

ETUDE RETROFIT GAZ

Evaluation environnementale du
rétrofit GNV et bioGNV pour
des véhicules Diesel



EXPERTISES

Janvier
2023

REMERCIEMENTS

BENITA Denis (ADEME), MONTAGNOLE Gladys (GRDF), CASTAIGNEDE Laurent (BCO2 ingénierie)

CITATION DE CE RAPPORT

LUCAS Maxime, GUYON Olivier, MICHEL Pierre, TERNEL Cyprien, MELGAR Joris, IFP Energies nouvelles. 2023. « Etude rétrofit Gaz » 31 pages.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01
Numéro de contrat : 2166D0025

Étude réalisée par IFPEN et IFP Energies pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : MELGAR Joris, IFP Energies nouvelles

Coordination technique - ADEME : BENITA Denis
Direction Villes et Territoires Durables/Service Transports et Mobilité

SOMMAIRE

RÉSUMÉ.....	4
ABSTRACT	5
1. CONTEXTE ET ENJEUX.....	6
1.1. Contexte.....	6
1.2. Objectifs.....	6
1.3. Méthodologie générale	7
2. SIMULATIONS DES CONSOMMATIONS REELLES DES VEHICULES	8
3. ANALYSE DU CYCLE DE VIE.....	9
3.1. Cadre général.....	9
3.2. Unité fonctionnelle.....	9
3.3. Frontières du système	10
3.4. Définition du système	10
3.4.1. Fabrication du véhicule.....	11
3.4.1.1. Modélisation carcasses	11
3.4.1.2. Modélisation groupes moteurs	11
3.4.1.3. Modélisation réservoirs.....	11
3.4.2. Phase d'utilisation des véhicules	12
3.4.3. Rétrofit ou mise à la casse du véhicule	14
3.4.3.1. Modélisation scénario rétrofit.....	14
3.4.3.2. Modélisation scénario de mise à la casse et achat d'un véhicule gaz neuf.....	14
3.4.4. Fin de vie	15
3.5. Résultats.....	16
3.5.1. Emissions grises du rétrofit	16
3.5.2. Autocar.....	17
3.5.3. Poids lourd 19 tonnes.....	20
3.5.4. Véhicule Utilitaire Léger 2,6 tonnes.....	22
4. CONCLUSION	24
4.1. Synthèse et enseignements.....	24
4.2. Limites de l'étude	24
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	26
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	27
SIGLES ET ACRONYMES	28
ANNEXES.....	29
ANNEXE 1 : Données utilisées.....	29
ANNEXE 2 : Données véhicules pour simulations de consommation	31

RÉSUMÉ

Cette étude s'inscrit dans la stratégie française pour le développement de la filière Gaz Naturel Véhicule (GNV) et sa déclinaison bioGNV. Elle vise à évaluer la pertinence environnementale de la solution rétrofit d'un véhicule diesel vers une motorisation gaz GNV/bioGNV, et de la comparer avec d'autres scénarios de renouvellement de véhicule.

Dans la continuité de l'étude sur le « rétrofit électrique », précédemment réalisée par le bureau d'études ALGOE pour le compte de l'ADEME début 2021, s'intitulant « Conditions nécessaires à un rétrofit économe, sûr et bénéfique pour l'environnement », la présente étude vise à fournir une vision claire et détaillée de l'intérêt du « rétrofit gaz ». Les résultats présentés pourront être mis en perspective avec une étude économique sur le l'intérêt du rétrofit gaz.

Trois types de véhicules sont étudiés : l'autocar scolaire 12 mètres, le poids lourd 19 tonnes, et le véhicule utilitaire léger 2,6 tonnes. Ces trois segments sont particulièrement indiqués pour une utilisation gaz. En 2021, la part des nouvelles immatriculations GNV est de 50% pour les bus et 17% pour les autocars, et 1 poids lourds sur 20 roule désormais au bioGNV/GNV [21]. Le rétrofit gaz de la flotte diesel existante pourrait accélérer la dynamique.

L'évaluation de la consommation de combustible des trois types de véhicules est effectuée sur différents cycles d'usage. Les valeurs de consommation alimentent ensuite en données l'étude environnementale.

L'évaluation environnementale se base sur la méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) et a pour objectif de comparer les émissions de gaz à effet de serre (GES) des solutions de conservation du véhicule initial, de rétrofit du véhicule initial et d'achat d'un nouveau véhicule. Il s'avère que l'impact des émissions grises du rétrofit gaz est compensés par les émissions évitées en roulant au gaz par rapport au diesel sur le reste à vivre du véhicule. Dans tous les scénarios étudiés, le rétrofit gaz apparaît comme moins émetteur de GES que la conservation du véhicule initial, la mise à la casse du véhicule initial et l'achat d'un nouveau véhicule gaz neuf. L'intérêt d'un rétrofit ou renouvellement d'un véhicule est particulièrement notable pour une utilisation au bioGNV.

ABSTRACT

This study is part of the French strategy for the development of the Natural Gas Vehicle (NGV) sector and its bio-NGV version. It aims at assessing the environmental relevance of the retrofit of a diesel vehicle to a NGV/bioNGV engine, and to compare it with other vehicle renewal scenarios.

In the continuity of the study on the "retrofit electric vehicle", entitled " Conditions nécessaires à un retrofit économe, sûr et bénéfique pour l'environnement ", the present study aims at providing a clear and detailed vision of the interest of the "gas retrofit". The environmental results presented could be put into perspective with an economic study on the gaz retrofitting scenarios.

Three types of vehicles are studied: the 12-metre school bus, the 19-tonne truck and the 2.5-tonne light commercial vehicle. These three segments are particularly prone to gas use. In 2021, in France, the share of new CNG registrations is 50% for buses and 17% for coaches, and 1 in 20 HGVs now run on bioNGV/CNG [21]. The gas retrofit of the existing diesel fleet could accelerate the momentum.

The fuel consumption of the three types of vehicles is assessed over different duty cycles. The consumption values are then fed into the economic analysis.

The environmental assessment is based on the Life Cycle Assessment (LCA) methodology and aims at comparing the greenhouse gas (GHG) emissions of keeping the original vehicle, retrofitting the original vehicle and purchasing a new vehicle. It turns out that the impact of the grey emissions of the gas retrofit are offset by the emissions avoided when running on gas compared to diesel over the remaining life of the vehicle. In all the scenarios studied, gas retrofitting is more beneficial than scrapping the original vehicle and buying a new gas vehicle. The benefits of retrofitting or renewing a vehicle are particularly noticeable for use with bioNGV.

1. Contexte et enjeux

1.1. Contexte

Le rétrofit (réaménagement) consiste dans sa définition générique à ajouter, modifier ou restaurer des fonctions technologiques à des systèmes vieillissants, par le remplacement de pièces obsolètes ou usées tout en maintenant la configuration initiale du système. C'est une pratique courante du secteur des transports pour rénover des véhicules.

Dans la dynamique de développement de la mobilité routière, le « rétrofit thermique » émerge pour transformer des véhicules diesel en motorisation gaz, permettant de fonctionner au Gaz Naturel pour Véhicule (GNV) et au bioGNV avec des réductions des impacts environnementaux encore plus vertueuses.

La poussée du rétrofit s'inscrit aussi dans un contexte de zones urbaines de plus en plus restrictives (16 ZFE en France) pour les véhicules professionnels fonctionnant pour une très grande majorité au Diesel. Ceux-ci seront totalement interdits en IDF d'ici 2025. Les véhicules GNV, en étant Crit'air 1, sont admissibles en ville. Ils possèdent de plus une meilleure cohérence économique que la solution électrique. Le rétrofit permettrait aussi un développement de la filière GNV, aujourd'hui limitée par le manque d'offre de véhicules neufs sur certains secteurs et le maillage insuffisant en stations GNV dans certaines régions.

L'étude « rétrofit » [1] sur le rétrofit électrique a permis de définir des recommandations à partir d'Analyses de Cycle de Vie (ACV) du rétrofit de véhicules diesel vers des véhicules électriques. Il manque à ce jour un équivalent pour le rétrofit « thermique » en France. Les résultats obtenus par la présente étude ne sont toutefois pas destinés à être directement comparés à ceux de l'étude rétrofit électrique. En effet, les méthodologies, hypothèses retenues et bases de données utilisées diffèrent.

1.2. Objectifs

Si l'opération de « rétrofit gaz » semble a priori pertinente pour réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) d'un véhicule routier dans sa production comme dans son usage, l'étude vise à vérifier la véracité de cette intuition par des analyses d'impacts documentées.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les impacts environnementaux potentiels de différents moyens de transport routier (personne et marchandise), à l'horizon temporel actuel (2022), 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). Les infrastructures routières et pour les stations-service sont exclues du périmètre.

L'ACV de différents segments de véhicules (Autocar scolaire, Poids lourd 19 tonnes, Véhicule utilitaire léger) et leurs vecteurs énergétiques associés : Diesel B7, GNV et bioGNV, a permis de comparer entre elles 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.

L'objectif de l'étude est également de comparer le processus de rétrofit par rapport à la conservation du véhicule diesel initial et l'achat d'un véhicule neuf. En ce sens, l'approche retenue se structure autour de l'analyse de trois scénarios se différenciant par la décision prise après 10 ans d'exploitation d'un véhicule diesel :

- Un scénario de prolongement de l'exploitation du véhicule « diesel » pendant dix ans supplémentaires,
- Un scénario de rétrofit GNV du véhicule et de son exploitation pendant dix ans,
- Un scénario de mise à la casse suivi de l'achat d'un véhicule GNV neuf et de son exploitation pendant dix ans.

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 l'étude (Erreur ! Source du renvoi introuvable.), à savoir :

- L'autocar 12m (type IVECO crossway),
- Le poids-lourd de 19 tonnes (type Renault Trucks D-wide),
- Le véhicule utilitaire léger de 2,6 tonnes (type Mercedes sprinter)



Figure 1: Segments analysés dans l'étude

Chaque organe de la motorisation (moteur thermique, boîte de vitesses, carrosserie) a été modélisé du point de vue énergétique afin de permettre une simulation de la consommation représentative d'un véhicule réel. Ces modèles ont permis d'évaluer la consommation en carburant (diesel et gaz) pour un usage unitaire urbain, extra-urbain et autoroutier.

