

Déc.
2018

PANORAMA ET EVALUATION DES DIFFERENTES FILIERES D'AUTOBUS URBAINS

Etat des lieux sur les technologies et les filières énergétiques existantes et en devenir pour le transport par autobus

RAPPORT

ADEME

Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :

ajBD

REMERCIEMENTS

Nous remercions les membres du comité de pilotage.

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, Denis Bénita, AJBD, David Fayolle. 2018. Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains. 100 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

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

20, avenue du Grésillé

BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 18MAR000393

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : AJBD, David Fayolle

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



SOMMAIRE

1. Introduction	5
2. Vue d'ensemble de l'autobus urbain en France.....	7
La filière comprenant les carburants dits « de transition »	21
3. Filière ED95.....	22
4. Filière HVO	26
5. Filière GTL.....	29
La filière gaz.....	32
6. Filière GNC.....	33
7. Filière biogaz	40
8. Filière GNL	43
La filière électrique	47
9. Filière hybride.....	48
10. Filière hybride rechargeable	56
11. Filière tout électrique	59
La filière hydrogène	68
12. Filière Hydrogène	69
13. Conclusion.....	74
Annexes.....	75
14. Annexe 1 – Rappels sur le contexte réglementaire relatif aux autobus	76
15. Annexe 2 – Eléments de réflexion sur l'économie des filières.....	82
16. Annexe 3 – Facteurs d'émissions pour les autobus	84
Références bibliographiques	92
Index des tableaux et figures	95
Sigles et acronymes.....	97



RÉSUMÉ

Ce document s'adresse à tous les acteurs du milieu de l'autobus urbain (Autorités Organisatrices de la Mobilité, exploitants, collectivités, etc.), et remplace la version précédente d'août 2015.

Il se veut très accessible pour la majorité des lecteurs, et après un bref état des lieux du parc et du marché des autobus urbains, se propose de passer en revue les différentes technologies actuelles et futures dont sont équipés les bus.

Il constitue ainsi une synthèse de la majorité des études et évaluations menées ces dernières années et en particulier en 2018, avec pour chacune des filières une synthèse de ses avantages et inconvénients.

Enfin, il apporte au travers de ses annexes quelques éléments fondamentaux sur la réglementation des autobus urbains, des données économiques sur les différentes filières de bus, ainsi que de nombreux facteurs d'émissions par type de véhicule et type de norme EURO.

ABSTRACT

This document aims at giving an overview of technology pathways for urban buses to key players of this industrial sector.

It provides an update of the previous version (August 2015) while keeping the information easy to read for any users.

After giving latest data on the urban bus market, it reviews pros and cons of current and future technologies which can be applied to buses, based on a thorough benchmarking and analysis work.

Finally, it includes information on urban buses regulations, economic data about each bus technology, and major emissions factors depending on the type and the age of the vehicle.

1. Introduction

1.1. Contexte

L'ADEME a la charge de la remise du rapport sur l'évolution des technologies à faible niveau d'émissions, leur disponibilité, leurs coûts, tel que défini dans le décret n° 2017-23 du 11 janvier 2017 définissant les critères caractérisant les autobus et autocars à faibles émissions et faisant suite à la loi sur la transition énergétique et la croissance verte.

La problématique « autocars » a été traitée à travers un partenariat avec la FNTV qui a débouché sur la réalisation du guide « Quelles filières énergétiques pour les autocars » en octobre 2017.

Concernant la problématique « autobus », un précédent panorama avait été réalisé par l'ADEME en 2015, qui recensait les différentes filières énergétiques pour les autobus urbains exclusivement.

La loi du 17 août 2015 – relative à la transition énergétique pour la croissance verte (TECV) – et les décrets n°2017-21 et n°2017-23 du 11 janvier 2017 pris en application de l'art 37 de la loi définissant le cadre réglementaire de l'achat de véhicules propres par les opérateurs de transport public, posent les fondements juridiques de la présente étude. En effet, l'article 37 prévoit que l'État et les acteurs publics [...] procèdent à des achats responsables avec des obligations de renouvellement du parc en faveur de véhicules plus sobres sur le plan énergétique.

Le présent rapport permet ainsi d'identifier le niveau de développement des différentes filières énergétiques autres que le gazole ainsi que les contraintes et les leviers relatifs à leurs déploiements.

1.2. Périmètre

Trois grandes familles de filières technologiques sont développées dans ce document :

- La filière comprenant les carburants dits de transition : ED95, HVO, GTL¹
- La filière gaz : GNC, biogaz, GNL
- La filière électrique : hybride, hybride rechargeable, électrique

La filière hydrogène, étudiée sous l'angle de la pile à combustible, appartient stricto sensu à la filière électrique, mais son degré de développement différent a conduit à la traiter séparément.

1.3. Grille de lecture des fiches

Le gazole (moteur diesel) est la filière énergétique de référence, pour laquelle une gamme complète de véhicules est disponible. Actuellement la plus performante en termes de coûts directs, elle est adaptée à toutes les activités du transport routier de voyageurs. Néanmoins, des solutions alternatives à cette énergie fossile permettent d'apporter une réponse graduée à cet enjeu de réduction de l'empreinte environnementale du transport. L'investissement dans l'une ou l'autre de ces technologies nécessite la prise en compte de plusieurs facteurs qui sont repris de manière systématique dans les fiches au travers des rubriques suivantes :

- Présentation de la filière avec ses caractéristiques propres
- Rappel du cadre réglementaire et fiscal
- Indication sur la maturité de la filière (disponibilité des véhicules, conditions d'avitaillement et d'implantation des infrastructures, exploitation, maintenance)
- Données économiques (les coûts détaillés sont repris en annexe 2)
- Impacts environnementaux (pollution locale -NOx, PM, ...-, pollution globale -GES-, autres impacts -bruit, ...-)

¹ Un lexique en fin de document reprend l'ensemble des sigles et acronymes cités dans le rapport.



- Avantages et inconvénients sur les plans techniques, environnementaux et économiques

4. Filière HVO

4.1. Présentation / caractéristiques

Le HVO (hydrogénation liquide d'huile végétale hydrotraitée) est obtenu par un process chimique hydrogénation-chuques régulières de parties solides sur le gazole, le kazo, le pétrole ou le pétrole ou de gazines similaires. En ce sens, il est considéré comme un bioéquivalent.

Une fois traité, le HVO peut être utilisé comme essence de gazole. La technique de fabrication du HVO permet en effet d'obtenir un produit avec une qualité et une conservation comparables à celles du gazole et utilisées différentes immédiatement, dans la même unité basée sur celle du gazole.

Le HVO est immédiatement utilisable dans les moteurs diesel, soit immédiatement après l'ajout au gazole soit utilisé pur.

4.2. Cadre réglementaire et fiscal

4.2.1. Réglementation

Le HVO est un carburant répondant aux spécifications de la norme EN-590-B2009 au caractère antifroid et de température en cours de transport et de stockage autorisé. L'application du HVO aux autorités en France depuis l'arrêté du 23 février 2017 relatif à la liste des carburants autorisé au regard des dispositions de l'art 260 ter du code de l'environnement, a été étendue à l'ensemble des véhicules de transport de marchandises ayant une logique d'approvisionnement adaptée (notamment une cuve séparée pour le stockage du carburant).

Par ailleurs, les véhicules Euro V fonctionnant au HVO sont considérés comme des véhicules à faibles émissions de particules et peuvent donc être autorisés à circuler dans les zones urbaines et les agglomérations de moins de 200 000 habitants (et hormis les communes soumises à un Plan de Protection de l'environnement).

4.2.2. Fiscalité

Le HVO est soumis à la TICPE au même tarif que le gazole (indice 22 et 59,40 € par hectolitre). Les entreprises de transport de voyageurs doivent déclarer la fraction de la TICPE dans les mêmes conditions que pour le gazole.

Le HVO donne droit à minoration du taux de la TICPE.

