sur la durée de vie du véhicule.



Tableau 4 – Principales hypothèses spécifiques au segment B

En France en 2020, dans la catégorie des segments B, les VEB et les VTH fonctionnant au bioGNC se démarquent nettement par leur empreinte carbone environ 3 fois inférieure à celle d'un VTH-essence.

C'est ce que retranscrit clairement la Figure 1 ci-dessous.



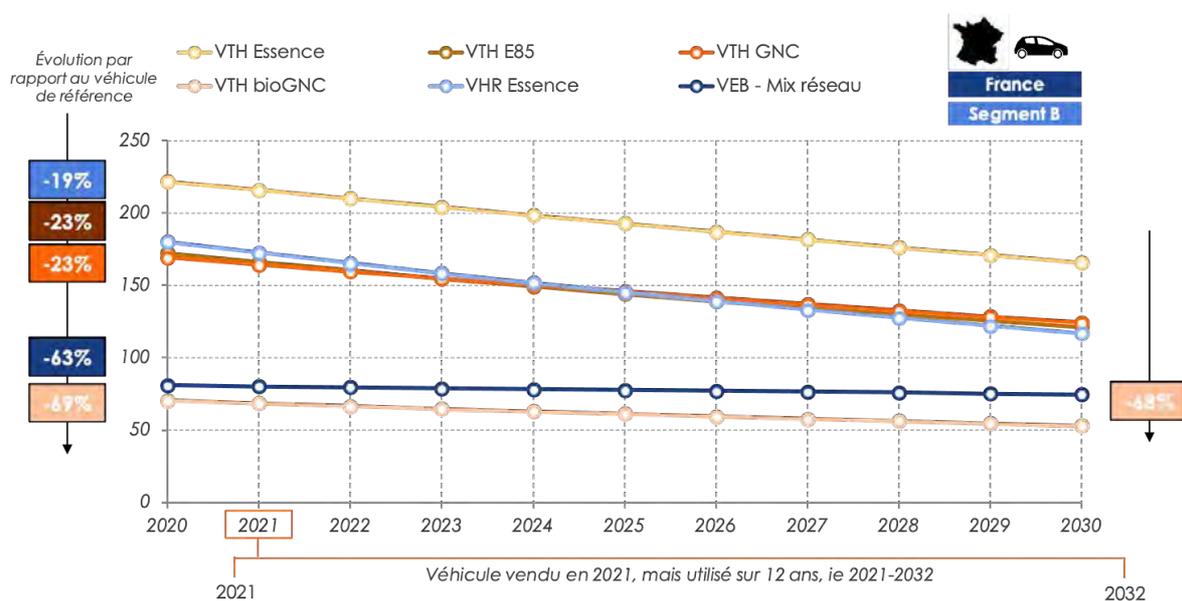
Sources : Analyses Carbone 4



Figure 1 – Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'une voiture vendue en 2020
France – Segment B | gCO₂e/km

Il ressort clairement que **la part la plus importante de l'empreinte carbone en cycle de vie pour un VEB utilisé en France est la fabrication, du véhicule et de sa batterie**, ce qui confirme des analyses que nous avons déjà publiées dans une note de synthèse sur le véhicule électrique et corrobore d'autres travaux récents^{3 4 5}. L'amélioration de l'empreinte carbone des batteries a pourtant été très nette au cours des 5 dernières années (passant de près de 200 kgCO₂e/kWh à environ 100 kgCO₂e/kWh, en moyenne), ce qui n'est cependant pas suffisant pour réduire de manière drastique ce poste d'émissions. Il faudra pour cela préférentiellement produire ces batteries dans des pays où l'électricité est faiblement carbonée (gain potentiel de 25%) et aussi et surtout **favoriser l'adoption de batteries de capacité raisonnable, en ne cherchant pas à tout prix à augmenter leur taille**. Il y a là un enjeu systémique majeur mêlant infrastructure de recharge, expérience utilisateur, coût d'utilisation, changement d'usages.

A l'horizon 2030, l'hybridation légère permet une amélioration sensible des VTH, ce qui permet de réduire l'écart avec le VEB dont la performance carbone ne s'améliore pas du fait de l'accroissement de la capacité de sa batterie. Le VHR gagne lui aussi en pertinence et finit par passer sous le VTH-E85, en faisant l'hypothèse que les utilisateurs sont mieux sensibilisés à l'intérêt de la recharge électrique et utilisent donc ce mode plus intensément (50% des kilomètres en 2030 au lieu de 30% en 2020). La **Figure 2** illustre l'évolution des différentes empreintes carbone au cours du temps. A noter que chaque point représente la moyenne des émissions d'un véhicule vendu cette année-là, sur sa durée de vie.



Les batteries du BEV augmentent de 50 à 60 kWh de 2020 à 2030, ce qui freine la baisse des émissions sur la période.

Sources : Analyses Carbone 4



**Figure 2 – Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie du millésime considéré
France – Segment B | gCO₂e/km**

3. T&E, « How clean are electric cars ? », 2020.

4. EAFO, « How 'green' is the electricity we use to charge our EVs? », 2020.

5. TU/e, « Comparing the lifetime green house gas emissions of electric cars with the emissions of cars using gasoline or diesel », 2020.

A l'échelle européenne, dans une vision moyenne 2020, les résultats sont très similaires à la France, à savoir que le VTH-bioGNC est le moins émissif, mais que les VEB restent mieux placés que les VTH, même hybrides. A noter que c'est le cas même en Pologne où le mix électrique est très carboné. Ceci est dû à la réduction importante des émissions de fabrication des batteries, au cours des dernières années, comme déjà mentionné, et à la décarbonation progressive de tous les mix électriques européens. La **Figure 3** permet de comparer l'ensemble des alternatives pour le segment B.

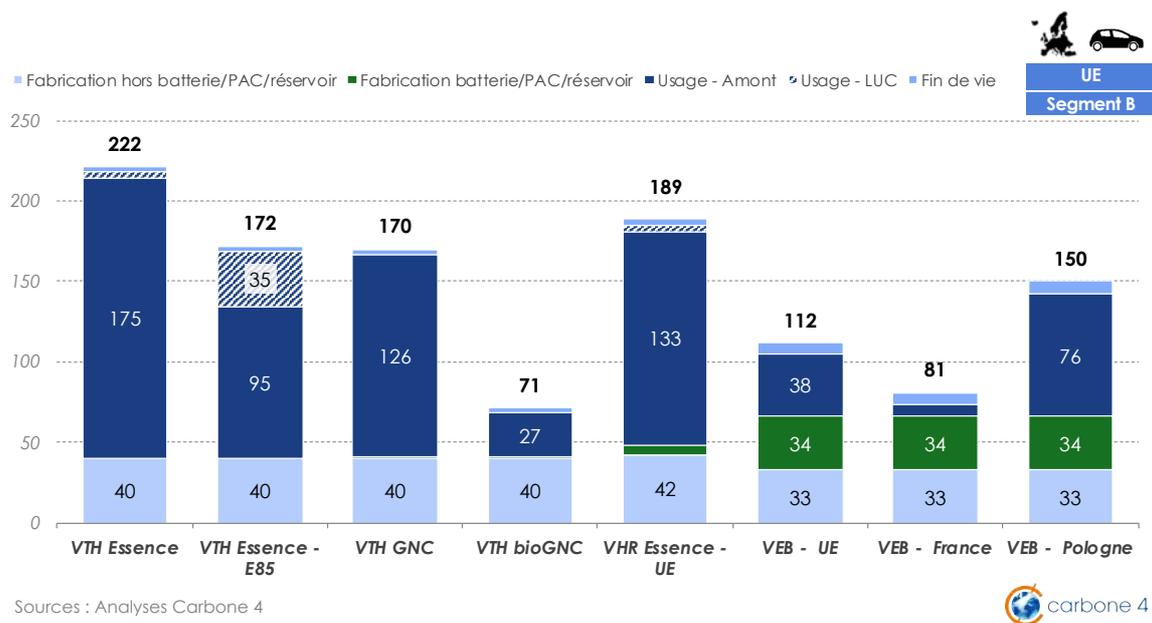


Figure 3 – Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'une voiture vendue en 2020 Europe – Segment B | gCO₂e/km



Zoom sur le segment D

 Segment D Motorisation	Invariant au cours du temps		Variant au cours du temps	2020	2030
	Poids	Durée de vie			
VTH Essence	1 520 kg	200 000 km 12 ans	Conso réelle (MHEV)	8,3 L/100 km	6,2 L/100 km
			Part éthanol*	9%	13%
VTH Diesel	1 560 kg	200 000 km 12 ans	Conso réelle (MHEV)	6,9 L/100 km	5,2 L/100 km
			Part biodiesel*	6%	8%
VTH GNV	1 609 kg <i>dont réservoir : 89 kg</i>	200 000 km 12 ans	Conso réelle (MHEV)	5,8 kg/100 km	4,3 kg/100 km
			Part bioGNV*	5%	11%
VEB	1 770 kg <i>dont batterie : 375 kg</i>	200 000 km 12 ans	Conso réelle	21 kWh/100 km	20 kWh/100 km
			Capacité batterie	60 kWh	90 kWh
VEH	1 595 kg <i>dont batterie+réservoir : 137 kg</i>	200 000 km 12 ans	Conso réelle	1,3 kg/100 km	1,2 kg/100 km
			Taille réservoir	6,3 kgH ₂	= 6,3 kgH ₂
VHR	Essence : 1 791 kg Diesel : 1 731 kg	200 000 km 12 ans	Conso réelle identique à celles des MHEV et BEV ci-dessus		
			Capacité batterie	13 kWh 30% km élec	20 kWh 50% km élec

*La part d'éthanol et de biodiesel (en volume) et de bioGNV est moyennée sur la durée de vie du véhicule.



Tableau 5 – Principales hypothèses spécifiques au segment D

Au contraire du segment B, le segment D propose une nouvelle technologie : le VEH, équipé d'une pile à combustible permettant d'alimenter un moteur électrique à partir d'hydrogène stocké à bord.

Ainsi, **en France en 2020, dans la catégorie des segments D, les VEB, VTH fonctionnant au bioGNC et les VEH-100% ENR ont des empreintes carbone similaires, bien meilleures que les VTH (facteur 2,5 à 4).**

Là encore, les très faibles FE du bioGNC et de l'électricité française permettent aux véhicules au biogaz et au véhicule électrique de faire la course en tête, le VEB présentant les plus faibles émissions à l'usage (9 gCO₂e/km) mais étant pénalisé par la fabrication de sa batterie. Le VEH est 2 à 2,5 fois moins émissif en cycle de vie qu'un VTH ou un VHR, lorsque l'hydrogène est produit par électrolyse avec le FE du réseau français. Sa performance carbone est cependant quelque peu dégradée par le faible rendement global de la chaîne de transformation énergétique : avec le même moteur électrique qu'un VEB, les émissions à l'usage sont 5 fois plus élevée (44 gCO₂e/km contre 9 gCO₂e/km).

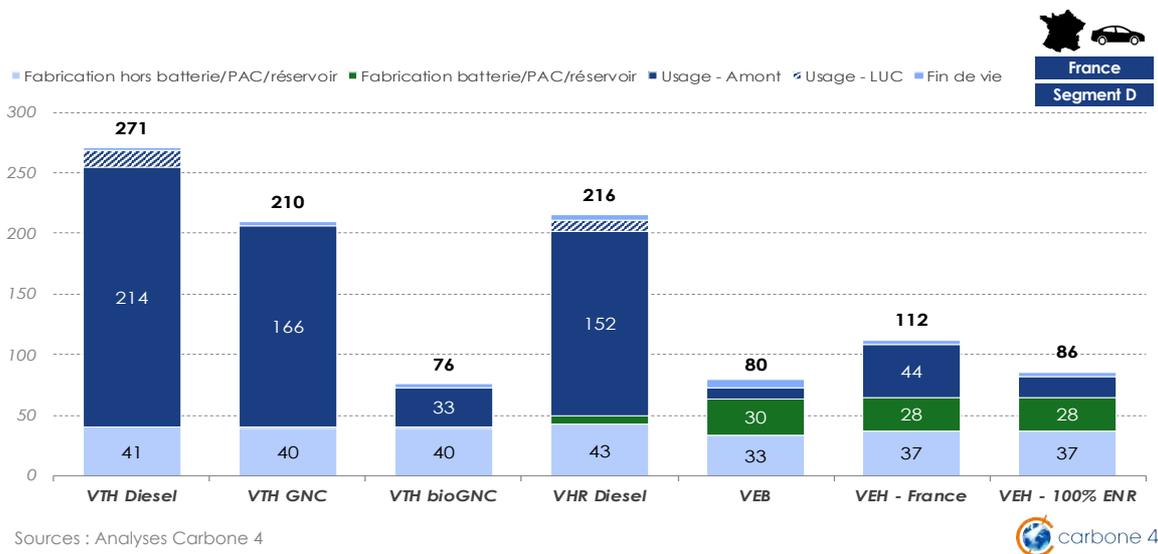
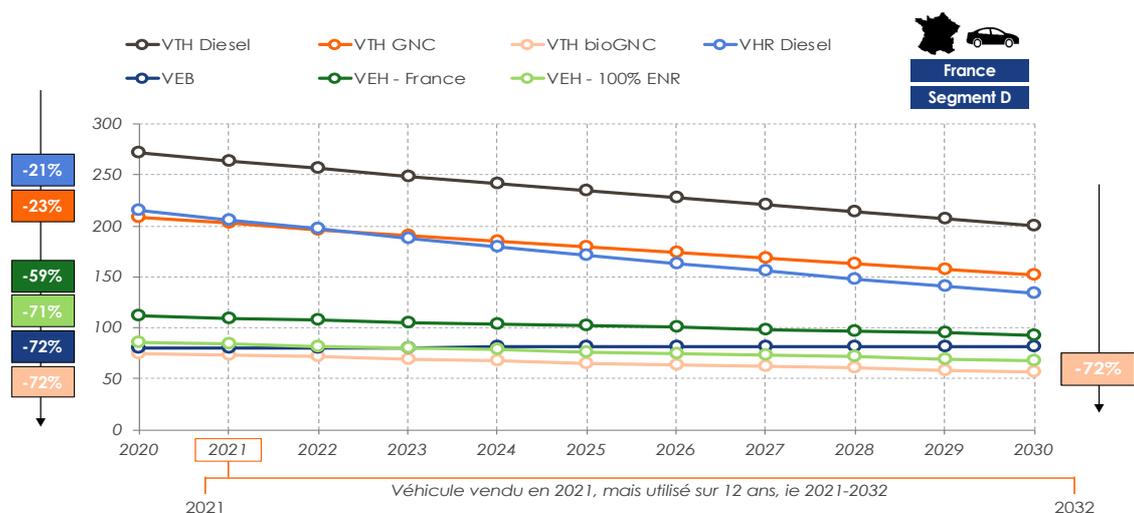


Figure 4 – Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'une voiture vendue en 2020 France – Segment D | gCO₂e/km

Lorsque l'électrolyse est alimentée par un mix 100% ENR, le gain d'émissions pour la production de l'hydrogène permet de venir au niveau du VEB (roulant avec le mix réseau, par contre).

A l'horizon 2030, l'hybridation légère permet une amélioration sensible des VTH d'ici 2030, ce qui permet de réduire l'écart avec les VEB et VEH. Le VHR gagne lui aussi en pertinence et finit par dépasser le VTH-GNC, pour les mêmes raisons que pour le segment B. **Considérant des progrès significatifs sur la fabrication des équipements spécifiques au VEH (PAC et réservoir : environ -30% sur les émissions de fabrication), VEH et VEB deviennent presque équivalents, selon que le mix électrique de l'électrolyse est celui du réseau ou 100% ENR.** Enfin, la formule bioGNC reste toujours la plus performante en matière d'empreinte carbone.

La **Figure 5** illustre l'évolution des différentes empreintes carbone au cours du temps. A noter que chaque point représente la moyenne des émissions d'un véhicule vendu cette année-là, sur sa durée de vie.



Les batteries du BEV augmentent de 60 à 90 kWh de 2020 à 2030, ce qui freine la baisse des émissions sur la période.
Sources : Analyses Carbone 4

Figure 5 – Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie du millésime considéré France – Segment D | gCO₂e/km

Ce qui différencie en profondeur la comparaison en France et la comparaison en vision « moyenne UE » en 2020, ce sont les performances carbone des VEH. En effet, avec un mix électrique beaucoup plus carboné au niveau européen (environ 6 fois plus dans nos hypothèses), l'électrolyse produit un hydrogène beaucoup trop carboné, conduisant à des émissions supérieures à 300 gCO₂e/km, voire 400 gCO₂e/km en Allemagne. Ces valeurs sont supérieures aux VTH conventionnels. Le développement des VEH ne peut donc s'envisager qu'avec une production d'hydrogène peu carbonée, i.e. par électrolyse à partir d'une électricité peu carbonée (typiquement mix français ou mix 100% ENR). La Figure 6 suivante résume la situation 2020 des segments D, en UE.

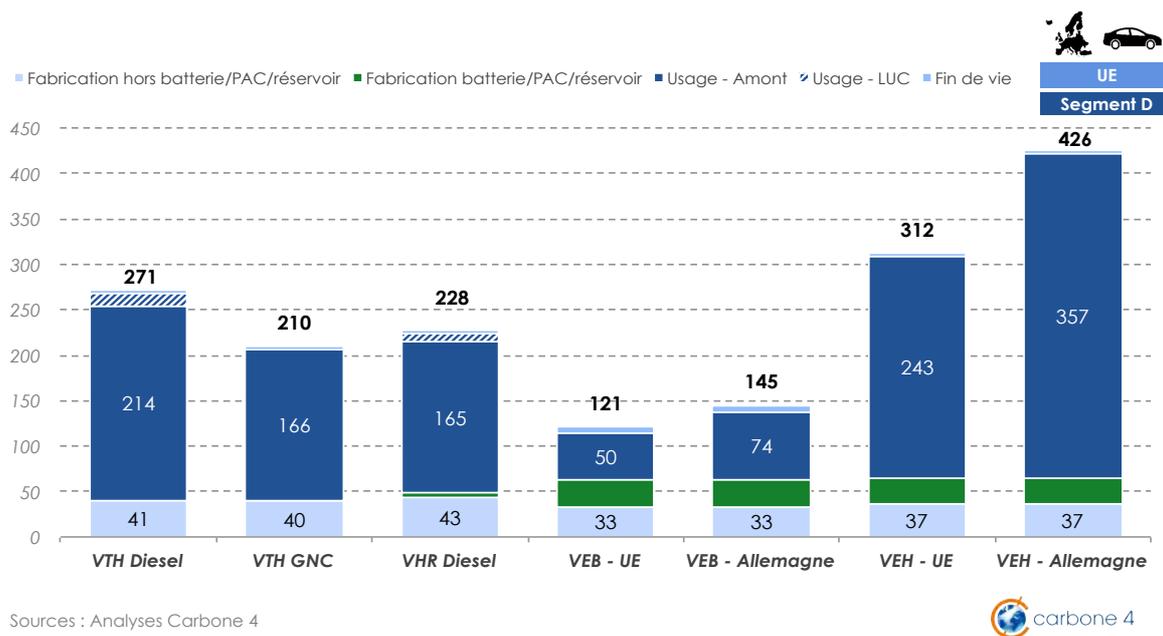


Figure 6 – Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'une voiture vendue en 2020 Europe – Segment D | gCO₂e/km

En vision prospective à 2030, toutes les solutions s'améliorent, les progrès les plus spectaculaires étant observés sur les VEH roulant à l'hydrogène car l'électricité de réseau est supposée se décarboner rapidement dans les 10 prochaines années, selon les projections énergétiques à disposition [scénario IEA RTS, plans énergétiques nationaux], ce qui rendrait la phase de production d'hydrogène par électrolyse beaucoup moins émissive (-37,5% en moyenne UE).