Après cette première approche énergétique du réservoir à la roue (*Tank-to-Wheel*), chaque type de véhicule a ensuite été évalué suivant la méthodologie ACV, intégrant la production du vecteur énergétique mais également la fabrication du véhicule et sa fin de vie. Cette étude reprend le cheminement de l'étude E4T [2] publiée en 2018 et mise à jour en 2022. Une mise à jour des architectures et des réservoirs gaz a été effectuée, et la modélisation d'un autocar a été entièrement ajoutée.

2. Simulations des consommations réelles des véhicules

Pour simuler la consommation des 3 segments véhicules, le modèle utilisé est celui qui est décrit dans le rapport du projet TCO2 [3]: il s'agit du « modèle de véhicule développé par IFPEN [...] quasi-statique basé sur les équations de la physique. [...] Les véhicules utilisés pour réaliser les simulations sont paramétrés pour représenter des véhicules neufs dont les émissions respectent la norme Euro VI et dont les caractéristiques principales correspondent à la moyenne des caractéristiques des véhicules neufs disponibles sur le marché. »

Issu d'un précédent projet mené par IFPEN pour l'ADEME (étude E4T), trois cycles de conduite sont utilisés pour représenter trois usages moyens sur les principales topologies de route, à savoir un usage urbain, extra-urbain et autoroutier, présentés dans [3]. Dans le cas du VUL les cycles utilisés sont issus des travaux présentés dans l'étude « Driving Behavior Identification and Real-World Fuel Consumption Estimation With Crowdsensing Data » [4] et représentent un comportement normal d'un conducteur pour un usage urbain, extra-urbain et autoroutier.

Le modèle de consommation des véhicules est validé sur des trajets réels. La validation du modèle poids-lourd est présentée dans [3] et celle du modèle VUL dans les travaux « Conventional engine vehicles model parametrization for real-world fuel consumption estimation » [5].

Les principaux paramètres des 3 véhicules pour les motorisation Diesel-B7 et Gaz sont détaillés dans la Table 1.

Véhicule	Carburant	Masse à vide [t]	PTAC [t]	Masse moteur [kg]	Masse post-traitement [kg]	Masse réservoir [kg]	Puissance moteur [kW]
VUL 3,5t	Diesel	1,4	4	120	18	0 *	90
	GNV	1,4	4	120	5	75	90
PL 19t	Diesel	9,4	19	732	61	150	280
	GNV	9,4	19	732	18	158	280
Autocar 12m	Diesel	12,3	19	732	61	100	280
	GNV	12,3	19	732	18	178	280

Table 1: Principaux paramètres macroscopiques des 3 segments véhicule diesel B7 et Gaz

*réservoir en plastique, masse négligée

Les consommations simulées pour les 3 véhicules pour les motorisation Diesel-B7 et Gaz sont présentées dans la Table 2 : consommations simulées avec le modèle IFPEN.

Véhicule	Techno	Cycle	Consommation	Unité
PL 19t	Diesel-B7	Ville	45,2	l/100km
		Route	28,9	l/100km
		Autoroute	23,8	l/100km
	GNC	Ville	42,0	kg/100km
		Route	26,5	kg/100km
		Autoroute	20,9	kg/100km
VUL	Diesel-B7	Ville	11,7	l/100km
		Route	10,1	l/100km
		Autoroute	11,1	l/100km
	GNC	Ville	9,7	kg/100km
		Route	8,1	kg/100km
		Autoroute	8,5	kg/100km
Autocar	Diesel-B7	Ville	44,1	l/100km
		Route	28,3	l/100km
		Autoroute	23,4	l/100km
	GNC	Ville	41,1	l/100km
		Route	26,0	l/100km
		Autoroute	20,7	l/100km

Table 2: consommations simulées avec le modèle IFPEN

3. Analyse du Cycle de Vie

3.1. Cadre général

L'objectif de l'étude est d'évaluer les impacts environnementaux des véhicules étudiés à l'horizon actuel, en prenant en compte à la fois le cycle de vie véhicule et le cycle de vie carburant. Pour cela la méthodologie utilisée est celle de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), réalisée conformément aux normes ISO 14040 & 14044 à l'aide du logiciel commercial d'ACV SimaPro® version 9.2.0.2. La base de données utilisée est Ecoinvent v.3.8 pour les modélisations des cycles de vie des véhicules ainsi que la Base Carbone® pour la modélisation des vecteurs énergétiques. La modélisation choisie est par défaut « *allocation, cut-off by classification* ».

La méthode d'impact utilisée pour évaluer les indicateurs *midpoints* (orientés problèmes) est la méthode EF 3.0 préconisée par la Commission Européenne. Dans cette étude, seuls les résultats sur l'indicateur de potentiel de réchauffement climatique sont présentés. Cet indicateur rend compte du forçage radiatif (« réchauffement ») causé par les émissions de gaz à effet de serre. La capacité d'un gaz à effet de serre à influencer le forçage radiatif, son potentiel de réchauffement, est exprimée par rapport à une substance de référence, le dioxyde de carbone. On parle alors d'équivalent CO₂ écrit CO₂eq.

3.2. Unité fonctionnelle

La norme ISO 14044 définit l'Unité Fonctionnelle comme "Performance quantifiée d'un système de produits, destinée à être utilisée comme unité de référence dans une ACV". Cette unité fonctionnelle est nécessaire lorsque l'on souhaite comparer par exemple un poids lourd Diesel avec un poids lourd hydrogène.

L'unité fonctionnelle retenue est la « mise à disposition d'un véhicule sur une durée de vie de 20 ans pour le transport de personnes ou de marchandises sur une distance d'1 km dans un contexte de trafic donné ».

3.3. Frontières du système

Les infrastructures : stations-service, les routes, la consommation des auxiliaires, les émissions liées à l'usure des pneus et au freinage, et l'entretien des véhicules ont été exclues du périmètre de l'étude. Les étapes considérées sont celles présentées dans la figure 2.

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*). Les facteurs d'émissions sont ceux de la Base Carbone®. Les facteurs d'émissions amont (WTT) du GNV et bioGNV incluent des émissions spécifiques qui interviennent en « station », sous forme de consommations énergétiques pour la compression du GNC et sous forme d'émissions fugitives de méthane. La consommation électrique moyenne d'une station est estimée à 0.267 kWh par kilogramme de GNC distribué en France (ADEME). La valeur des émissions fugitives est issue de l'étude « PumpTo-Wheels (PTW) methane emission from the heavy-duty (HD) transportation sector » [6].

Sur l'axe vertical propre au véhicule, il y a deux composantes : le cycle de vie du véhicule (modélisations IFPEN avec base Ecoinvent 3.8) et le fonctionnement véhicule via l'utilisation du carburant. L'étude menée est donc qualifiée du puits à la roue ou *Well to Wheel* (WtW) avec la prise en compte du cycle de vie véhicule en plus.

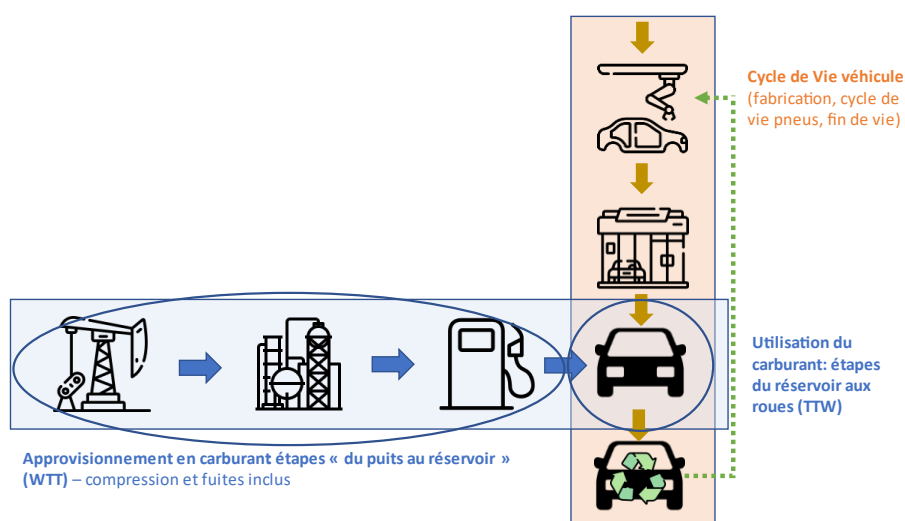
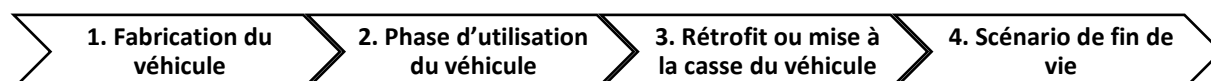


Figure 1: Etapes considérées dans le périmètre WtW incluant le cycle de vie véhicule (Icons made by Freepik, Good Ware and Jongrak from www.flaticon.com)

3.4. Définition du système

Les données et hypothèses structurantes utilisées sont détaillées ci-dessous, regroupées selon les 4 étapes du cycle de vie des véhicules :



3.4.1. Fabrication du véhicule

On fait ici l'hypothèse que les véhicules sont assemblés en France et également utilisés en France.

Les véhicules étudiés ont été modélisés selon le découpage suivant :

- Carcasse du véhicule
- Pneus
- Moteur thermique
- Réservoir (diesel ou gaz)
- Système post-traitement des gaz d'échappement (diesel ou gaz)

3.4.1.1. Modélisation carcasses

VUL

Le choix des matériaux utilisés ainsi que leur mise en forme pour la modélisation des carcasses des VUL sont basés sur la donnée Ecoinvent "Light commercial vehicle {RER} production | Alloc Rec, U". Cette donnée comprend toute la carcasse du véhicule sauf : les pneus, la batterie. La consommation d'énergie : électricité et gaz naturel, pour la fabrication du véhicule est aussi basée sur la donnée Ecoinvent "Light commercial vehicle {RER} production | Alloc Rec, U". Un rendement de 70 % pour la conversion du gaz naturel en chaleur a été considéré.

Autocar

Le choix des matériaux utilisés ainsi que leur mise en forme pour la modélisation des carcasses des Autocar sont basés sur la donnée Ecoinvent " Bus production {RER} production | Alloc Rec, U". Cette donnée comprend toute la carcasse du véhicule sauf : les pneus, la batterie. La modélisation de la carcasse d'autocar est complétée par l'ajout de 57 sièges de 45kg composés à 65% d'acier [7].