4.3. Mécanisme de la filière

4.3.1. Disponibilité des véhicules

Comme le HVO est immédiatement utilisable dans les moteurs diesel adaptés (sauf si mélange au gazole), en théorie, tous les véhicules fonctionnant au diesel peuvent circuler au HVO. Cependant, il est nécessaire d'en demander confirmation auprès de son constructeur.

4.3.2. Conditions d'avlilabilite et d'implantation des infrastructures

En France, le HVO n'est pas encore commercialisé. Cependant, la 1^{re} bio-éthio-éthanol française de taille mondiale a été mise en service à Mèze (Hérault) en juin 2013. 600 000 tonnes de HVO doivent être produites chaque année. Le carburant sera également disponible dans toute l'Europe.

Une infrastructure spécifique reste à prévoir si ce n'est une cuve réservée au HVO pour conserver ses propres émissions.

4.3.3. Exploitation

L'autorisation d'un véhicule circulant au HVO est similaire à celle d'un véhicule circulant au gazole. Ce carburant est utilisé depuis 2007 dans les pays d'Europe du nord.

4.3.4. Maintenance

L'utilisation du HVO peut nécessiter une recalibration du système d'injection de carburant afin d'optimiser le fonctionnement du moteur, ainsi que quelques modifications des cuves de stockage du carburant.

4.4. Coûts et économies

Le prix du HVO est plus élevé que celui du gazole en raison du coût de production plus élevé et du coût de la matière première.

4.4. Impact environnemental

Matière première utilisée	Particularités HVO	CO ₂
HVO	Réduction des émissions locales pour les véhicules fonctionnant au HVO (émissions de CO ₂ et de NOx)	• + 50 % du枯e à la route

Une étude réalisée début 2010 par Kien, Total, OMV, PTT, PACC, le CNET et l'ADEME sur 2 autoroutes EURO VI sur 2 types d'interurbains en conditions réelles de circulation a permis de mesurer en continu la consommation de carburant et les émissions de CO₂ et de NOx.

Les 2 véhicules ont permis de comparer le comportement de l'autocar desservant alternativement au gazole ou au HVO. Les résultats montrent que malgré le fait urbain et donc similaire au profil de roulage d'un autocar, seront exactes pour cette étude.

Pollution locale

Pour les NOx, les niveaux observés sont proche de ceux rapportés à la norme EURO VI (et 59 g/km, -5,17 % d'EGV) respectivement pour le gazole et le HVO en cycle urbain. Ces valeurs sont très proches, et démontrent qu'il existe aucun gain pour le HVO dans le cycle urbain.

Pollution globale

Comme le HVO est un carburant hydrocarboné, à partir de la directive européenne 2009/30, il doit donc faire un assainissement minimum de 50 % des émissions de CO₂ du cycle à la route par rapport au gazole (en fonction de la matière première utilisée pour le HVO, cet assainissement peut atteindre 75 %).

PAGC_26 | Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains
PAGC_27 | Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains

PAGC_28 | Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains
PAGC_29 | Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains

Figure 1 : Exemple de présentation d'une fiche filière

Lorsque deux filières sont relativement proches (GNC et biogaz, hybride et hybride rechargeable), seuls les éléments spécifiques à la 2^{ème} fiche filière sont détaillés dans sa fiche, les éléments communs étant renvoyés à la lecture de la 1^{ère} fiche filière correspondante.



2. Vue d'ensemble de l'autobus urbain en France

En 2017 le transport de voyageurs en autobus, autocars et tramways représentait 6,2 % des déplacements (en voyageurs.kilomètres²) derrière la voiture particulière (80,5 %) et le train (11,7 %), en léger ralentissement de 1,3 % par rapport à 2016.

Les dernières données comparables disponibles pour le transport routier de voyageurs sont présentées ci-dessous.

	Parc au 01/01/2016	Km annuel (en millions)	Km annuel moyen par véhicule
Autocars	67 053	2 022	30 157
Autobus	26 545	1 071	40 421
<i>dont autobus de la RATP</i>	4 573	179	39 523
<i>dont autobus hors RATP</i>	21 972	892	40 608
Ensemble	93 598	3 093	33 068

Tableau 1 : Parc d'autobus et d'autocars en service au 1^{er} janvier 2016 et kilométrages parcourus en 2015

Source : SOeS, UTAC, RATP, traitement SOeS

2.1. Parc de véhicules

2.1.1. La typologie du parc autobus

Au 1^{er} janvier 2018, les bus standard (12 mètres) représentent près de 70 % du parc national³ (même ordre de grandeur que les années précédentes).

Selon l'UTP, les parcs autobus se sont gonflés entre 2016 et 2018, notamment celui de la RATP. Cependant, le nombre de véhicules dans les autres réseaux est resté stable. Cela peut s'expliquer par la diminution de l'offre kilométrique des réseaux urbains, très nette depuis 2016, alors que l'élargissement des périmètres de desserte s'accélère.

A noter que 86 % des liaisons urbaines sont assurées grâce à l'autobus.

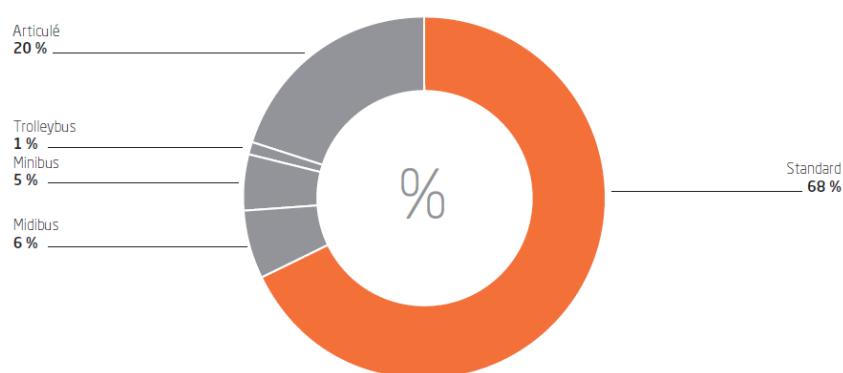


Figure 2 : Répartition du parc autobus au 1^{er} janvier 2018

Source : UTP, enquête parc 2018

² Unité de mesure qui équivaut au transport d'un voyageur sur un kilomètre

³ Les résultats présentés dans ce chapitre 1.1 résultent de l'enquête parc 2018 UTP. Un parc de 17 329 autobus (tous gabarits et toutes énergies) est ressorti de l'enquête (139 réseaux répondants). On peut extrapoler cette donnée à ~18 250 autobus en circulation au 1^{er} janvier 2018 pour les 162 réseaux adhérents UTP. Pour connaître l'intégralité du parc il faudrait y ajouter ces autres réseaux (majoritairement de petite taille). A titre de comparaison, au 1^{er} janvier 2016, le ministère indique 26 545 autobus en circulation et l'enquête parc 2016 UTP extrapolée représente ~18 220 autobus.



2.1.2. Les énergies du parc autobus

Malgré une nette prédominance des autobus thermiques fonctionnant au gazole (en particulier pour les autobus non-capacitaires⁴), la présence des autres énergies alternatives au gazole continue de progresser (28 % du parc pour les autobus capacitaires).

Pour ces autres énergies alternatives, la mobilité gaz est la plus représentée, suivie de l'hybride gazole puis de l'électrique. Même si tous les types d'énergies alternatives ne sont pas encore déployés, ils font souvent l'objet d'expérimentation ou de déploiement programmé dès 2019.

