



Etude ACV de véhicules roulant au GNV et bioGNV



Auteurs :

Anne Bouter
Joris Melgar
Cyprien Ternel

Version finale du 19 septembre 2019

Table des matières

1	OBJECTIFS DE L'ETUDE	3
1.1	CONTEXTE	3
1.2	OBJECTIFS.....	3
1.3	METHODOLOGIE GENERALE.....	4
2	SIMULATIONS DES CONSOMMATIONS REELLES DES VEHICULES.....	5
2.1	PLATEFORME DE SIMULATIONS DES VEHICULES.....	5
2.2	RESULTATS NOTABLES DE LA SIMULATION ENERGETIQUE.....	5
2.2.1	DETERMINATION DES MASSES	5
2.2.2	CONSOMMATIONS SUR CYCLE.....	8
3	ANALYSE DU CYCLE DE VIE	10
3.1	DEFINITION DU SYSTEME	10
3.1.1	DESCRIPTION DES VEHICULES ETUDIES.....	10
3.1.2	PNEUS.....	11
3.1.3	BATTERIES.....	11
3.1.4	CARBURANTS.....	11
3.2	UNITE FONCTIONNELLE	12
3.3	FRONTIERES DU SYSTEME.....	12
3.4	RESULTATS.....	13
3.4.1	VEHICULES LEGERS	13
3.4.2	BUS	17
3.4.3	VEHICULES UTILITAIRES LEGERS (VUL)	19
3.4.4	POIDS LOURD LIVRAISON 12 TONNES	20
4	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	21
5	ANNEXE	22
6	BIBLIOGRAPHIE	24

1 Objectifs de l'étude

1.1 Contexte

Historiquement, il existe un lien étroit entre le transport et le pétrole : 93 % de l'énergie utilisée provient de produits pétroliers. C'est ce lien qui est remis en question dans les scénarios de transition énergétique puisqu'au niveau mondial, le secteur du transport est le deuxième contributeur aux émissions anthropiques de Gaz à Effet de Serre (GES), après celui de la production d'électricité. Toutefois, des efforts ont été déployés pour réduire la dépendance du secteur du transport au pétrole en proposant des solutions énergétiques alternatives innovantes. Pour un constructeur commercialisant des véhicules légers en Europe, la réglementation en vigueur impose un plafond d'émission de CO₂ sur l'ensemble de sa flotte, fixé à 130 g CO₂ eq./km, avec à la clef des pénalités si le constructeur ne respecte pas ce quota. Ce plafond, passera à 95 g CO₂ eq./km pour la totalité de la flotte (ventes annuelles) d'un constructeur à partir de 2021.

Dans ce contexte réglementaire sévère, l'amélioration seule du rendement des moteurs thermiques ne sera pas suffisante et incite fortement les constructeurs à avoir recours à d'autres technologies bas-carbone :

- l'électrification, sous réserve que l'électricité soit faiblement carbonée
- l'incorporation de biocarburants à la pompe
- les technologies piles à combustibles
- etc.

Une autre solution serait d'utiliser un carburant alternatif : le GNV (Gaz Naturel Véhicule) ou encore le bioGNV. Un marché existe déjà puisque plus de 18 millions de véhicules roulent déjà au GNV dans le Monde, dont quelques 15 000 en France, principalement des bus, des poids lourds et des véhicules utilitaires.

Le GNV d'origine fossile possède l'avantage d'avoir un facteur d'émission inférieur à celui de l'essence ou du gazole. Cela signifie que pour une même quantité d'énergie brûlée dans le moteur, moins de CO₂ sera rejeté en sortie du pot d'échappement. Cependant, il est produit à partir de ressources fossiles et ne pourra pas représenter une solution pérenne dans la transition énergétique du secteur Transport.

Produit à partir de ressources organiques (effluents d'élevage, résidus de cultures, déchets organiques, ...), le biométhane, utilisé ici en tant que carburant (bioGNV) constitue une source d'énergie renouvelable et durable. La filière d'injection du biométhane dans les réseaux est actuellement en plein essor. Cette dynamique s'inscrit également dans l'évolution du secteur des traitements des déchets qui fait face à des enjeux en matière de gestion et de valorisation. Les performances du biométhane en terme de réduction des émissions de gaz à effet de serre ont déjà été établies dans le cadre d'études utilisant l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), et sont souvent mises en avant pour témoigner de l'intérêt de cette filière. Néanmoins, il manque à ce jour une étude ACV plus complète intégrant le cycle de vie des véhicules, pour évaluer l'intérêt de rouler au BioGNV.

1.2 Objectifs

L'objectif de cette étude est d'évaluer les impacts environnementaux potentiels de différents moyens de transport routier (personne et marchandise), et à différents horizons temporels (actuel et 2030), en prenant en compte à la fois le cycle de vie du véhicule et le cycle de vie du carburant. L'étude se

concentre sur le seul indicateur de réchauffement climatique via les émissions de gaz à effet de serre (GES).

L'ACV des différents segments de véhicules (véhicule particulier, bus, véhicule utilitaire léger, poids lourd de livraison), couplés aux technologies de propulsion (moteur thermique, hybride, électrique) et à leurs vecteurs énergétiques associés : carburants fossiles, bioGNV et mix électrique, a permis de comparer entre eux les options technologiques envisagées, et d'identifier celles les plus adaptées aux différents contextes d'un point de vue environnemental centré sur le changement climatique. Cependant l'étude n'est pas totalement exhaustive et la comparaison avec d'autres carburants alternatifs tels que les biocarburants liquides conventionnels ou avancés resterait à faire.

1.3 Méthodologie générale

La première étape de l'étude a été de réaliser une évaluation systématique de la consommation énergétique des véhicules pour les différents segments analysés dans le projet (Figure 1), à savoir :

- Le segment des véhicules légers, avec 2 gammes de véhicules : cœur de gamme (segment C) et haut de gamme (segment D)
- Le segment des bus (12m)
- Le segment des véhicules utilitaires (de type Renault Master)
- Le poids lourd de livraison à dominante urbaine (12 tonnes)



Figure 1 : Segmentation du secteur Transport utilisée dans l'étude

Chaque segment a été décomposé suivant différentes motorisations intégrant des taux d'électrification variables, du véhicule thermique au véhicule tout électrique, en passant par le véhicule hybride et le véhicule hybride rechargeable. Chaque organe de la motorisation (moteur thermique, moteur électrique, batterie) a été modélisé du point de vue énergétique, en prenant en compte les grandes tendances et améliorations à venir d'ici 2030. De la même manière, chaque véhicule a été modélisé en prenant en compte une vision prospective sur ses grandes caractéristiques (aérodynamiques et frottements des pneumatiques) et sur sa masse (allègement carrosserie et châssis, impact de l'amélioration de la densité de puissance et d'énergie des organes électrifiés). Ces modèles ont permis d'évaluer la consommation d'énergie (carburant et électricité) sur différents cycles d'usages, actuelle et future.

Après cette première approche énergétique du réservoir à la roue (*Tank-to-Wheel*), chaque type de véhicule et groupe motopropulseur (GMP) a ensuite été évalué suivant la méthodologie ACV, intégrant la production du vecteur énergétique mais également la fabrication du véhicule. Cette étude reprend le cheminement de l'étude E4T¹ publiée en 2018. Une mise à jour des architectures (notamment électrique) a été effectuée, et la motorisation GNV et bioGNV a été entièrement ajoutée.

¹ Etude Energétique, Economique et Environnementale du Transport (IFPEN-ADEME, 2018)

2 Simulations des consommations réelles des véhicules

2.1 Plateforme de simulations des véhicules

Afin de déterminer la consommation énergétique des différents véhicules définis par leur architecture et leur segmentation, des simulations ont été opérées à l'aide du logiciel Simcenter Amesim™. Les plateformes de simulation s'appuient sur des composants de la librairie "IFP-Drive" co-développés par IFP Energies nouvelles et Siemens PLM Software (Figure 2). Ces modèles retranscrivent la physique de l'ensemble des organes présents dans les véhicules conventionnels (moteur thermique, transmission etc...) et électrifiés (batterie, machine de traction, électronique de puissance etc...). Un composant dédié aux architectures hybrides (*ECMS: Equivalent Consumption Minimization Strategy*) permet de déterminer la stratégie optimale de gestion des énergies thermique et électrique afin de minimiser la consommation de carburant. De plus amples détails peuvent être obtenus en consultant la publication SAE [Automatic Generation of Online Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Powertrain Simulation]

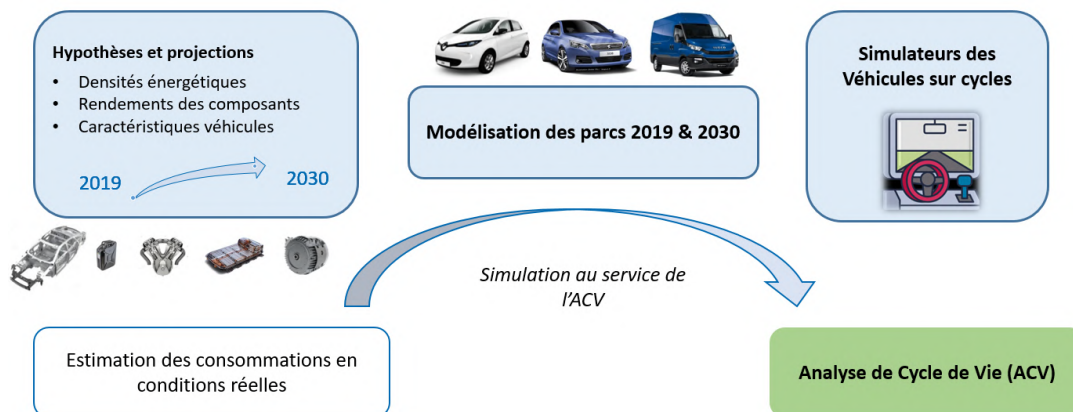


Figure 2 : Méthodologie de dimensionnement et analyse énergétique des véhicules

Ces plateformes de simulation véhicules ont été validées en s'appuyant sur les moyens expérimentaux d'IFP Energies nouvelles, à savoir des bancs moteurs thermiques, machines électriques et batteries ainsi que des bancs rouleaux sur lesquels sont instrumentés les véhicules. Ces moyens permettent également de fournir des données fidèles aux choix technologiques des constructeurs automobiles.