Zoom sur les matériaux allégés

Est-il avantageux d'alléger par substitution de l'acier par des matériaux plus légers, mais plus émissifs à fabriquer ?

La question n'a à notre connaissance que rarement été investiguée, mais c'est pourtant un point d'attention à avoir lorsqu'on raisonne en analyse de cycle de vie. En effet, il est admis que l'industrie automobile fait d'ores et déjà appel à des matériaux dits « allégés » pour contenir l'augmentation de masse de ses véhicules. Si à l'avenir, la tendance à limiter, voire réduire, la masse des véhicules mis en circulation se confirme, alors la quantité d'aluminium, de plastiques, d'aciers spéciaux, peut-être même de matériaux composites (comme la fibre de carbone par exemple) va croître dans les véhicules routiers, en lieu et place de l'acier standard.

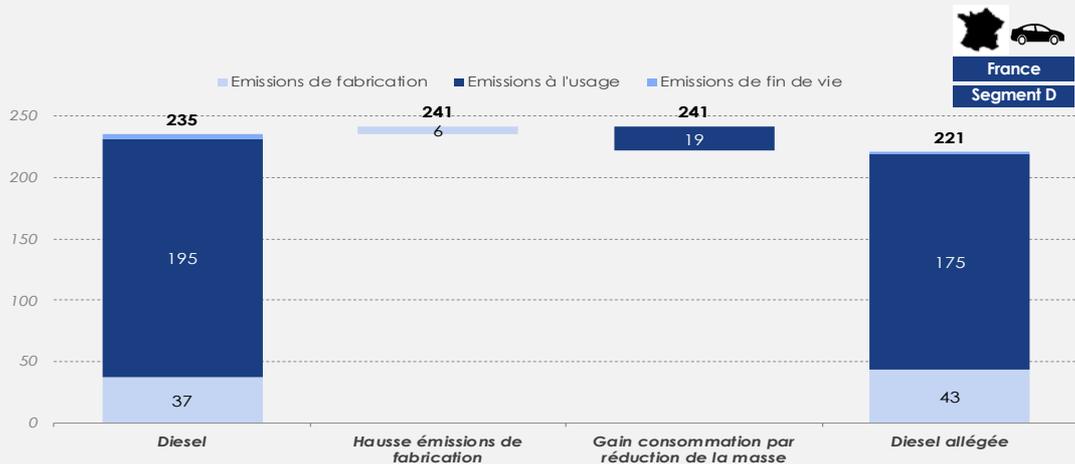
Cette substitution va avoir un effet bénéfique sur la consommation d'énergie du véhicule en phase d'usage, c'est une évidence. En revanche, la fabrication de ces matériaux de substitution se révèle dans bien des cas plus émissive que celle de l'acier conventionnel qu'ils remplacent, de sorte que la question se pose de savoir si le bénéfice à la consommation d'énergie n'est pas annulé par ces émissions de fabrication à la hausse.

Pour y répondre, nous avons retenu le cas d'un véhicule particulier (segment D), car du fait de sa plus faible utilisation par rapport aux autres véhicules routiers, c'est sur cette catégorie que la question se pose de manière la plus aiguë. Par ailleurs, nous avons retenu deux cas de figure bien distincts en matière de motorisation, pour couvrir les cas opposés en matière des émissions liées à l'usage : VTH-essence et VEB, vendus en 2020 dans les 2 cas. Pour être conservatif dans nos conclusions, nous avons par ailleurs pris des facteurs d'émissions de fabrication dans la fourchette haute pour les matériaux de substitution, considérés comme neufs (sources : base Carbone et base Impacts). Enfin, nous avons étudié différentes configurations de substitution, en analysant différents mix aluminium / plastiques / fibres de carbone, ces dernières étant de loin les plus émissives à produire (environ 3 fois plus que l'aluminium moyen neuf).

Les résultats sur le VTH-essence montrent que, même dans le cas le plus défavorable pour la fabrication (90% de fibres de carbone et 10% d'aluminium en substitution à l'acier), le bilan comparatif en cycle de vie est neutre à légèrement favorable. Avec une substitution plus commune (50% aluminium et 50% plastiques), le gain net est d'environ 10 gCO₂e/km (soit -4%) pour 200 kg de masse en moins. La **Figure 7** ci-dessous illustre ce 2^{ème} cas de figure, en distinguant clairement augmentation des émissions de fabrication et réduction des émissions d'usage.

Ainsi, même si leur production est intensive en CO₂, les matériaux plus légers que l'acier favorisent globalement la réduction des émissions des véhicules thermiques.





Hypothèses: gain de consommation de 0,3 litres / 100 km pour 100 kg de réduction de masse, gain de masse de 40% - 20% - 50% par substitution de l'acier respectivement par de l'aluminium, du plastique, de la fibre de carbone. Variation des émissions de fabrication des véhicules uniquement sur la base des émissions de production des matériaux introduits / substitués.

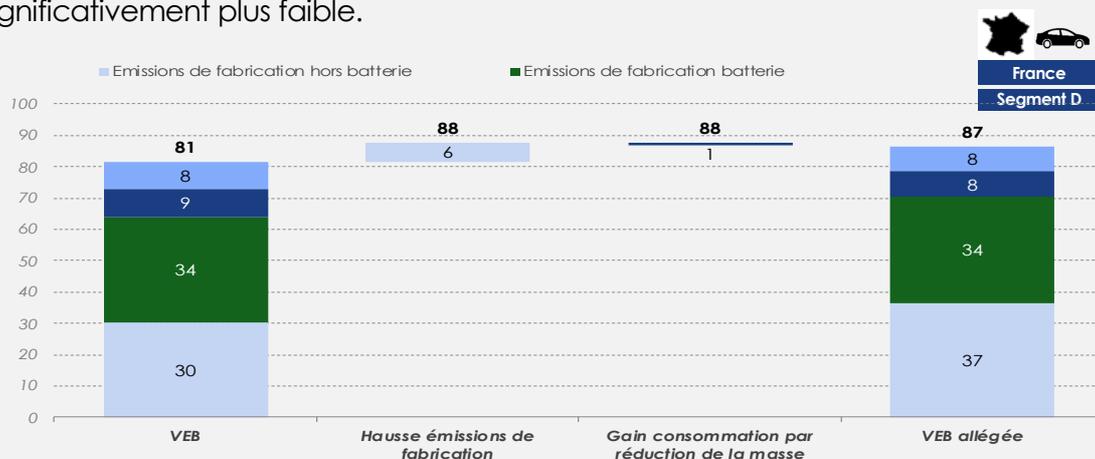
Sources: Renault, PSA, McKinsey, Alcoa, Plastiques Europe, Base Carbone, Base Impacts, Analyses Carbone 4



Figure 7 – Effet de réduction de la masse de 200 kg d'acier par 50% d'aluminium et 50% de plastique, sur l'empreinte carbone moyenne d'un véhicule diesel vendu en 2020 France – Segment D | gCO₂e/km

Pour les BEV, la conclusion est différente, du moins en France (et par extension tous les pays où le mix électrique est peu carboné, et de facto les émissions d'usage). La Figure 8 ci-dessous montre ainsi que les émissions de fabrication sont nettement supérieures au gain obtenu par la réduction de masse sur les émissions d'usage. Les bénéfices de la réduction de masse sont bien les mêmes d'un point de vue physique, mais comme les émissions d'usage ne sont que de 9 gCO₂e/km (contre 197 gCO₂e/km pour le VTH-essence), il n'est pas possible d'obtenir mieux qu'environ 1 gCO₂e/km de gain. A noter que le mix de matériaux de substitution (50% aluminium et 50% plastiques) n'est pourtant pas le plus émissif à produire dans cet exemple. Au bout du compte, en France, les émissions du BEV (segment D) augmentent dans ce cas de figure d'environ 5 gCO₂e/km (soit +6%).

Par conséquent, l'introduction de matériaux plus légers sur les VEB peut conduire à une hausse des émissions en cycle de vie, en France, au contraire de ce qu'on peut obtenir pour les VTH. En conclusion, la stratégie d'allègement des VEB reste bien sûr pertinente, mais doit préférentiellement se faire au travers de l'allègement des batteries, l'allègement via la conception (moins de matière) et l'utilisation accrue de matériaux recyclés dont l'empreinte carbone de fabrication peut être significativement plus faible.



Hypothèses: gain de consommation de 0,3 litres / 100 km pour 100 kg de réduction de masse, gain de masse de 40% - 20% - 50% par substitution de l'acier respectivement par de l'aluminium, du plastique, de la fibre de carbone. Variation des émissions de fabrication des véhicules uniquement sur la base des émissions de production des matériaux introduits / substitués.

Sources: Renault, PSA, McKinsey, Alcoa, Plastiques Europe, Base Carbone, Base Impacts, Analyses Carbone 4



Figure 8 – Effet de réduction de la masse de 200 kg d'acier par 50% d'aluminium et 50% de plastique, sur l'empreinte carbone moyenne d'un véhicule électrique vendu en 2020 France – Segment D | gCO₂e/km

2

Véhicules professionnels

Ce qu'il faut retenir

Les véhicules professionnels à la plus faible empreinte carbone en cycle de vie sont :

✓ Les **véhicules au bioGNV**

L'empreinte carbone très faible est due à l'hypothèse que les véhicules au gaz seraient développés avec une hybridation légère (comme pour les véhicules thermiques conventionnels). Le facteur d'émissions du biométhane varie par ailleurs peu selon les pays de production.

✓ Les **véhicules électriques à batterie, quel que soit le mix électrique** de la région considérée.

Un mix décarboné (France, électricité renouvelable) permet les meilleures performances, mais même un véhicule électrique vendu aujourd'hui en Allemagne, voire en Pologne, reste moins émissif qu'un véhicule thermique comparable.

✓ Les **véhicules électriques à hydrogène produit par électrolyse ou par vaporeformage de biométhane, avec une électricité décarbonée** (réseau français ou renouvelable)

L'empreinte carbone dépend très fortement du mix électrique, avec des performances similaires au véhicule électrique avec une électricité décarbonée, et similaire voire supérieure au véhicule thermique dans le cas contraire.

La vision prospective en 2030 diminue les écarts d'émissions entre les motorisations, sans pour autant changer les conclusions déjà visibles en 2020

✓ *L'hybridation légère permet de rattraper une partie du retard sur les VEB, ces derniers s'améliorant plus lentement du fait de la hausse de capacité des batteries qui contrecarre la baisse du FE de l'électricité (sauf pour les bus).*

✓ *En particulier pour les véhicules à hydrogène, la décarbonation de l'électricité de réseau européenne n'est pas suffisante pour égaler la performance CO₂ du véhicule électrique ou au bioGNV.*

Concernant **les autobus circulant en milieu urbain**, les motorisations électriques et hydrogène (bas-carbone) sont à privilégier **grâce à la récupération d'énergie** importante lors des freinages fréquents et à l'absence d'émissions **de particules fines** (à l'échappement).

A l'inverse, **le biogaz est la seule solution technologique véritablement décarbonante disponible à date pour les tracteurs routiers**, en attendant l'arrivée des solutions « zéro émission ». Cependant, le déploiement massif de véhicules au gaz peut induire **un verrouillage du parc** sur ce vecteur énergétique, avec l'utilisation de gaz fossile **si la ressource en biométhane n'est pas disponible en quantité suffisante**, ce qui semble être le cas (voir [Zoom sur des vecteurs énergétiques spécifiques](#)).



Véhicules Utilitaires Légers

 VUL Motorisation	Invariant au cours du temps		Variant au cours du temps	2020	2030
	Poids	Durée de vie			
VTH Diesel	1 830 kg	200 000 km 12 ans	Conso réelle (MHEV)	10,2 L/100 km	7,6 L/100 km
			Part biodiesel*	6%	8%
VTH GNV	1 960 kg dont réservoir : 180 kg	200 000 km 12 ans	Conso réelle (MHEV)	8,5 kg/100 km	6,3 kg/100 km
			Part bioGNV*	5%	11%
VEB	1 943 kg dont batterie : 313 kg	200 000 km 12 ans	Conso réelle	31 kWh/100 km	29 kWh/100 km
			Capacité batterie	50 kWh	75 kWh
VEH	1 833 kg dont batterie+réservoir : 173 kg	200 000 km 12 ans	Conso réelle	2,0 kg/100 km	1,8 kg/100 km
			Taille réservoir	5,4 kgH ₂	= 5,4 kgH ₂

*La part de biodiesel (en volume) et de bioGNV est moyennée sur la durée de vie du véhicule.



Tableau 6 – Principales hypothèses spécifiques au véhicule utilitaire léger

Le véhicule utilitaire léger se caractérise par une consommation énergétique plus élevée que les véhicules particuliers, mais aussi un besoin d'autonomie kilométrique moindre en règle générale. Cela explique une **réduction de l'empreinte carbone encore plus forte que pour les VP, d'un facteur 3 à 4**, entre un véhicule thermique diesel ou GNC, et les motorisations électriques et bioGNC, en France en 2020.

A noter que **la performance carbone du VEB est légèrement meilleure que celle du véhicule au bioGNC** (voir **Figure 9**) car la batterie est relativement petite (ne permettant qu'une autonomie de 160 km environ), ce qui **diminue le poids carbone de la fabrication du véhicule**. Dans les deux cas, les émissions restent très faibles en France. En revanche, avec l'accroissement de la taille des batteries d'une part et l'hybridation légère des véhicules thermiques d'autre part, l'empreinte du véhicule au biométhane diminue dans le temps tandis que celle du véhicule électrique reste stable, ce qui inverse la hiérarchie en 2030, les deux motorisations restant comparables d'un point de vue carbone (voir **Figure 10**).

Le VEH, s'il permet une réduction de l'empreinte carbone d'un facteur 2 à 3 par rapport aux véhicules roulant aux énergies fossiles, reste 50% plus émissif que le VEB et le véhicule au biogaz en 2020, si l'hydrogène est produit avec de l'électricité de réseau. Cette différence se réduit en 2030, mais reste présente.

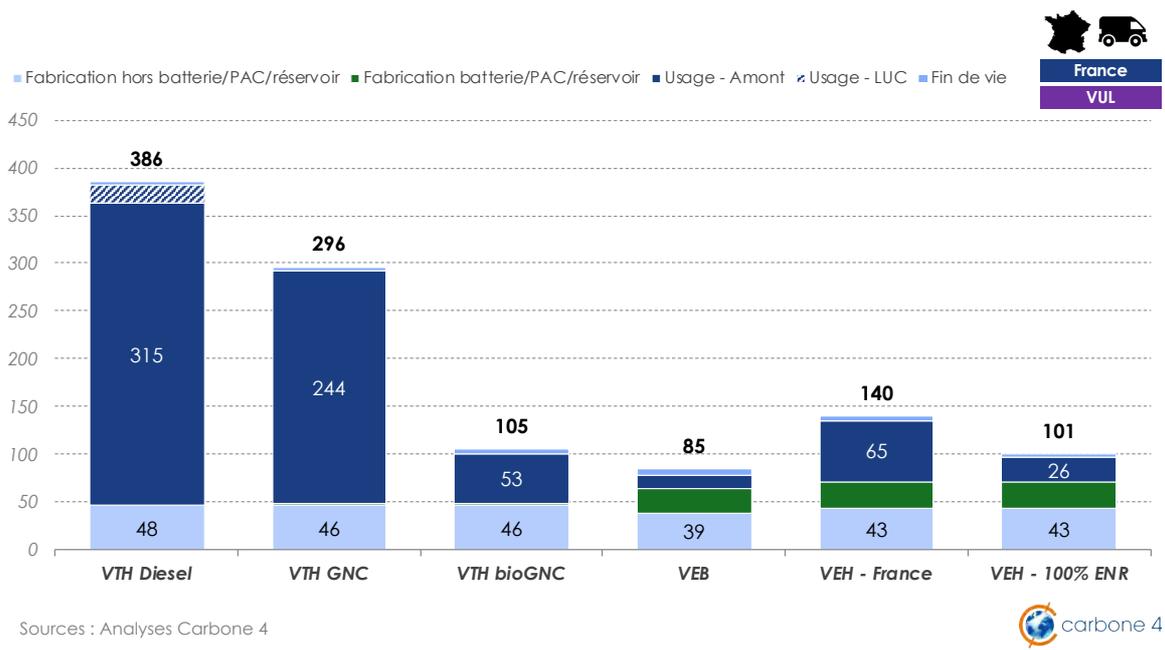


Figure 9 – Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'un VUL vendu en 2020 France | gCO₂e/km

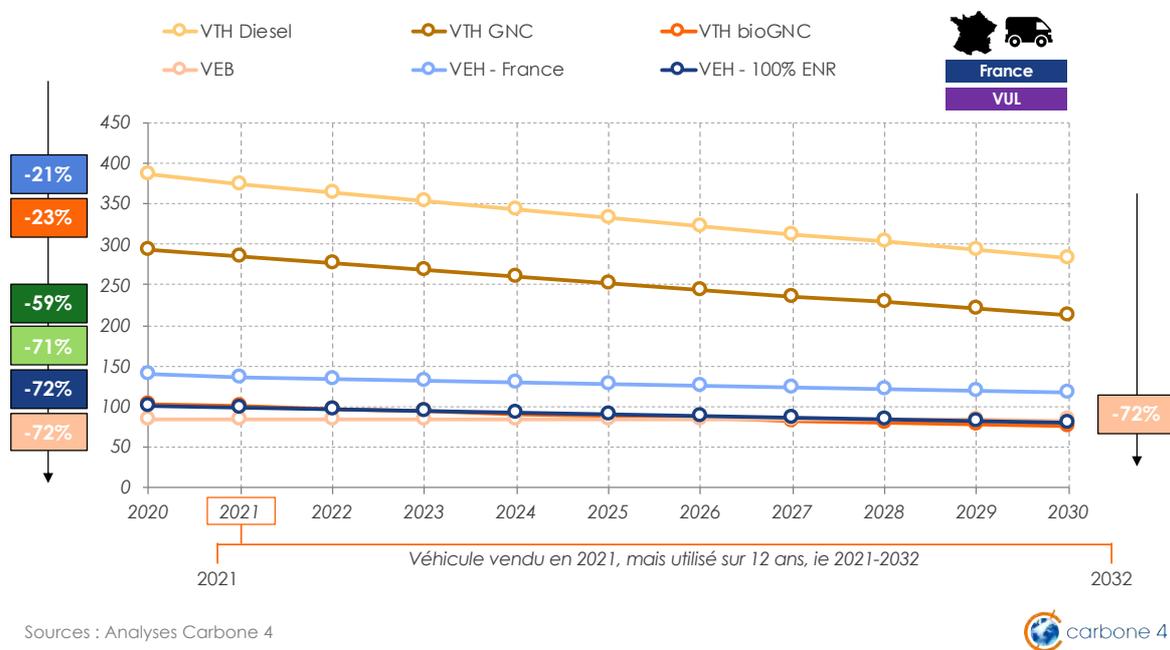


Figure 10 – Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie du millésime considéré France – Véhicule utilitaire léger | gCO₂e/km

En élargissant notre regard à l'Union Européenne (Figure 11) le facteur d'émissions de l'électricité influence plus ou moins notablement la performance carbone des motorisations électriques et hydrogène. Pour le VEB, les performances sont légèrement dégradées par rapport au cas français et sont **50% plus élevées**, voire 100% en Allemagne, **que celles du véhicule au bioGNV**. Mais cela reste **bien inférieur aux véhicules thermiques** diesel/GNV.