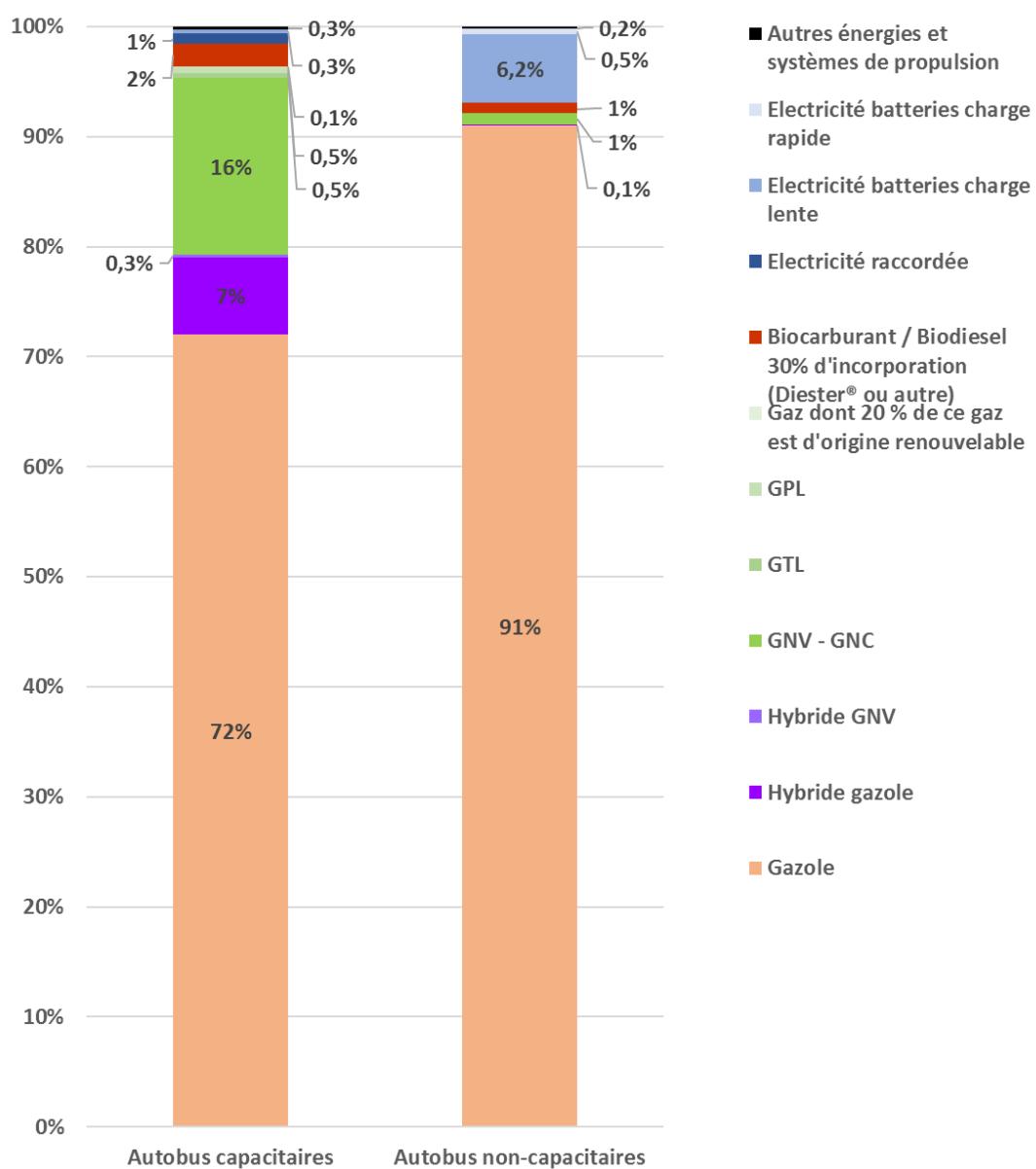


Figure 3 : Part des énergies par autobus capacitaires ou non-capacitaires au 1^{er} janvier 2018

Source : UTP, enquête parc 2018

⁴ Les autobus dits « non-capacitaires » sont les autobus de moins de 12 mètres, comprenant les véhicules de type midibus et minibus. Par extension, les autobus dits « capacitaires » sont les autobus de 12 mètres et plus, comprenant les véhicules de type articulé, standard et trolleybus.

Là encore, la dispersion est grande selon la taille du réseau puisque 40 % des véhicules capacitaires des réseaux de plus de 250 000 hab. (hors RATP) sont à énergie alternative au gazole. La part de ces véhicules pour la RATP est de 22 %.

Même si les effets de la loi sur la Transition Ecologique pour la Croissance Verte ne sont pas encore visibles (obligation de renouvellement d'une partie du parc vers des véhicules à faibles émissions), de nombreux réseaux se sont engagés dans des tests de véhicules électriques⁵ de grande capacité, certains d'entre eux ayant passé des appels d'offres pour leur acquisition.

Exemples de campagnes de communication en faveur des « bus propres » :



Figure 4 : Plan bus 2025 : Commandes de bus propres pour 2018-2020 Ile-de-France mobilités



Figure 5 : Campagne de promotion des bus propres par Ile-de-France mobilités

2.1.3. La normalisation Euro

Avec presque 98 % des autobus du parc fonctionnant avec un moteur thermique, une vision fine de sa répartition selon les normes Euro est essentielle.

Au 1^{er} janvier 2018, presque les 2/3 du parc respectent les normes Euro V+ (V, EEV et VI), dont presque 1/4 en norme Euro VI.

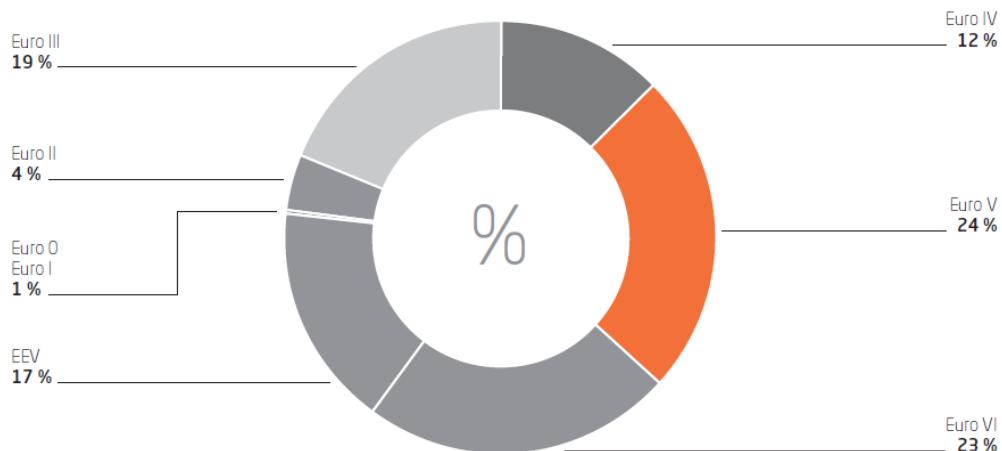


Figure 6 : Part des véhicules thermiques urbains selon la norme Euro au 1^{er} janvier 2018

Source : UTP, enquête parc 2018

⁵ Le décompte des véhicules électriques capacitaires inclue 172 trolleybus.



2.1.4. L'âge moyen du parc autobus

L'âge moyen du parc d'autobus est de 7,7 ans.

On note une certaine dispersion en fonction de la taille du réseau :

- Réseaux de plus de 250 000 hab. (hors RATP) : 8,5 ans
- Réseaux de 100 000 à 250 000 hab. : 8,2 ans
- Réseaux de moins de 100 000 hab. : 8,1 ans
- RATP : 6,3 ans

A noter que le parc des autobus non-capacitaires (minibus et midibus) est plus jeune de 1,5 point en moyenne.

En outre, le décret sur les véhicules à faibles émissions pourrait conduire à un prolongement de la durée de vie des véhicules dans l'attente de la maturité des filières d'énergies alternatives.

Par rapport aux autres pays européens, la France se situe dans la moyenne d'âge des différents parcs d'autobus.