2.2 Résultats notables de la simulation énergétique

2.2.1 Détermination des masses

Parmi l'ensemble des paramètres d'entrée des simulations véhicules, la masse roulante est prépondérante. Pour un même segment, cette masse diffère selon l'architecture. Une masse « carcasse » a été identifiée pour chaque segment, à laquelle viennent s'ajouter les masses des organes présents dans le véhicule selon leur dimensionnement. La figure 3 illustre le dimensionnement et le choix des composants pour les véhicules représentatifs du segment C.

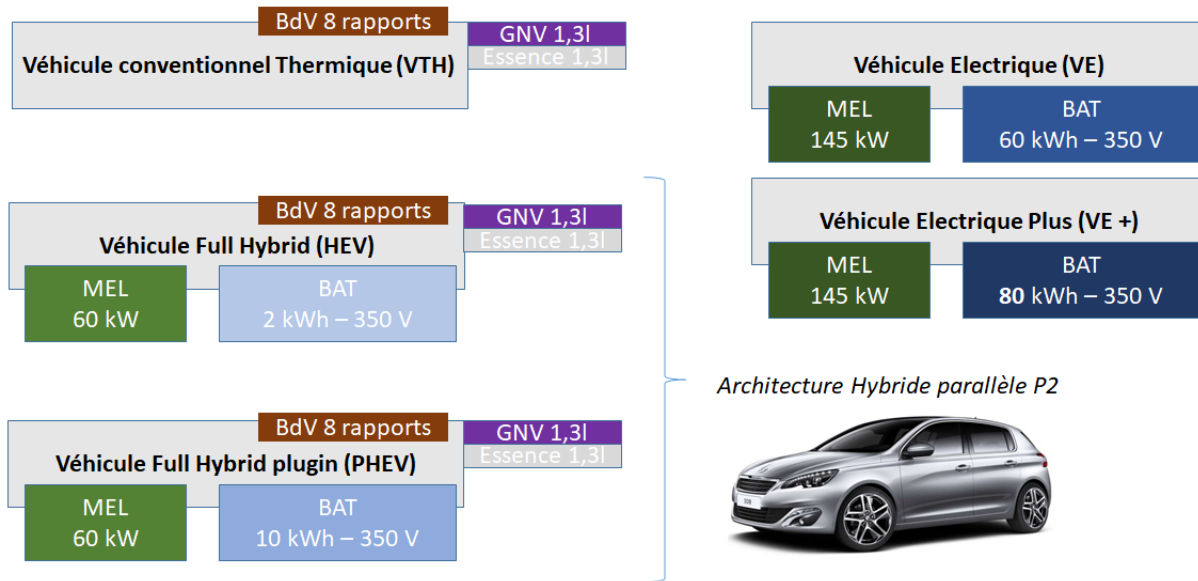


Figure 3 : Dimensionnement des architectures du segment C (MEL : moteur électrique, BAT : batterie)

Le calcul des masses des composants s'appuie sur des hypothèses de densités énergétiques et des densités de puissance déterminées pour l'horizon actuel et projetées pour l'horizon 2030. La batterie constitue une part importante de la masse des véhicules électrifiés, la densité du pack total incluant le refroidissement des cellules, la structure et le contrôle de la batterie est estimée actuellement à 150 Wh/kg et atteindrait 200 Wh/kg en 2030.

S'agissant des véhicules GNV et bioGNV, la masse des réservoirs de gaz a été définie suivant l'état de l'art. Ces réservoirs renferment du gaz à 200 bars, ils sont constitués d'acier ce qui alourdit les véhicules GNV en particulier lorsque les volumes de gaz sont conséquents comme sur les poids lourds et les bus qui peuvent embarquer jusqu'à 8 réservoirs de 150 litres. Dans ces applications lourdes, les réservoirs en acier peuvent atteindre 400 kg. Pour les véhicules légers le surpoids est d'environ 30 – 40 kg par rapport aux réservoirs de carburant liquide en plastique.

La figure 4 présente la décomposition des véhicules retenus pour l'horizon actuel du segment C. On notera l'absence de véhicules GNV électrifiés puisque ce type de véhicule n'est pas commercialisé à ce jour – mais ils entrent dans le parc 2030 considéré dans l'étude.

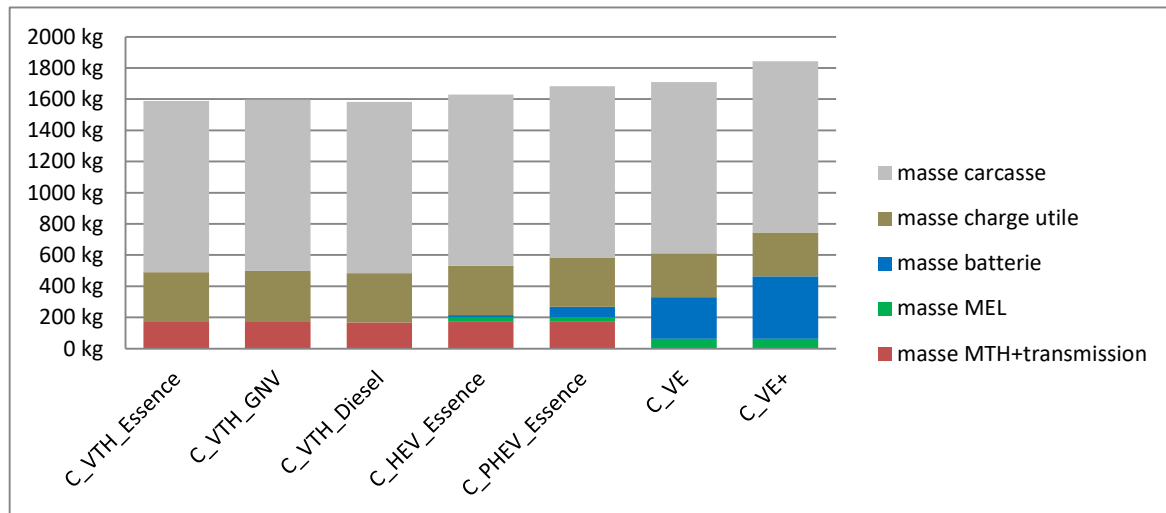


Figure 4 : Décomposition massique des véhicules du segment C 2019 (MEL : machine électrique - MTH : machine thermique - la charge utile est déterminée en s'appuyant sur le protocole d'homologation européen WLTP avec en plus la prise en compte du réservoir)

L'évolution des hypothèses sur les composants à horizon 2030 permet d'estimer les masses roulantes, la figure 5 montre l'évolution envisagée des masses des véhicules pour le segment C. La réduction des masses véhicules conventionnels et hybrides d'ici 10 ans est d'environ 4%. Pour les véhicules électriques, la réduction de masse atteint 3% en considérant une augmentation des capacités des batteries de 50% car l'extension de l'autonomie demeure prioritaire pour les constructeurs (à iso-capacité batterie en 2030, la réduction de masse serait de 8%).

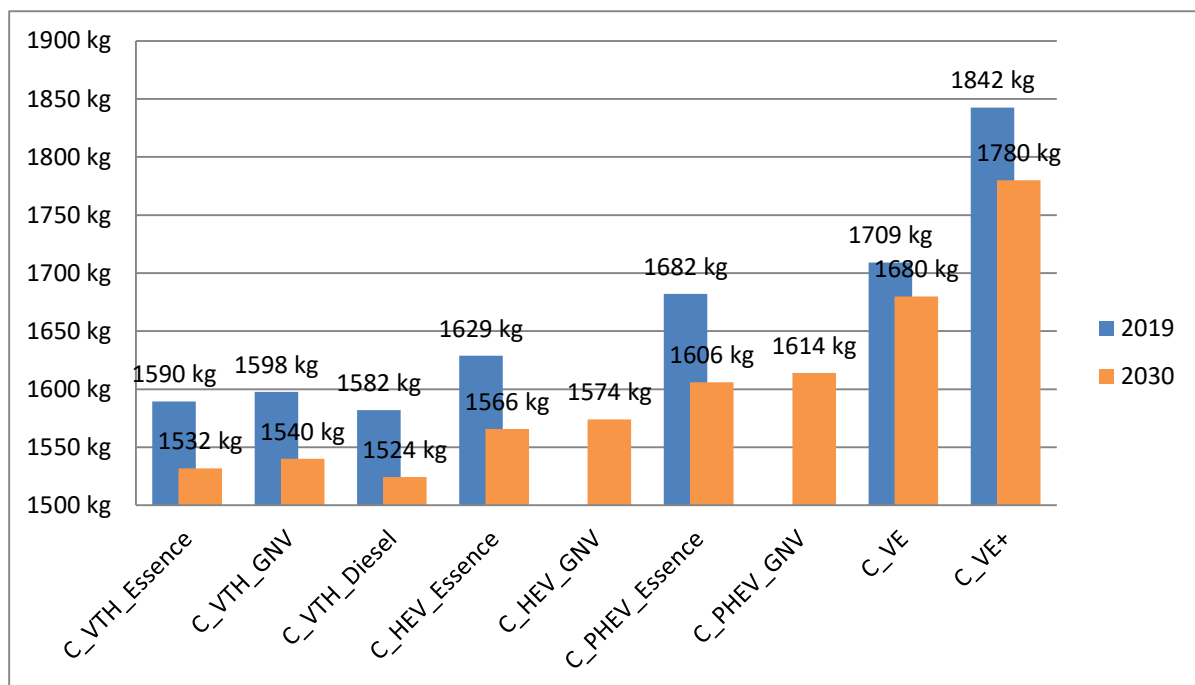


Figure 5 : Evolution des masses roulantes [kg] simulées entre les parcs 2019 et 2030 du segment C

2.2.2 Consommations sur cycle

Les véhicules légers ont été simulés sur le cycle d'homologation WLTC qui a remplacé le cycle NEDC en 2018 dans le but d'être plus représentatif de l'usage global d'un véhicule particulier. Le bus a été évalué sur un cycle issu d'un enregistrement opéré par la RATP, il est plutôt dynamique (beaucoup d'accélération et de freinages) et sa vitesse moyenne est relativement basse (11 km/h). Le poids lourd a été évalué sur l'enregistrement d'un cycle de livraison péri-urbain.