En revanche, **l'empreinte carbone du VEH explose avec l'électrolyse carbonée au mix électrique européen moyen** (autour de 300 gCO₂e/kWh en 2020), et il devient alors **plus émissif qu'un VTH**, même en tenant compte de la décarbonation forte du mix européen ou allemand à l'horizon 2030. Seuls le **vaporeformage du biométhane** ou une **électrolyse avec une électricité 100% EnR** permettent dans ce cas d'obtenir une réelle décarbonation du VEH.

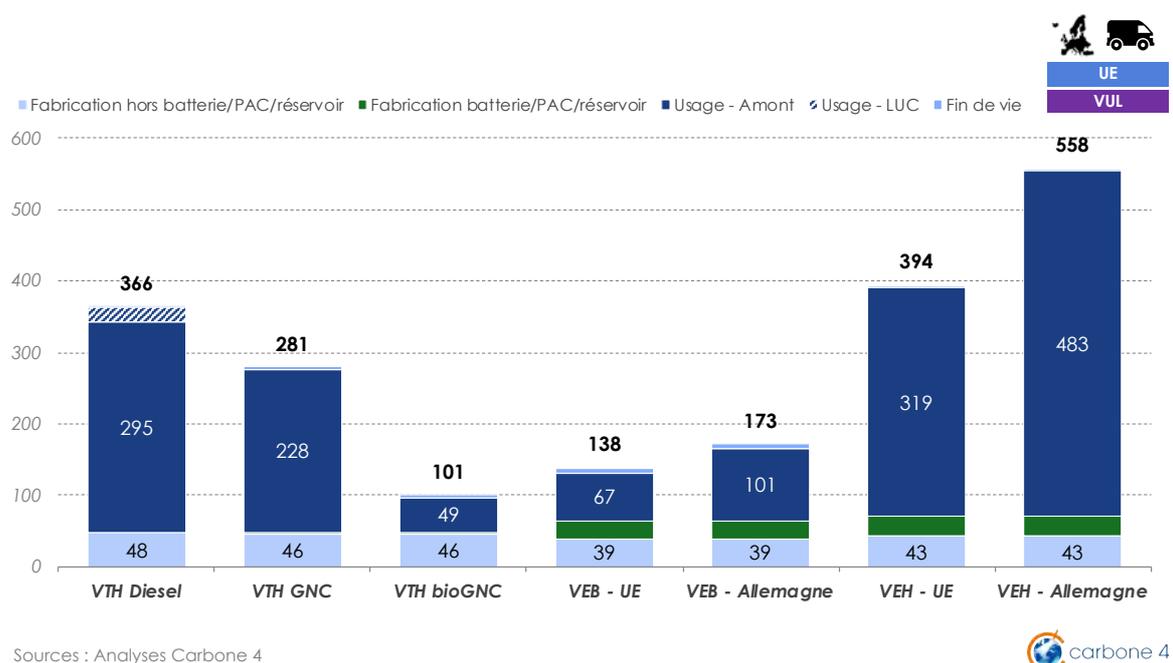


Figure 11 – Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'un VUL vendu en 2020
Europe | gCO₂e/km



Autobus

Autobus Motorisation	Invariant au cours du temps		Variant au cours du temps	2020	2030
	Poids	Durée de vie			
VTH Diesel	10 800 kg	480 000 km 12 ans	Conso réelle	43 L/100 km	40 L/100 km
			Part biodiesel*	6%	8%
VTH GNC	11 650 kg dont réservoir : 950 kg	480 000 km 12 ans	Conso réelle	37 kg/100 km	34 kg/100 km
			Part bioGNV*	5%	11%
VEB	12 250 kg dont batterie : 2 000 kg	480 000 km 12 ans	Conso réelle	130 kWh/100 km	124 kWh/100 km
			Capacité batterie	320 kWh =	320 kWh
VEH	11 050 kg dont batterie+réservoir : 700 kg	480 000 km 12 ans	Conso réelle	8,3 kg/100 km	7,5 kg/100 km
			Taille réservoir	28 kgH ₂	25 kgH ₂

*La part de biodiesel (en volume) et de bioGNV est moyennée sur la durée de vie du véhicule.



Tableau 7 – Principales hypothèses spécifiques à l'autobus

Dans le cas des autobus, les principaux éléments spécifiques sont **une utilisation intensive** (40 000 km/an, soit 2 à 3 fois plus que les VP), **une distance moyenne quotidienne modérée** (autour de 150 km, ce qui limite la taille des batteries et réservoirs), et une vitesse moyenne relativement faible avec **beaucoup d'accélération et de freinages, ce qui favorise les motorisations électriques (VEB, VEH)** permettant la récupération d'énergie lors des décélérations.

Ainsi, **en France, la Figure 12 illustre bien que la meilleure motorisation est sans conteste l'autobus électrique, ou l'autobus à hydrogène 100% renouvelable**, bénéficiant de la part importante de la phase d'usage par rapport à celle de la fabrication des équipements spécifiques (batteries, PAC, réservoirs), relativement aux VP ou VUL. Pour un bus à hydrogène produit avec l'électricité du réseau, **le poids carbone se traduit par une empreinte globale 80% supérieure à l'autobus électrique** (438 gCO_{2e}/km contre 244), et légèrement supérieur à celle du véhicule au bioGNV. Néanmoins, **toutes ces motorisations restent 3 à 4 fois moins émissives que les autobus diesel ou GNV**, plombés par les émissions liées à l'usage très importantes. La différence est même de l'ordre de 1000 gCO_{2e}/km entre un autobus électrique et un autobus diesel/GNV, ce qui est loin d'être négligeable.

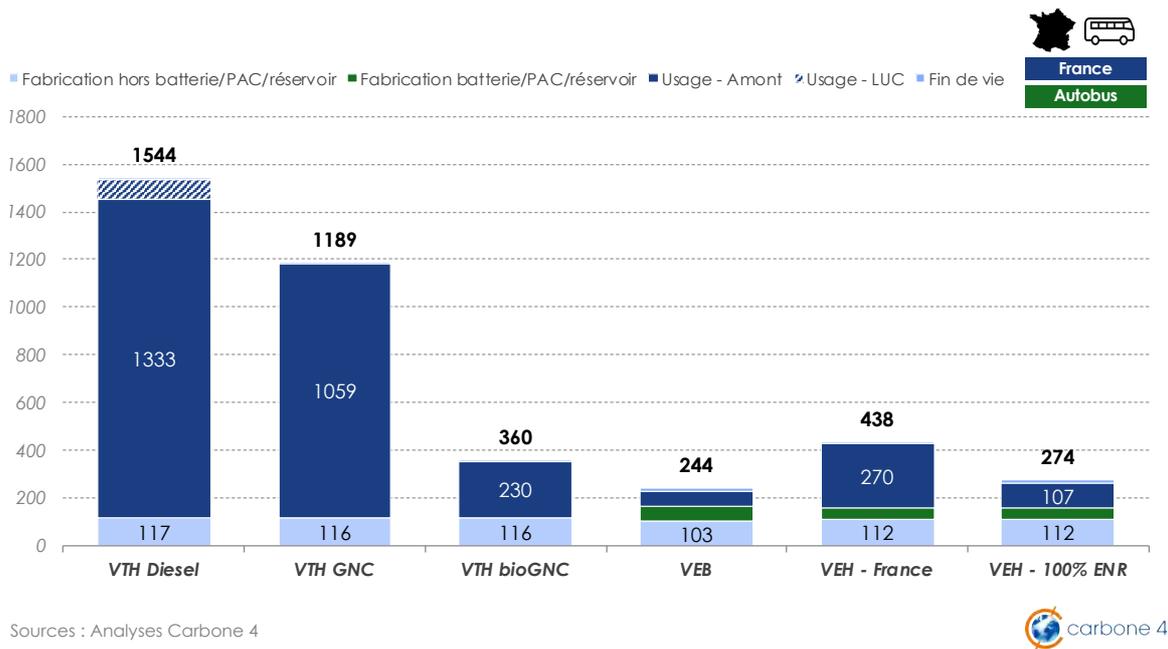


Figure 12 – Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'un autobus vendu en 2020 France | gCO₂e/km

En outre, comme montré sur la **Figure 13**, il ne faut pas compter sur l'hybridation légère à venir des motorisations thermiques pour modifier la hiérarchie à l'horizon 2030, car si elle permet de réduire légèrement les écarts, elle ne change ni le classement des véhicules ni les ordres de grandeurs.

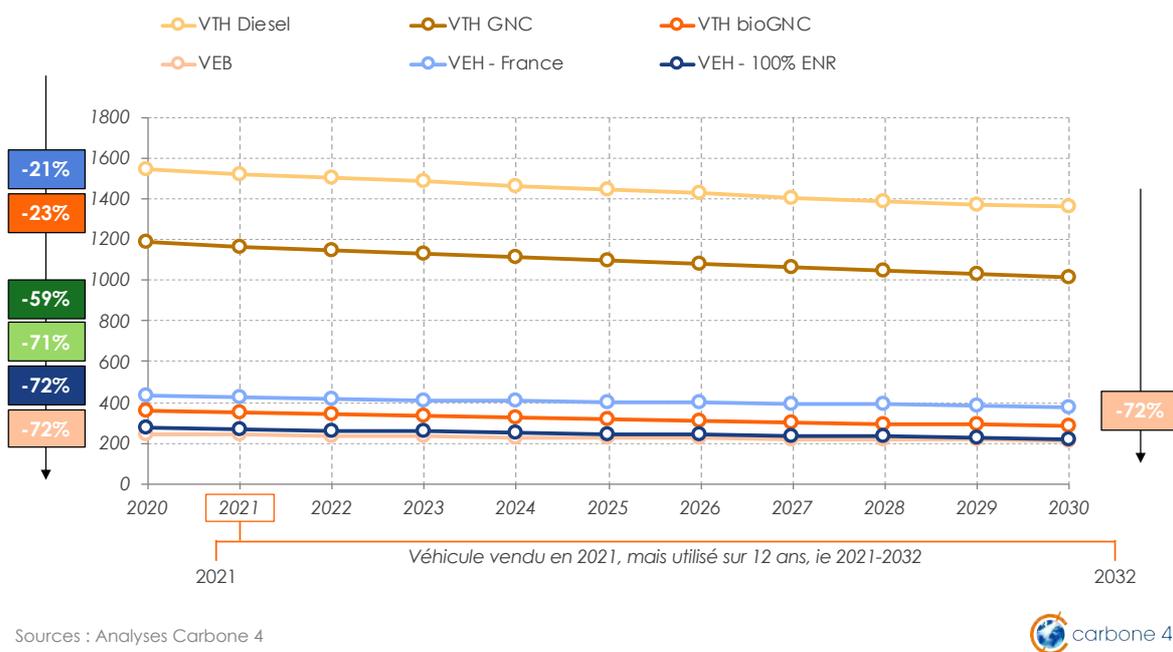


Figure 13 – Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie du millésime considéré France – Autobus | gCO₂e/km

A l'échelle de l'Union Européenne, la part de l'usage augmente pour les autobus électriques avec l'électricité plus carbonée (facteur 6 par rapport à l'électricité de réseau française). Ces derniers sont donc plus émissifs que les autobus au bioGNV (+25%), mais tout en restant 3 à 4 fois moins carbonés que les autobus diesel ou au GNV (voir Figure 14).

Enfin, le VEH utilisant de l'hydrogène produit par électrolyse à partir du mix électrique moyen européen se révèle une nouvelle fois non-pertinent du point de vue carbone, avec une empreinte similaire voire supérieure à celle des VTH conventionnels. Seule la production d'hydrogène à partir de vaporeformage de biométhane ou d'une électrolyse avec électricité 100% EnR est une solution viable pour rendre cette motorisation bas-carbone.

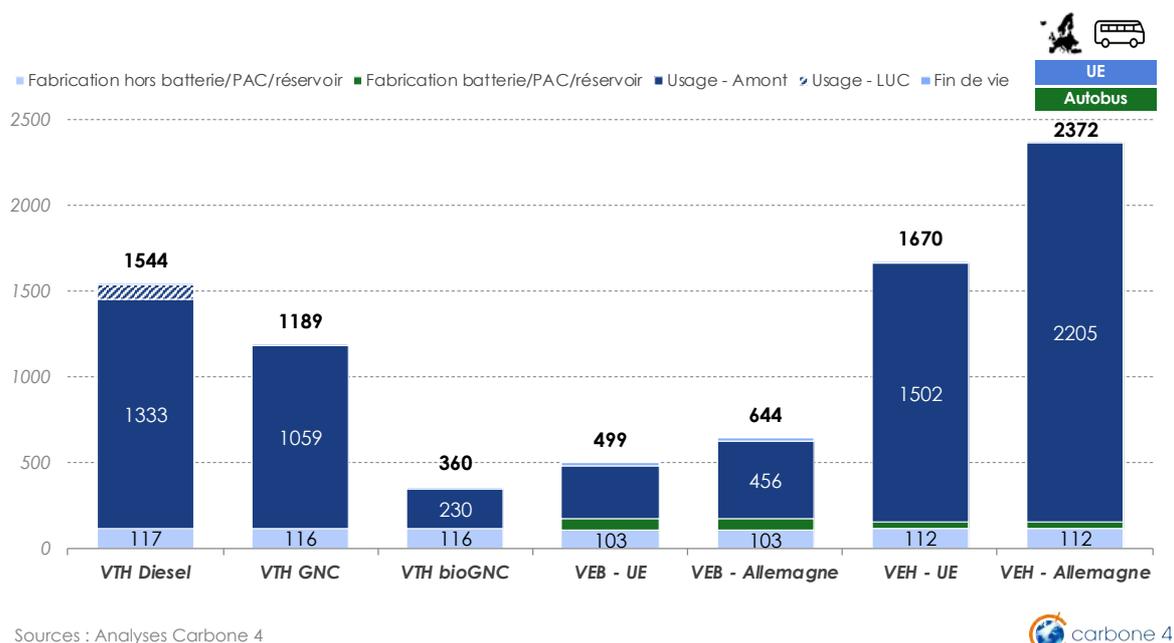


Figure 14 – Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'un autobus vendu en 2020 Europe | gCO₂e/km



Tracteurs routiers

 Poids lourd Motorisation	Invariant au cours du temps		Variant au cours du temps	2020	2030
	Poids	Durée de vie			
VT - Diesel	7 100 kg	1 200 000 km 12 ans	Conso réelle (MHEV) Part biodiesel*	33 L/100 km 6%	28 L/100 km 8%
VT - GNC	7 700 kg <i>dont réservoir : 750 kg</i>	1 200 000 km 12 ans	Conso réelle (MHEV) Part bioGNC*	29 kg/100 km 5%	25 kg/100 km 11%
VT - GNL	7 179 kg <i>dont réservoir : 229 kg</i>	1 200 000 km 12 ans	Conso réelle (MHEV) Part bioGNL*	29 kg/100 km 5%	25 kg/100 km 11%
VEB	10 900 kg <i>dont batterie : 4 500 kg</i>	1 200 000 km 12 ans	Conso réelle Capacité batterie	135 kWh/100 km 720 kWh	128 kWh/100 km 1 000 kWh
VEH (électrolyse)	9 175 kg <i>dont batterie+réservoir : 2 675 kg</i>	1 200 000 km 12 ans	Conso réelle Taille réservoir	8,6 kg/100 km 45 kgH ₂	7,8 kg/100 km 60 kgH ₂
VHR	7 838 kg <i>dont batterie : 438 kg</i>	1 200 000 km 12 ans	Conso réelle identique à celles des MHEV et BEV ci-dessus Capacité batterie	70 kWh 10% km élec	70 kWh 10% km élec

*La part de biodiesel (en volume) et de bioGNC/bioGNL est moyennée sur la durée de vie du véhicule.



Tableau 8 – Principales hypothèses spécifiques au poids lourd

À cause du besoin des tracteurs routiers de disposer d'une **grande autonomie**, les motorisations électriques à batterie ne sont **pas disponibles** pour ce type de véhicule⁶, **à date**. Pour d'autres raisons, les **versions hydrogène tardent à voir le jour**, même si des premiers modèles sont annoncés par certains constructeurs (Nikola, Hyundai). **Pourtant**, en tenant compte du **très fort kilométrage annuel** des tracteurs routiers (100 000 km/an dans notre modèle), **elles devraient constituer des solutions très fortement décarbonantes** car elles sont d'autant plus intéressantes que **l'usage est intensif** (le poids carbone des équipements - batterie/PAC/réservoir - étant dès lors très rapidement amorti, voir § sur les autobus).

Ainsi, en nous situant **en 2030 en France⁷**, le **tracteur routier électrique et son homologue au bioGNV ont une empreinte carbone 6 fois plus faible que celle du véhicule diesel**, ceci en tenant compte de l'hybridation légère des véhicules thermiques. **Le tracteur à hydrogène est aussi une solution moins émissive** : si l'hydrogène est produit par électrolyse avec de l'électricité renouvelable, l'empreinte est aussi faible que celle du VEB, et avec de l'électricité de réseau, l'empreinte reste faible bien que 2 fois supérieure aux VEB et VTH-bioGNV.

D'autre part, on observe que **le véhicule hybride n'apporte pas de réelles économies de CO₂**, car la part électrique ne concerne que **10% de l'usage** (en zone urbaine, pour des raisons de pollution locale). Et les VTH roulant au gaz fossile ne permettent qu'une **diminution relativement faible** de l'empreinte carbone par rapport au

6. Seuls roulent des prototypes (au mieux des premières séries) à l'heure où nous écrivons ces lignes.

7. On fait alors l'hypothèse que les offres batterie et hydrogène existeront.

véhicule diesel. Notamment en considérant le GNL, les gains apportés par le gaz sont en partie compensés par les opérations de liquéfaction du gaz, qui font chuter le rendement énergétique du puits à la roue.