Poids lourd

La composition matériau de la carcasse du PL est prise équivalente à celle des bus, dérivée de la donnée "Bus production {RER} production | Alloc Rec, U".

Modélisation pneus

Le poids et la liste des matières composant les pneus des autocars et des poids lourds sont tirés de la présentation d'Iveco Crossway – Autocar Scolaire 12m [8]. Leur composition (% matière) est basée sur le rapport IMPRO CAR I « Environmental Improvement of Passengers Cars » [10] du JRC. La durée de vie des pneus est supposée égale à 40 000 km. Le nombre de pneus d'un poids lourd 19 tonnes est pris égal à 6.

3.4.1.2. Modélisation groupes moteurs

Les moteurs diesel et gaz sont modélisés en utilisant la même donnée Ecoinvent «Internal combustion engine, passenger car {GLO} market for internal combustion engine, passenger car | Cut-off, S». On considère la masse d'un moteur diesel et gaz identique. En revanche, on fait l'hypothèse que la masse du post-traitement diesel (DOC + SCR + CUC + DPF) est supérieure à celle GNV (3WCC) [11].

3.4.1.3. Modélisation réservoirs

Pour les véhicules diesel, on considère un réservoir de 100 kg pour l'autocar et de 150 kg pour le poids lourd (source IFPEN). Pour la composition des réservoirs diesel : on considère 50% acier, 50% aluminium [12]. On fait l'hypothèse pour le VUL diesel que la masse du réservoir est négligeable car en plastique.

Pour la composition des réservoirs GNV, on fait l'hypothèse qu'ils sont de « type IV » (composite). La teneur en fibres de carbone diffère des réservoirs H₂ pouvant stocker du gaz à 700bar : pour des applications GNV stocké à 200bar, on considère 45% résine d'époxy, 55% fibre de carbone [13].

La modélisation de la fibre de carbone (dont la production est très consommatrice en énergie) est issue de sources diverses (Benitez et al 2021 [14], Das et al. 2011 [15], Fraunhofer 2018 [16]). On fait l'hypothèse d'une production de fibres de carbone et d'assemblage du réservoir type IV en France (avec le mix électrique et le transport associé). En annexe, une analyse de sensibilité présente les facteurs d'émissions calculés pour une production du réservoir GNV en Europe et dans le reste du monde.

Le dimensionnement des réservoirs gaz a été réalisé en fonction du besoin en autonomie considéré conjointement avec l'ADEME et GRDF. Dans un souci de représentativité, pour l'autocar et le PL, il a été volontairement choisi une autonomie un peu inférieure à celle d'un véhicule neuf. En effet, un véhicule « rétrofité » n'aura pas forcément le même usage qu'un véhicule neuf, il doit également rester attractif sur le plan économique. La table 3 présente les masses de réservoir calculées à partir de l'hypothèse d'autonomie fixée.

Véhicule	Autonomie (km)	Capacité (L)	Masse réservoir Type IV (kg)
VUL 2,5t	400	195	75
PL 19t	300	410	158
Autocar 12m	300	461	178

Table 3: Données de dimensionnement de réservoir

3.4.2. Phase d'utilisation des véhicules

Les consommations des différents véhicules selon les cycles d'utilisation (ville, route et autoroute) ont été établies dans la partie simulation de cette étude.

Les hypothèses pour le chargement des véhicules sont les suivantes :

- 50% de la charge utile pour le VUL et PL 19t
- 50 personnes 1 trajet sur 2 pour l'autocar plus le conducteur (rappel: il s'agit d'un autocar scolaire)

Dans cette étude, des cycles de conduite réalistes utilisant les coefficients de pondération imposés par la norme EURO VI E ont été étudiés (table 4). Ces coefficients appliqués aux consommations déterminées pour les cycles ville, route et autoroute dans la partie simulation (cf. section 2) permettent d'estimer des valeurs de consommation pour les 3 types de véhicules étudiés (sachant que le VUL est en catégorie N1, le poids lourd 19T en catégorie N3 et l'autocar en catégorie M3).

Catégories de véhicules	Exigence	Urbain	Peri-urbain	Autoroute
M1-N1	%	34	33	33
N2-M2-M3	%	45	25	30
M2-M3 class I & II	%	70	30	0
N3	%	30	25	45

Table 4: Coefficients de pondérations utilisés ISC-UTAC

On retrouve les différents kilométrages annuels dans le tableau 5.

Véhicule	Kilométrage annuel (km/an)	Source hypothèse
VUL 3,5t	15 000	ADEME / étude rétrofit EV
PL 19t	40 000	ADEME-GRDF
Autocar 12m	40 000	ADEME-GRDF

Table 5: Hypothèses de kilométrage

Les facteurs d'émissions de GES utilisés dans cette étude sont ceux de la Base Carbone® ADEME 2019 (Tableau 6).

FE		gCO2e/MJ PCI	Source
Diesel B7	WTT	17,3	BC ADEME (2019)
	TTW	70,6	BC ADEME (2019)
GNV	WTT	11,9	BC ADEME (2019)
	TTW	52,1	BC ADEME (2019)
bioGNV	WTT	12,7	BC ADEME (2019)
	TTW	0,43	BC ADEME (2019)

Table 6: FE utilisés

Les résultats présentés dans la partie 3.5. sont très sensibles aux valeurs de consommation estimées et aux facteurs d'émissions des vecteurs énergétiques. Une revue bibliographique des facteurs d'émissions existants a été réalisée (la table 4 regroupe les valeurs d'émissions de GES d'autres sources disponibles : Sphera, Ecoinvent, JEC V5), il en ressort que les facteurs d'émissions de l'ADEME utilisés sont très proches des autres valeurs. L'impact du choix de FE ne devrait pas influencer sur les conclusions de cette étude.

		Well-to-Tank (g CO ₂ -eq / MJ PCI)	Tank-to-Wheel (g CO ₂ -eq / MJ PCI)
Diesel B7	Ecoinvent 3.8 diesel low sulfur	13,4	-
	JEC V5 diesel	18,9	73,2
	Base carbone ADEME Diesel B7	17,3	70,6
GNV	Natural gas, high pressure, vehicle grade {GLO} market for natural gas, high pressure, vehicle grade Cut-off, U Ecoinvent 3.8	14,5	-
	GNV EU-28 Methane (from natural gas) + compression (/MJ) Sphera	11,4	-
	JEC V5: EU-mix piped natural gas supply, transport to EU by pipeline (1900 km), transport inside EU (500 km), distribution through high pressure trunk lines and low pressure grid, compression to CNG at retail point.	11,4	56,1
	Base carbone ADEME GNC	11,9	52,1
bioGNV	Biomethane, high pressure, vehicle grade {RoW} market for biomethane, high pressure, vehicle grade Cut-off, U Ecoinvent 3.8	18,4	-
	JEC V5: Upgraded biogas from municipal organic waste as compressed methane gas (CBM) closed digestate storage	9,5	0
	Base carbone ADEME (bio méthane comprimé)	12,7	0,43

Table 7: Comparaison des différents FE disponibles

3.4.3. Rétrofit ou mise à la casse du véhicule

3.4.3.1. Modélisation scénario rétrofit

Pour modéliser le rétrofit, on considère la fabrication, le transport et la fin de vie d'un nouveau Groupe Motopropulseur (GMP) gaz et d'un nouveau réservoir GNC. A cela s'ajoutent les impacts liés au démantèlement du moteur diesel (énergie, immobilisations, déchets). Ces données proviennent de l'étude « rétrofit » véhicule électrique qui s'appuie sur les dires d'experts du rétrofit (sauf pour les données associées aux réservoirs). En effet, on fait l'hypothèse que les émissions liées à ces postes sont similaires pour le rétrofit thermique.

Pour le transport, on considère uniquement le transport aval du kit de rétrofit (moteur et réservoir) avec l'hypothèse suivante : transport sur 500 km en camion du kit rétrofit [17].

Dans le cas du rétrofit, on considère que le moteur diesel est remplacé par un nouveau moteur GNV. Dans la modélisation ACV du véhicule, deux moteurs sont pris en compte (cas le plus pénalisant). En réalité, il est possible de convertir un moteur diesel en moteur GNV en changeant des pièces du moteur (injecteurs, contrôle moteur etc..) et en adaptant le système de stockage et de dépollution. En termes de résultats ACV, il serait possible d'obtenir des impacts du rétrofit potentiellement inférieurs à ceux calculés dans cette étude (avec le remplacement complet du moteur). Avec des données supplémentaires sur le procédé de conversion du moteur, il serait donc possible de compléter l'analyse effectuée ici.

3.4.3.2. Modélisation scénario de mise à la casse et achat d'un véhicule gaz neuf

Pour modéliser le scénario de mise à la casse d'un véhicule à l'issue de 10 ans d'utilisation et d'achat d'un nouveau véhicule gaz qui sera utilisé pendant les 10 années suivantes, on considère les impacts de fabrication d'un nouveau véhicule complet mais en utilisant une allocation d'impact (50%) fondée sur la durée de vie des véhicules. En effet, en considérant une durée de vie de 20 ans, il ne paraît pas exact d'allouer la totalité des impacts du nouveau véhicule. En effet après les dix années d'utilisation, le véhicule pourra, en théorie, être encore utilisé 10 ans (soit 10 ans de plus que l'unité fonctionnelle fixée à 20 ans de durée de vie de véhicule). On retrouve les hypothèses d'allocation d'impact dans le tableau 5 :

Sources d'impacts fixes	Scénario 20 ans diesel	Scénario rétrofit	Scénario casse (utilisation d'allocation)
Fabrication Carcasse	1	1	1,5 (1 carcasse + 0,5 pour le nouveau véhicule)
Fabrication GMP	1 GMP diesel	2 GMP (1 diesel + 1 GNV)	1 GMP diesel + 0,5 GMP GNV
Fabrication réservoir	1 réservoir diesel	2 réservoirs (1 diesel + 1 GNV)	1 réservoir diesel + 0,5 réservoir GNV
Fin de vie Carcasse	1 fin de vie	1 fin de vie	1 fin de vie véhicule diesel + 0,5 fin de vie véhicule GNV

Table 8: Modélisations associées aux différents scénarios étudiés

3.4.4. Fin de vie

La fin de vie a été modélisée selon la méthode des impacts évités, prenant ainsi en compte les impacts environnementaux liés aux phases de valorisation ainsi que les impacts évités des matériaux valorisés.