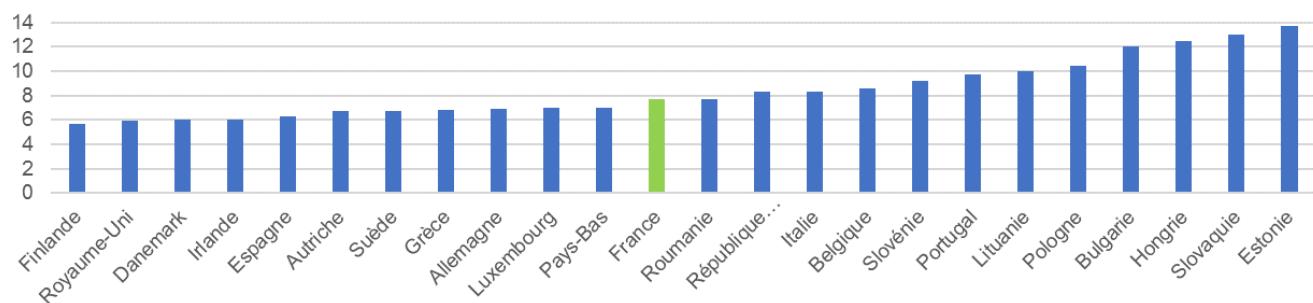


Figure 7 : Age moyen du parc autobus par pays membre de l'Union européenne (source : UITP, 2007)

2.2. Marché

2.2.1. Les constructeurs

Toutes capacités confondues, Iveco Bus est le constructeur principal avec 41 % des autobus suivi de Heuliez Bus à 24 % et Evobus à 16 %.

Sur le segment des autobus capacitaires (12 mètres et plus), on retrouve les mêmes acteurs avec des parts de marchés presque identiques, voire supérieurs (45 % pour Iveco Bus).

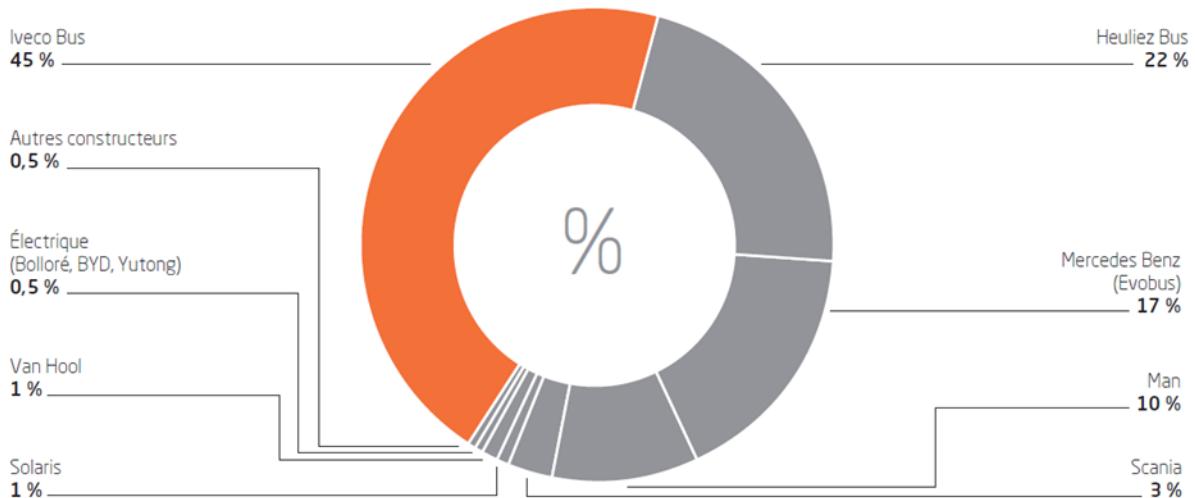


Figure 8 : Part des constructeurs des autobus capacitaires au 1^{er} janvier 2018

Source : UTP, enquête parc 2018

En approfondissant par type de véhicule, 53 % des bus articulés⁶ et 93 % des trolleybus⁷ sont des IVECO BUS.

Sur le segment des autobus non-capacitaires (moins de 12 mètres, comprenant les véhicules de type midibus et minibus), Heuliez Bus représente 48 % des parts de marché, devant les groupes Vehixel et Dietrich (26 %)

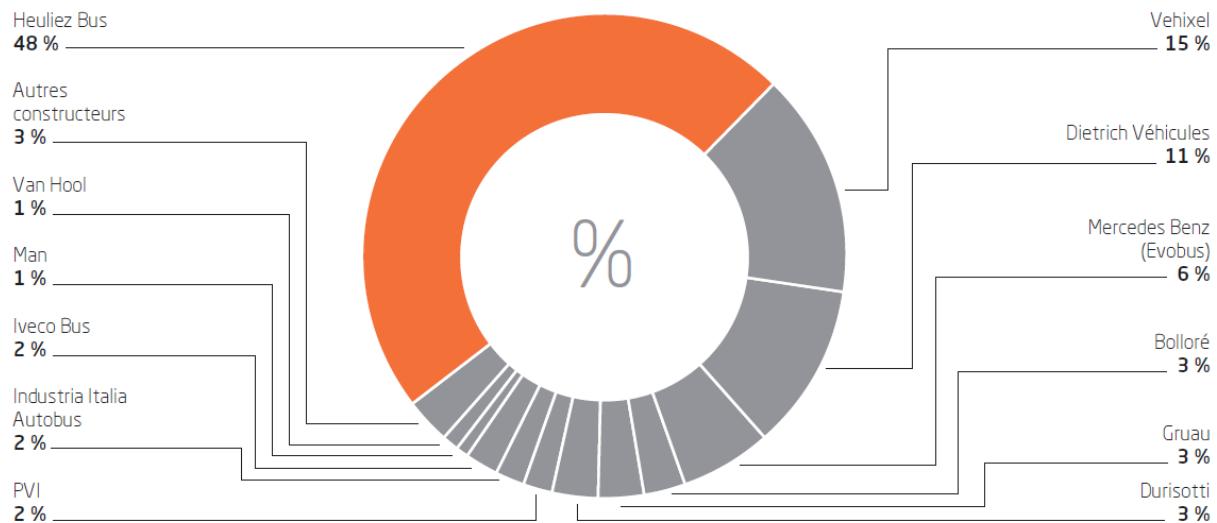


Figure 9 : Part des constructeurs des autobus non-capacitaires au 1^{er} janvier 2018

Source : UTP, enquête parc 2018

En approfondissant par type de véhicule, 83 % des midibus⁸ sont des Heuliez Bus et 58 % des minibus⁹ sont des Vehixel (33 %) ou des Dietrich (24 %).

⁶ Représenter 22 % des bus capacitaires

⁷ Représenter 1 % des bus capacitaires

⁸ Représenter 57 % des bus non-capacitaires

⁹ Représenter 43 % des bus non-capacitaires



2.2.2. Les immatriculations

Après une année 2015 exceptionnelle, deux années de légères baisses sont enregistrées (-2 % pour les immatriculations d'autobus entre 2016 et 2017).

		2014	2015	2016	2017
France métropolitaine	Autobus	1 559	2 050	1 708	1 679
	Autocars	4 327	5 281	4 875	4 659
	Non spécifié	11	14	10	
	Total	5 897	7 345	6 593	6 338
DOM	Autobus et autocars	280	309		
Total		6 177	7 654		

Tableau 2 : Bilan des immatriculations 2014 à 2017

Source : Trans'Bus

Les prévisions 2018 font état d'un volume d'immatriculations (autobus + autocars) d'environ 6 000 unités).

Le trio Iveco Bus, Heuliez Bus et Mercedes-Benz compte pour 81 % des immatriculations en 2017, Man suit juste derrière avec 9 % de ces dernières.

2.3. Exemples de réseaux de transport en commun

En complément de l'aspect global présenté ci-avant, cette partie propose quelques exemples concrets de l'implémentation de ces technologies de bus alternatives au diesel dans des réseaux existants.

Chaque fiche est structurée avec une description de l'AOM, un état du parc, une carte du réseau (pour appréhender l'étendue de ce dernier) et enfin des informations sur les bus alternatifs.

2.3.1. Bus propres – Ville de Paris



La Régie Autonome des Transports Parisiens (RATP) gère le réseau autobus de Paris sous la tutelle d'Île de France Mobilités (anciennement STIF).

Sur les 4 700 véhicules du réseau RATP, 97 % fonctionnent au diesel (dont 60 % conformes à la norme Euro V) et 3 % au GNV (140 véhicules), hybrides ou électriques (74 véhicules) : le groupe se lance l'objectif en 2025 de mettre en service 100 % de bus propres (80 % de la flotte devrait fonctionner grâce à l'électricité et 20 % au GNV).