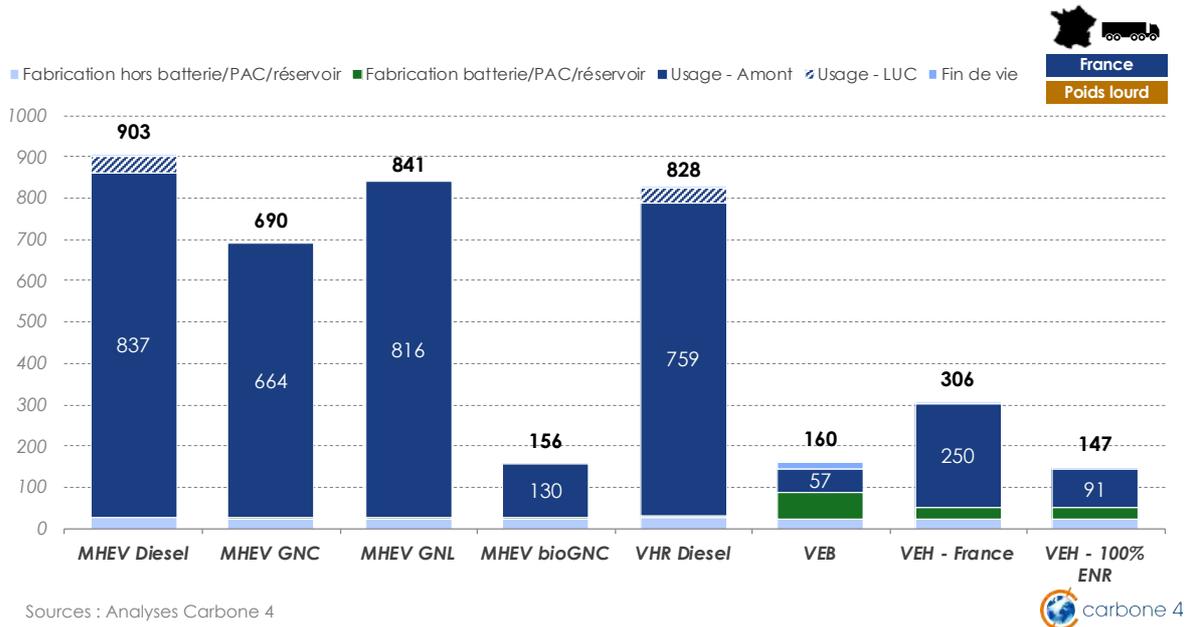


Figure 15 – Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'un tracteur routier vendu en 2030 en France | gCO₂e/km

Avec le prisme européen résumé sur la Figure 16, l'empreinte carbone du tracteur routier électrique est doublée, tout en restant 3 fois inférieure à celle du diesel et donc significativement avantageuse, tout comme le tracteur au bioGNV. En revanche, **le tracteur routier à hydrogène produit par électrolyse avec le mix électrique européen a une empreinte carbone supérieure au véhicule diesel fossile.** Ainsi, lorsque l'électricité de réseau n'est pas assez bas-carbone, l'hydrogène doit impérativement être produit soit par vaporeformage de biométhane, soit par électrolyse d'une électricité 100% EnR.

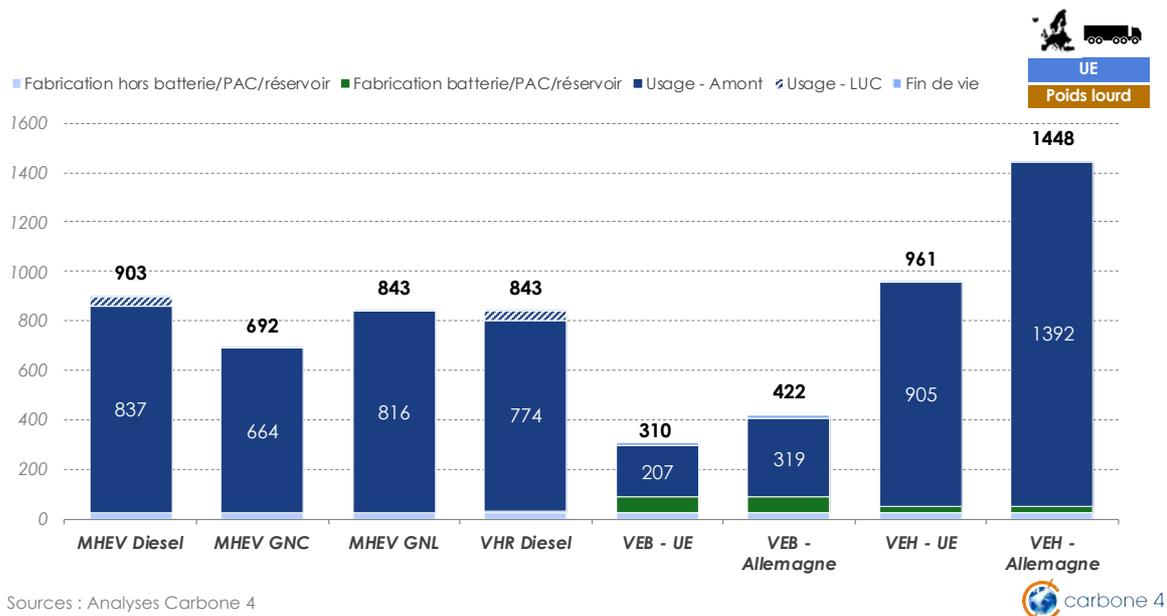


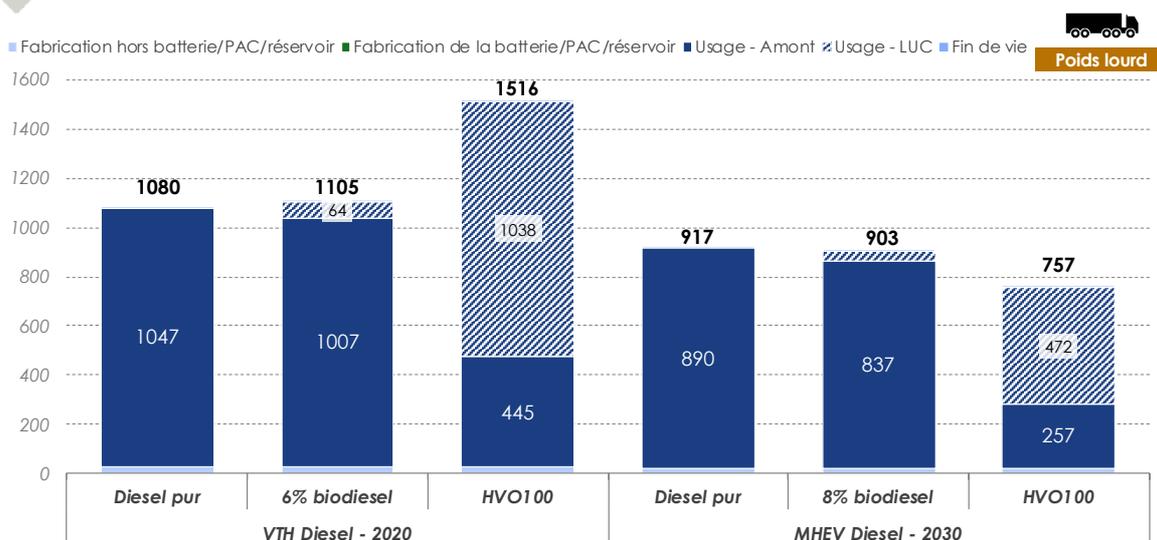
Figure 16 – Empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'un tracteur routier vendu en 2030 en Europe | gCO₂e/km

3

Zoom sur des vecteurs énergétiques spécifiques



Zoom biocarburants



Sources : Analyses Carbone 4



Figure 17 – Comparaison de l'empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'un poids lourd vendu en 2020 et 2030 | gCO₂e/km

Les biocarburants liquides ne permettent qu'une décarbonation modeste, car d'une part leur taux d'incorporation est relativement faible (~5% de la part énergétique en Europe en 2020, estimation à environ ~10% en 2035), et d'autre part l'empreinte carbone de certains agrocarburants est similaire, voire supérieure à celle des carburants fossiles, en prenant en compte les changements d'affectation des sols⁸.

Ainsi, **pour le biodiesel en 2030**, même en tablant sur une incorporation à hauteur de 8%⁹ du volume et sur un changement de mix d'intrants dans la production de biodiesel¹⁰ (suppression de l'huile de palme qui représente 25% de consommation de biodiesel en Europe en 2019), **l'empreinte carbone est peu améliorée**. Dans le cadre d'une utilisation de biocarburants purs (HVO100¹¹), l'empreinte n'est diminuée que de

8. Changement d'affectation des sols directs et indirects pris en compte dans l'étude, contrairement à la réglementation européenne à date.

9. Les taux d'incorporation se réfèrent ici au volume physique, et respectent les directives réglementaires de la RED II.

10. Les mix d'intrants considérés sont 50% de colza, 25% de soja, et 25% de palme en 2020 ; et 70% de colza, et 30% de carburants avancés (huiles de cuisson usagée et autre déchets / résidus) en 2030.

11. Même composition d'intrants que dans le cas d'un taux d'incorporation à 6%/8% respectivement.

20% (changement d'affectation des terres inclus) alors que le déploiement à grande échelle d'une utilisation à 100% de biocarburants liquides pose la question d'une adaptation des motorisations et surtout du potentiel de gisement. Toutes ces conclusions sont bien visibles sur la **Figure 17**.

De même, le bioéthanol ne permet de décarboner que légèrement les véhicules essence (non représentés sur la **Figure 17**). Les facteurs d'émissions sont similaires à ceux de l'essence, excepté pour la betterave et pour les biocarburants avancés fondés sur de la paille de blé, mais encore relativement peu disponibles. Là aussi, seule une utilisation massive de bioéthanol, avec par exemple de l'E85, permettrait une diminution notable de l'empreinte carbone (environ -20% à -25%), et cette baisse d'émissions demeure faible par rapport aux motorisations électriques ou avec du biogaz, et est à mettre en regard de la disponibilité de la ressource et de sa compétition avec la production alimentaire et d'autres secteurs (ex : aéronautique).

Changements d'affectation des terres

Pour les biocarburants, les émissions de la combustion sont considérées nulles par convention, car durant sa croissance, la plante absorbe du CO₂ qui sera libéré lors de la combustion. C'est le cycle court naturel du carbone. **Les émissions de GES imputables aux biocarburants se situent donc en amont de l'utilisation** (culture, récolte, transformation, acheminement jusqu'à la pompe) ainsi que les changements d'affectation des terres. En effet, la production d'agrocultures peut par exemple nécessiter de déforester des terres (changement d'affectation **direct**) ou peut remplacer une production alimentaire qui va être déplacée vers des surfaces non cultivées (changement d'affectation **indirect**).

Les émissions liées au changement d'affectation indirect des terres sont **très difficiles à estimer**, car il faut avoir une vision systémique de la situation agricole d'une région et disposer d'une bonne allocation des émissions à chaque étape du cycle de production. Cependant, il est certain qu'elles ne sont pas nulles et ne peuvent être de ce fait négligées. Elles sont ainsi **très élevées pour l'huile de palme** à cause de la déforestation des forêts primaires et la destruction de tourbières en Indonésie et en Malaisie (85% de production mondiale), ainsi que **pour le soja** à cause de la déforestation amazonienne au Brésil et le défrichement de terres en Argentine. Cela explique que les FE de l'huile de palme et du soja soient **2 à 3 fois supérieurs¹² à celui du diesel fossile** (combustion incluse) !

Des fortes incertitudes demeurent sur le niveau absolu des émissions liées au changement d'affectation des terres. Le facteur d'émissions varie ainsi énormément suivant le cas considéré : âge de la plantation (déforestation déjà « amortie » ou non), type de sol (minéral, tourbière), durée d'amortissement du carbone libéré (entre 20 et 30 ans). Néanmoins, l'estimation de ces émissions en ordre de grandeur permet de **bien prendre en compte l'impact climatique de la production de ces cultures** (bien qu'avec du recul), et montre que le potentiel de décarbonation **varie beaucoup selon le type d'intrants** (palme, colza, tournesol, etc.).

Avec l'avènement des **biocarburants de type avancés** (issus de résidus agricoles ou forestiers, et de déchets), **le changement d'affectation des terres n'est plus un problème**, bien qu'il y ait déjà une concurrence des usages sur ces nouvelles ressources (biocarburants liquides, biogaz, production de chaleur renouvelable, etc.).

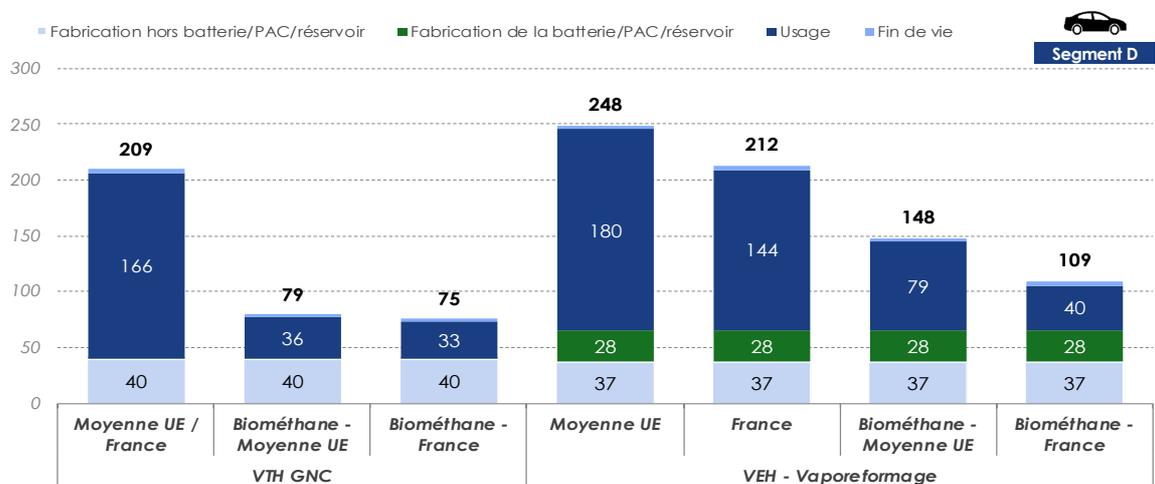
12. Globiom (2015), ICCT (source : GREET 2018, Valin et al. 2015).



Zoom biométhane

La particularité de ce vecteur énergétique est que son utilisation peut s'envisager de deux façons différentes dans la mobilité : soit en tant que carburant gazeux que l'on brûle dans un moteur thermique, soit comme une énergie primaire que l'on peut transformer en hydrogène par vaporeformage.

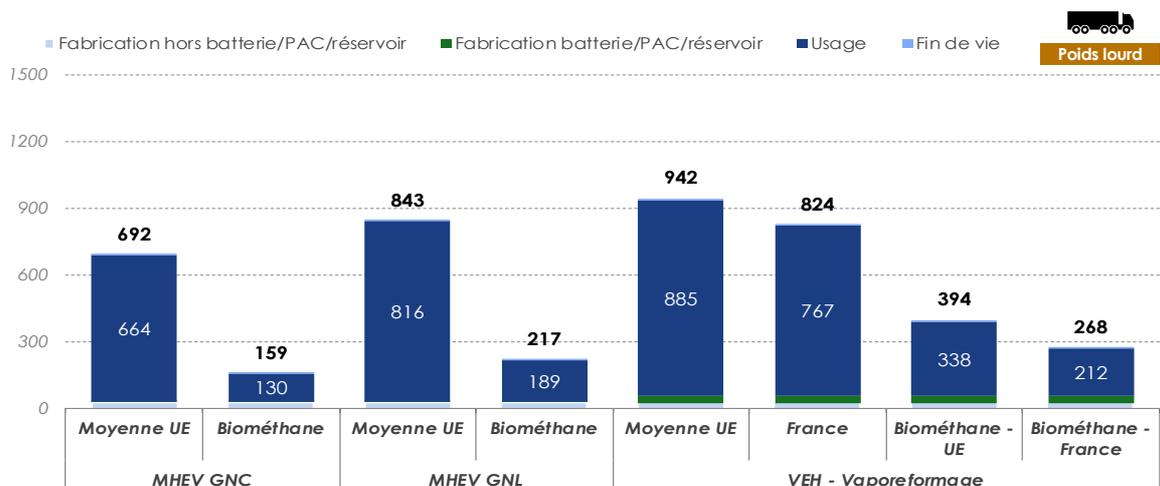
Nous utilisons l'exemple du segment D en 2020 et du tracteur routier en 2030 pour illustrer notre propos. Les **Figures 18 et 19** ci-dessous permettent de tirer quelques enseignements clairs.



Pour un VTH roulant au GNC réseau (4% de biométhane), l'empreinte carbone est quasiment identique pour l'UE et pour la France (variation <1gCO₂e/100km due à la légère différence du facteur d'émissions du biométhane).



Figure 18 – Comparaison de l'empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'un véhicule du segment D vendu en 2020, en France et en Europe | gCO₂e/km



Sources : Analyses Carbone 4



Figure 19 – Comparaison de l'empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'un tracteur routier vendu en 2030, en France et en Europe | gCO₂e/km

Commençons par le gaz naturel fossile : cette solution n'est pas du tout à la hauteur de décarbonation des transports, et ne soutient pas du tout la comparaison avec le biométhane, où que ce soit et quelle que soit la voie énergétique retenue. Pour l'anecdote, on notera que le vaporeformage de gaz naturel en France a une performance carbone similaire à un véhicule roulant au GNV (gaz de réseau, incluant une fraction du biométhane¹³). Mais au niveau européen, mieux vaut utiliser le gaz naturel directement dans un moteur à combustion interne (sous forme de GNV) que pour produire de l'hydrogène qui servirait ensuite à alimenter un VEH : les émissions sont environ 20% supérieures dans ce dernier cas.

S'agissant de la filière biométhane, les calculs révèlent deux conclusions fortes :

1. **en France ou en UE, le bioGNV utilisé dans un véhicule thermique est la solution la moins émissive en cycle de vie,**
2. le vaporeformage de biométhane pour produire de l'hydrogène ne permet pas d'obtenir le même niveau de performance carbone, même en France où les émissions d'usage sont moindres qu'en UE (40 gCO₂e/km en France contre 79 gCO₂e/km en UE pour un véhicule de segment D) du fait du faible FE de l'électricité pour l'étape de compression. Cette solution est surtout pénalisée par les émissions de fabrication des équipements spécifiques au VEH, à savoir PAC et réservoir, inexistantes dans le cas du VTH-bioGNV, et ceci bien que leur empreinte de fabrication diminue de 30% entre 2020 et 2030 dans notre scénario, pour le segment D, le VUL et l'autobus (stable pour le camion).