Fin de vie des véhicules

Le scénario de fin de vie des véhicules est modélisé à partir du rapport de PE International et Gingko21 à destination de l'ADEME [18] : « Les constructeurs automobiles, membres du comité technique, nous ont transmis un scénario réaliste de recyclage des véhicules hors d'usage (VHU) post 2015 (France) et permettant l'atteinte des taux réglementaires ». Ainsi, la plupart des taux fournis concernant la proportion de recyclage, incinération, mise en décharge par type de matériaux a été réutilisée.

La Directive 2000/53/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage [19] a également été suivie. Le taux de collecte des VHU en 2010 (69 %) a été utilisé faute d'informations plus récentes. Les distances du détenteur au démolisseur puis du démolisseur au broyeur ont également été prises en compte.

Fin de vie des pneus

Le scénario de fin de vie des pneus s'appuie en partie sur une étude réalisée pour l'ADEME intitulée « Transport et logistique des déchets » parue en octobre 2014 [20]. Le taux de collecte des pneus est supposé identique à celui des VHU, de même que les caractéristiques logistiques liées à leur acheminement sur les différents sites. Les mêmes statistiques de déchets ont été utilisées afin de modéliser la part des matériaux partant en incinération ou en décharge.

3.5. Résultats

3.5.1. Emissions grises du retrofit

Les « émissions grises » correspondent aux émissions de gaz à effet de serre des seules phases de « fabrication », donc sans prendre en compte de fonctionnement, ni la fin de vie, à ce premier stade de l'analyse. Dans le cas des véhicules neufs, cela concerne l'évaluation de toutes les émissions jusqu'à la vente ; dans le cas du retrofit il s'agit des émissions de « retrofitage » cumulant le transport du véhicule à retrofiter et du kit de retrofit vers l'atelier, la fabrication amont des composants et l'installation du kit retrofit.

Pour rappel (cf § 3.4.3), le kit retrofit est composé d'un nouveau moteur thermique, d'un système post-combustion et d'un nouveau réservoir gaz.

Le diagramme suivant présente les émissions grises du kit retrofit thermique. La structure externe (carcasse) du véhicule d'origine n'est donc pas prise en compte ici. L'impact de la fabrication des intrants du kit de retrofit est décomposé en deux postes : le Groupe Motopropulseur « GMP gaz » et les réservoirs GNV type 4 « Réservoir gaz ».

Le poste « transport kit de retrofit » correspond à l'impact du transport des éléments vers l'atelier de retrofit. Les données utilisées proviennent de l'étude simplifiée retrofit EV d'un autobus [17].

Le poste « énergie » correspond à la consommation énergétique pour l'assemblage des éléments du kit, le poste « Immobilisations » à l'impact de l'immobilisation des biens nécessaires au retrofit (garage, machinerie etc.), ces données ainsi que celles des déchets proviennent de l'étude « retrofit » véhicule électrique qui se base sur les dires d'experts du retrofit. En effet, on fait l'hypothèse, que les émissions liées à ces postes sont similaires pour le retrofit thermique.

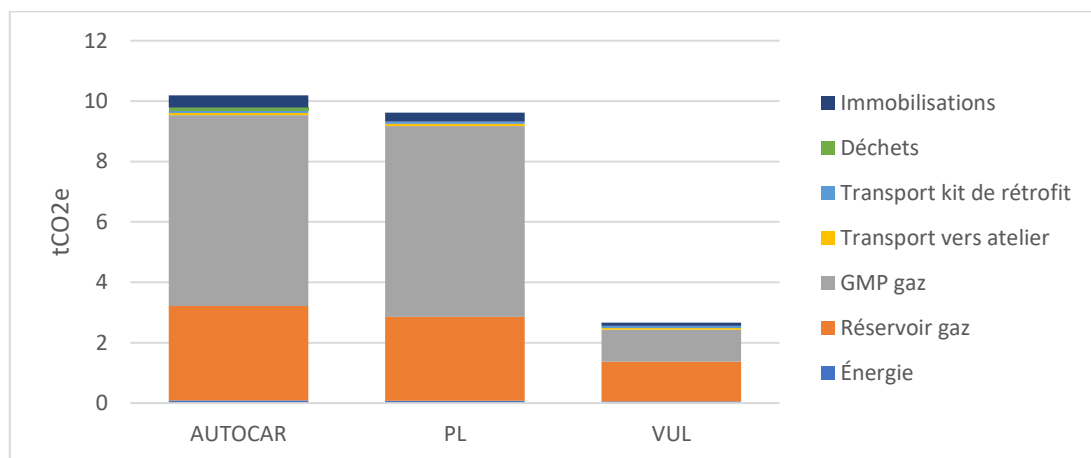


Figure 2: Emissions grises du retrofit thermique

L'impact des postes « intrants » (GMP gaz et Réservoir Gaz) sont les plus significatifs. On remarque que l'impact des réservoirs gaz GNC type 4 (cf. 3.4.1. - principalement composés de fibres de carbone et de résine d'époxy), bien que relativement légers en masse, est quasiment équivalent à celui d'un nouveau GMP gaz.

Le diagramme suivant permet de comparer l'impact relatif des installations retrofits gaz avec la fabrication complète de véhicules neufs thermiques, diesel et gaz :

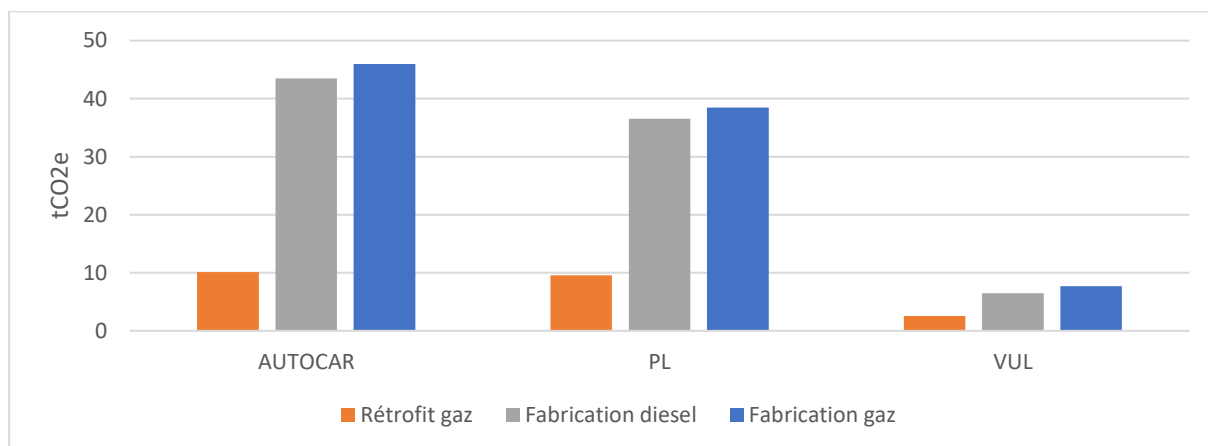


Figure 3: Emissions grises de la fabrication d'un véhicule thermique neuf comparées à celles d'un processus de retrofit gaz

Le processus de retrofit gaz est bien moins impactant que la fabrication d'un nouveau véhicule thermique car on évite la fabrication d'une nouvelle carcasse de véhicule. Cela est particulièrement intéressant pour les applications de véhicules « lourds » comme l'autocar et le poids lourd dont l'impact associé à la fabrication de la carcasse du véhicule est très important.

On remarque également que l'impact de la fabrication d'un véhicule neuf gaz est plus important que celui d'un véhicule neuf diesel. Cela est dû à l'impact des réservoirs gaz dans la fabrication des véhicules gaz.

3.5.2. Autocar

Les figure 5, 6 et 7 présentent les émissions de GES pour l'autocar (type IVECO crossway 12m) sur une durée de vie de véhicule de 20 ans et un kilométrage annuel de 40 000km pour les scénarios suivants :

Diesel : Fabrication, utilisation et fin de vie du véhicule diesel initial, émissions sur 20 ans rapportées en kgCO_{2e}/km.

Retrofit GNV : Fabrication, utilisation du véhicule diesel initial sur 10 ans puis retrofit gaz et utilisation GNV sur 10 ans puis fin de vie du véhicule retrofit. Emissions sur 20 ans rapportées en kgCO_{2e}/km.

Retrofit bioGNV : Fabrication, utilisation du véhicule diesel initial sur 10 ans puis retrofit gaz et utilisation bioGNV sur 10 ans puis fin de vie du véhicule retrofit. Emissions sur 20 ans rapportées en kgCO_{2e}/km.

Casse et GNV : Fabrication, utilisation et fin de vie du véhicule diesel initial sur 10 ans, puis achat d'un véhicule neuf gaz et utilisation GNV sur 10 ans, puis fin de vie du véhicule retrofit. Emissions sur 20 ans rapportées en kgCO_{2e}/km.

Casse et bioGNV : Fabrication, utilisation et fin de vie du véhicule diesel initial sur 10 ans, puis achat d'un véhicule neuf gaz et utilisation bioGNV sur 10 ans, puis fin de vie du véhicule retrofit. Emissions sur 20 ans rapportées en kgCO_{2e}/km.