Les résultats énergétiques des véhicules du segment C sur cycle WLTC sont présentés sur la figure 6.

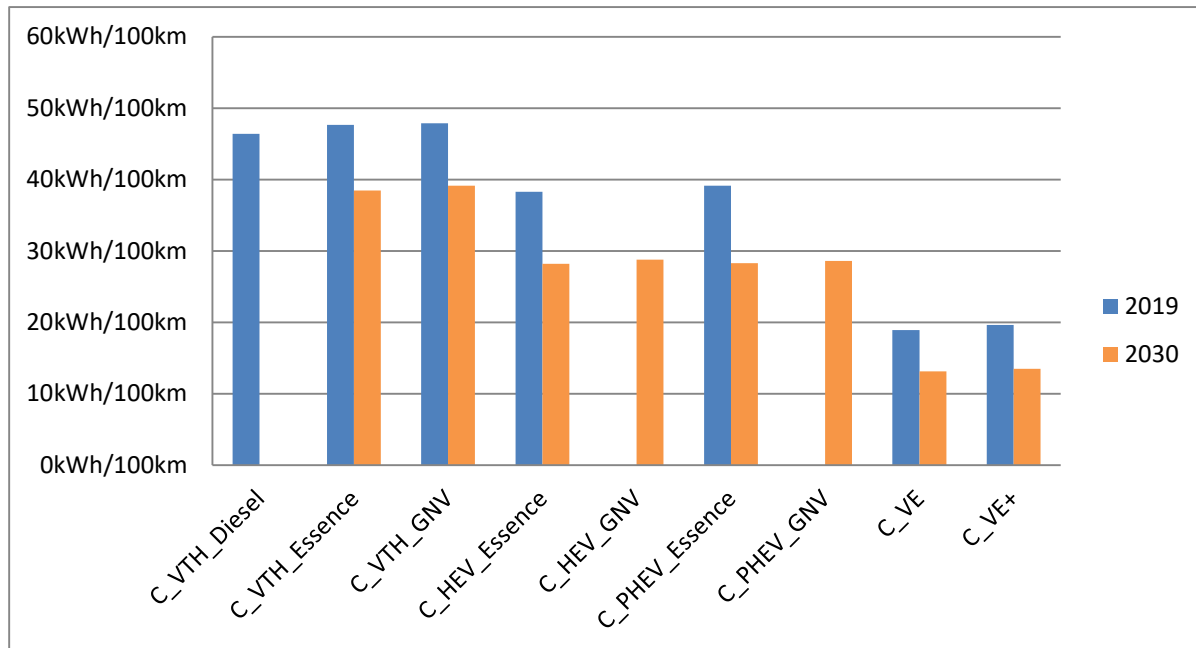


Figure 6 : Consommation énergétique [kWh/100km] des véhicules du segment C – horizon 2019

- Analyse des résultats pour l'horizon 2019 :

On constate que les consommations des véhicules conventionnels (VTH) essence et GNV sont similaires, ce qui s'explique par la proximité des cartographies moteurs utilisées dans l'étude ; les constructeurs s'appuient en effet sur une base moteur « essence » afin de développer des solutions technologiques GNV.

La figure 6 montre également le gain apporté par l'électrification : le dimensionnement des composants détaillé dans la figure 3 conduit à des réductions de la consommation qui atteignent 20% pour les hybridations standards (HEV).

Le véhicule hybride rechargeable (PHEV) affiche pour sa part une consommation plus élevée que l'hybride HEV en raison de la masse de sa batterie embarquée – le cycle étant réalisé avec un niveau de charge final de la batterie égal à celui de départ. Ce constat simple démontre que le mode électrique d'un PHEV – et donc sa recharge régulière – est celui à privilégier. Dans ce mode, le PHEV s'apparente alors à un véhicule électrique pour lequel les résultats de consommations énergétiques sont inférieures à 20 kWh/100km, et ce pour les deux hypothèses de capacité de batterie envisagées : VE et VE+. Cette faible consommation énergétique est atteinte grâce aux rendements élevés des composants de la chaîne de traction, en particulier celui de la machine électrique dont le rendement moyen sur cycle est de 94% - contre 34% pour le moteur thermique du véhicule conventionnel essence.

- **Projection des consommations énergétiques à l'horizon 2030 :**

Les évolutions envisagées pour 2030 - en termes d'allègement des composants, de réduction des forces qui s'exercent sur le véhicule et d'augmentation des rendements des organes – conduiraient selon les simulations à des réductions de la consommation pour l'ensemble des architectures : 20% pour les véhicules conventionnels et jusqu'à 30% pour les véhicules électriques avantagés par l'augmentation des densités énergétiques des batteries malgré l'augmentation des capacités.

L'analyse des résultats du segment C ne démontre pas l'intérêt énergétique des moteurs au gaz naturel comparés aux moteurs à carburant fossile liquide, les rendements des convertisseurs étant du même ordre de grandeur et évolueront de la même façon d'ici à 2030. Pour voir des différences, il faut traiter l'ensemble de la chaîne énergétique : « du puits à la roue ». C'est l'objet de la partie suivante : l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), qui prend pour données d'entrée les caractéristiques des composants et les résultats énergétiques des 80 véhicules modélisés au travers de la plateforme de simulation.

3 Analyse du Cycle de Vie

3.1 Définition du système

L'ACV a été réalisée conformément aux normes ISO 14040:2006 et ISO 14044:2006 et à l'aide du logiciel commercial SimaPro®. La base de données utilisée est Ecoinvent v.3.5. La modélisation choisie est par défaut « *allocation, cut-off by classification* ».

On fait ici l'hypothèse que les véhicules sont assemblés en France et également utilisés en France. Deux horizons temporels ont été considérés dans le cadre de cette étude : actuel (2019), et prospectif (2030). Plusieurs cycles d'utilisation ont été étudiés : le cycle homologué WLTC² pour les véhicules légers (segments C et D) et VUL, le cycle RATP pour le bus, et le cycle Carrefour City pour le poids lourd de livraison 12 tonnes.

Les PCI³ utilisés dans cette étude reprennent les valeurs du JRC⁴, de même que les quantités de CO₂ émises lors de la combustion des carburants essence et gazole.

Les consommations des différents véhicules selon les cycles d'utilisation ont été établies dans la première phase de cette étude (voir chapitre 2). La distinction a été faite entre le transport de personnes et le transport de marchandise car ils n'assurent pas la même fonction et ne sont donc pas directement comparables. Cet aspect méthodologique sera explicité dans la définition de l'unité fonctionnelle, section 3.2.

3.1.1 Description des véhicules étudiés

Tous les véhicules ont été modélisés d'après les données de la section 2.2.1 concernant les poids, selon le découpage suivant :

- caisse en blanc du véhicule avec options et boîte de vitesse
- moteur thermique
- moteur électrique et génératrice
- batterie

Les véhicules à l'horizon 2030 sont modélisés d'après les véhicules considérés à l'horizon actuel. Seul un allègement des véhicules a été pris en compte (PE International AG and Ginkgo 21 2013) : remplacement de 30 % de l'acier du véhicule par une quantité d'aluminium correspondant à 65 % de ces 30 % d'acier. Les véhicules ont été modélisés d'après deux rapports européens issus du projet IMPRO CAR (Nemry et al. 2008; Nemry et al. 2009), et de la base de données Ecoinvent (Frischknecht et al. 2005).

3.1.1.1 Véhicules légers (Segments C et D)

La durée de vie de ces véhicules est supposée égale à 10 ans à raison de 15.000 km / an, soit 150.000 km sur leur cycle de vie. Cela est en cohérence avec la précédente étude E4T.

² World harmonized Light vehicles Test Cycles

³ Pouvoir calorifique inférieur

⁴ Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Appendix 4a

3.1.1.2 Véhicule utilitaire léger (VUL)

La durée de vie de ces véhicules est supposée égale à 12 ans à raison de 16.200 km / an, soit 194.400 km sur leur cycle de vie.

3.1.1.3 Bus

La composition matière des bus est basée sur le découpage matière de la présentation d'Iveco Irisbus et est détaillée selon l'architecture thermique, hybride, ou électrique. Des hypothèses et extrapolations ont également été réalisées. La durée de vie des bus est supposée égale à 12 ans à raison de 40.000 km / an, soit 480.000 km sur leur cycle de vie.