Y a-t-il des émissions évitées dans le FE du biométhane ?

Dans cette étude, nous n'avons considéré que les émissions induites lors du cycle de vie des énergies, et pas les émissions évitées le cas échéant. Ainsi, nous avons retenu un FE pour le bioGNC en France de 45,1 gCO₂e/kWh¹⁴ (soit -80% par rapport au GNC fossile).

Bien que **les normes et standards de comptabilité carbone (tels que l'ISO ou le GHG Protocol) interdisent clairement d'additionner les émissions évitées aux réductions d'émissions**, certains acteurs agrègent émissions induites et évitées, de sorte que les FE affichés peuvent devenir très faibles, voire négatifs. Or, le concept d'émissions évitées est très éloigné des émissions induites : dans le premier cas, il s'agit d'une différence conventionnelle d'émissions entre deux situations hypothétiques, éventuellement étalée dans le temps, alors qu'il s'agit dans le deuxième cas d'émissions instantanées qui se retrouvent réellement dans l'atmosphère à l'instant T. Pour ces dernières, l'impact sur le changement climatique est direct et avéré. Dans le cas des émissions évitées, le bénéfice attendu sur le climat reste arbitraire et incertain. Des standards internationaux proposent des méthodes d'évaluation de ces émissions évitées, selon les types de projet notamment, afin de leur donner un maximum de robustesse.

Afin de ne pas mélanger les choux et les carottes, notre approche est de comparer

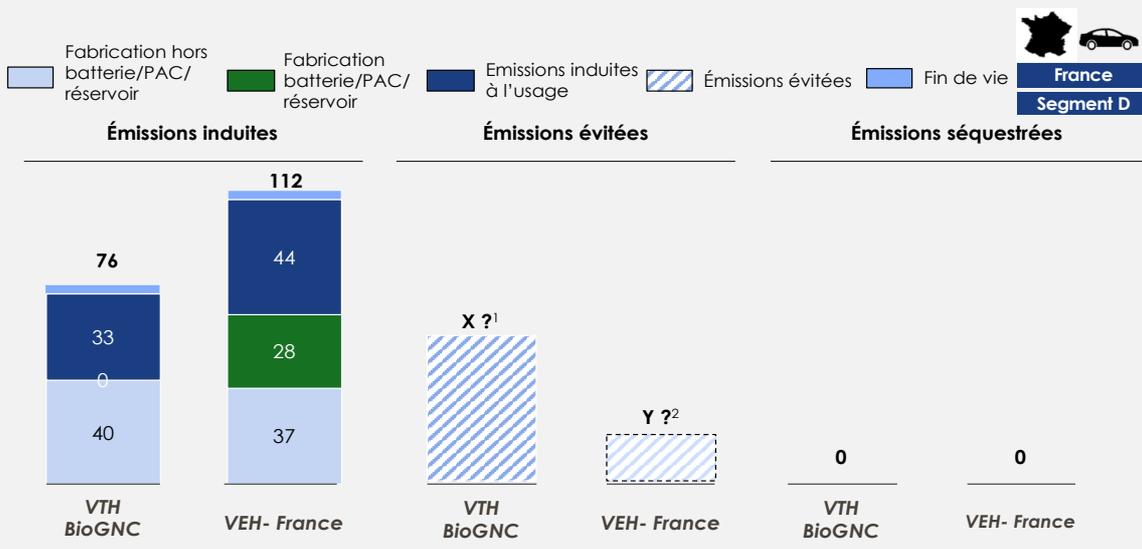
13. Incidemment, un VEH roulant avec du H₂ produit par vaporeformage en France est globalement moins émissif en 2020 qu'un VTH conventionnel (essence ou gazole).

14. Source : Quantis et GRDF, mars 2020, « EVALUATION DES IMPACTS GES DE LA PRODUCTION ET L'INJECTION DU BIOMETHANE DANS LE RESEAU DE GAZ NATUREL – RAPPORT SYNTHETIQUE ».

les énergies entre elles sur la base des émissions induites seulement, car il s'agit de la métrique la plus incontestable. Toutefois, les émissions évitées lorsqu'elles sont démontrées avec un niveau de rigueur suffisant peuvent être évaluées, mais séparément et pas de manière agrégée avec les émissions induites.

Dans le cas du biométhane, la filière de production par méthanisation présente des co-bénéfices qui se traduisent par des émissions évitées au niveau du système de traitement des déchets (en évitant par exemple des émanations de méthane ou de la production d'engrais minéraux), ou au niveau du système agricole (par substitution des engrais chimiques par le digestat). Ces émissions évitées, bien que conventionnelles, traduisent avec un bon niveau de confiance la réalité du terrain. Toutefois, un acteur du transport recourant à du bioGNV français ne peut s'arroger les émissions évitées par la méthanisation dans le système agricole français, même si celles-ci sont bien réelles et participent des bénéfices importants liés à cette pratique agricole.

En résumé, dans une vision holistique de la lutte contre le changement climatique, **les émissions évitées dans les autres secteurs sont un co-bénéfice non applicable sur le facteur d'émissions d'une énergie**, mais tout à fait **valorisable en tant que contribution à la décarbonation** des autres secteurs (cf. le référentiel Net Zero Initiative¹⁵). Autrement dit, les vertus climatiques de la production de biométhane ne peuvent pas toutes être reportées à l'échappement, mais peuvent tout à fait être appréhendées dans l'approche de comptabilité différenciée, représentée schématiquement sur la **Figure 20** ci-dessous.



Notes : (1) la dernière étude Quantis de 2020 ne propose de valeur mise à jour pour les émissions évitées. Dans son étude de 2017 pour GRDF en revanche, le chiffre de 64 gCO₂e/kWh était proposé.
 (2) A moyen terme, l'hydrogène pourra rendre des services de stockage au réseau électrique, limitant le recours aux moyens de production fossiles (TAC notamment). A date, ces services ne sont pas effectifs.



Figure 20 – Tableau de bord de Net Zero Initiative pour visualiser émissions induites, évitées et séquestrées – Segment D vendu en 2020, en France | gCO₂e/km

15. Le **tableau de bord** de la **Net Zero Initiative** permet de **visualiser** et de **valoriser** de manière séparée les émissions **induites**, **évitées** et **séquestrées**. Carbone 4 recommande d'utiliser cette représentation pour **communiquer efficacement, avec rigueur et transparence**.



Zoom hydrogène (et « zéro émissions »)

Le cas de l'hydrogène utilisé dans un VEH est le plus complexe, car il peut être produit de deux manières différentes, et dans des pays aux caractéristiques électriques différentes qui plus est. En outre, le VEH utilise comme le VEB un moteur électrique. C'est pourquoi il nous semble utile de faire ici un zoom sur le VEH, afin de dégager les principaux enseignements relatifs au vecteur hydrogène.

Les **Figures 21 et 22** ci-dessous dressent un panorama large de la situation en 2020 pour les segments D et autobus dits « zéro émission » (à l'échappement), en l'occurrence VEB et VEH.

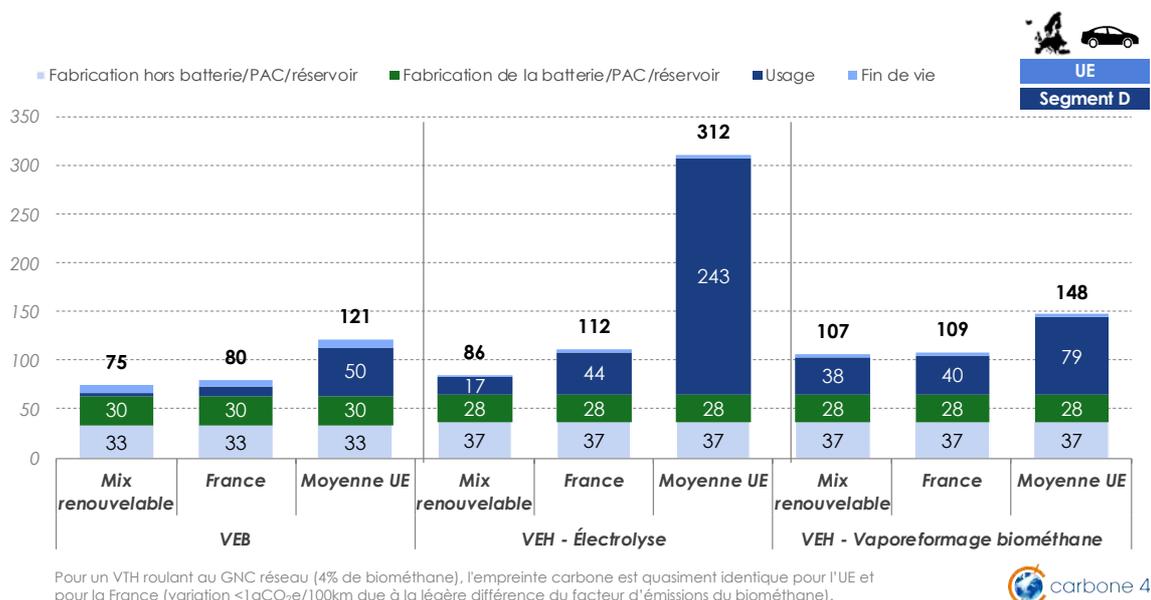


Figure 21 – Comparaison de l'empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'un véhicule de type segment D vendu en 2020, en France et en Europe | gCO₂e/km

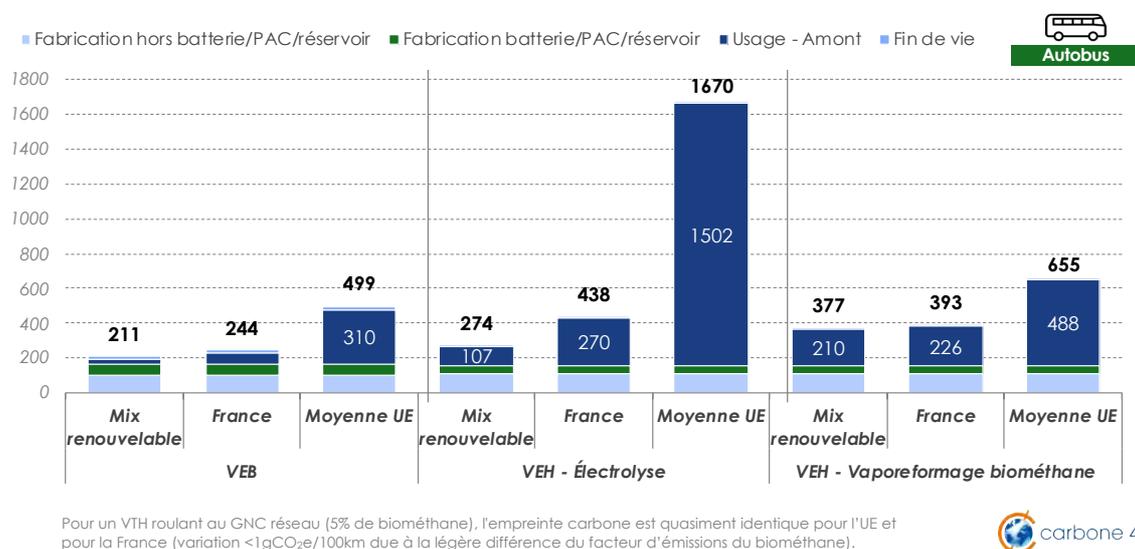


Figure 22 – Comparaison de l'empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d'un autobus vendu en 2020, en France et en Europe | gCO₂e/km

En France, l'électrolyse et le vaporeformage de biométhane conduisent à des empreintes carbone équivalentes pour le VEH, proches de celles du VEB, même si légèrement supérieures (environ 110 gCO₂e/km contre 80 pour un véhicule de segment D).

En dehors des frontières de l'Hexagone, la solution VEH n'est pertinente que si l'électricité alimentant l'électrolyse est bas-carbone (par exemple, issue d'un mix renouvelable). **Produire de l'hydrogène à partir du mix électrique moyen de l'UE est à proscrire** car cela conduit à des émissions en cycle de vie plus élevées que les VTH conventionnels. Mieux vaut dans ce cas produire l'hydrogène par vaporeformage de biométhane, ce qui aboutit à un VEH proche du VEB en termes de performance carbone. N'oublions cependant pas, comme nous l'avons montré plus haut, que l'usage le plus rationnel du biométhane, selon le seul critère des émissions de CO₂, est de le brûler sous forme de bioGNV dans un moteur thermique. Nous reviendrons plus loin sur les autres considérations pouvant intervenir dans le choix des solutions techniques, au-delà du critère carbone.

Concernant les véhicules « zéro émission » dans leur ensemble, si le mix électrique européen moyen disqualifie l'électrolyse et si le vaporeformage de gaz naturel fossile reste très émetteur, les autres possibilités comme **le vaporeformage de biométhane, l'électrolyse peu carbonée et la technologie batterie sont de réelles solutions**. Elles permettent de diviser l'empreinte carbone par 2, voire 3, par rapport au véhicule diesel, et jusqu'à 6 dans le cadre d'un autobus électrique roulant au mix électrique français ou aux énergies renouvelables, ce qui en fait une solution réellement décarbonante.

Comme nous le développons dans un chapitre ultérieur (5), **ces véhicules « zéro émission » présentent de surcroît les avantages de diminuer fortement les nuisances sonores et de ne produire ni NOx ni particules à l'échappement¹⁶**. Ce sont là **des qualités éminemment valorisées en zone dense** qui font des technologies « zéro émission » des solutions d'autant plus à privilégier pour les véhicules amenés à circuler régulièrement en milieu urbain.

16. Des particules sont cependant produites par l'abrasion des freins, l'usure des pneus et potentiellement lors de la production d'électricité et du vaporeformage.

4

Scénarios alternatifs



Approche

Le scénario central d'évolution des hypothèses est celui que nous avons jugé le plus plausible, compte-tenu des sources rassemblées pour ces travaux. C'est pourquoi l'ensemble des résultats commentés auparavant s'inscrit dans le cadre de ce scénario.

Toutefois, **il nous paraît utile pour éclairer les orientations de demain de décrire d'autres scénarios envisageables, bien que moins alignés avec les tendances observées.** Naturellement, ces scénarios peuvent paraître irréalistes à certains, mais nous avons fait en sorte qu'**ils ne s'appuient sur aucune rupture technologique.** De ce fait, leur niveau de réalisme n'a d'égal que la capacité des régulateurs, industriels et utilisateurs à modifier les tendances actuelles, en prenant des décisions à leur portée.

Cette démarche permet aussi de répondre à certaines questions récurrentes, afin de nourrir le débat sur l'évolution des technologies, réglementations et comportements. Ainsi, nous avons construit les deux scénarios alternatifs suivants pour les véhicules particuliers :

- ✓ **n°1 : scénario « thermal-friendly »**, pour pousser les possibilités des VTH dans leurs retranchements, tout en se montrant plus conservateurs sur les bénéfices climat des VEB. Pour ce faire, les taux d'incorporation de biocarburants liquides avancés sont relevés, l'efficacité énergétique globale du véhicule est augmentée, son poids est légèrement réduit. En outre, la décarbonation progressive du mix électrique est plus lente que dans le scénario central et la course à l'augmentation de capacité des batteries s'amplifie. **Ce scénario permet ainsi de vérifier si une inversion de hiérarchie peut s'opérer entre des VTH ultra-performants et des VEB moins performants.** Et si oui, à quelles conditions.
- ✓ **n°2 : scénario « sobriété »**, pour mesurer **quelles réductions d'émissions peuvent être attendues des véhicules routiers de demain** (quelle que soit leur énergie), **en supposant que des pratiques de sobriété se mettent en place**, depuis la conception jusqu'à l'usage. Ceci dans un contexte où le secteur du transport doit viser la décarbonation quasi-complète en 2050, en France et en Europe. Pour ce faire, la masse moyenne des véhicules est ramenée à celle du début des années 2000 (soit environ -25%, via des gains sur la conception même et grâce à de la substitution par des matériaux plus légers), la capacité des batteries diminue

légèrement de manière maintenir une autonomie des véhicules électriques constante (grâce à l'amélioration des performances du véhicule) et la durée de vie des véhicules est prolongée.

Les jeux d'hypothèses associés sont résumés dans le **Tableau 9** ci-dessous, en précisant comment ils s'écartent du scénario central (par défaut, tout ce qui ne figure pas dans ce tableau est considéré invariant par rapport au scénario central).

Catégorie	Paramètre	Scénario central	Variantes		
			Thermal-friendly	Sobriété	
Énergies	Électricité	FE réseau	Scénario normal	Scénario conservateur (-20% par rapport aux objectifs de décarbonation des plans nationaux)	Pas de changements vs scénario central
	Biocarburants liquides	Taux d'incorporation éthanol en 2035 (énergie PCI)	Conventionnel : 7% Avancé : 2,5%	Conventionnel : 7% Avancé : 5,0%	Pas de changements vs scénario central
		Taux d'incorporation biodiesel en 2035 (énergie PCI)	Conventionnel : 4,9% Avancé : 2,5%	Conventionnel : 5,9% Avancé : 5,0%	Pas de changements vs scénario central
Véhicules	Poids	Masse carcasse	Hypothèses validées	-5% vs 2020, avec matériaux substitution (50% alu, 50% plastique)	-25% vs 2020 (masse moyenne des voitures en 2000) (25% gains design, 75% gains substitution matériaux)
	Autonomie	Capacité batterie (VEB/VEH)	Hypothèses validées	+20% capacité batterie/réservoir en 2030	Autonomie maintenue entre 2020 et 2030
	Consommation	Amélioration technologiques	-25% en 2030 vs 2020 (-17% hybridation, -8% perf véhicule hors hybridation)	-30% en 2030 vs 2020 (-20% hybridation, -10% perf véhicule hors hybridation)	Pas de changements vs scénario central
		Gains allègement véhicules	/	Évolution déduite de la variation de poids de chaque véhicule	Évolution déduite de la variation de poids de chaque véhicule
	Kilométrage	Durée de vie	12 ans	Pas de changements vs scénario central	15 ans



Tableau 9 – Hypothèses des scénarios alternatifs différant du scénario central



Segment B

La comparaison des résultats du scénario central avec ceux des deux scénarios alternatifs, sur le segment B, apporte des premiers éléments éclairants. C'est ce que révèle la **Figure 23** ci-après. De fait, deux conclusions fortes se dégagent, en réponse aux questions posées précédemment :

- ✓ **en prenant des hypothèses très favorables au VTH, et en dégradant dans le même temps la performance carbone du VEB, la hiérarchie en cycle de vie ne change pas.** Même avec un mix électrique européen plus carboné que celui de la France, le VEB sera à l'avenir bien moins émissif qu'un VTH, même ultra-performant (-30% dans le scénario « thermal-friendly »).
- ✓ **la meilleure prise en compte des enjeux de sobriété** (allègement pour revenir au standard du début des années 2000, arrêt de la course à l'augmentation de capacité des batteries, durée de vie prolongée) **peut générer des gains très significatifs**, quelle que soit la technologie : -24% sur le VTH et -20% sur le VEB entre le scénario central et le scénario « sobriété ». Compte-tenu de l'ambition très forte des pouvoirs publics sur la décarbonation du secteur à l'horizon 2050, **c'est sans aucun doute un levier dont nous ne pourrions pas nous passer.** Reste désormais à déterminer de quelle manière cela peut se mettre en œuvre progressivement.