Plusieurs modèles de bus électriques ont été testés dans un premier temps dès 2015 sur les lignes 21 et 147 puis ont été déployés de façon plus large depuis le 1^{er} février 2018 avec le concours des constructeurs Heuliez, Irizar, Solaris, Yutong (Groupe Dietrich Carebus) et Byd.

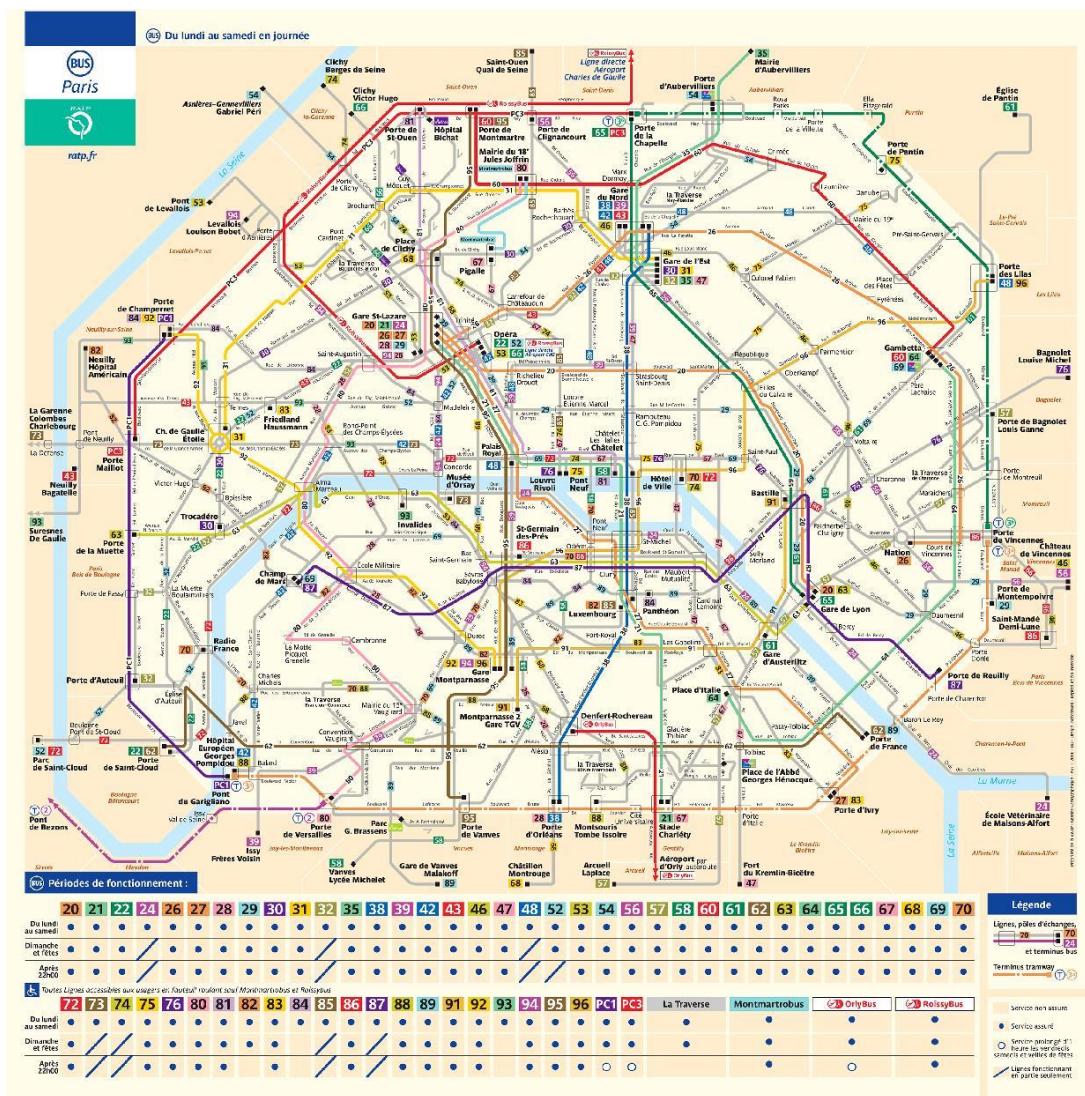


Figure 10 : Plan du réseau bus RATP



Un autobus de la ligne 21 a été équipé du modèle APTIS de Alstom, un bus 100 % électrique :



Figure 11 : Autobus Aptis 100 % électrique Alstom Ligne 21

Par ailleurs, ce sont déjà 140 autobus qui sont alimentés au GNV depuis le 1er juin 2015.

Depuis le 1er novembre 2015, 50 bus hybrides circulent sur le réseau RATP et une commande de 500 autobus supplémentaires a été réalisée.

Depuis juin 2016, la ligne 341 est désormais équipée d'une flotte complète de 23 autobus standard électrique Bluebus (Groupe Bolloré).



Figure 12 : Bluebus de la ligne 341

Fin 2017, 20 Bluebus supplémentaires ont été mis en service avec recharge partielle en terminus sur 2 lignes. De plus, les bus de la ligne 115 et 126 (du Groupe Bolloré) fonctionnent à l'électrique.

2018 doit marquer la conversion intégrale en GNV du centre bus de Créteil pour un parc de 240 véhicules. Depuis le 1^{er} février 2018, 800 autobus hybrides circulent sur le réseau RATP.



Figure 13 : Autobus Man ligne 24, 100 % GNV



Figure 14 : Autobus hybride Heuliez GX 337 ligne 152

2.3.2. Bus GTL – Ville de Strasbourg



La Compagnie des Transports Strasbourgeois (CTS) exerce une double compétence : opérateur et maître d'ouvrage. Société Anonyme d'Economie Mixte, la CTS a signé un contrat de concession en 1990 pour une durée de 30 ans avec l'Eurométropole de Strasbourg. En 2020, la CTS doit se transformer en Société Publique Locale (SPL).

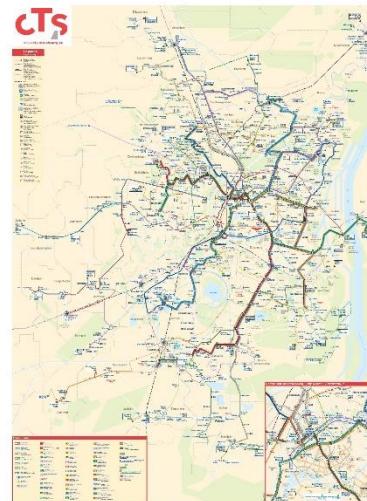


Figure 15 : Plan général du réseau © Compagnie des Transports Strasbourgeois

Depuis 1998, des bus fonctionnent au GNV sur le réseau. Fin 2008, la CTS comptabilisait 100 véhicules CITELIS GNV sur un total de 252.

Depuis 2009, un bus articulé hybride (électrique et gasoil) fonctionne sur le réseau.

De septembre 2016 à février 2017, 10 autobus diesel sont passés au GTL en partenariat avec Shell. Entre le 3 et le 21 décembre 2018, un autobus « Cristal »¹⁰ 100 % électrique a été expérimenté sur la ligne 10 (fréquence de 45 minutes du lundi au vendredi de 9h30 à 19h30).

L'automne 2019 doit marquer l'arrivée de 20 autobus électriques sur le réseau (rechargés de nuit en fin de service).

Le matériel est réparti entre 27 lignes de bus.



Figure 16 : Autobus GTL en cours de ravitaillement © CTS

¹⁰ L'autobus Cristal est un minibus électrique (version avec conducteur ou autonome) conçu par le groupe Lohr qui peut se transformer en autobus articulé. En effet plusieurs véhicules peuvent être accrochés en bout à bout.



2.3.3. Bus hybride – Ville de Dijon



En 1978 les premiers autobus articulés arrivent à Dijon.

Les lignes à haut niveau de service sont exploitées depuis 2004.