3.1.1.4 Poids lourd de livraison (12 tonnes)

La durée de vie des poids lourds livraison est supposée égale à 12 ans à raison de 31.000 km / an, soit 372.000 km sur leur cycle de vie.

3.1.2 Pneus

La détermination du poids et la composition des pneus des véhicules particuliers et des VUL est basée sur le rapport de Nemry et al.. Le poids des pneus des bus et des poids lourds est basé sur la présentation d'Iveco Irisbus. Leur composition est basée sur le rapport de Nemry et al.. La durée de vie des pneus quel que soit le type de véhicule routier est supposée égale à 40.000 km.

Le nombre de pneus d'un véhicule particulier est de 4, de même que pour les VUL. Le nombre de pneus d'un bus et d'un poids lourd de livraison est pris égal à 6.

3.1.3 Batteries

Les hypothèses concernant la modélisation des batteries dans cette étude sont issues de données fournies par l'ADEME. Ce sont des batteries LiNMC : Lithium-ion Nickel Manganèse Cobalt. Elles représentent un mix (50/50) de deux technologies. Les émissions de GES associées à leur production sont d'environ 101 kg CO₂ eq. / kWh de batterie modélisée pour 2019, et 76 kg CO₂ eq. / kWh de batterie modélisée pour 2030. Ces valeurs sont conformes aux ordres de grandeur que l'on peut trouver dans la littérature.

La durée de vie des batteries est supposée égale à 10 ans pour les véhicules particuliers. Elle est supposée égale à 6 ans pour les bus, les VUL et les poids lourds. Deux batteries sont ainsi nécessaires aux cycles de vie de ces véhicules.

3.1.4 Carburants

Différents types de carburants ont été utilisés pour modéliser les véhicules du parc roulant à horizon actuel et 2030 : carburants liquides, gazeux et vecteur énergétique électrique.

Les biocarburants liquides ne font pas partie du scope de l'étude.

3.1.4.1 Carburants liquides

Les carburants fossiles : essence et gazole, sont modélisés d'après les données Ecoinvent pour la partie amont ou *Well-to-Tank* : respectivement 63 et 43,9 g CO₂ eq. / kWh.

Les émissions associées à leur combustion sont basées sur les valeurs du JEC : *Tank-to-Wheel* (TTW), à savoir 264 et 263 g CO₂ eq. / kWh.

3.1.4.2 Gaz et biogaz

Les émissions liées à la production et à la combustion du GNV sont basées sur le facteur d'émission de la base de données Ecoinvent et de la base carbone de l'ADEME (respectivement 45,3 et

204,1 g CO₂eq. / kWh). Le facteur d'émission pour la production du GNV est sensiblement équivalent entre les deux bases de données : 46,5 g CO₂eq. / kWh pour la base carbone de l'ADEME. Ecoinvent a été privilégié étant donné son implémentation dans le logiciel utilisé.

Les émissions de GES du bioGNV sont basées sur les résultats de l'étude « Evaluation des impacts GES de l'injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel, ENEA Quantis , 2017 » (Quantis 2017). Les émissions de GES liées à la production, l'injection et la consommation de biométhane y sont évaluées à 23,4 g CO₂ eq / kWh PCI, soit environ 9 fois moins que le gaz naturel. En particulier, le CO₂ émis lors de la combustion du biométhane est intégralement compensé en amont par le CO₂ capté depuis l'atmosphère (par photosynthèse) durant la croissance des plantes. Cela conduit à un bilan CO₂ neutre. Ce principe de neutralité carbone s'applique plus généralement pour tous les produits à courte durée de vie issus de biomasse végétale et subissant une dégradation par combustion : biocarburants au sens large par exemple.

Les faibles émissions de GES liées à la production du bioGNV (résultat de l'étude ENEA-Quantis réalisée pour GRDF – voir section bibliographie) et la non comptabilisation des émissions de CO₂ biogéniques liées à la combustion du bioGNV (en tant que biocarburant), conduisent à des émissions de GES très faibles sur l'ensemble du cycle de vie des différents véhicules.

Pour affiner et rendre l'étude plus robuste, il conviendrait d'effectuer une analyse de sensibilité sur les émissions de GES liées à la production du bioGNV. En effet, peu d'harmonisation existe sur le sujet et la base carbone ne préconise pas non plus de valeur.

3.1.4.3 Electricité

L'électricité est modélisée d'après le procédé Ecoinvent pour une production française 2017 (IEA 2017). Cela donne pour la France un facteur d'émission moyen de 55,7 g CO₂ eq. / kWh, utilisé pour 2019 et 2030.

3.2 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle retenue pour les véhicules routiers répondant à la fonction de transport de personnes est le déplacement d'une personne sur 1 km dans un contexte de trafic donné exprimé en personne.km.

L'unité fonctionnelle retenue pour les véhicules routiers répondant à la fonction de transport de marchandise est le déplacement d'une tonne de marchandise sur 1 km dans un contexte de trafic donné exprimé en tonne.km.

L'hypothèse d'1,3 personne par véhicule particulier est mise en regard de 17,4 personnes en moyenne par bus (données RATP).

Les taux de chargements pour les VUL sont supposés égaux à 28 % (d'après une étude Ricardo) et 60 % pour les poids lourds d'après les hypothèses IFPEN.

3.3 Frontières du système

Ont été exclues du périmètre de l'étude : les infrastructures, les routes, les bornes de recharge, la recharge des véhicules, la consommation des auxiliaires, les émissions liées à l'usure des pneus et au freinage. Dans un scénario de déploiement prospectif de l'électrification, il faudrait les inclure dans le périmètre. La consommation des auxiliaires, les émissions liées à l'usure des pneus et au freinage peuvent être supposées comparables entre les différents cas d'étude et ne sont pas prises en compte.

Les étapes considérées sont celles présentées dans la Figure 7 ci-dessous. Sur l'axe horizontal, l'ensemble des étapes du cycle de production des carburants est pris en compte : de l'extraction des matières premières jusqu'au réservoir du véhicule (*Well-to-Tank*) à l'utilisation du carburant (*Tank-to-Wheel* ou *TTW*). Sur l'axe vertical propre au véhicule, il y a deux composantes : le cycle de vie du véhicule (*Cradle-to-Grave* ou *C2G*) et le fonctionnement véhicule via l'utilisation du carburant. L'étude menée est donc qualifiée du puits à la roue ou *Well-to-Wheel* avec la prise en compte du cycle de vie véhicule en plus.

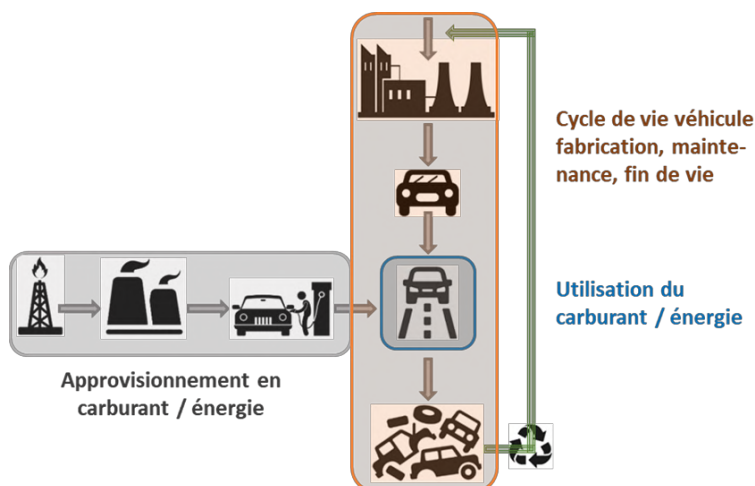


Figure 7 : Etapes du cycle de vie considérées dans l'étude : bilan du puits à la roue et cycle de vie véhicule

3.4 Résultats

La méthode d'impact utilisée pour estimer les impacts potentiels sur le changement climatique est celle préconisée par la Commission Européenne, soit le *Global Warming Potential* calculant le forçage radiatif sur un horizon de temps de 100 ans d'après la méthodologie IPCC 2007.

3.4.1 Véhicules légers

3.4.1.1 Segment C

Les Figure 8 et Figure 9 présentent les résultats pour le segment C (voiture compacte, type Mégane, 308 ou Golf) des émissions de GES en grammes de CO₂ équivalent par kilomètre et par personne transportée en 2019 et 2030. La partie bleue foncée représente les émissions liées à la carcasse du véhicule et au groupe motopropulseur (moteur, boîte de vitesse, etc.). On peut remarquer que cette partie est relativement équivalente entre les différentes motorisations, avec un léger avantage aux véhicules électriques (absence de moteur thermique et de boîte de vitesse).

L'étape du cycle de vie la plus émettrice en GES pour les véhicules thermiques est liée à la partie carburant (en gris), c'est-à-dire les émissions du puits au réservoir et du réservoir à la roue. Ce sont surtout ces émissions du réservoir à la roue représentant la combustion du carburant dans le véhicule durant les 150 000 km de son utilisation qui constituent la majeure partie de l'impact sur le réchauffement climatique.

Le GNV (en turquoise) émet moins de CO₂ que ses équivalents thermiques, essence et gazole, grâce à un facteur d'émission plus faible (rapport H/C favorable pour le CH₄ par rapport aux plus longues chaînes carbonées des hydrocarbures liquides). On peut remarquer aussi la réduction importante de ces émissions entre 2019 et 2030, grâce à l'amélioration des rendements.

Le bioGNV, qui présente un facteur d'émission environ 9 fois plus faible, a des résultats très favorable : environ 40 g CO₂ eq. /personne.km, soit 3,5 fois moins que le véhicule équivalent Diesel.