Les impacts sont ventilés par postes contributeurs suivants :

- FDV Gaz : impact du démontage et du recyclage du véhicule rétrofité ou neuf gaz ;
- Utilisation bioGNV : impact de la consommation de bioGNV par le véhicule rétrofité ou neuf ;
- Utilisation GNV : impact de la consommation de GNV par le véhicule rétrofité ou neuf ;
- Fabrication G : fabrication d'un nouveau véhicule gaz ;
- Rétrofit : impact du procédé de rétrofit gaz cf. 3.5.1. et 3.4.3. ;
- FDV Diesel : impact du démontage et du recyclage du véhicule diesel initial ;
- Utilisation Diesel : impact de la consommation de gazole par le véhicule diesel initial ;
- Pneus : cycles de vie des pneumatiques ;
- Fabrication D : fabrication du véhicule diesel initial ;

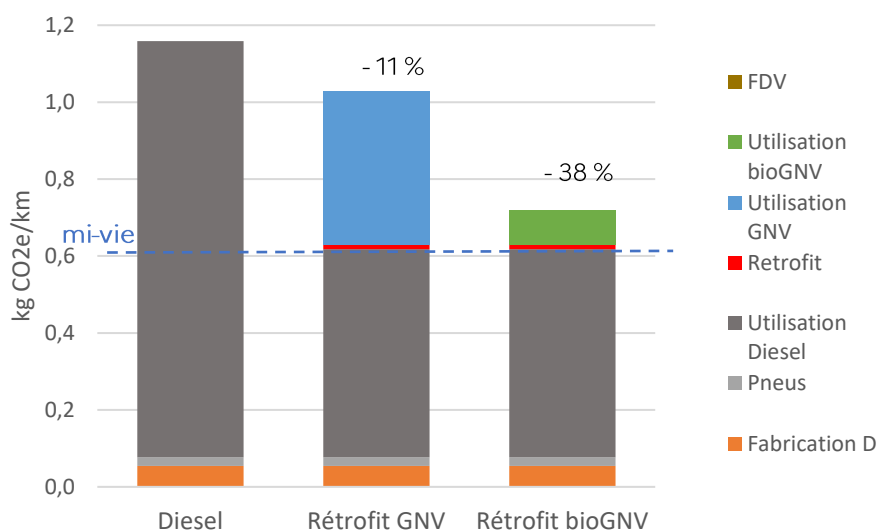


Figure 4: Comparaison des émissions de GES d'un Autocar diesel pendant 20 ans, avec un autocar rétrofité gaz après 10 ans d'utilisation diesel

Dans le scénario de conservation du véhicule Diesel initial, on observe que la phase d'utilisation du véhicule diesel « Utilisation Diesel » écrase les impacts de la phase de fabrication du véhicule « Fabrication D », d'entretien des pneus « Pneus » et de la fin de vie « FDV ».

Dans les scénarios de rétrofit gaz, les émissions grises du « Rétrofit » - en rouge, sont compensées par les émissions évitées en phase d'utilisation « Utilisation GNV » et « Utilisation bioGNV » du véhicule rétrofité au gaz à mi-vie. L'impact évité du rétrofit est particulièrement notable pour une utilisation au bioGNV (-38%).

La lecture de la figure 6 a montré les potentielles émissions de GES évitées avec un rétrofit gaz de l'autocar diesel. Pour permettre dans un second temps une comparaison du rétrofit gaz (qui s'inscrit sur la durée de vie de 20 ans du véhicule initial) avec l'alternative consistant à mettre à la casse le véhicule initial à mi-vie et à acheter un véhicule gaz neuf (qui s'inscrit sur 30 ans : 10 ans mi-vie du véhicule plus 20 ans durée de vie théorique du nouveau véhicule gaz neuf), nous avons délibérément réduit par le calcul l'impact de la fabrication du nouveau véhicule gaz neuf « Fabrication G » avec une allocation d'impact (Cf. 3.4.3.). La figure 6 présente une comparaison des émissions de GES pour les deux alternatives :

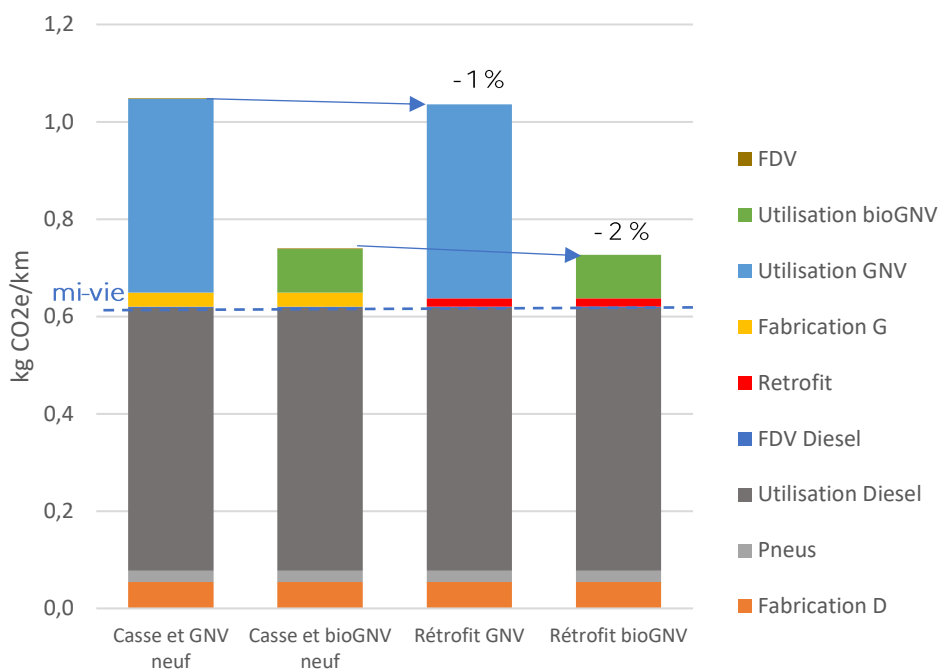


Figure 5: Comparaison des émissions de GES d'un Autocar selon différents scénarios d'exploitation à mi-vie

Le scénario de mise à la casse et achat d'un véhicule gaz neuf implique la fabrication d'un nouveau véhicule « Fabrication G ». On constate qu'en ayant volontairement réduit l'impact de la fabrication du nouveau véhicule pour permettre une comparaison des deux scénarios sur 20 ans, l'impact du retrofit est moindre.

Les émissions évitées par la solution retrofit comparées à celles de l'achat d'un véhicule neuf semblent négligeables. Pour autant, le gain est écrasé par les impacts de la phase d'utilisation diesel sur les 10 premières années. La figure 8 présente les résultats plus détaillés, à partir de la décision de retrofit ou de renouvellement (t = 10 ans).

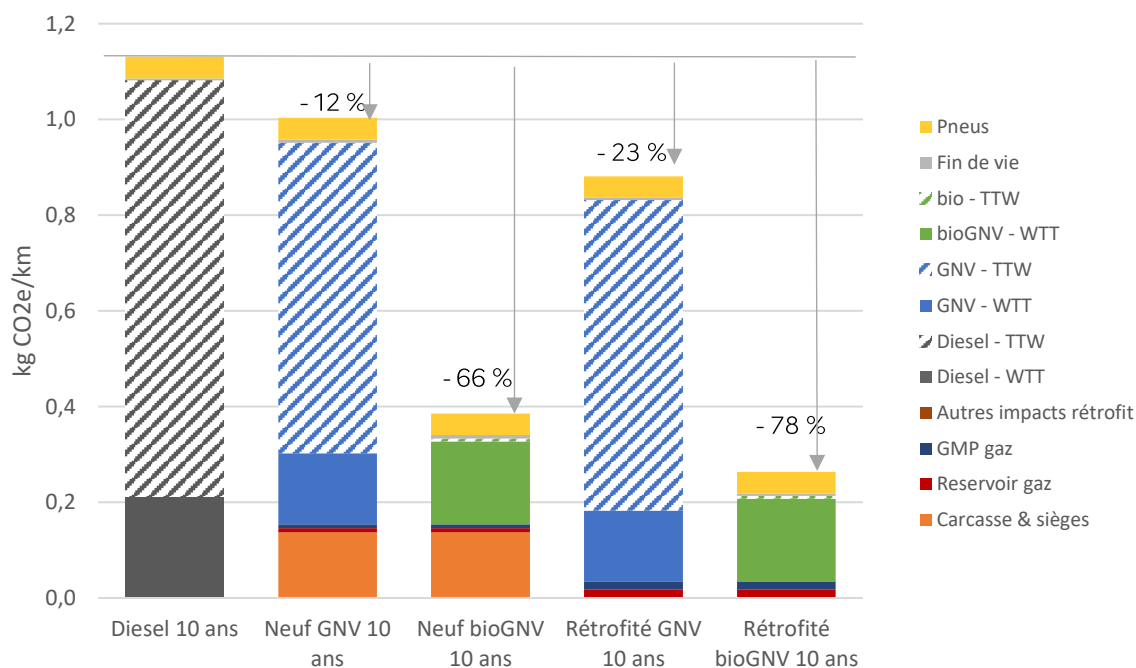


Figure 6: Comparaison des émissions de GES du reste à émettre de l'autocar initial au-delà de 10 ans d'âge selon différents scénarios d'exploitation

Les impacts de la fabrication d'un nouveau véhicule gaz agrègent ceux de la fabrication de la « carcasse & sièges », du « réservoir gaz » et du nouveau « GMP gaz ».

Les impacts du rétrofit sont représentés par l'ajout d'un nouveau « GMP gaz », et de « réservoirs gaz ». Pour plus de lisibilité sur le graphique, les « autres impacts du rétrofit » étant relativement faibles (cf. 3.4.3 et 3.5.1.) ont été regroupés.

Les émissions en phase d'utilisation ont été décomposées en « Well-to-tank » et « Tank-to-Wheel » en hachuré sur le graphique.

On constate un gain plus significatif avec le scénario rétrofit par rapport à un scénario de renouvellement de véhicule, car les résultats, ramenés en CO₂/km sont moins écrasés par la phase d'utilisation diesel du véhicule sur les 10 premières années.

3.5.3. Poids lourd 19 tonnes

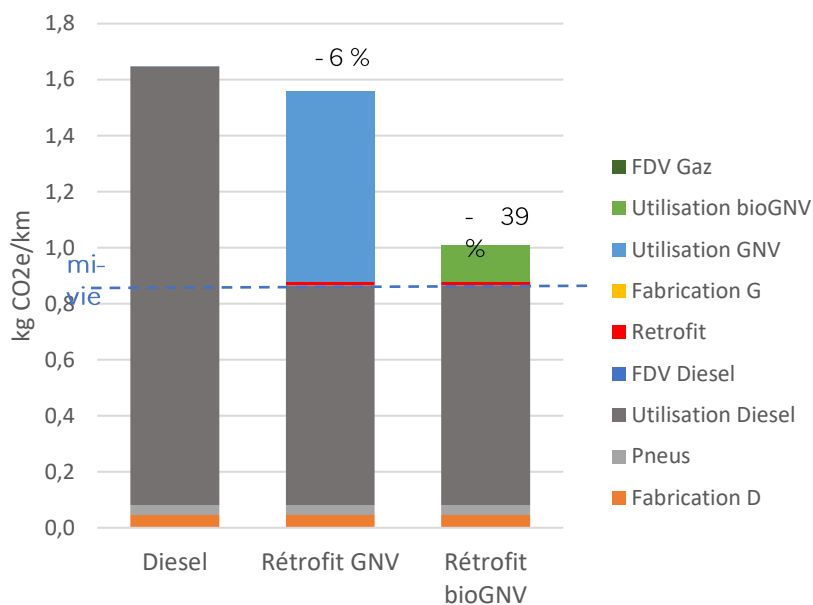


Figure 7: Comparaison des émissions de GES d'un PL diesel pendant 20 ans, avec un autocar rétrofité gaz après 10 ans d'utilisation diesel

Comme dans le cas de l'autocar, les émissions grises du rétrofit sont compensées par les émissions évitées en phase d'utilisation « Utilisation GNV » et « Utilisation bioGNV » du véhicule rétrofité au gaz à mi-vie.