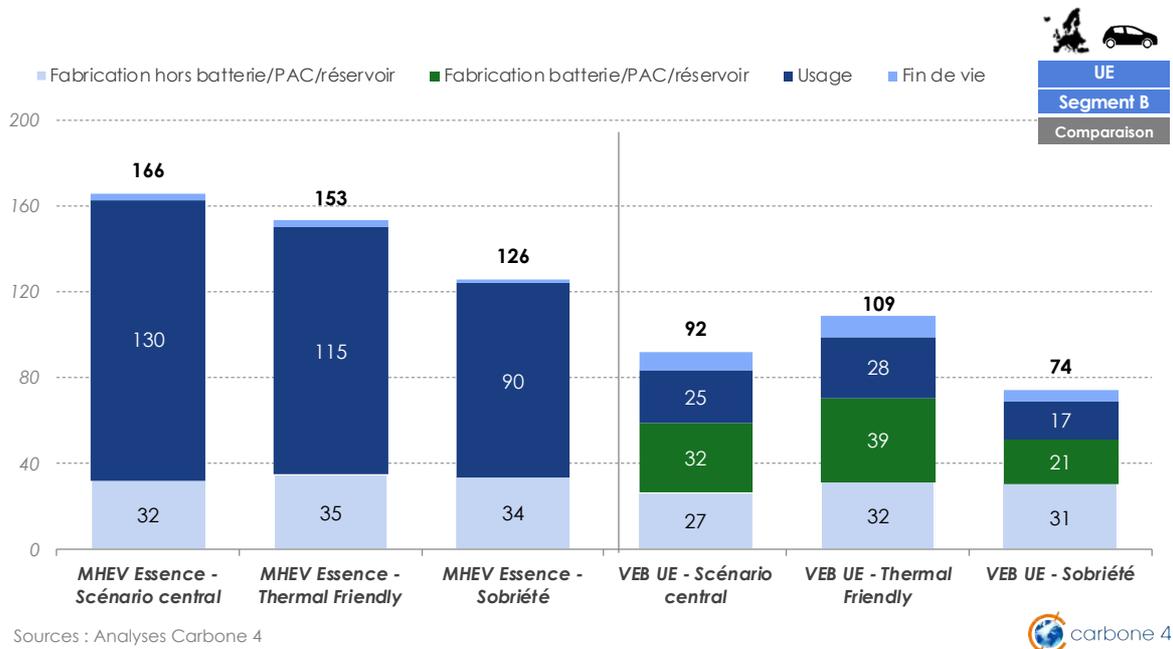


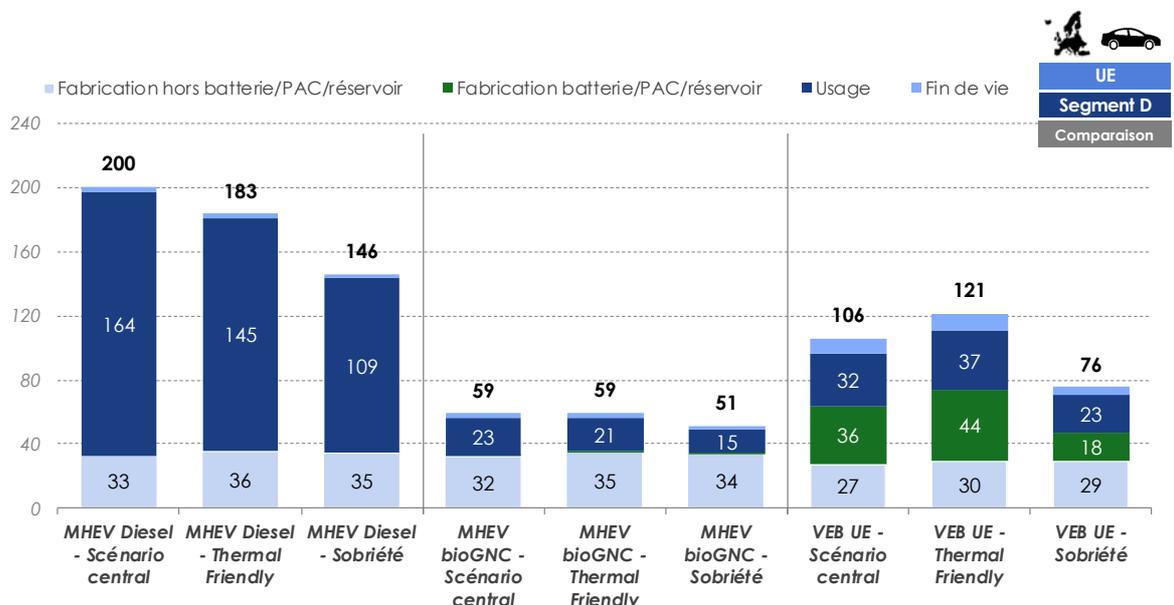
Figure 23 – Comparaison de l’empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d’un véhicule de type segment B vendu en 2030 en Europe | gCO₂e/km



Segment D

Reproduire cet exercice sur le segment D permet de compléter ces conclusions sur un panel de motorisations plus large. Les enseignements sont les mêmes, sans surprise, puisque les mécanismes à l'œuvre sont identiques. C'est ce que montre la **Figure 24** ci-dessous :

- ✓ sur le scénario « thermal-friendly », le VEB reste bien moins émissif que le VTH (de l'ordre de -34% en moyenne UE, et -50% pour la France¹⁷), malgré une réduction de l'ordre de 10% des émissions du VTH par rapport au scénario central.
- ✓ sur le scénario « sobriété », la conclusion la plus intéressante porte sur les gains potentiels obtenus, aussi bien pour le VTH (-27%) que pour le VEB (-28%), par rapport au scénario central. **Ces réductions très significatives plaident de manière très forte pour un renversement de certaines tendances actuelles** (telles que la prise de poids ininterrompue depuis 40 ans ou la fin de la course à l'augmentation de capacité des batteries). Les conditions de succès de cette inversion restent toutefois à définir : **l'intransigeance des pouvoirs publics, la prise de conscience des utilisateurs, le volontarisme des constructeurs seront des piliers incontournables**. A noter que nulle révolution technologique n'est nécessaire pour cela.



Sources : Analyses Carbone 4



Figure 24 – Comparaison de l’empreinte carbone moyenne sur la durée de vie d’un véhicule de type segment D vendu en 2030 en Europe | gCO₂e/km

17. Non visible sur le graphique.

5

Vision synthétique : il n'y a pas que les émissions de GES !

Si la lutte contre le changement climatique est clairement une priorité pour nos sociétés, les arbitrages entre les technologies ne peuvent être faits sur le seul critère des émissions de GES. Ce dernier est à l'évidence primordial et, selon les travaux qui figurent dans les pages précédentes, il ne serait pas crédible de continuer à encourager la production de véhicules thermiques pour décarboner le transport routier. En revanche, de l'ensemble des alternatives, il n'est pas simple de décréter quelle solution est meilleure et doit être privilégiée au détriment des autres. Pour ce faire, **il faut sortir de la vision purement carbone et raisonner dans le cadre d'une approche systémique qui permet d'embrasser plus largement les forces et les faiblesses de chaque solution technologique.** En effet, pour parvenir à décarboner le plus rapidement possible le secteur, nous faisons face à un problème de dynamique qui met en jeu notre capacité à mettre en œuvre plus ou moins vite et à généraliser plus ou moins largement les diverses solutions alternatives. Pour appréhender cela, le critère des émissions de GES ne suffit plus et il est nécessaire de considérer les enjeux environnementaux (autres que le changement climatique), de ressources, d'infrastructures, de concurrence des usages, d'acceptation et bien sûr de coûts.

Le **Tableau 10** ci-dessous dresse un rapide panorama de ces enjeux pour les différentes technologies alternatives au VTH.

Vecteur énergétique	Facteurs en faveur	Facteurs en défaveur
Électricité	<ul style="list-style-type: none"> • Contribution au pilotage du réseau (2^{ème} vie sous forme de batteries stationnaires, V2G) • Peu d'impact sur les capacités de production électrique • Co-bénéfiques sur le bruit et la pollution de l'air 	<ul style="list-style-type: none"> • Batterie : pression importante sur certaines ressources minérales (lithium, cobalt,...), dont l'extraction peut poser des problèmes socio-environnementaux • Batterie : Filière de recyclage embryonnaire • Temps de recharge et autonomie parfois contraignants • Impacts locaux éventuels sur les réseaux
Biométhane	<ul style="list-style-type: none"> • Externalités positives grâce aux émissions évitées sur les filières agricoles et de traitement de déchets • Plein de bioGNC rapide 	<ul style="list-style-type: none"> • Estimations très variables du gisement accessible de biométhane en France / UE • Concurrence forte avec des usages peut-être plus pertinents (industrie, bâtiment) • Coût du biométhane élevé (~90€/MWh, 4x supérieur au gaz naturel)
Hydrogène vert	<ul style="list-style-type: none"> • Plein de H₂ rapide • Gestion de l'intermittence des ENR • Co-bénéfiques sur le bruit et la pollution de l'air 	<ul style="list-style-type: none"> • Concurrence avec des usages peut-être plus pertinents économiquement (industrie) • Coût de l'hydrogène assez élevé • Offre et infrastructures encore embryonnaires

Sources : Analyses Carbone 4



Tableau 10 – Principaux avantages et inconvénients autre que l'empreinte carbone pour chaque vecteur énergétique appliqué au transport

Biométhane : très bas-carbone mais quid de sa disponibilité réelle pour le transport ?

Nos calculs ont confirmé que **le biométhane (sous forme de bioGNV) est une excellente piste pour décarboner le transport**. Par ailleurs, le procédé de méthanisation qui permet de produire l'essentiel du biométhane aujourd'hui (et pour encore de nombreuses années) présente des co-bénéfices environnementaux supplémentaires, notamment via des émissions de GES évitées dans les filières agricole et de traitement des déchets. A son débit cependant, **l'utilisation de bioGNV pour le transport ne se montre pas aussi efficace que les VEB ou VEH pour réduire la pollution de l'air ou le bruit en zone dense**.

Le gros point d'interrogation concernant le biométhane porte sur sa disponibilité réelle à grande échelle pour le transport. L'encart ci-après dresse un panorama du potentiel vu par différents acteurs, ce qui permet de caractériser le champ des possibles. Notre approche très conservatrice démontre ainsi que **24% des poids lourds au mieux pourraient rouler avec 100% de bioGNV en France en 2050**.

Que l'on soit cependant optimiste ou pessimiste sur notre capacité à développer cette filière au bon rythme en Europe en particulier, le fait que ce gaz sera toujours réclamé pour d'autres usages ne changera pas. En effet, il est nécessaire de décarboner toute l'économie (comme par exemple l'industrie ou le résidentiel / tertiaire) : pour de nombreux secteurs, le biogaz constitue une solution de substitution toute trouvée au gaz naturel fossile. **Il existe ainsi de facto une concurrence forte sur les usages potentiels du biométhane**. Une analyse plus fine de la pertinence des usages du gaz doit être faite pour mieux comprendre là où sa valeur ajoutée climato-économique est la plus élevée (sachant que sans ce type d'analyse, les acteurs des différents secteurs consommateurs de gaz, comme l'industrie ou le transport, auront tous beau jeu de crier haut et fort que la biogaz doit avant tout leur être réservé, pour tout un tas de « bonnes » raisons).

Un avantage apparemment fort de la filière gaz est que **les réseaux de transport et de distribution sont déjà en place**, ce qui limite la question des infrastructures d'avitaillement. **Cela ne pose ni de grandes difficultés de mise en œuvre, ni n'induit un coût élevé**. Néanmoins, cet avantage apparent peut aussi être vu comme un risque pour le climat : en effet, tant que le biogaz ne se substituera pas au gaz naturel fossile dans des proportions significatives, les utilisateurs de VTH-GNV brûleront avant tout du GNV carboné, ce qui ne permettra absolument pas de réduire les émissions de GES dans les bonnes proportions. Pis, **dans l'hypothèse où le potentiel de biométhane se révèle dans la fourchette basse des estimations, le développement accéléré de la mobilité gaz pourrait surtout conduire à verrouiller les émissions de GES du transport sur une à deux décades, via du gaz naturel essentiellement fossile**, avant de réorienter le cas échéant les politiques publiques et industrielles vers une autre technologie.

Biométhane : quel potentiel pour la mobilité ?

S'agissant de la France, **il existe une très grande disparité d'estimation des gisements de biogaz, ainsi que de la capacité à les mobiliser.** La **Figure 25** dresse un panorama de quelques travaux de référence récents, sur le sujet.

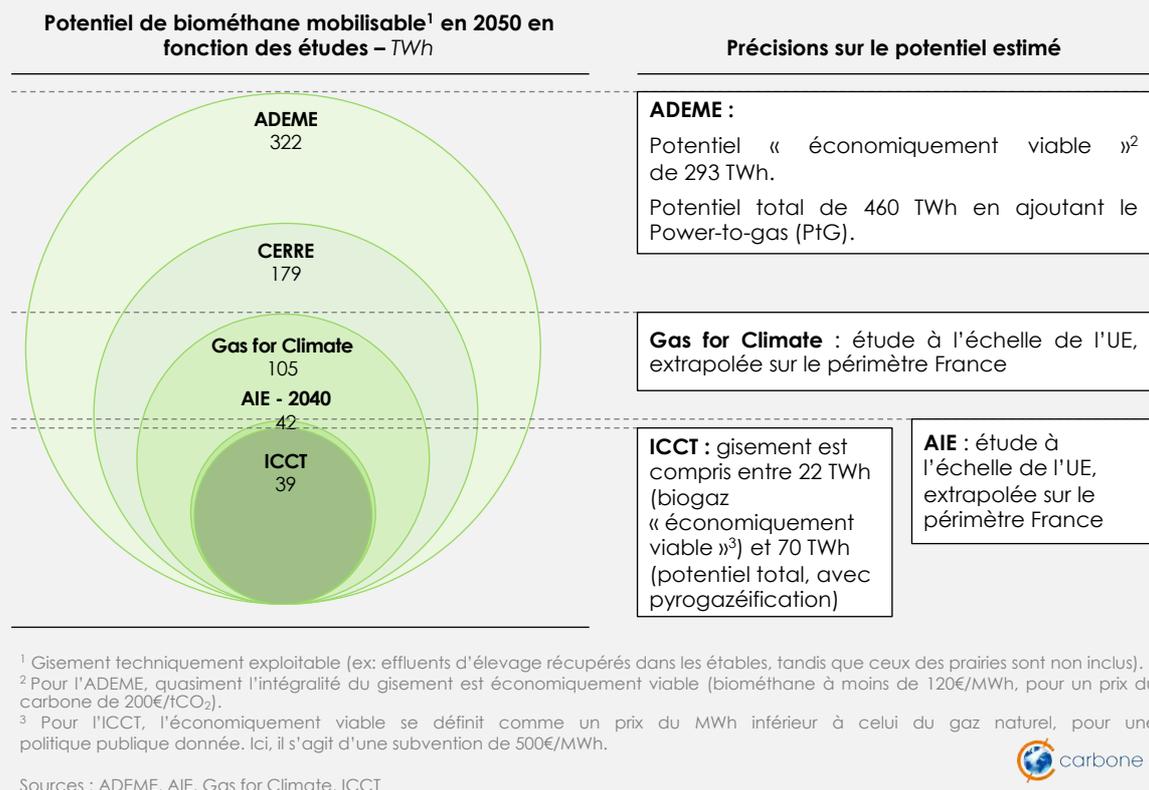


Figure 25 – Potentiel du biométhane mobilisable en France en 2050

Pour des raisons méthodologiques, il n'est pas surprenant de retrouver l'estimation de l'ADEME en tête avec un potentiel mobilisable de 322 TWh en 2050. En effet, l'approche consiste dans ce cas à trouver le prix auquel les gisements dont la SNBC¹⁸ a besoin dans ses scénarios 2050 deviennent accessibles. Elle prend en compte les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE), malgré la concurrence potentielle avec d'autres usages comme l'alimentation ou les biocarburants. Les hypothèses sont très optimistes, que ce soit sur la faisabilité pratique des solutions envisagées, sur le passage à grande échelle de quelques projets pilotes ou encore sur les coûts de déploiement des technologies.

A l'inverse, l'estimation de l'ICCT est radicalement différente (39 TWh de potentiel mobilisable en 2050) car cette étude est principalement une revue critique des hypothèses de l'ADEME (et de Gas for Climate) sur les gisements de la filière bois et des CIVE (sur l'aspect concurrence entre les usages et coût des technologies), leur déploiement industriel, les politiques publiques mises en place et la mobilisation des gisements envisagés. Cette étude se veut ainsi très conservatrice sur le potentiel de biogaz réellement mobilisable.

18. SNBC : Stratégie Nationale Bas Carbone

Les travaux de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) ont été extrapolés pour évaluer le potentiel de la France, à partir du potentiel de l'UE. Sans remettre en question nommément d'autres travaux, comme peut le faire l'ICCT, l'AIE arrive néanmoins à peu près aux mêmes conclusions. A noter que les auteurs ne prennent pas en compte les technologies qui n'ont pas prouvé leur efficacité aujourd'hui, excepté la pyrogazéification. Le Power-to-Gas n'est ainsi pas considéré dans le champ de l'étude et c'est pourquoi nous l'avons aussi retiré des données, dans les autres sources. Enfin, les cultures intermédiaires ne sont pas prises en compte par l'AIE qui ne les considère pas comme « durables ».

Les autres travaux de Gas for Climate et du Centre on Regulation in Europe (CERRE) aboutissent à des estimations intermédiaires, en s'appuyant toutes deux sur une approche bottom-up permettant de reconstituer les gisements existants en partant de ce qui est physiquement accessible. Les deux études sont plus optimistes dans leurs hypothèses que l'AIE, notamment sur la possibilité de mobiliser les CIVE à l'échelle de l'Europe ou le potentiel de pyrogazéification du bois.

A noter que **ces écarts observés pour la France se vérifient aussi au niveau européen**, en comparant les 4 études CERRE, Gas for Climate, AIE et ICCT.