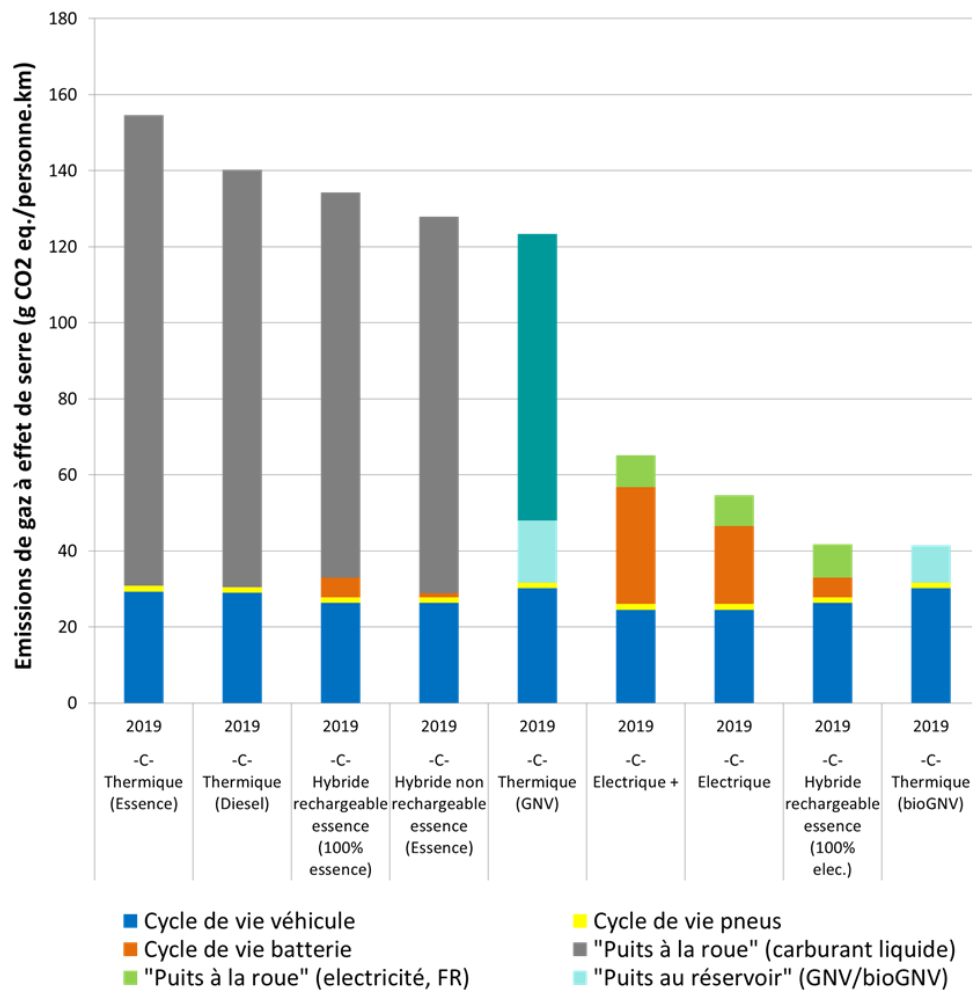


Figure 8 : Impacts potentiels sur le changement climatique pour les véhicules du segment C en 2019

Si on observe à présent les véhicules électrifiés, comprenant les hybrides rechargeables (PHEV) et les véhicules électriques à batterie, on peut remarquer que les émissions liées à la fabrication de la batterie (partie orange des graphiques) deviennent non négligeables. Elles sont bien sûr directement proportionnelles à la capacité de la batterie embarquée (en kWh). Des progrès techniques et les éventuelles ouvertures de gigafactory en Europe expliquent pourquoi le facteur d'émission des batteries en 2030 est plus faible qu'en 2019 dans nos projections.

On peut remarquer des résultats complètement différents pour les hybrides rechargeables, entre une utilisation tout électrique (PHEV 100% elec.) ou une utilisation tout thermique, c'est-à-dire sans jamais recharger sa batterie (hybride rechargeable 100% essence ou 100% GNV). En tout électrique, les résultats sont très bons (41 g CO₂ eq. / personne.km en 2019), et concurrencent le véhicule thermique fonctionnant au bioGNV. En tout thermique les résultats sont bien sûr dégradés : les émissions liées à la fabrication de la batterie s'additionnent à celles de la combustion du carburant.

Le mode d'utilisation des PHEV par leurs propriétaires, et leur volonté de recharger leur véhicule, sont encore aujourd'hui assez mal connus. Les deux résultats antagonistes présentés ici permettent d'établir a minima les bornes inférieures et supérieures de l'utilisation de ce type de véhicule.

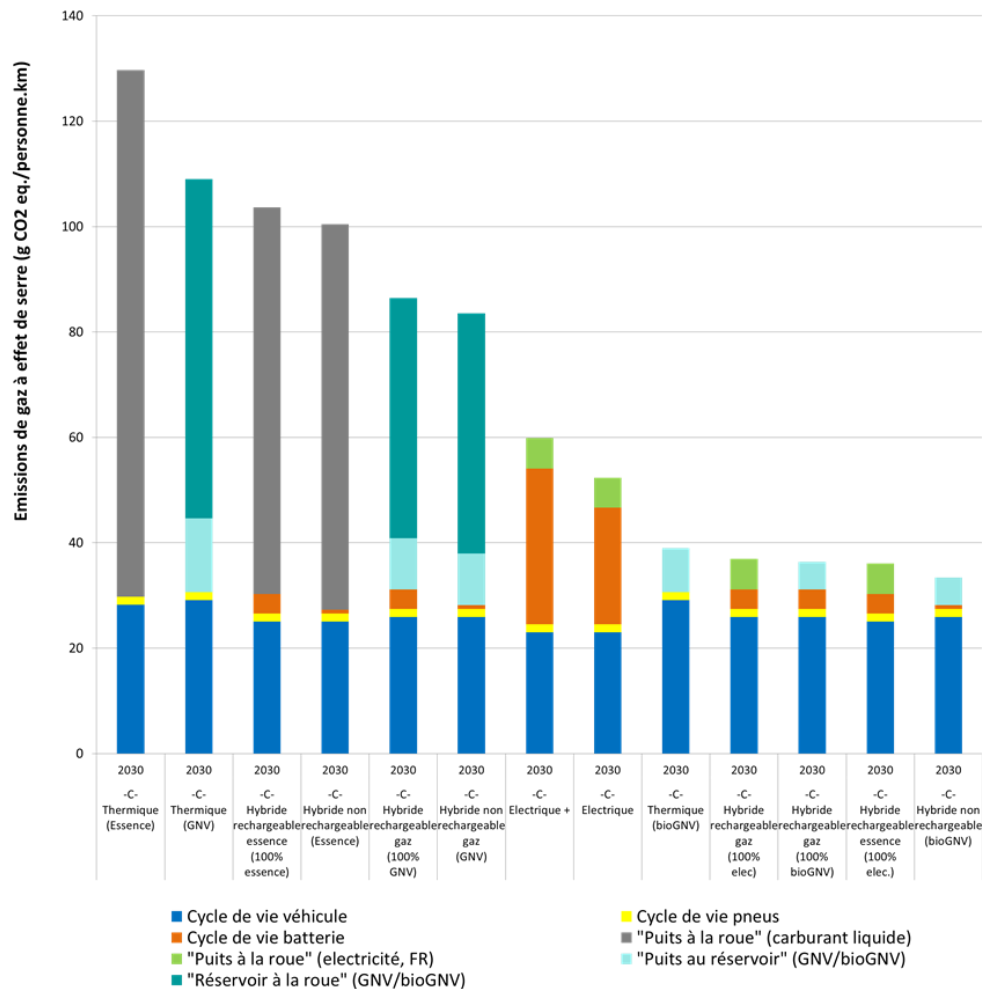


Figure 9 : Impacts potentiels sur le changement climatique pour les véhicules du segment C en 2030

L'apport de l'hybridation non rechargeable (HEV) permet de diminuer la consommation des véhicules et donc leurs émissions de CO₂. Pour un véhicule HEV essence, on se rapproche ainsi des émissions d'un véhicule thermique roulant au GNV (soit environ 123 g CO₂eq. / personne.km). L'hybride non rechargeable GNV, disponible en 2030 (Figure 9) d'après nos hypothèses, fait encore mieux avec 82 g CO₂ eq. / personne.km. Enfin, l'hybride non rechargeable bioGNV cumule les deux avantages de l'hybridation et du biométhane, avec des émissions totales à 33 g CO₂eq. / personne.km en 2030.

Les véhicules électriques à batterie (Electrique et Electrique+ pour ceux embarquant une batterie plus importante) émettent beaucoup moins de CO₂ que les véhicules thermiques, même hybridés. Les émissions dues à la fabrication de la batterie sont largement compensées par les faibles émissions relatives à la production d'électricité durant les 150 000 km d'utilisation. En effet c'est la production d'électricité française qui est considérée ici et le facteur d'émission est très faible (55,7 g CO₂ eq. / kWh), dû à l'utilisation majoritaire de l'énergie nucléaire.

Pour un véhicule électrique embarquant 40 kWh de batterie en 2019, environ 52 g CO₂eq. / personne.km sont émis. Pour un véhicule Electrique+ (60 kWh de batterie), cela représente environ 63 g CO₂eq. / personne.km. Ces résultats sont néanmoins supérieurs à ceux du véhicule thermique fonctionnant au bioGNV.

3.4.1.2 Segment D

Les Figure 10 et Figure 11 présentent les résultats concernant les impacts potentiels sur le changement climatique pour les véhicules du segment D en 2019 et 2030.