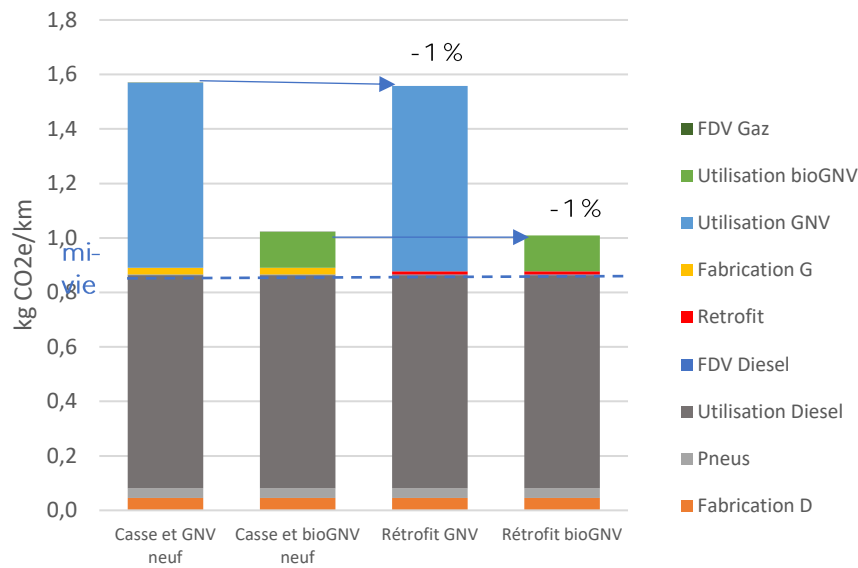


Figure 8: Comparaison des émissions de GES d'un PL selon différents scénarios d'exploitation à mi-vie

L'impact de la fabrication d'un autocar étant similaire à l'impact de la fabrication d'un PL (hypothèse de même composition de carcasse cf. 3.4.1.), le différentiel entre le scénario d'achat d'un PL neuf et le rétrofit gaz d'un PL de 10 ans est similaire à celui de l'autocar (~1%) sur 20 ans.

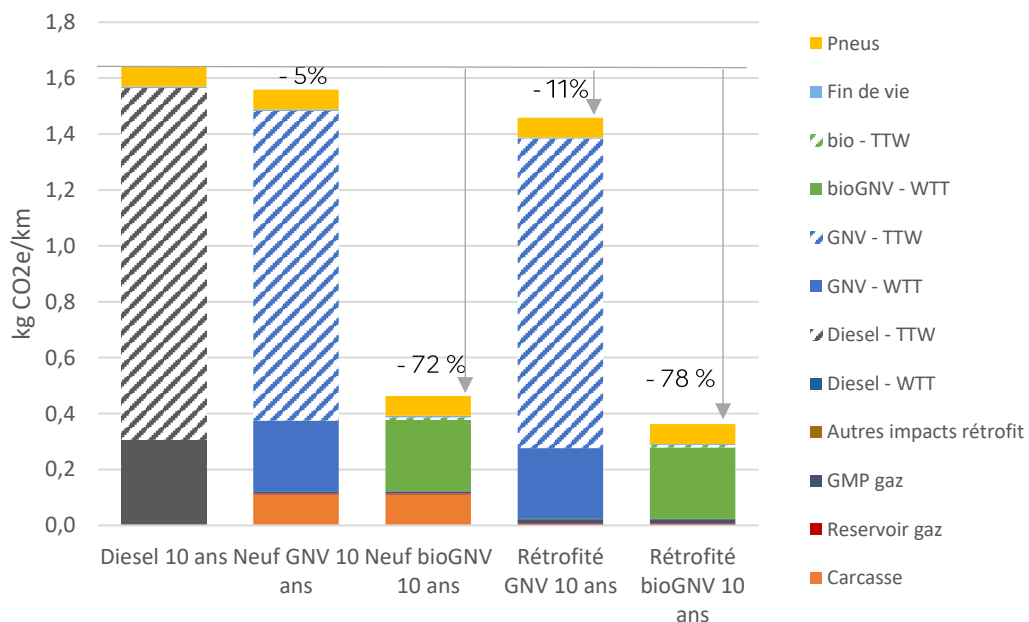


Figure 9: Comparaison des émissions de GES du reste à émettre du PL initial au-delà de 10 ans d'âge selon différents scénarios d'exploitation

On constate un bénéfice du changement diesel vers gaz légèrement plus faible que dans le cas d'un autocar. Cela peut s'expliquer par un écart plus faible des entre les consommations Diesel et Gaz pour le PL que pour l'Autocar (donc moins de gains associés à la phase utilisation GNC) avec les pondérations de cycles de conduite utilisées (cf. 3.4.2. Table 4). Avec toutefois des meilleures performances pour le scénario de rétrofit comparé au scénario de renouvellement du PL.

3.5.4. Véhicule Utilitaire Léger 2,6 tonnes

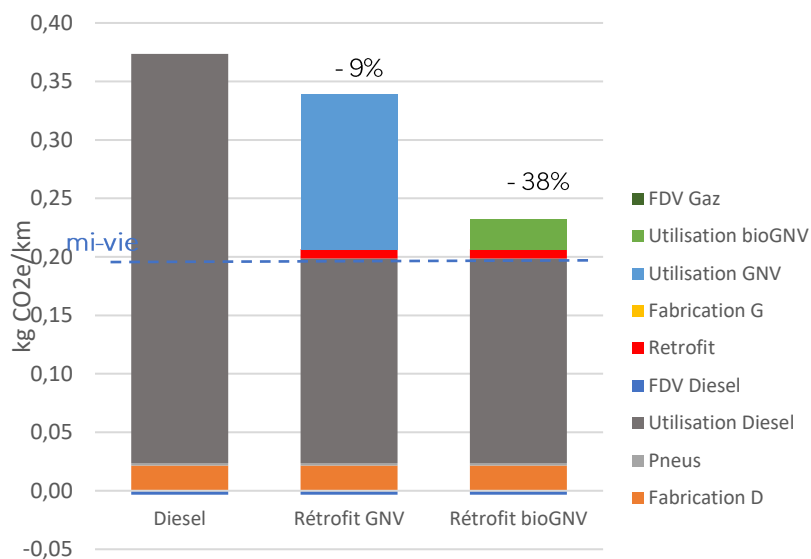


Figure 10: Comparaison des émissions de GES d'un VUL diesel pendant 20 ans, avec un autocar rétrofité gaz après 10 ans d'utilisation diesel

Dans le cas du VUL, l'impact des émissions grises du rétrofit est plus visible. Mais il reste compensé par les émissions évitées en phase d'utilisation gaz.

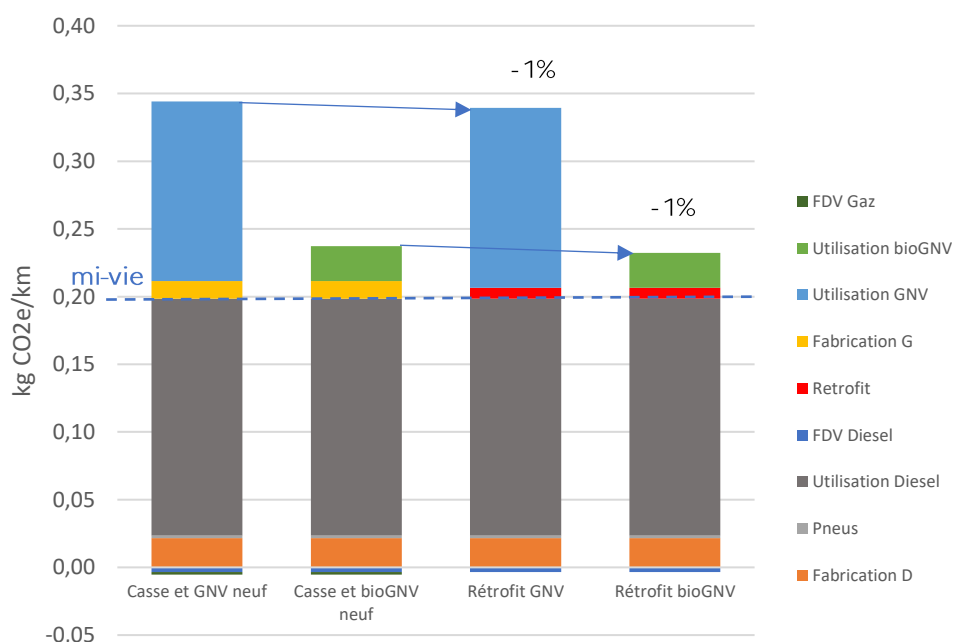


Figure 11: Comparaison des émissions de GES d'un VUL selon différents scénarios d'exploitation à mi-vie

La phase de fin de vie du véhicule VUL permet d'éviter des émissions de GES liées à la fabrication de nouveaux matériaux. Ces impacts évités sont d'autant plus élevés dans le scénario de mise à la casse et d'achat de véhicule neuf où on met deux véhicules à la casse sur une période de 30 ans. Cela compense les impacts de la fabrication d'un VUL légèrement plus élevés que les émissions grises du rétrofit gaz.