Le champ des possibles apparaît ainsi relativement vaste pour la production de biométhane à l'horizon 2050. Pour mieux cadrer les implications de cette disponibilité incertaine pour le transport, nous avons traduit en termes comptables ce que l'objectif SNBC sur le gaz renouvelable dans le transport signifiait en matière d'approvisionnement de la flotte de véhicules roulant au bioGNV, à l'horizon 2050. Pour cela, nous avons pris des hypothèses favorables au bioGNV afin d'estimer la borne haute :

- ✓ les 40 TWh¹⁹ de gaz renouvelable de la SNBC 2050 pour le transport sont disponibles sous forme de biométhane seul
- ✓ l'ensemble du biométhane est affecté aux poids lourds, dont le parc est supposé stable par rapport à aujourd'hui (en nombre de véhicules)

Le **Tableau 11** ci-dessous résume notre approche analytique.

France - vision 2050		Commentaires
Demande SNBC	40 TWh	<ul style="list-style-type: none"> • Obj : 200-300 TWh de gaz renouvelable (biométhane et hydrogène) en 2050, dont 40 TWh attribué au transport • Hypothèse optimiste : l'ensemble du gaz renouvelable dans les transports est du biométhane
Conso moyenne d'un autobus / PL	306 700 kWh/an	<ul style="list-style-type: none"> • Reprise des consommations et kilométrage du modèle pour véhicules produit en 2030
Nombre de véhicules au bioGNV	130 000	<ul style="list-style-type: none"> • Parc français de véhicules au GNV constitué uniquement d'autobus et de PL
Part du parc de véhicules routiers	12%	<ul style="list-style-type: none"> • Hypothèse d'un parc de véhicules routiers stable à 1 M d'autobus/PL

Sources : SNBC, MTEs, gaz-mobilité.fr



Tableau 11 – Estimation de la part potentielle de tracteurs routiers français roulant au biométhane en 2050

19. Cela représenterait 20% des 200 TWh du total de la production 2050 de biogaz. A comparer aux 2 TWh produits approximativement en France en 2019.

Dans cette configuration favorable, **la proportion de poids lourds pouvant rouler avec 100% de bioGNV en 2050 est de l'ordre de 12% des poids lourds (y compris les autobus)**, ce qui serait assez minoritaire.

En doublant la quantité de biométhane disponible pour le transport²⁰ passant de 40 à 80 TWh), on arriverait alors à **une valeur haute de 24% des poids lourds pouvant rouler avec 100% de bioGNV en France en 2050.**

Nos calculs d'émissions de GES en cycle de vie ont démontré la pertinence de ce vecteur énergétique pour décarboner le transport, mais du fait de cette limitation intrinsèque de potentiel, **il apparaît clairement que cette technologie doit être vue comme un complément à l'électrification (batteries ou hydrogène), même pour la mobilité lourde.**

Cette approche reproduite sur l'UE conduit à des résultats tout à fait similaires. En effet, selon le CERRE par exemple, le potentiel de production de biogaz à l'échelle de l'UE-28 est environ 7 fois supérieur à celui de la France. Comme par ailleurs, la comparaison des tailles de parcs conduit à un rapport 8 sur les VP et 6 sur les PL (d'après données URF 2019), la conclusion précédente valable pour la France l'est aussi pour l'UE : **environ 1/4 des poids lourds européens au mieux pourra rouler avec 100% de bioGNV en 2050, 1/10 étant sans doute plus réaliste.**

20. Soit parce que la production totale est plus forte qu'anticipée (plus proche des 300 TWh que de 200 TWh), soit parce que la part réservée au transport est augmentée (par ex. 40% des 200 TWh, au lieu des 20% prévus aujourd'hui).

Hydrogène : des atouts nombreux, à orienter prioritairement ailleurs que vers la mobilité ?

L'utilisation de l'hydrogène pour le transport est très en vogue, à tout le moins dans les discours. Le fait qu'il permette **une mobilité « zéro émission » (à l'échappement), sans pollution locale, sans bruit, et surtout sans les contraintes de temps de recharge et de foncier posées par la technologie des batteries, le rend particulièrement séduisant**. Autant de vertus qui le rendent d'une certaine manière incontournable dans le paysage d'une Europe décarbonée en 2050.

Pourtant, tout comme le biogaz, et même si cela ne tient pas le haut de l'affiche, **il semble bien que les usages les plus pertinents de l'hydrogène bas-carbone se trouvent non pas dans le transport, mais dans l'industrie lourde** (comme la sidérurgie, le raffinage) **ou la pétrochimie** (pour la production de l'ammoniac des engrais). L'Allemagne ne s'y est pas trompée, qui va consacrer 60% des 9 milliards d'investissement de son Plan Hydrogène en dehors de la mobilité.

Comme l'économie de l'hydrogène n'en est qu'à ses balbutiements, il y a là **un enjeu stratégique majeur qui est de savoir comment utiliser au mieux une molécule très versatile dans ses applications, mais en quantité limitée pendant encore longtemps** (du moins relativement à la quantité d'électricité disponible, en particulier pour la mobilité). Les infrastructures n'existent qu'à petite échelle et si les projets de développement sont de plus en plus nombreux du côté de l'offre d'hydrogène « vert » notamment, la question du transport, de la distribution et de l'avitaillement n'est encore qu'embryonnaire. Les acteurs publics et industriels ont raison d'investir dans cette filière d'avenir, mais sachant qu'au moins deux alternatives moins carbonées existent pour la mobilité (VTH-bioGNV et VEB, comme les résultats de ces travaux le montrent), ils doivent se saisir de la question de la concurrence des usages en orientant l'utilisation de l'hydrogène plutôt vers les usages autres que le transport, à moyen terme. Une nuance toutefois : **une partie des transports lourds** (de personnes ou de marchandises), surtout ceux pratiquant la longue distance et demandant des taux d'utilisation élevés, **peuvent représenter un débouché judicieux car (i) l'alternative par batteries y trouve ses limites** (perte de chargement utile²¹, contraintes opérationnelles) **et (ii) le bioGNV ne sera peut-être pas produit en quantité suffisante pour ces besoins**.

Favoriser le développement de la mobilité hydrogène à court-terme au détriment de ses alternatives obligerait à alimenter les VTH avec un hydrogène carboné (car obtenu par vaporeformage de méthane ou électrolyse d'un mix électrique pas assez bas-carbone) : ça serait là aussi **prendre le risque de verrouiller les émissions de GES du transport à un niveau élevé pendant de longues années**, ce que nous ne pouvons nous permettre. **A plus long-terme**, sous l'impulsion de la demande de l'industrie lourde justement, quand la filière se sera structurée, que les infrastructures de production d'hydrogène « vert »²² seront en quantité suffisante, que les coûts auront baissé suffisamment côté molécule, alors **les VEH aussi pourront trouver toute leur place dans la mobilité bas-carbone**, pour compléter l'offre VEB et VTH-bioGNV, principalement pour les PL. C'est ainsi beaucoup une question temporelle.

21. Espace insuffisant dans le châssis d'un camion de type tracteur longue distance.

22. On peut éventuellement adjoindre à l'électrolyse faite à partir d'électricité bas-carbone la production d'hydrogène par vaporeformage avec capture et séquestration du CO₂.

Batteries : ses limites ne pourront pas lui faire jouer tous les rôles

Les analyses menées dans le cadre de cette étude ont montré qu'à l'exception du VTH-bioGNV, l'empreinte carbone en cycle de vie des VEB est toujours la plus faible, quel que soit le type de véhicule²³.

Les autres facteurs plaçant en faveur de l'électrification du transport routier via les batteries sont nombreux : réduction importante du bruit, élimination quasi-totale de la pollution locale de l'air, maturité technologique et industrielle, offre constructeur (bientôt) pléthorique, etc. De surcroît, dans les prochaines années, les avancées technologiques sur les véhicules et les compteurs vont permettre de déployer des solutions Vehicle-to-Grid, visant à rendre des services au réseau en pilotant mieux l'offre et la demande, avec à la clé (en théorie) des réductions de coût pour l'utilisateur. De même, l'utilisation stationnaire en seconde vie des batteries ayant beaucoup servi pour la mobilité va se multiplier, là aussi pour rendre des services énergétiques à l'utilisateur et au réseau.

Aurait-on ainsi affaire à la solution idéale ? Le VEB est-il un choix stratégique sans regret, face aux enjeux de transition bas-carbone ? La réponse est négative ...

En effet, la généralisation du VEB à l'échelle du parc actuel des véhicules se heurterait de manière très forte à la disponibilité des métaux rentrant dans la composition des batteries. Si l'inquiétude n'est pas de mise sur le nickel ou le manganèse, la situation est en revanche plus préoccupante sur le lithium et surtout le cobalt. A l'horizon de 5-10 ans, la mise en exploitation de nouvelles ressources semble réalisable mais au-delà, les perspectives sont bien plus incertaines, surtout dans un postulat de croissance très forte de la demande en batteries et d'autant plus si les conditions d'extraction se durcissent pour réduire les impacts miniers. La réduction de la place du cobalt dans la chimie des batteries, la systématisation du recyclage des cellules en fin de vie (la filière est embryonnaire, mais se structure en Europe par exemple) sont des réponses à même d'atténuer ce risque, mais de là à penser que la production de plusieurs centaines de millions de VEB dans le monde est envisageable en 10 ou 20 ans²⁴, cela reste un pari. Il y a donc là à notre sens une faiblesse inhérente à l'électromobilité par batteries, mais qui peut être modulée d'au moins deux manières :

- ✓ en cessant la course à l'augmentation de taille des batteries : disposer de 2 batteries de 50 kWh, plutôt que d'une seule batterie de 100 kWh, permet de mettre 2 VEB sur la route au lieu d'1...
- ✓ en optimisant la taille du parc des véhicules légers, grâce au renforcement des politiques publiques pour mieux remplir les véhicules particuliers (pas qu'électriques) : pour satisfaire le même besoin de mobilité, c'est-à-dire les mêmes flux en voyageurs.km, on aurait besoin de moins de veh.km, et donc de moins de véhicules tout court...

Généraliser le VEB au détriment d'autres solutions pourrait aussi conduire à des problématiques d'équilibre du réseau électrique à une échelle locale, à cause d'appels de puissance importants à des moments où celui-ci serait déjà fortement sollicité. Par exemple en France, RTE²⁵ a démontré que le réseau électrique national pouvait absorber sans difficulté des taux de pénétration très importants de VEB, mais

23. Le VEH-100% ENR fait parfois jeu égal, voire un peu mieux selon le type de véhicule.

24. Aujourd'hui, le monde compte un peu plus d'un milliard de véhicules, tous types confondus.

25. RTE, « Enjeux de développement de l'électromobilité pour le système électrique », mai 2019.

n'a pas exclu que cela pourrait conduire à des situations certes rares, mais critiques, dans certaines zones où le réseau est moins résilient qu'ailleurs, si ce dernier n'est pas renforcé localement.

Restent les questions des coûts et de l'expérience utilisateur : le coût d'acquisition constitue encore aujourd'hui un frein important pour nombre d'automobilistes tentés par l'électromobilité, mais il va s'effacer progressivement dans les toutes prochaines années, avec la baisse continue des coûts industriels. D'ores et déjà, l'acquisition via des solutions de leasing permet de lisser l'investissement sur plusieurs années, comme un crédit classique, avec des loyers mensuels proches des versions thermiques.

En revanche, **l'adoption large du VEB se heurte à un obstacle classique, celui de l'autonomie kilométrique. Basculer sur la mobilité électrique ne peut ainsi s'envisager pour beaucoup d'automobilistes que s'il est possible de conserver les mêmes usages** de « couteau suisse » avec une voiture électrique qu'avec une voiture thermique. En pratique aujourd'hui, pour les usagers de la route, réaliser un trajet longue distance est ainsi ce qui s'avère le plus contraignant avec la mobilité électrique, bien que cela ne représente pour l'essentiel d'entre eux qu'une faible fraction de leurs déplacements, mais avec un poids symbolique fort, car rattaché par exemple aux départs en vacances. Il y a là un enjeu d'expérience utilisateur crucial pour la démocratisation du véhicule électrique : trouver un point de charge libre, attendre le temps d'effectuer la recharge, etc. Pour rendre le VEB perpétuellement disponible et rechargeable en quelques minutes, les services de recharge sur bornes devraient donc être monnayés au prix fort (bornes rapides voire ultra-rapides, en grand nombre, avec une problématique de foncier disponible et de renforcement du réseau électrique) et les véhicules eux-mêmes seraient plus chers (plus grosses batteries, chargeurs compatibles avec les très fortes puissances), tout cela au détriment de la diffusion de l'électromobilité. On peut bien entendu parier sur une évolution progressive des comportements des automobilistes qui accepteraient de passer davantage de temps sur la route (pour les recharges), au profit de la réduction leur empreinte environnementale, limitant *de facto* la fuite en avant décrite précédemment. Mais il est serait utopique d'imaginer que cela puisse se généraliser à moyen-terme dans les mentalités ...

On comprend donc bien que le tout-batteries trouve ses limites, même dans le cas des véhicules particuliers. Ni le bioGNV, ni l'hydrogène ne se retrouveront confrontés à ce type de contraintes et **l'offre de véhicules alternatifs devra en fait forcément être plurielle pour répondre aux différents usages**, même si le VEB pourra en couvrir la grande majorité.

Conclusion

Sur la base des hypothèses du scénario central, qui nous semble le plus probable pour les deux décennies à venir, **nos analyses démontrent clairement que les technologies « électrification par batteries » (VEB) et « bioGNV » (VTH-bioGNV) tiennent le haut du pavé en termes de réduction d'empreinte carbone** en cycle de vie, quels que soient les véhicules considérés.

On obtient ainsi pour un VP vendu en 2020 en France, et roulant jusqu'en 2031, de l'ordre de -65 à -70% sur les émissions de CO_2eq . Ces bénéfices sont encore plus marqués pour les véhicules lourds, utilisés de manière plus intensive (autobus, tracteurs routiers), ce qui est favorable à l'électrification : on obtient des réductions d'environ -75 à -85% . Ces gains spectaculaires sont notamment permis par la conjugaison de 2 facteurs :

- ✓ les émissions à l'usage très faibles, du fait du mix électrique peu carboné de la France
- ✓ les émissions de fabrication des équipements spécifiques comme les batteries qui ont baissé de manière marquée ces dernières années, et vont poursuivre sur cette tendance dans le futur (du fait des gains d'efficacité industrielle et de la baisse des FE de l'électricité des process)

A noter qu'en dehors de l'Hexagone, qu'on ait affaire à un VP, un VUL ou un autobus, **un VEB vendu aujourd'hui en Allemagne, voire en Pologne, reste moins émissif qu'un VTH comparable**. Les VTH-bioGNV voient leur performance carbone peu varier d'un pays à l'autre, et restent ainsi les moins émissifs en règle générale.

Même dans un scénario favorable au véhicule thermique, dans lequel nous avons délibérément opté pour des hypothèses optimistes pour le VTH et pessimistes pour le VEB, **il n'y a pas d'inversion de la hiérarchie : quel que soit le type de véhicule, le VEB reste moins émissif que le VTH** en cycle de vie, que ce dernier soit alimenté par des carburants pétroliers ou du gaz fossile.

Cependant, le vecteur hydrogène n'a pas dit son dernier mot car **le véhicule à hydrogène (VEH) présente des résultats tout à fait similaires sous certaines conditions, notamment de décarbonation du mix électrique** (comme en France ou avec des énergies renouvelables) permettant de le produire par électrolyse. A contrario, dans les conditions actuelles de contenu carbone du mix électrique en Europe, la production par électrolyse avec l'électricité de réseau conduit à **des résultats très défavorables** dans des pays comme l'Allemagne ou au Bénélux. A ce jour, la planche de salut pour l'hydrogène passe alors soit par le vaporeformage de biométhane soit par l'électrolyse avec une électricité bas carbone.

Sous leur forme **hybride rechargeable** (VHR), les motorisations thermiques présentent certes une **amélioration substantielle** (de l'ordre de -10 à -35%), mais restent **en-deçà de ce que proposent les alternatives telles que VTH-bioGNV, VEB ou VEH avec hydrogène bas-carbone**, même en considérant 50% des km parcourus en électrique en 2030.

Néanmoins, face à ces solutions plus ou moins décarbonantes, il faut mettre en regard les ressources mobilisables, qui sont très variables selon les vecteurs énergétiques et font face à une compétition forte des autres secteurs. Ainsi, **le bioGNV ne peut prétendre à décarboner à lui seul la mobilité car sa disponibilité restera un obstacle majeur**, même dans les hypothèses de potentiel les plus favorables. De même, la production de l'hydrogène « vert » n'en est qu'à ses balbutiements, et devrait monter en puissance progressivement en suivant le développement des énergies renouvelables ou du biométhane. Enfin, si l'électricité n'est pas une ressource manquante en tant que telle, les batteries des véhicules électriques s'appuient sur des ressources minérales qui ne sont ni infinies, ni mobilisables immédiatement.

Il en résulte que **l'électrification des véhicules devrait représenter la majeure partie du verdissement du parc des VP et des VUL**, et cette pénétration pourrait être d'autant plus forte que la taille des batteries reste limitée pour ne pas accroître la tension sur les ressources minérales. Les technologies basées sur le bioGNV et l'hydrogène « vert » (ressources énergétiques moins abondantes) doivent être vues comme des compléments au VEB, à flécher en priorité vers la mobilité lourde où les batteries atteignent leur limites (volume requis, autonomie du véhicule, rapidité de recharge). Et même dans ce cas, ils n'apporteront que des solutions partielles : en réservant son usage dans la mobilité uniquement aux poids lourds, nous estimons qu'environ 1/4 des poids lourds européens au mieux pourra rouler avec 100% de bioGNV en 2050, 1/10 étant sans doute plus réaliste. **Le bioGNV et l'hydrogène sont donc des solutions essentielles pour répondre aux besoins de la mobilité routière et pallier aux limites des véhicules à batteries, mais ne peuvent pas représenter une réponse à eux seuls pour la décarbonation du secteur.**

Concernant les biocarburants liquides, ils contribueront peu, voire pas du tout, à décarboner le transport routier, aux taux d'incorporation qui sont (et seront) les leurs en Europe (au maximum 18% de bioéthanol et 11% de biodiesel en volume, dans notre scénario le plus ambitieux). Le bénéfice carbone est marginal pour le bioéthanol et dans, bien des cas, l'empreinte carbone empire pour les biodiesels du fait des émissions attribuables au changement d'affectation des sols, causé par les cultures dédiées. Ce problème pourrait en grande partie être résolu par la montée en puissance des biocarburants dits avancés (comme ceux utilisant la lignocellulose des plantes), mais leur progression sera trop lente dans les 20 prochaines années pour faire la différence.

Enfin, il est décisif de garder à l'esprit que la pertinence du choix de telle ou telle motorisation ne peut se faire sur la base du seul critère carbone. L'offre constructeur, l'équation micro-économique, la disponibilité du vecteur énergétique, les contraintes d'usage, les autres impacts environnementaux sont autant de paramètres qui doivent intervenir dans la décision. **Aucune technologie ne coche toutes les cases, c'est pourquoi une approche systémique est nécessaire** pour orienter politiques publiques et choix industriels dans le sens de la décarbonation la plus rapide possible du transport routier.