Les tendances sont inchangées par rapport au segment C.

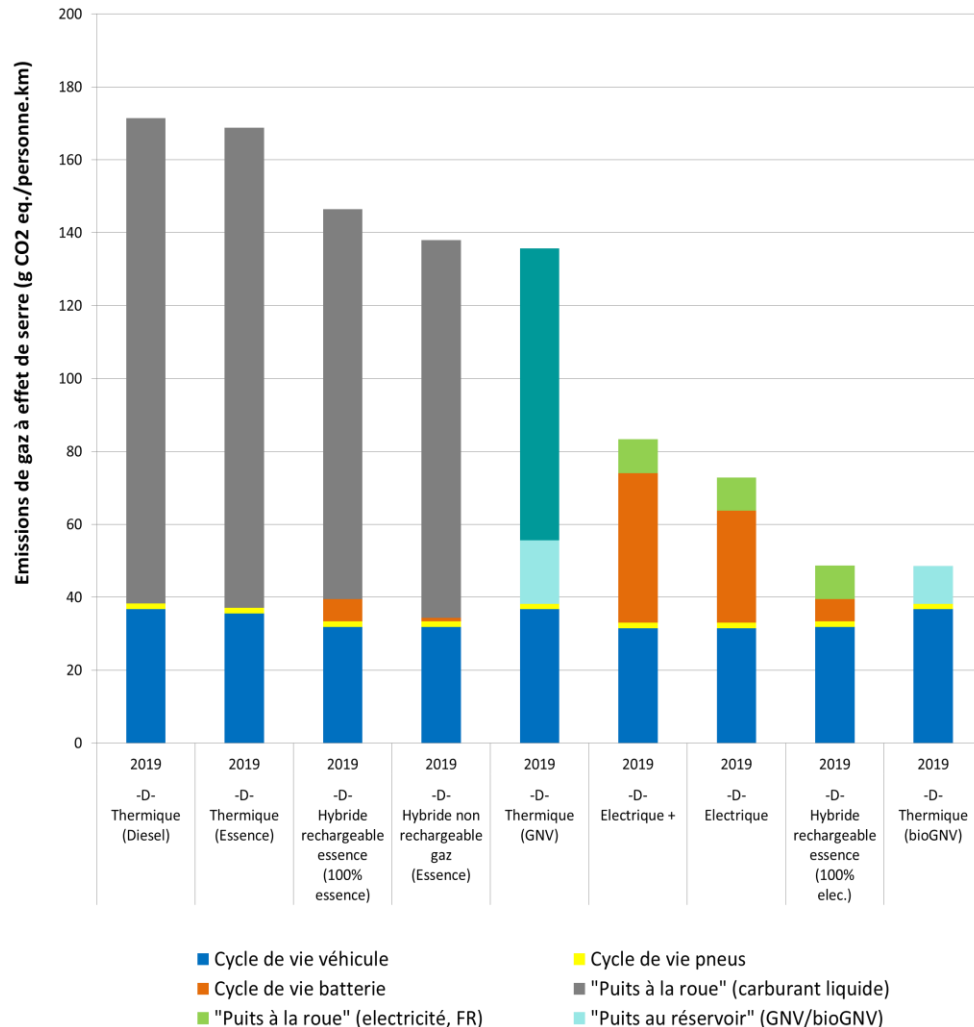


Figure 10 : Impacts potentiels sur le changement climatique pour les véhicules du segment D en 2019

L'utilisation d'un véhicule thermique fonctionnant au bioGNV est très intéressante puisqu'il s'agit des meilleurs résultats en 2019 avec 47 g CO₂ eq. / personne.km, équivalents à ceux obtenus avec l'hybride rechargeable fonctionnant toujours en mode électrique.

Avec des batteries de capacités conséquentes sur ce segment D (60 et 80 kWh en 2019 pour l'Electrique et l'Electrique +), les véhicules électriques sont pénalisés par les émissions liées à la fabrication de la batterie. Même le faible facteur d'émission de l'électricité française (essentiellement nucléaire) ne permet pas de rattraper cet écart.

En 2019 comme en 2030 les hybrides rechargeables fonctionnant 100 % du temps en mode électrique affichent de très bons résultats, quasiment équivalents à ceux du thermique bioGNV.

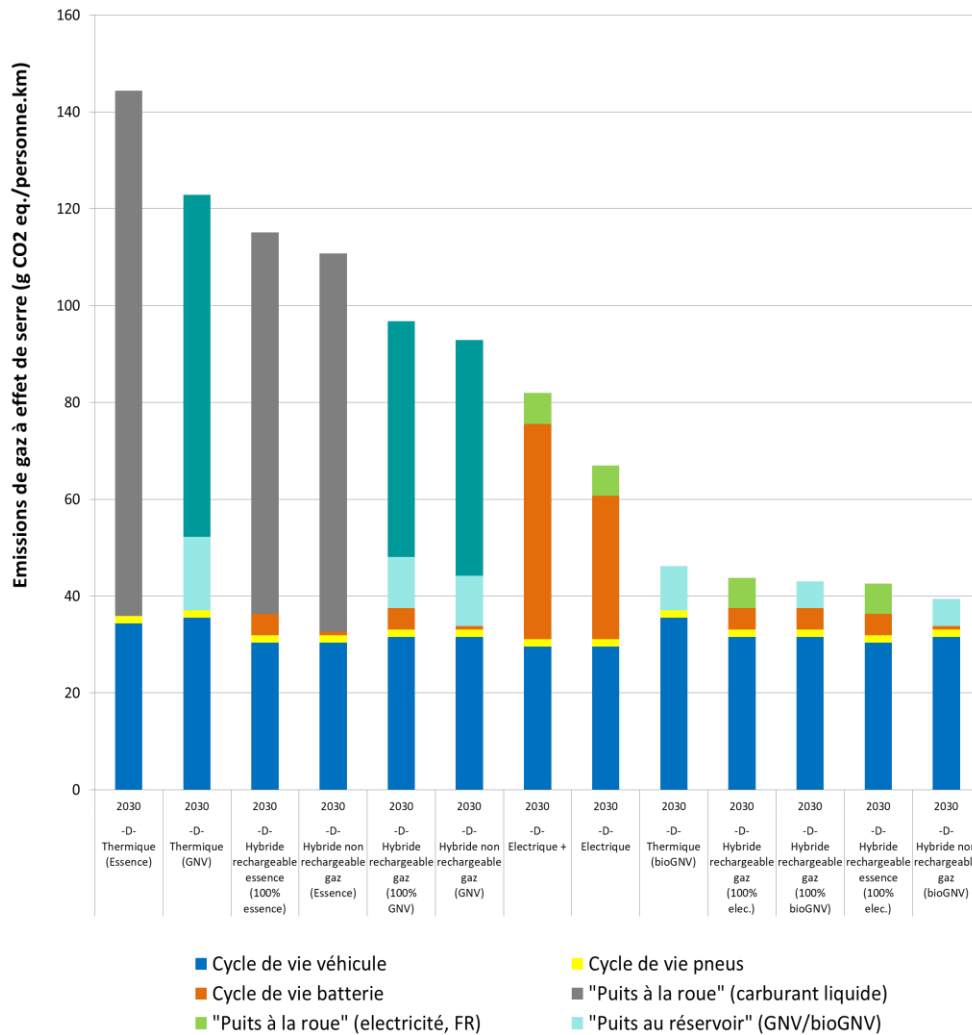


Figure 11 : Impacts potentiels sur le changement climatique pour les véhicules du segment D en 2030

3.4.2 Bus

Les résultats pour les bus sont présentés sur la Figure 12 pour l'année 2019, et la Figure 13 pour l'année 2030.

Etant donné que les bus parcourent beaucoup de kilomètres (40 000 km par an pendant 12 ans), la contribution aux émissions de GES de la fabrication de la carcarasse et du groupe motopropulseur est moins importante proportionnellement que pour les véhicules légers. Mais cela vaut aussi pour la fabrication de la batterie. Ce sont donc les émissions provenant de la production et de la combustion du carburant qui sont prépondérantes. Par conséquent cela nivèle un peu les résultats par rapport à ceux des véhicules légers segment C et D.

Les bus 100 % électriques présentent des résultats légèrement inférieurs au bus thermique fonctionnant au bioGNV.

Les bus Diesel et GNV fossile présentent des émissions de GES largement supérieures à celles des bus électriques ou bioGNV.

L'apport de l'hybridation diminue bien sûr les émissions mais elles restent tout de même 3 à 4 fois plus élevées que celles des bus électriques.