En 2013, la flotte est renouvelée de moitié grâce à 102 autobus hybrides (1^{er} parc en France de cette importance). Le contrat de DSP entre Dijon métropole (Grand Dijon) et Keolis Dijon mobilités a été renouvelé pour une durée de 6 ans depuis le 1^{er} janvier 2017.

Le parc bus de Keolis Dijon mobilités est composé de 199 autobus (dont 141 équipés de plancher bas avec rampe d'accès) :

- 102 autobus hybrides,
- 83 autobus articulés,
- 4 minibus pour les services de proximité
- 5 minibus destinées aux personnes à mobilité réduite
- 7 minibus City.

Les bus circulent sur :

- 23 lignes dont 5 lignes à haut niveau de service et 1 ligne express
- 1 navette gratuite en centre-ville
- 15 lignes scolaires

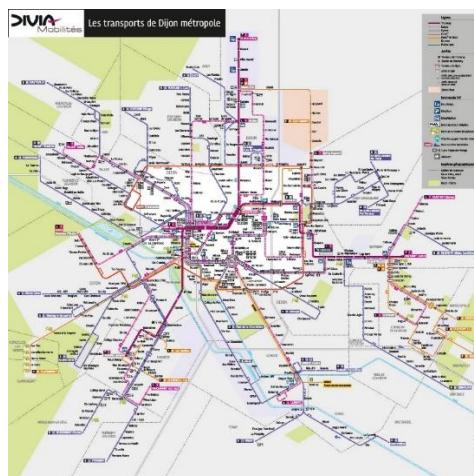


Figure 17 : Plan du réseau DIVIA de Dijon métropole



Figure 18 : BHNS de la ligne 6 avec bus hybride
Heuliez



Figure 19 : Navette Bluebus 100 % électrique

Les autobus fonctionnent grâce à la technologie hybride (HEULIEZ et IRISBUS – Groupe IVECO) et à l'électrique (Bluebus – Groupe Bolloré).

Depuis août 2017, la navette gratuite « City » a été mise en place dans le centre-ville. Ce sont 5 véhicules 100 % électriques Bluebus qui circulent du lundi au samedi de 8h à 19h permettant d'assurer des correspondances avec le réseau bus structurant (une navette toutes les 10 minutes)

2.3.4. Bus électrique – Ville d'Orléans



Keolis Orléans exploite le réseau de Transports de l'Agglomération Orléanaise (TAO), composé de 42 lignes de bus. 7 lignes du réseau assurent un service de Transport A la Demande (TAD).

La flotte est composée de 220 bus dont 60 % équipés d'un plancher bas.

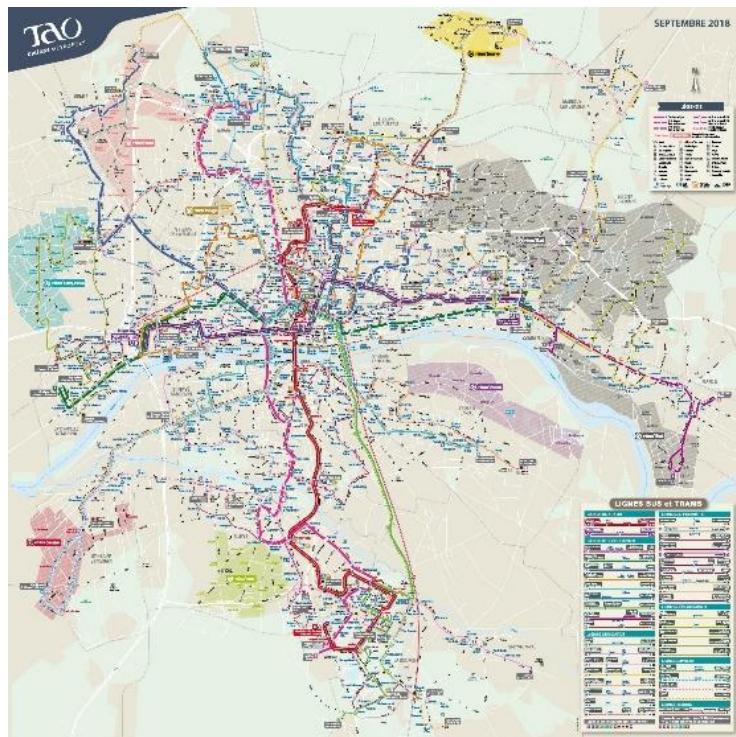


Figure 20 : Réseau bus d'Orléans métropole

Depuis mai 2017, 2 bus électriques ont été déployés sur 2 lignes régulières structurantes, avec une installation spécifique permettant un rechargeement optimal de 3 heures pendant la nuit au dépôt de Saint-Jean de Braye. En 2018, 4 bus électriques supplémentaires ont été mis en service.

Orléans métropole a renouvelé le 15 novembre 2018 le contrat d'exploitation avec Keolis jusqu'en 2024 avec pour objectif un renouvellement intégral du parc en 100 % électrique.



Figure 21 : Bus électrique en expérimentation



Figure 22 : Autobus 18 mètres en exploitation



2.3.5. Bus GNV – Ville de Boulogne-sur-Mer



RATP Dev, sous contrat de DSP avec la Communauté d'agglomération du Boulonnais, exploite le réseau Marinéo de Boulogne-sur-Mer (moins de 45 000 habitants) à travers sa filiale la Compagnie des Transports du Boulonnais (CTB) jusqu'en décembre 2020.

La flotte de la CTB comprend 79 bus. Ces autobus sont répartis entre 15 lignes régulières, 1 navette gratuite en centre-ville et 1 service de TAD.



Figure 23 : Plan du réseau bus Marinéo de Boulogne sur Mer © Marinéo

En octobre 2003, la communauté d'agglomération de Boulogne-sur-Mer a acheté ses 10 premiers autobus A330 Van Hool fonctionnant grâce au GNV et 5 bus supplémentaires chaque année jusqu'en 2007 (pour une trentaine de bus actuellement).



Figure 24 : Autobus gaz VanHool © CA du Boulonnais



Figure 25 : La flotte de bus GNV © Ray Ward

A noter qu'en mai 2017, la CTB a expérimenté une navette autonome 100 % électrique d'une capacité de 12 personnes accessible aux PMR.

2.3.6. Bus BioGNV – Ville de Grenoble



Le Syndicat Mixte des Transports en Commun (SMT) est l'AOM de Grenoble Métropole. Depuis 2013 l'exploitation du réseau Transports de l'Agglomération Grenobloise (TAG) est assurée par TRANSDEV/SEMITAG, pour une durée de 7 ans.

Le réseau TAG dispose d'une flotte de 300 véhicules dont 32 autobus articulés et 230 autobus standards. Sur ces 230 autobus, 56 sont équipés d'une motorisation hybride et 122 roulent au gaz (alimentés par du biogaz). En juin 2018, 48 autobus Scania GNV supplémentaires ont été acquis. Le réseau est composé de 46 lignes de bus.



Figure 26 : Plan du réseau © SEMITAG

On retrouve une centaine d'autobus par centre bus, dont :

- La majorité des véhicules fonctionnant au bioGNV au centre bus 1
- Les véhicules hybrides au centre bus 2



Figure 27 : Flotte d'autobus Iveco de Grenoble



Figure 28 : Autobus BioGNV du STMC

2.3.7. Bus à hydrogène – Ville de Pau



En tant que Territoire à Energie POSitive pour une croissance verte (TEPOS), l'agglomération Pau-Pyrénées a décidé la mise en place d'un Plan Climat Air Energie Territoire (PCAET) en 2016. C'est dans cette lignée que s'inscrit la création d'une ligne de bus à hydrogène pour 2019. Le Syndicat mixte des transports urbains Pau Porte des Pyrénées (SMTU PPP), en tant qu'autorité organisatrice de la mobilité (AOM) est responsable de la maîtrise d'ouvrage de ce projet de Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) dénommé « Fébus ». C'est la Société Publique Locale d'exploitation des transports publics et des services à la mobilité de l'agglomération paloise (SPL STAP), en assistance technique par le groupe Keolis, qui gère pour le compte du SMTU PPP, le réseau d'autobus Idelis dans lequel s'inscrit la ligne Fébus.