Au-delà de la motorisation, cette étude confirme l'importance de considérer l'ensemble du cycle de vie du véhicule dans l'analyse de l'empreinte carbone :

- ✓ **D'une part, le poids carbone de la phase de production et de fin de vie des véhicules et des équipements spécifiques (batteries, PAC, réservoirs) pour les technologies alternatives VEB et VEH peut être très significatif (jusqu'à 90% de l'empreinte carbone totale pour un VEB en France !).** Ce constat revient à s'interroger sur la pertinence d'une réglementation européenne basée uniquement sur des émissions de CO₂ d'homologation à l'échappement, sans tenir compte de l'ensemble des émissions en cycle de vie (y compris l'amont des vecteurs énergétiques).
- ✓ **D'autre part, nos travaux mettent en avant de manière claire le rôle décisif que peut jouer la sobriété d'usage, au sens large, avec des véhicules moins énergivores.** En se focalisant simplement sur les VP, nous avons ainsi montré que des gains supplémentaires de l'ordre de 25%, toutes motorisations confondues, peuvent être obtenus sans révolution technologique, en adoptant simplement des hypothèses allant dans le sens de la sobriété (réduction des masses, prolongement de la durée de vie, arrêt de la course à la capacité des batteries).

Ainsi, du point de vue carbone, un VEB de forte puissance emportant un pack batterie de 90 kWh ou plus (ex : SUV Type Audi e-tron) peut générer dans un pays comme l'Allemagne (plus grand marché automobile européen) des **émissions en cycle de vie comparables, voire supérieures à un VTH de plus petite taille**. La réglementation est dans ce cas parfaitement trompeuse car elle qualifiera le premier cité de vertueux, alors que le second sera pénalisé ... A l'aune de notre analyse, **nous recommandons donc aux autorités publiques de reconsidérer les « règles du jeu » sur la mesure des émissions de CO₂ des véhicules neufs en Europe (VP/VUL et PL)**, pour éviter que les règles supposément incitatives ne soient contre-productives dans bien des cas, **et inciter à la sobriété d'usage avec des règles basées sur la masse des véhicules et la capacité des batteries**.

Enfin, **il est crucial de rappeler que la technologie seule ne permettra pas de réduire suffisamment nos émissions** dans les prochaines décennies. Comme montré par nos calculs, on peut en ordre de grandeur espérer un facteur 3 à 4 de réduction via les technologies, une fois celles-ci largement diffusées . Or, il nous faudrait plutôt viser un facteur 5 à 6 pour réduire suffisamment nos émissions à l'horizon 2050. En tenant compte de la croissance démographique qui joue dans le sens d'une hausse en tendance des consommations d'énergie, l'équation est encore moins favorable. Par ailleurs, les solutions alternatives étudiées ici présentent pour beaucoup **d'autres impacts qu'il faut aussi maîtriser** au risque de tomber de Charybde en Scylla : conditions d'extraction des ressources minérales, artificialisation et changement d'usage des sols pour de la production végétale ou électrique, etc. Pour ces multiples raisons, **le prisme purement technologique est largement insuffisant pour penser la décarbonation de la mobilité**. D'autres leviers de réduction particulièrement efficaces existent qu'il faut mobiliser en parallèle ; il est capital d'en faire mention dans cette conclusion :

- ✓ réduire les flux à la source (nombre et portée des déplacements), aussi bien pour les personnes que les marchandises
- ✓ mieux partager les véhicules particuliers (lutte contre l'auto-solisme) et mieux remplir les véhicules lourds (éliminer les retours à vide, réduire les livraisons express non optimisées)
- ✓ favoriser le report modal autant que possible, vers les modes actifs et les transports collectifs (personnes) ou massifiés (marchandises), plus sobres en carbone, en fonction des situations

Annexes :

les analyses de sensibilité confirment la prépondérance de la masse et de la consommation d'énergie !

Ces analyses de sensibilité ont deux justifications principales.

En premier lieu, elles permettent de **répondre à des interrogations récurrentes sur l'importance de tel ou tel facteur, relativement aux autres**. Ainsi, pour un VHR, quelle est l'importance du % en mode électrique par rapport à la performance intrinsèque de la motorisation thermique ? pour un VEB, le facteur d'émissions de l'électricité est-il plus ou moins influent que la capacité de la batterie ? Pour un VEH, l'amélioration du rendement de l'électrolyse a-t-il plus ou moins d'importance que la distance de transport de l'hydrogène ?

Ce faisant, elles offrent la possibilité d'**identifier sans équivoque les paramètres les plus influents sur les résultats, finalement peu nombreux**. Il est alors beaucoup plus simple de définir de nouveaux scénarios, variantes du scénario central, en faisant varier uniquement ces paramètres-clés. Cela garantit que (i) l'analyse reste pertinente, même en laissant inchangée une grande partie des hypothèses et que (ii) les scénarios sont simples à définir, rendant leur lecture et interprétation plus faciles.

Bien entendu, cette approche n'a pas pour vocation de couvrir l'ensemble des scénarios possibles. On pourrait tout à fait imaginer des situations technologiques de rupture ou des cas très spécifiques d'approvisionnement énergétique. Nous n'avons pas fait ce choix afin que **nos résultats traduisent non pas des spécificités, mais une situation plus globale**, reflet des performances des différents types de véhicules, à l'échelle d'un pays ou d'une région (en l'occurrence ici, l'UE).

Ce qu'il faut retenir

Pour les véhicules thermiques (VTH), consommation d'énergie du moteur et masse du véhicule sont largement dominantes dans l'analyse de sensibilité, loin devant le taux d'incorporation des biocarburants ou les FE des biocarburants (y.c. biométhane). Pour que ces deux derniers paramètres aient plus d'importance relative, il faudrait que le taux d'incorporation moyen soit beaucoup plus haut (ce qui n'est pas une tendance attendue en Europe à l'horizon de 15-20 ans) et que les biocarburants, notamment les biodiesels, ne soient pas autant pénalisés par les émissions directes et indirectes de changement d'usages des sols.

A la différence des VTH, **les VHR sont assez fortement sensibles à une 3^{ème} variable qui est le % d'utilisation du véhicule en mode électrique**. En effet, de par leur conception-même, les utilisateurs de VHR vont avoir la possibilité de recharger ou pas leur véhicule (à la différence des VTH, même convertis au « mild hybrid »), ce qui peut avoir une influence considérable sur l'empreinte carbone de cette solution technologique.

La **Figure 26** ci-après illustre les résultats obtenus sur la voiture particulière VTH et VHR, segment D.

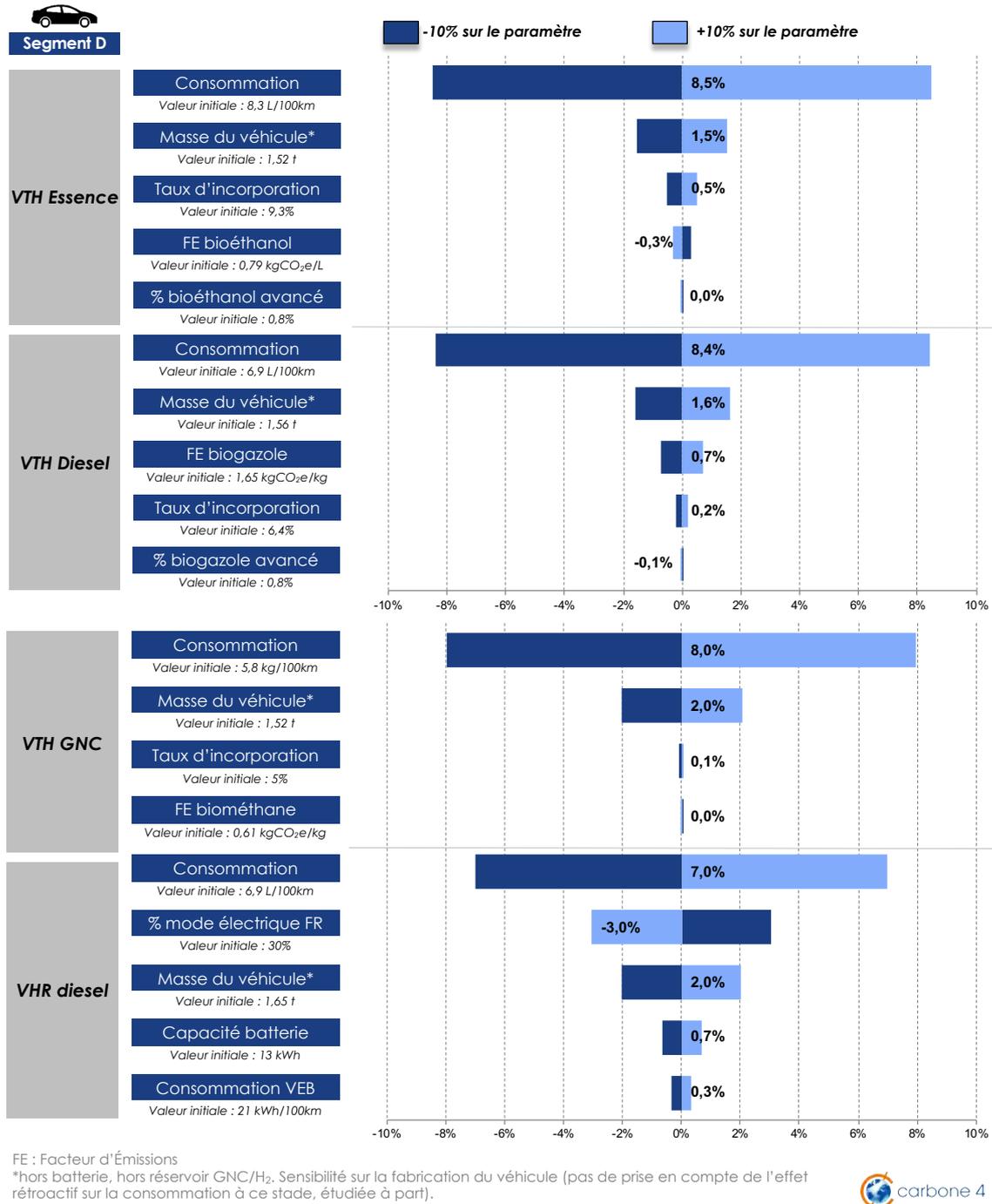


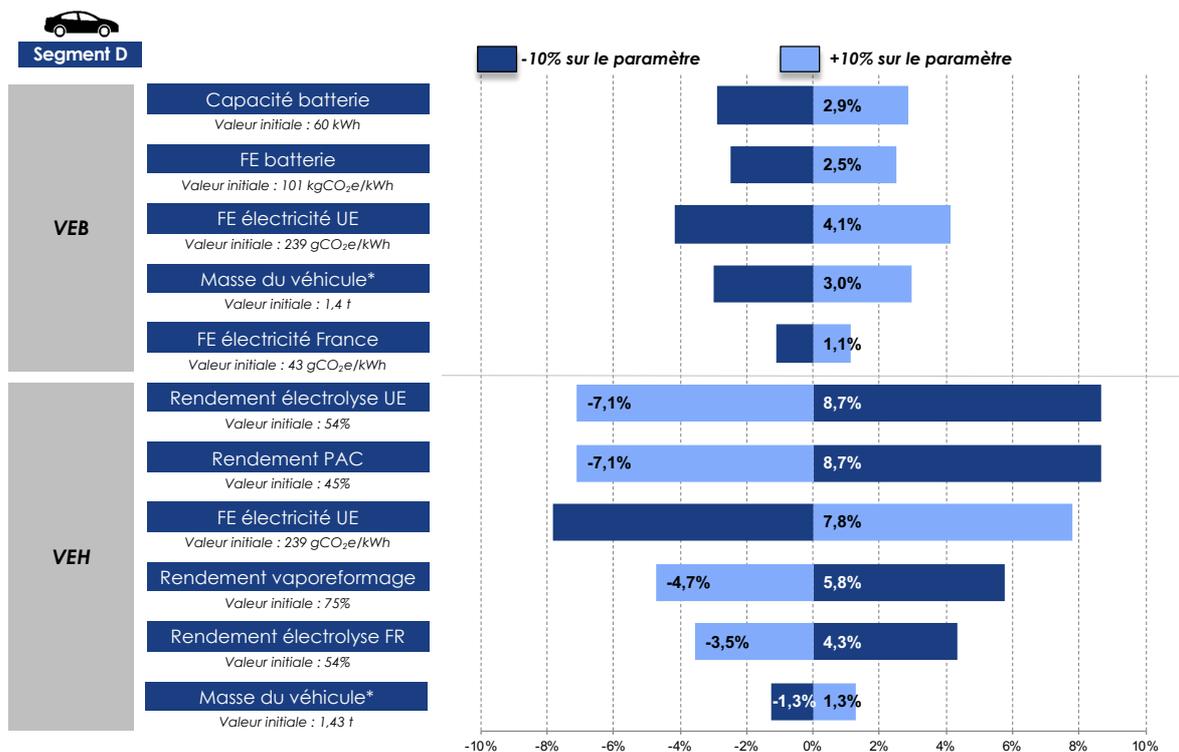
Figure 26 – Analyse de sensibilité des paramètres les plus influents sur l'empreinte carbone des véhicules thermiques

Pour le VEB, quatre paramètres se révèlent bien plus influents que les autres. Sans surprise, on retrouve **le FE de l'électricité**, d'autant plus influent qu'il est élevé à court-terme (i.e. que 10% de baisse sur le FE du mix UE aura plus d'effet que 10% de baisse du FE de la France, beaucoup plus faible aujourd'hui). De même, on retrouve **le FE de fabrication des batteries**, surtout dans les pays où l'électricité de roulage est faible car la part de la fabrication est alors dominante. Plus inattendu sans doute, deux

autres facteurs ressortent néanmoins de cette analyse, **la masse du véhicule** (ce qui constitue un argument contre la fabrication des véhicules électriques les plus lourds, type SUV) **et la capacité des batteries**. Notre analyse confirme qu'il y a là un enjeu carbone fort sur ce dernier paramètre et que la mobilité électrique doit être l'occasion de repenser nos rapports aux usages, c'est-à-dire ne pas vouloir à tout prix retrouver les performances d'autonomie des véhicules thermiques, mais raisonner davantage au niveau systémique (temps de parcours, recharge, alternatives, etc.).

Le cas du VEH est très particulier, ce qui s'explique par la spécificité de son vecteur énergétique, l'hydrogène. Ainsi, les paramètres les plus influents sont bien entendu **la consommation d'hydrogène aux 100 km** (ou, ce qui est équivalent dans le cas de l'électrolyse, le FE de l'électricité), mais également **les rendements de conversion pour produire le dit hydrogène**, que ce soit par vaporeformage ou par électrolyse. Enfin, **la masse est comme toujours un facteur déterminant** de la performance carbone, même dans le cas du VEH.

La **Figure 27** ci-après illustre les résultats obtenus sur la voiture particulière VEB et VEH, segment D.



FE : Facteur d'Émissions.

Les sensibilités pour le VEB et le VEH sont déterminées pour le périmètre UE, sauf pour le FE électricité France et pour le rendement électrolyse FR où le VEB / le VEH sont considérés en France, bien entendu.

*hors batterie, hors réservoir GNC/H₂. Sensibilité sur la fabrication du véhicule (pas de prise en compte de l'effet rétroactif sur la consommation à ce stade, étudiée à part).



Figure 27 – Analyse de sensibilité des paramètres les plus influents sur l'empreinte carbone des véhicules électriques (VEB/VEH)

Annexes :

sources utilisées

Hypothèse véhicules

- **IFP énergies nouvelles**, *Éléments de comparaison énergétique de deux bus urbains pour différents cycles d'usage*, 2019
- **IFP énergies nouvelles**, *Bilan transversal de l'impact de l'électrification par segment*, 2018
- **IFP énergies nouvelles**, *Étude ACV de véhicules roulant au GNV et bioGNV*, 2019
- **IFP énergies nouvelles – E4T**, *Analyse de la consommation énergétique des véhicules routiers (du réservoir à la roue)*, 2018
- **The Shift Project**, *Étude comparative de l'impact carbone de l'offre de véhicules*, 2020
- **T&E**, *How clean are electric cars? T&E's analysis of electric car lifecycle CO₂ emissions*, 2020
- **ADEME**, *Base carbone*
- **Les comptes des transports en 2018**, 2019
- **Fondation pour la Nature et l'Homme**, *Quelle contribution du véhicule électrique à la transition écologique en France ?*, 2017

Hypothèse batteries

- **IVL Swedish Environmental Research Institute**, *Lithium-Ion Vehicle Battery Production*, 2019

Réservoirs à gaz & PAC

- **ADEME**, *Base carbone*
- **Fraunhofer Institute**, *Greenhouse gas emissions for battery electric and fuel cell electric vehicles with range over 300km*, 2019
- **AFHPAC**, *Applications de la pile à combustible et de l'hydrogène dans le transport routier*, 2018

Fabrication

- **ADEME**, *Base carbone*
- **T&E**, *How clean are electric cars? T&E's analysis of electric car lifecycle CO₂ emissions, 2020*

Carburants liquides

- *Directive (UE) 2018/2001 – relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, 2018*
- **JEC**, *Well-to-Tank Database v5a, 2018*
- **Globiom**, *The land use change impact of biofuels consumed in the EU, 2015*

Gaz naturel

- **ADEME**, *Base carbone*
- **NGVA – Thinkstep**, *Greenhouse Gas Intensity of Natural Gas, 2017*
- **GRDF – ENEA/Quantis**, *Évaluation des impacts GES de l'injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel en appliquant une approche d'allocation, 2020*
- **OFATE**, *Regards croisés sur le biogaz en Allemagne et en France, 2019*
Planifications Pluriannuelles de l'Énergie 2019-2023 / 2024-2028

Potentiel biométhane

- **ADEME**, *Base carbone*
- **ICCT**, *A methodological comparison for estimating renewable gas potential in France, 2019*
- **ICCT**, *What is the role for renewable methane in European decarbonization?, 2019*
- **Gas for climate**, *The optimal role for gas in a net-zero emissions energy system, 2019*
- **IEA**, *Outlook for biogas and biomethane, 2020*

Hydrogène

- **IEA**, *Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells*, 2015
- **Committee on Climate Change**, *Hydrogen in a low-carbon economy*, 2018
- **FCHJU**, *New bus refuelling for European Hydrogen Bus Depots*, 2017
- **National Renewable Energy Laboratory**, *Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing Technical Status and Costs*, 2014

Électricité

- **IEA**, *Electricity Information 2019*, 2019
- **Energiewende**
Planifications Pluriannuelles de l'Énergie 2019-2023 / 2024-2028



Carbone 4 est le premier cabinet de conseil indépendant spécialisé dans la stratégie bas carbone et l'adaptation au changement climatique.

En permanence à l'écoute des signaux faibles, nous déployons une vision systémique de la contrainte énergie-climat, et mettons toute notre rigueur et notre créativité en œuvre pour transformer nos clients en leaders du défi climatique.

Contact : mobilite@carbone4.com