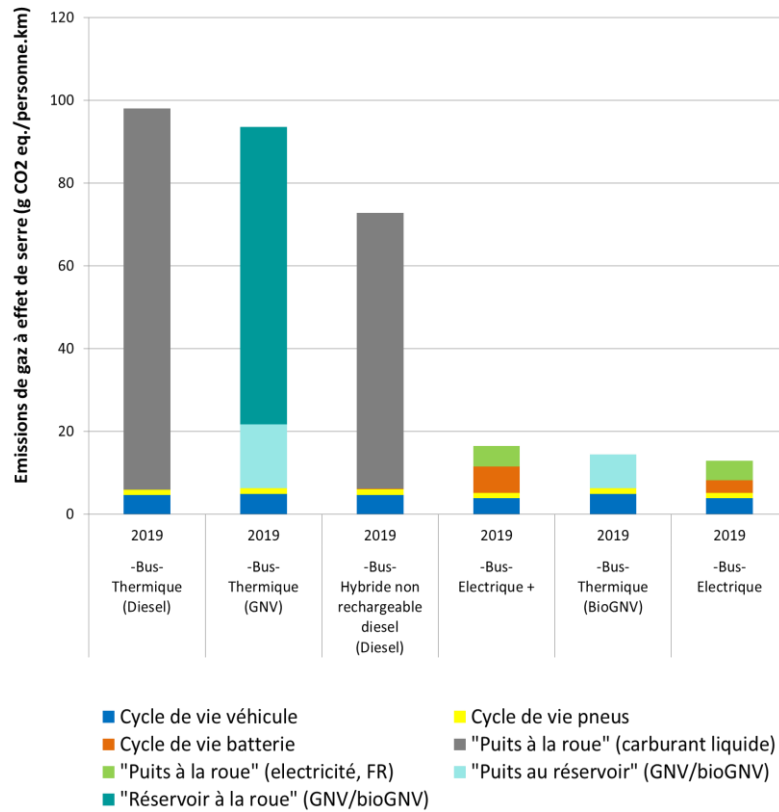


Figure 12 : Impacts potentiels sur le changement climatique pour les bus. Horizon temporel 2019

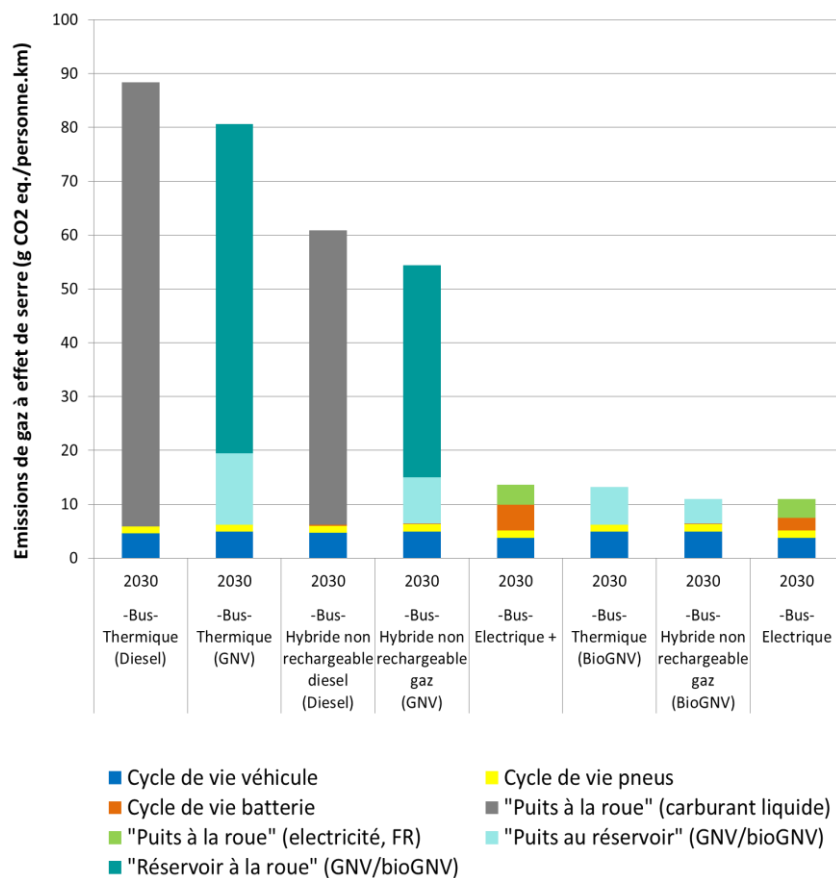


Figure 13 : Impacts potentiels sur le changement climatique pour les bus. Horizon temporel 2030

3.4.3 Véhicules utilitaires légers (VUL)

Les résultats des Figure 14 et Figure 15 présentent les émissions de GES des VUL pour les années 2019 et 2030. L'analyse rejoint celle faite pour les véhicules légers de segment D : la taille importante de la batterie (80 et 100 kWh en 2019 et 2030) a pour conséquence des émissions importantes lors de leur production. Les VUL thermiques (Diesel ou GNV) sont très émetteurs, contrairement à ceux roulant au bioGNV.

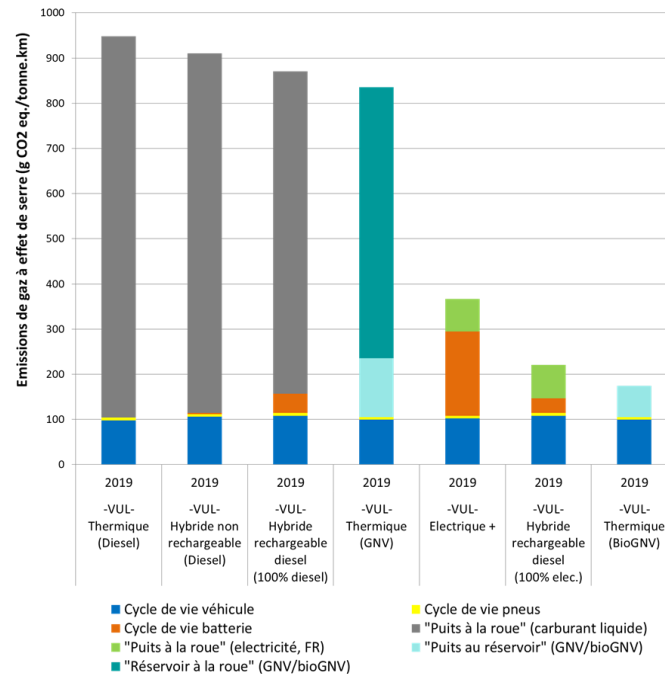


Figure 14 : Impacts potentiels sur le changement climatique pour les VUL. Horizon temporel 2019

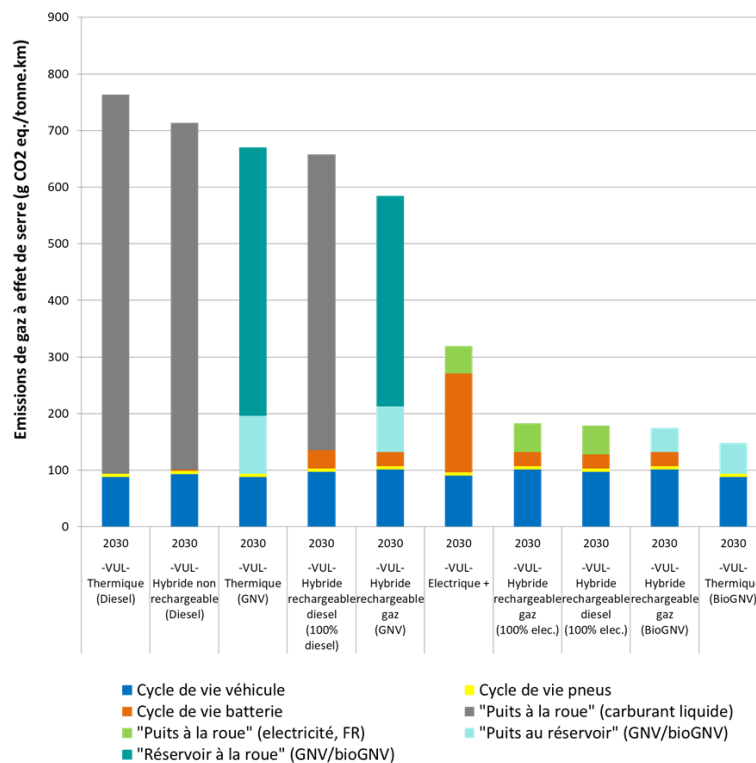


Figure 15 : Impacts potentiels sur le changement climatique pour les VUL. Horizon temporel 2030

3.4.4 Poids lourd livraison 12 tonnes

Les résultats pour les poids lourds de livraison 12 tonnes sont représentés sur les Figure 16 et Figure 17. Avec les 372 000 kilomètres parcourus en 12 ans, la phase d'utilisation (avec la consommation du carburant) est prépondérante. Les meilleurs résultats sont apportés par la motorisation thermique fonctionnant au bioGNV.

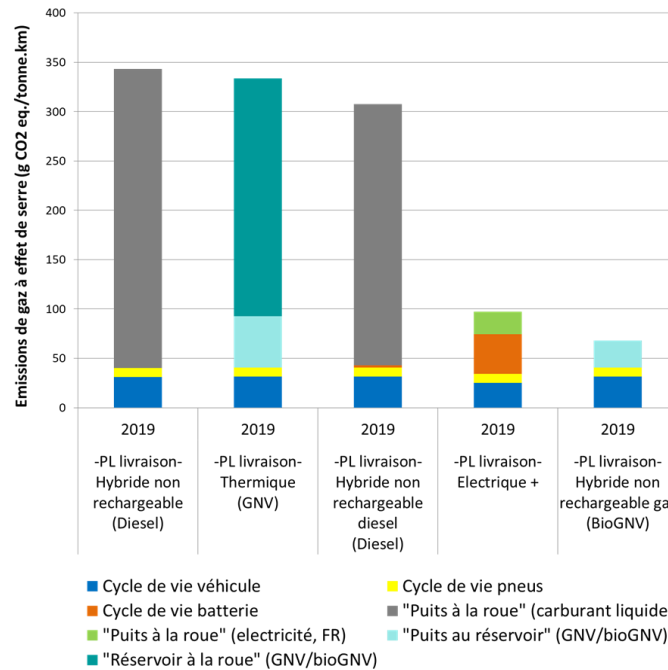


Figure 16 : Impacts potentiels sur le changement climatique pour les PL livraison 12 tonnes. Horizon temporel 2019