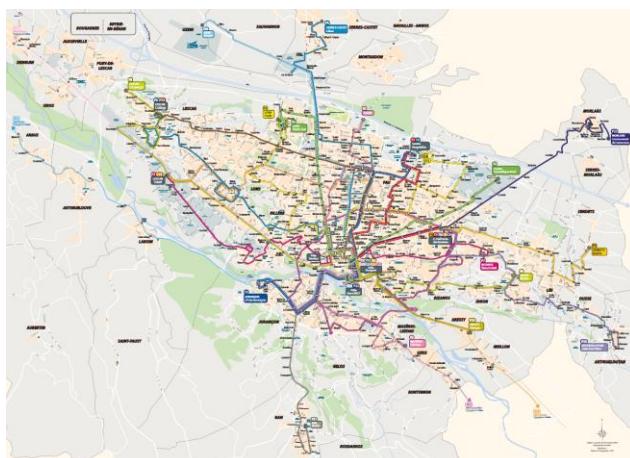


Figure 29 : Plan général du réseau © Idelis

Caractéristiques techniques du projet :

- 8 bus articulés de 18 m Van Hool à pile à combustible de 125 places qui circuleront toutes les huit minutes
- 6 km de ligne du nord au sud entre l'hôpital et la gare, en site propre (BHNS), avec 14 arrêts et 17 minutes de trajet annoncées de bout en bout
- Démarrage prévu à l'automne 2019
- L'hydrogène sera produit localement, avec un procédé d'électrolyse de l'eau



Figure 30 : Tracé de la ligne © Fébus



Figure 31 : Vue d'artiste du futur BHNS © Fébus

Le coût global du projet s'élève à ~72 millions d'euros, dont ~53 millions d'euros de travaux de rénovation urbaine. Sur les 13,5 millions d'euros d'investissement, près de 7 millions d'euros de subventions européennes et régionales, liées au choix de la technologie hydrogène, sont attendues.

La filière comprenant les carburants dits « de transition »

Filière ED95

Filière HVO

Filière GTL

Ces nouveaux carburants permettent d'accompagner la transition énergétique. Ils nécessitent des infrastructures de stockage similaires à celles du gazole. Au niveau des véhicules, on peut classer ces carburants en deux catégories :

- Les carburants substituables au diesel. Ces carburants fonctionnent avec un moteur identique à la technologie diesel. C'est le cas du biocarburant HVO, (Hydrotreated Vegetables Oils) et du carburant paraffinique de synthèse GTL (Gas-To-Liquid)
- Les carburants non substituables au diesel et donc nécessitant un moteur adapté. C'est le cas du biocarburant ED95.



3. Filière ED95

3.1. Présentation / caractéristiques

L'éthanol est un alcool liquide incolore et volatil se mélangeant à la plupart des solvants usuels.

En tant que carburant de substitution d'origine végétale, le « bioéthanol » peut être utilisé seul ou avec de l'essence.

Le bioéthanol est un alcool produit par fermentation, soit du sucre issu de plantes -betteraves, cannes à sucre- soit de l'amidon issu de céréales -blé, maïs, ...- (bioéthanol 1^{ère} génération). Il peut également provenir de résidus et de déchets -moûts et marcs- de la vinification (bioéthanol 2^{ème} génération).

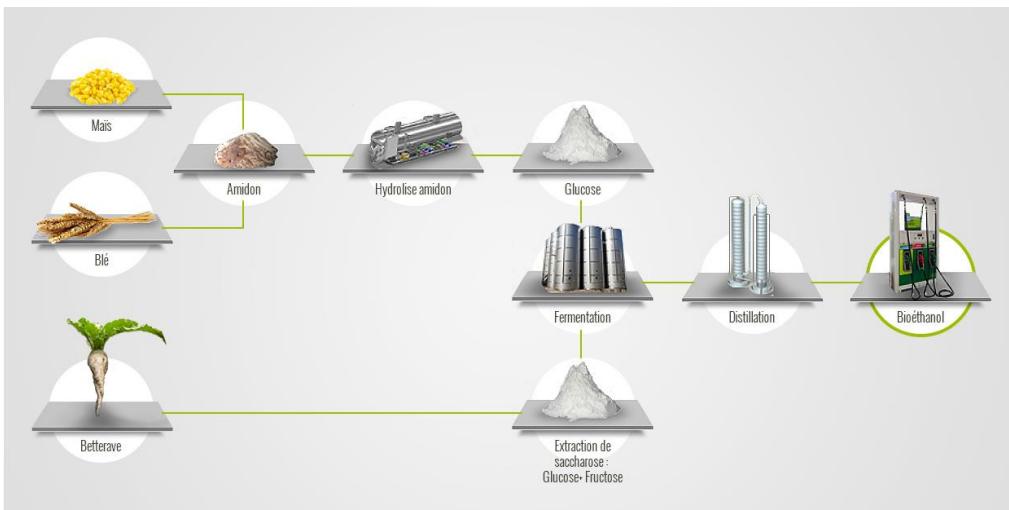


Figure 32 : Schéma de production de bioéthanol

Source : bioethanolcarburant.com

Le bioéthanol est présent dans les carburants distribués en France : 5 % dans le SP95 et le SP98, jusqu'à 10 % dans le SP95-E10, entre 65 % et 85 % dans le super éthanol E85.

La filière énergétique traitée dans le présent chapitre concerne le bioéthanol ED95, défini par l'article 1 de l'arrêté du 29 mars 2016 relatif aux caractéristiques du carburant ED95, comme « un mélange d'éthanol, d'eau et d'additifs favorisant l'auto-inflammation et la lubrification, destiné à l'alimentation de moteurs thermiques à allumage par compression ». Il est utilisé seul à hauteur de 95 % dans des moteurs diesel adaptés, et contient 95 % d'éthanol aqueux en volume et 5 % d'additifs.

3.2. Cadre réglementaire et fiscal

3.2.1. Réglementation

L'ED95 figure sur la liste des carburants autorisés en France depuis l'arrêté ministériel du 4 février 2016, modifiant l'arrêté du 22 décembre 1978. Les caractéristiques du bioéthanol ont été définies par l'arrêté du 29 mars 2016, qui précise notamment qu'il « ne peut être utilisé que dans des flottes professionnelles disposant d'une logistique d'approvisionnement spécifique et de leurs propres capacités de stockage et de distribution. »

Le stockage enterré du bioéthanol répond à la Norme EN 12285-1 relative aux exigences applicables aux réservoirs. Les infrastructures sont cependant similaires à celles utilisées pour des véhicules diesel EURO VI.

Par ailleurs, les véhicules fonctionnant à l'ED95 sont catégorisés dans le groupe 2 des types d'autobus à faibles émissions du décret n°2017-23 du 11 janvier 2017.

3.2.2. Fiscalité

Le bioéthanol est répertorié à l'indice 56 de la nomenclature des carburants de l'art 265 du Code des douanes.

Le taux de TICPE du bioéthanol ED95 -fixé par le Projet de Loi de Finances Rectificative de 2016- est de 4,40 EUR/hectolitre sans possibilité de remboursement d'une fraction de la TICPE. L'éthanol contenu dans l'ED95 est éligible à la minoration de la TGAP.

La loi de finances pour 2018 a prolongé de deux ans, jusqu'au 31 décembre 2021, le suramortissement de 60% prévu pour l'achat d'un véhicule de 3,5 à 16 t roulant à l'ED 95, et de 40 % prévu pour l'achat d'un véhicule de plus de 16 t roulant à l'ED 95.

3.3. Maturité de la filière

3.3.1. Disponibilité des véhicules

Seul Scania propose actuellement une gamme de bus fonctionnant à l'éthanol (l'utilisation de cette technologie nécessite d'avoir un moteur dédié).

Le bioéthanol ED95 est principalement utilisé en Suède et au Brésil dans les flottes de véhicules lourds pour le transport de voyageurs comme de marchandises. Il a néanmoins été testé en France sur des bus dans les communes de Saint-Quentin (Aisne), Reims (Marne), Angers (Maine-et-Loire) ou Bordeaux (Gironde).