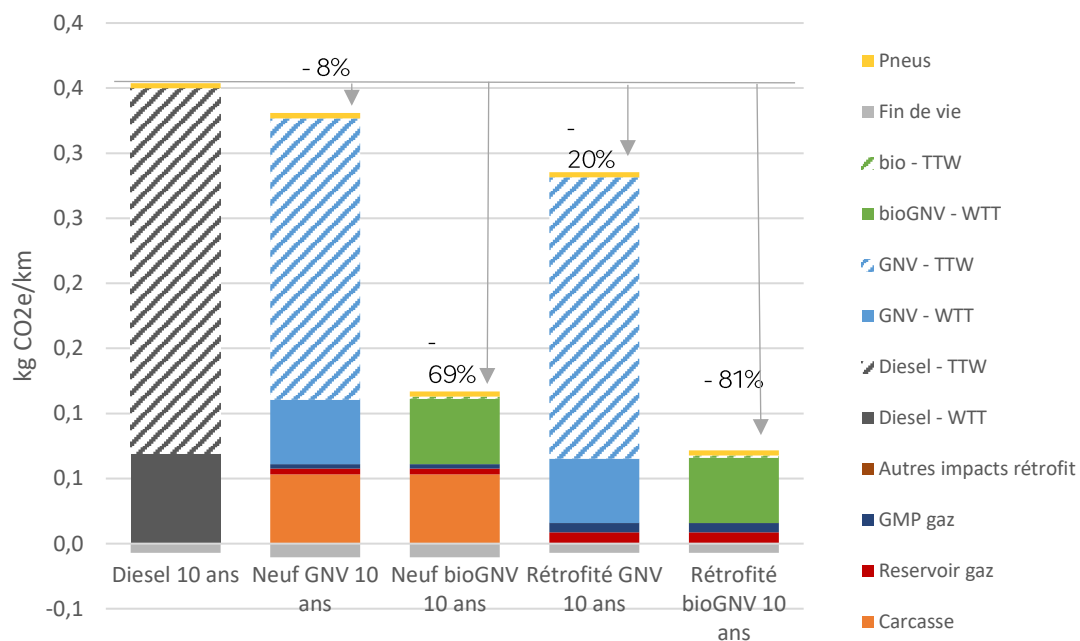


Figure 12: Comparaison des émissions de GES du reste à émettre du VUL initial au-delà de 10 ans d'âge selon différents scénarios d'exploitation

La solution rétrofit est meilleure que la mise à la casse et l'achat d'un VUL neuf gaz. On voit mieux ici, l'impact de la fabrication d'un véhicule neuf (« carcasse », « GMP gaz » et « réservoir gaz »), par rapport à l'impact du rétrofit gaz du VUL (« réservoir gaz », « GMP gaz » et « autres impacts rétrofit »).

4. Conclusion

4.1. Synthèse et enseignements

Le diagramme suivant présente une synthèse des émissions de gaz à effet de serre des cas Autocar, PL et VUL étudiés (moyenne des émissions au-delà de 10 ans d'âge du véhicule initial, en proportion du reste à émettre du véhicule initial au-delà de 10 ans d'âge) :

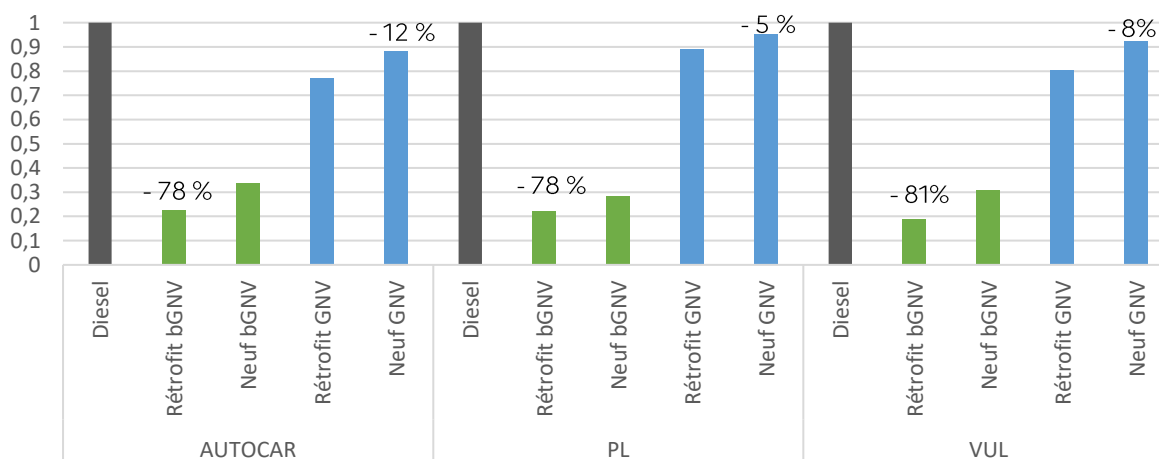


Figure 13: Synthèses des émissions de GES sur le reste à vivre du véhicule après 10 ans

Pour donner suite aux résultats de cette étude, plusieurs éléments de conclusion ou enseignements sont à souligner :

- Pour les trois types de véhicules, changer de moteur thermique pour 10 ans d'exploitation du véhicule au gaz plutôt qu'au diesel donne les meilleurs résultats en termes d'émissions de GES. Cela est vrai pour l'option rétrofit gaz du véhicule initial et pour le scénario de mise à la casse et achat d'un véhicule neuf gaz.
- Sans surprise, les réductions d'émissions GES sont bien plus conséquentes avec une utilisation en bioGNV
- En termes d'émissions de GES, le procédé de rétrofit gaz est dans tous les scénarios étudiés, plus intéressant que la mise à la casse et l'achat d'un véhicule neuf.

4.2. Limites de l'étude

Cette étude rétrofit gaz vient en complément de l'étude réalisée sur le rétrofit électrique, cependant les résultats présentés ne sont valables qu'avec les jeux de données et hypothèses retenus dans le cadre de cette étude et ne permettent pas une comparaison directe entre les solutions de rétrofit gaz et électrique.

Les principales hypothèses structurantes sont rappelées ici :

- Consommations et kilométrages estimés (en usage réel).
- Ciblage de trois catégories : l'autocar 40 kkm/an, le PL (40 kkm/an), le VUL (15 kkm/an).
- Utilisation de facteurs d'émission de la Base Carbone® pour le Diesel B7 et le GNV/bio GNV (2019, GRDF & ADEME).
- Cycle de vie des véhicules modélisés à partir de données Ecoinvent 3.8.
- Hypothèse d'un rétrofit effectué à l'âge de 10 ans, supposé être à mi-vie du véhicule.
- Hypothèse que la composition matière d'un moteur GNV est similaire que celle d'un moteur diesel.

- Lors du retrofit gaz, on considère que le moteur diesel est remplacé par un nouveau moteur GNV. Dans la réalité, il est possible de convertir un moteur diesel en moteur GNV en l'adaptant (systèmes d'injection, commande de l'allumage de la combustion, systèmes de stockage et de dépollution). Par manque de données sur les procédés de conversion moteur, l'hypothèse la plus pénalisante a été choisie, à savoir le remplacement complet du moteur, du système de stockage et de dépollution.
- Comparaison du retrofit avec la casse en réduisant l'impact de la fabrication d'un véhicule neuf gaz (impact de la fabrication divisé par 2 pour une comparaison sur une même durée de vie).
- Impacts en phase d'utilisation limités aux émissions CO₂e à l'échappement.
- Les infrastructures de ravitaillement ne sont pas incluses dans le périmètre d'étude. Il serait intéressant pour une comparaison plus détaillée du retrofit gaz avec les véhicules diesel ou retrofit électrique de les inclure.

Limites :

- Les pourcentages de gains d'émissions de GES sont très sensibles aux valeurs de consommations estimées via des cycles de vitesse et pondérations associées mais aussi des facteurs d'émission des vecteurs énergétiques (ici Base Carbone®).
- Incertitudes liées au procédé de retrofit, les données utilisées sont des données estimées à dire d'expert dans l'étude retrofit EV. Ces données peuvent varier fortement selon l'échelle du nombre de véhicule à retrofiter et l'optimisation des chaînes de production.
- Les bénéfices en termes de GES sont à mettre en perspectives avec d'autres indicateurs de pollution de l'air comme les polluants locaux (CH₄, NO_x, particules, etc.).
- Seules les émissions de GES sont étudiées, d'autres indicateurs comme l'utilisation de ressource minérales et métaux, l'utilisation d'eau pourrait donner plus d'indications quant au scénario le plus favorable entre retrofit et achat d'un nouveau véhicule.
- L'étude ne met pas en valeur les autres bénéfices du retrofit tels que le réemploi, la circularité et les autres bénéfices économiques. Une étude TCO (Total Cost of Ownership) pourrait être complémentaire au travail réalisé et apporter une vision plus complète sur l'intérêt du retrofit. En effet, il y aurait notamment de plus grandes différences sur le calcul TCO entre le scénario retrofit et le scénario « casse avec achat d'un nouveau véhicule ».

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CASTAIGNEDE Laurent, ALGOE, BCO2 Ingénierie, ADEME ALLARD Alexandre, "Etude Retrofit - Conditions nécessaires à un retrofit économe, sûr et bénéfique pour l'environnement," ADEME, 2021.
- [2] IFPEN-ADEME, "Etude Energétique, Economique et Environnementale du Transport - E4T2040," 2018.
- [3] Pierre Michel and Alexandre Chasse, "Développement d'un outil d'aide à la décision pour le renouvellement des poids lourds – Comparaison du coût total de possession, des émissions de gaz à effet de serre et des émissions polluantes.," ADEME, 2021.
- [4] Pierre Michel, Sol Selene Rodriguez, and Alexandre Chasse urélié Pirayre, "Driving Behavior Identification and Real-World Fuel Consumption Estimation With Crowdsensing Data," Mai 2022.
- [5] Pierre Michel et al., "Conventional engine vehicles model parametrization for real-world fuel consumption estimation, in Transport and Air Pollution (TAP) conference," 2022.
- [6] David L. McKainOrcid, Derek R. Johnson, W. Scott Wayne, Hailin Li, Vyacheslav Akkerman, Cesar Sandoval, April N. Covington, Ronald A. Mongold, John T. Hailer, and Orlando J. Ugarte Nigel N. Clark*, "Pump-to-Wheels Methane Emissions from the Heavy-Duty Transportation Sector," 2017.
- [7] <https://doi.org/10.3390/su6074608>,.
- [8] <https://doi.org/10.3390/su6074608>,.
- [9] "<https://www.iveco.com/ivecobus/fr-fr/pages/crossway-natural-power.aspx>,".
- [10] "Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Seurn, S., Genty, A., Uihlein, A., et al., Feebate and scrappage policy instruments : environmental and economic impacts for the EU27, Publications Office, 2012, <https://data.europa.e>,".
- [11] "Masses calculé à partir de sources IFPEN: densité des monolithes de 2,5g/cm³ (pourrait être améliorée au travers de l'obtention de données constructeurs). Associé à une donnée ICE Ecoinvent,".
- [12] "Source GRDF,".
- [13] "Study to methodize the design of a safe Type-4 CNG storage vessel using finite element analysis with experimental validation, Indian Institute of Technology Kharagpur, India – 2021 DOI:10.1016/j.ijpvp.2021.104425,".
- [14] Christina Wulf, Andreas de Palmenaer, Michael Lengersdorf, Tim Röding, Thomas Grube, Martin Robinius, Detlef Stolten, Wilhelm Kuckshinrichs, Alicia Benitez, "Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank," *Journal of Cleaner Production*, 2021.
- [15] Sujit Das, "Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites," *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2011.
- [16] Fraunhofer IBP GaBi & Fraunhofer IGCV, "AMP Composites CF additional documentation," 2018.
- [17] "Hypothèse transport logistique aval de CIDER Engineering « ACV SIMPLIFIEE RELATIVE A L'ACTIVITE DE RETROFIT D'AUTOBUS », 2022,".
- [18] "Elaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions GES et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et thermiques, ADEME, 2021,".
- [19] "Renewable Energy – Recast to 2030 (RED II)," 2018.