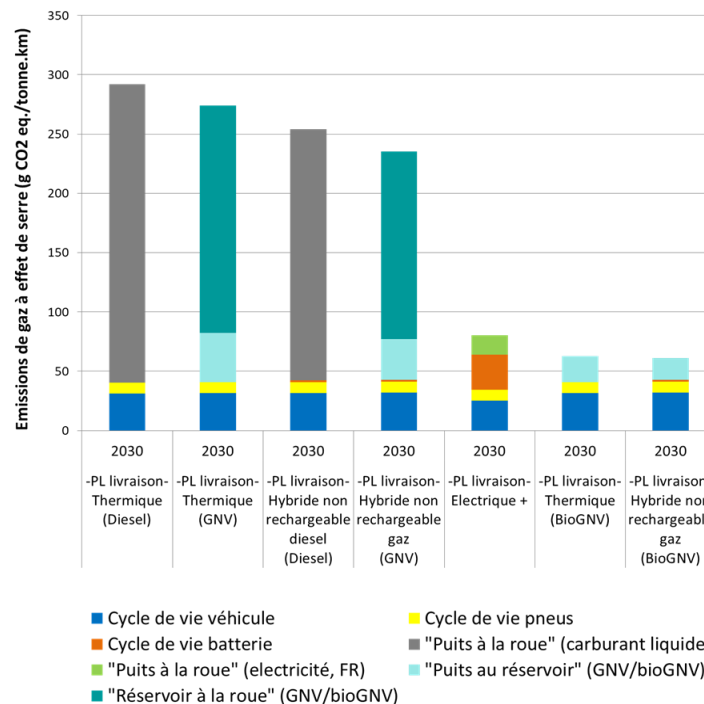


Figure 17 : Impacts potentiels sur le changement climatique pour les PL livraison 12 tonnes. Horizon temporel 2030

4 Conclusion et recommandations

Suite aux résultats de cette étude, plusieurs éléments de conclusion ou enseignements sont à souligner :

- En ce qui concerne les véhicules légers, les véhicules utilitaires et même les poids lourds 12 tonnes, l'utilisation d'un moteur thermique alimenté exclusivement au bioGNV donne les meilleurs résultats en termes d'émissions de GES, suivi de près par les hybrides rechargeables fonctionnant exclusivement à l'électrique (cas théorique car difficilement applicable en conditions réelles avec seulement 50-70 km d'autonomie, notamment pour les parcours longs). Viennent ensuite les véhicules électriques.
- L'hybridation du moteur bioGNV améliore encore les résultats, comme pour les carburants essence, gazole ou même GNV.
- Les véhicules électriques, avec une tendance allant vers des batteries de grande capacité, sont ainsi pénalisés par la quantité importante de CO₂ émise lors de la fabrication des batteries, provenant en grande partie de l'extraction et du raffinage des métaux utilisés (lithium, cobalt, nickel...), et par les procédés énergivores mis en œuvre pour la fabrication et l'assemblage des cellules.
- Les véhicules roulant au GNV (fossile) présentent de meilleures émissions GES que leurs équivalents diesel et essence, que ce soit en 2019 ou en 2030.
- La capacité de production du bioGNV en France (entre 1 et 1,5 TWh) permettrait d'alimenter environ 100 000 à 150 000 véhicules. Il faudrait donc augmenter fortement les unités de méthanisation pour pouvoir assurer un déploiement massif des véhicules bioGNV.
- Enfin, une solution pour déployer plus rapidement les véhicules bioGNV pourrait être d'utiliser un mix GNV fossile et bioGNV. Cela permettrait d'alimenter un nombre de véhicules plus important, tout en gardant un bilan GES très favorable, surtout si la motorisation venait à être hybridée.

5 Annexe

Donnée	Valeur	Source
PCI GNV	47,5 MJ/kg	IFPEN
FE ⁵ amont GNV	45,3 g CO ₂ eq./kWh	Ecoinvent v3.3
FE combustion GNV	204,1 g CO ₂ eq./kWh	Base Carbone ADEME, P.44
FE bioGNV	28,4 g CO ₂ eq./kWh	Etude ENEA Quantis
PCI diesel	43,1 MJ/kg	JEC
FE amont diesel	43,9 g CO ₂ eq./kWh	Ecoinvent v3.3
FE combustion diesel	263,5 g CO ₂ eq./kWh	JEC
PCI essence	43,2 MJ/kg	JEC
FE amont essence	63 g CO ₂ eq./kWh	Ecoinvent v3.3
FE combustion essence	264,2 g CO ₂ eq./kWh	JEC
FE électricité FR, 2019	55,7 g CO ₂ eq./ kWh	Ecoinvent v3.3 (IEA 2017, data 2014)
FE électricité FR, 2030 (pour analyse de sensibilité)	50,4 g CO ₂ eq./ kWh	Projection IFPEN d'après RED II (objectif 27% d'énergie renouvelable) basée sur la donnée EI v3.3
Masse réservoir bus GNV/bioGNV	433 kg	GRDF
Composition réservoir bus GNV/bioGNV	aluminium	GRDF
Masse réservoir PL GNV/bioGNV	558 kg	GRDF
Composition réservoir PL GNV/bioGNV	acier	GRDF
Masse réservoir bus et PL diesel	100 kg	GRDF
Composition réservoir bus et PL diesel	50 % aluminium / 50 % acier	GRDF
Masse réservoir segment C GNV/bioGNV	30 kg	http://isidoredd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/dri/RMT07-010.pdf
Composition réservoir segment C GNV/bioGNV	Epoxy	
Masse réservoir segment D GNV/bioGNV	39 kg	Extrapolation d'après http://isidoredd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/dri/RMT07-010.pdf
Composition réservoir segment D GNV/bioGNV	Epoxy	
Masse réservoir VUL GNV/bioGNV	47 kg	
Composition réservoir VUL GNV/bioGNV	Epoxy	
Cycles segments C, D, & VUL	WLTC	IFPEN
Cycle bus	RATP	IFPEN
Cycle PL livraison	Carrefour city	IFPEN

⁵ Facteur d'émission (FE)

Normes d'émissions à l'échappement véhicules particuliers, 2019	Normes Euro6b, véhicules particuliers	Delphi
Normes d'émissions à l'échappement véhicules particuliers, 2030	Normes Euro7, véhicules particuliers	Delphi
Normes d'émissions à l'échappement VUL et PL livraison, 2019	Normes Euro6b/6c VUL	Delphi
Normes d'émissions à l'échappement VUL et PL livraison, 2030	Hypothèses IFPEN	IFPEN
Normes d'émissions à l'échappement bus, 2019		https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php
Normes d'émissions à l'échappement bus, 2030		
Downsizing acier 2030	30 %	Etude ADEME, 30% de masse d'acier en moins pour les véhicules 2030
Downsizing aluminium 2030	65 %	Etude ADEME, L'aluminium remplace l'acier à proportion de 65 % des 30 %
Capacité batterie Segment C – VE – 2019	40 kWh	IFPEN
Capacité batterie Segment C – VE + – 2019	60 kWh	IFPEN
Capacité batterie Segment C – VE – 2030	60 kWh	IFPEN
Capacité batterie Segment C – VE+ – 2030	80 kWh	IFPEN
Capacité batterie Segment D – VE – 2019	60 kWh	IFPEN
Capacité batterie Segment D – VE + – 2019	80 kWh	IFPEN
Capacité batterie Segment D – VE – 2030	80 kWh	IFPEN
Capacité batterie Segment D – VE+ – 2030	100 kWh	IFPEN
Capacité batterie VUL – VE + – 2019	80 kWh	IFPEN
Capacité batterie VUL – VE+ – 2030	100 kWh	IFPEN
Capacité batterie Bus – VE – 2019 et 2030	170 kWh	IFPEN
Capacité batterie Bus – VE+ – 2019 et 2030	340 kWh	IFPEN
Capacité batterie PL – VE – 2019 et 2030	130 kWh	IFPEN
Capacité batterie PL – VE + – 2019 et 2030	240 kWh	IFPEN

6 Bibliographie

ISO 14040:2006, 10/2006 Environmental management - life cycle assessment - principles and framework, consulté le 19 juin 2018.

ISO 14044:2006, 10/2006 Environmental management - life cycle assessment - requirements and guidelines, consulté le 4 février 2019.

Frischknecht, Rolf; Jungbluth, Niels; Althaus, Hans-Jörg; Doka, Gabor; Dones, Roberto; Heck, Thomas et al. (2005) The ecoinvent Database. Overview and Methodological Framework (7 pp). In : The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 10, n° 1, p. 3–9. DOI: 10.1065/lca2004.10.181.1.

IEA (2017) World Energy Statistics and Balances.

Nemry, Françoise; Leduc, Guillaume; Mongelli, Ignazio; Uihlein, Andreas (2008) Environmental Improvement of Passenger Cars (IMPRO-car). Luxembourg : Publications Office (EUR. Scientific and technical research series, 23038), consulté le 23 novembre 2017.

Nemry, Françoise; Vanherle, Kris; Zimmer, Wiebke; Uihlein, Andreas; Genty, Aurélien; Rueda-Cantuche, José-Manuel et al. (2009) Feebate and Scrappage Policy Instruments. Environmental and Economic Impacts for the EU27. EUR 23896 EN. Luxembourg : OPOCE (EUR. Scientific and technical research series, 23896), consulté le 23 novembre 2017.

PE International AG and Ginkgo 21 (2013) Elaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de GES et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020. Etude réalisée pour le compte de l'ADEME. ADEME, éd., consulté le 29 janvier 2018.

Quantis (2017) Evaluation des impacts GES de l'injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel. Avec la collaboration de ENEA.