[20] "Transport et logistique des déchets, ADEME," 2014.

[21] gaz-mobilité.fr.

[22] "Nemry F, Leduc G, Mongelli I, Uihlein A. Environmental Improvement of Passenger Cars (IMPRO-car). EUR 23038 EN. Luxembourg (Luxembourg): OPOCE; 2008. JRC40598,".

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

Figure 1: Etapes considérées dans le périmètre WtW incluant le cycle de vie véhicule (Icons made by Freepik, Good Ware and Jongrak from www.flaticon.com)	10
Figure 2: Emissions grises du rétrofit thermique	16
Figure 3: Emissions grises de la fabrication d'un véhicule thermique neuf comparées à celles d'un processus de rétrofit gaz	17
Figure 4: Comparaison des émissions de GES d'un Autocar diesel pendant 20 ans, avec un autocar rétrofité gaz après 10 ans d'utilisation diesel	18
Figure 5: Comparaison des émissions de GES d'un Autocar selon différents scénarios d'exploitation à mi-vie	19
Figure 6: Comparaison des émissions de GES du reste à émettre de l'autocar initial au-delà de 10 ans d'âge selon différents scénarios d'exploitation	19
Figure 7: Comparaison des émissions de GES d'un PL diesel pendant 20 ans, avec un autocar rétrofité gaz après 10 ans d'utilisation diesel	20
Figure 8: Comparaison des émissions de GES d'un PL selon différents scénarios d'exploitation à mi-vie	21
Figure 9: Comparaison des émissions de GES du reste à émettre du PL initial au-delà de 10 ans d'âge selon différents scénarios d'exploitation	21
Figure 10: Comparaison des émissions de GES d'un VUL diesel pendant 20 ans, avec un autocar rétrofité gaz après 10 ans d'utilisation diesel	22
Figure 11: Comparaison des émissions de GES d'un VUL selon différents scénarios d'exploitation à mi-vie	22
Figure 12: Comparaison des émissions de GES du reste à émettre du VUL initial au-delà de 10 ans d'âge selon différents scénarios d'exploitation	23
Figure 13: Synthèses des émissions de GES sur le reste à vivre du véhicule après 10 ans	24
Table 1: Principaux paramètres macroscopiques des 3 segments véhicule diesel B7 et Gaz	8
Table 2: consommations simulées avec le modèle IFPEN	9
Table 3: Données de dimensionnement de réservoir	12
Table 4: Coefficients de pondérations utilisés ISC-UTAC	12
Table 5: Hypothèses de kilométrage	13
Table 6: FE utilisés	13
Table 7: Tableau 4: Comparaison des différents FE disponibles	14
Table 8: Modélisations associées aux différents scénarios étudiés	15

SIGLES ET ACRONYMES

3WCC	<i>Three Way Catalyst Converter</i> – Catalyseur 3 voies
ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
BioGNV/bGNV	Bio Gaz Naturel pour Véhicule
BV	Boîte de vitesses
CO2e	Emissions de gaz à effet de serre rapportées en équivalent dioxyde de carbone
CUC	<i>Clean Up Catalyst</i> – Catalyseur supprimant l'ammoniac résiduel
D	Diesel
DOC	<i>Diesel Oxydation Catalyst</i> – Convertisseur catalytique à oxydation pour Diesel
DPF	<i>Diesel Particulate Filter</i> – Filtre à particules Diesel
GMP	Groupe Moto-Propulseur
GNV	Gaz Naturel pour Véhicule
GRDF	Gaz réseau distribution France
IFPEN	IFP Energies nouvelles
JEC	JRC-EUCAR-CONCAWE
JRC	Joint Research Center – Centre commun de recherche Européen
PL	Poids lourd
t	Tonne
SCR	<i>Selective Catalytic Reduction</i> – Réduction catalytique sélective
VUL	Véhicule Utilitaire Léger
VHU	Véhicule Hors d'Usage

ANNEXE 1 : Données utilisées

Donnée	Valeur	Source
Facteurs émissions ¹ vecteurs énergétiques		
FE amont diesel B7	17,3 g CO ₂ -eq / MJ	BC ADEME
FE combustion diesel B7	70,6 g CO ₂ -eq / MJ	BC ADEME
PCI diesel B7	47,3 MJ/kg	BC ADEME
FE amont GNV	11,9 g CO ₂ -eq / MJ	BC ADEME
FE combustion GNV	52,1 g CO ₂ eq./ MJ	BC ADEME
FE amont bioGNV	12,7 g CO ₂ eq./ MJ	BC ADEME
FE combustion bioGNV	0,43 g CO ₂ eq./ MJ	BC ADEME
Intrants		
Composition réservoir diesel autocar et PL	50 % aluminium / 50 % acier	GRDF
Composition réservoir gaz type4	55% Epoxy / 45% Fibre de carbone	Extrapolation d'après https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104425
Masse siège autocar	45 kg	Extrapolation d'après https://doi.org/10.3390/su6074608
Composition d'un siège d'autocar	65% acier	Extrapolation d'après https://doi.org/10.3390/su6074608
Coefficients de pondérations Autocar	Urbain 45% - Rural 25% - Autoroute 30%	ISC-UTAC
Coefficients de pondérations PL	Urbain 30% - Rural 25% - Autoroute 45%	ISC-UTAC
Coefficients de pondérations VUL	Urbain 34% - Rural 33% - Autoroute 33%	ISC-UTAC
Kilométrage annuel Autocar	40 000 km/an	ADEME
Kilométrage annuel PL	40 000 km/an	ADEME
Kilométrage annuel VUL	15 000 km/an	ADEME
Durée de vie Autocar	20 ans	ADEME
Durée de vie PL	20 ans	ADEME
Durée de vie VUL	20 ans	ADEME
Nombre de pneus Autocar	6	IFPEN
Nombre de pneus PL	6	IFPEN
Nombre de pneus VUL	4	IFPEN
Durée de vie d'un pneu	40 000 km	IFPEN
Composition carcasse Autocar	Modèle IFPEN	Inspiré de la donnée Ecoinvent "Bus production {RER} production Alloc Rec, U"
Composition carcasse PL	Modèle IFPEN	Inspiré de la donnée Ecoinvent "Bus production {RER} production Alloc Rec, U"
Composition carcasse VUL	Modèle IFPEN	Inspiré de la donnée Ecoinvent "Light commercial vehicle {RER} production Alloc Rec, U"
Transport des pièces de retrofit	500 km	« Acv simplifiée relative à l'activité de retrofit d'autobus », CIDER ENGINEERING 2022

¹ Facteur d'émission (FE)

Composition des systèmes post-combustion diesel et gaz	donnée Ecoinvent "internal combustion engine"	IFPEN
Composition des moteurs diesel et gaz	donnée Ecoinvent "internal combustion engine"	IFPEN

ANNEXE 2 : Données véhicules pour simulations de consommation

Véhicule	Carburant	Masse à vide [t]	PTAC [t]	Masse moteur [kg]	Masse post-traitement [kg]	Masse réservoir [kg]	Puissance moteur [kW]	Masse boîte [kg]	Charge utile max. [tonnes]	Nb de rapports [-]
VUL 3,5t	Diesel	1,35	3,5	120	17,5	0	90	62	2,15	6
	GNV	1,41		120	5,0	75	90	62	2,09	
PL 19t	Diesel	9,40	19	732	61,3	150	280	250	9,6	9
	GNV	9,36		732	17,5	158	280	250	9,6	
Autocar 12m	Diesel	12,30	19	732	61,3	100	280	250	6,70	9
	GNV	12,33		732	17,5	178	280	250	6,7	

ANNEXE 3 : Sensibilité de la localisation de la production du réservoir GNV type 4

	FE fibre carbone (kgCO2/kg fibre de carbone)	FE réservoir (kgCO2/kg réservoir)
France (hypothèse retenue)	32,2	17
Europe	50	25
Monde	67,8	33

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



« Rétrofit gaz » - Évaluation énergétique et environnementale du « rétrofit gaz » d'un véhicule diesel

L'étude rétrofit « gaz » s'inscrit dans la stratégie française pour le développement de la filière Gaz Naturel Véhicule (GNV) et sa déclinaison bioGNV. Elle vise à évaluer la pertinence environnementale de la solution rétrofit d'un véhicule diesel vers un motorisation gaz GNV/bioGNV, et de la comparer avec d'autres scénarios de renouvellement de véhicule.

Trois types de véhicules sont étudiés : l'autocar scolaire 12 mètres, le poids lourd 19 tonnes, et le véhicule utilitaire léger 2,5 tonnes. Ces trois segments sont particulièrement indiqués pour une utilisation gaz.

L'évaluation environnementale se base sur la méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) et a pour objectif de comparer les émissions de gaz à effet de serre (GES) des solutions de rétrofit et d'achat d'un nouveau véhicule. Il s'avère que l'impact des émissions grises du rétrofit gaz est compensés par les émissions évitées en roulant au gaz par rapport au diesel sur le reste à vivre du véhicule. Dans tous les scénarios étudiés, le rétrofit gaz apparaît comme moins émetteur de GES que la mise à la casse du véhicule diesel et l'achat d'un nouveau véhicule gaz neuf. L'intérêt d'un rétrofit ou renouvellement d'un véhicule est particulièrement notable pour une utilisation au bioGNV.