En 1990, 30 autobus à l'éthanol, importés du Brésil, circulaient à Stockholm. En 2017, plus de 400 autobus à l'éthanol y étaient recensés sur un total de 2 000 véhicules (et une flotte mondiale à l'ED95 estimée à un millier d'unités). La capitale suédoise se fixe un objectif « zéro CO₂ » en 2050. Depuis les années 2000, la ville de Stockholm s'est dotée d'une usine de production d'éthanol à base de pâte à papier.

3.3.2. Conditions d'avitaillage et d'implantation des infrastructures

Le bioéthanol est réservé aux flottes captives disposant d'infrastructures de stockage. Ces dernières doivent être spécifiques.

Le bioéthanol, en raison de ses caractéristiques (hydrophile, volatile, inflammable), nécessite des précautions pendant le transport et le stockage.

Selon la localisation de l'entreprise, les possibilités d'approvisionnement des cuves doivent être confirmées par les fournisseurs.

Les stations de distribution de carburants doivent être adaptées au niveau des :

- Cuves de stockage
- Postes de distribution (adaptation des joints et des durites)
- Consignes de sécurité

3.3.3. Exploitation

Le confort de conduite et la capacité des véhicules sont analogues à celui d'un véhicule diesel.

La consommation est plus importante de l'ordre de 60 % par rapport au diesel en raison de son faible pouvoir calorifique (la distance couverte avec un plein sera donc moins importante qu'avec un bus diesel équivalent).

Pour la réalisation des pleins de carburant, des consignes spécifiques de sécurité doivent être respectées (notamment de porter des gants en caoutchouc butyle et des lunettes de protection en raison de la forte toxicité de l'éthanol pour les yeux).



3.3.4. Maintenance

La fréquence des cycles du plan de maintenance est multipliée par deux/trois par rapport à un véhicule diesel (vidange et changement du filtre à huile entre 20 000 et 30 000 km selon le type de service).

L'utilisation de la technologie ED95 nécessite de changer régulièrement les injecteurs tous les 20 000 km pour ne pas endommager le moteur.

Le convertisseur catalytique et les filtres à particules doivent être changés tous les 350 000 km.

3.4. Données économiques

Le coût d'acquisition d'un autobus standard fonctionnant à l'éthanol s'élève à plus de 250 k€, soit plus de 10 % par rapport à un véhicule Euro VI thermique.

L'utilisation de cette technologie implique des coûts de maintenance multipliés par deux par rapport à un véhicule diesel. Par exemple, l'étanchéité et la maintenance doivent être renforcées, synonyme d'un surcoût de 20 % comparé à un véhicule diesel Euro VI.

Les coûts d'investissements en infrastructure de stockage sont faibles (cuve dédiée).

La consommation est supérieure d'environ 60 % par rapport à un véhicule diesel Euro VI mais le prix du carburant est moins élevé, à environ 0,80 € par litre.

Ainsi par rapport à un véhicule diesel, les coûts des véhicules, d'infrastructures, d'exploitation et de maintenance sont supérieurs.

3.5. Impacts environnementaux

	Oxydes d'azote (NOx)	Particules (PM)	Gaz à Effet de Serre (GES)
ED95	Pas de gain	Aucun rejet mesurable par un PEMS* (également vrai pour la filière gazole EURO VI)	-88 % du puits à la roue

*PEMS = Portable emissions measurement system

Une étude, réalisée entre le 5 et le 21 décembre 2017 par l'ADEME, Scania et le Centre de Recherches en Machines Thermiques, visant à mesurer les émissions de polluants en conditions réelles de circulation (800 km parcourus) pour le GNV, l'éthanol et le diesel, a montré que l'utilisation du bioéthanol permet de réduire les émissions locales par rapport au diesel norme Euro VI. Cette campagne de mesures a été réalisée sur des autocars.

Des analyseurs de gaz ont été embarqués à bord des véhicules dont les trajets ont été décomposés ainsi : urbain (45 %), interurbain (25 %) et autoroute (30 %). Les émissions de CO₂, de CO, HC, NO et de NOx ainsi que la consommation de carburant ont pu être évaluées (sur cycle ISC type M3 -In Service Conformity-). Les véhicules fonctionnant à l'éthanol étaient équipés d'une boîte de vitesse automatique à glissement et leur puissance était de 280 cv. Seuls les résultats portant sur le roulage de type urbain (et donc similaire au profil de roulage d'un autobus) seront exploités dans cette étude.

Pollution locale

Pour les NOx, l'autocar éthanol émet sur l'ensemble du cycle ISC environ la moitié (0,12 g/kWh) des émissions de l'autocar diesel (0,27 g/kWh mesuré alors que le seuil de la norme Euro VI est à 0,69 g/kWh). En revanche, sur la partie urbaine, il n'existe aucun gain pour la filière éthanol.

Pollution globale

La photosynthèse (absorption de CO₂ par la plante) permet de contrebalancer les émissions produites lors de la phase d'utilisation du véhicule, avec une réduction de 88 % des émissions totales de CO₂ (sur l'Analyse du Cycle de Vie).

Si on regarde uniquement la phase d'utilisation du véhicule (du réservoir à la roue), les valeurs d'émissions de CO₂ sont proches pour l'autocar éthanol et l'autocar diesel. Sur cycle urbain, elles sont respectivement de 78,2 et 83,2 kgCO₂/100km. Néanmoins, à cause du PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) plus faible de l'éthanol, l'autocar éthanol surconsomme de ~60 % en cycle urbain par rapport à l'autocar diesel.

Autres impacts

L'utilisation du bioéthanol permet de se détacher du modèle classique d'importation de pétrole depuis les pays producteurs traditionnels. En outre, cette indépendance énergétique permet de maintenir des emplois ruraux et les résidus de plantes peuvent bénéficier au bétail.

3.6. Synthèse

Autorisé en France depuis janvier 2016, le bioéthanol ED95 est en cours d'expérimentation. L'utilisation de ce carburant nécessite un véhicule avec un moteur dédié et seul le constructeur Scania en commercialise.

L'impact environnemental très positif, en particulier sur les émissions de GES, est contrebalancé par l'augmentation des coûts de fonctionnement liés à la surconsommation et à la maintenance.

Technique	Environnemental	Economique
+ Ressources disponibles et renouvelables pour la production d'ED95	+ Forte réduction des émissions de gaz à effet de serre	- Investissements modestes en infrastructures (cuve spécifique)
Disponibilité de l'approvisionnement en ED95 à vérifier		- Coût du poste carburant supérieur au diesel (consommation plus importante même si carburant moins cher)
- Nécessité d'un véhicule avec moteur dédié		- Coûts de maintenance élevés
- Fréquence accélérée des cycles du plan de maintenance		
- Nécessité de changer régulièrement les injecteurs		
- Consommation de carburant plus élevée		
- Stockage spécifique : carburant très volatil et très inflammable		



4. Filière HVO

4.1. Présentation / caractéristiques

Le HVO (Hydrotreated Vegetable Oil ou Huiles Végétales Hydrotraitées) est obtenu par un procédé chimique d'hydrogénéation d'huiles végétales de plantes telles que le colza, le soja, le palme ou le jatropha ou de déchets de graisses animales. En ce sens il est considéré comme un biocarburant.

Les caractéristiques du HVO après transformation sont similaires à celles du gazole. La technique de fabrication du HVO permet en effet d'obtenir un produit avec une qualité et une conservation comparables à celles du gazole et utilisable à différentes températures, voire même plus basses que celles du gazole.

Le HVO est immédiatement utilisable dans les moteurs diesel : soit incorporé dans le gazole soit utilisé pur.

4.2. Cadre réglementaire et fiscal

4.2.1. Réglementation

Le HVO est un carburant répondant aux spécifications de la norme EN15940 relative aux carburants paraffiniques de type gazole, approuvée en 2016 par le Parlement européen. L'utilisation du HVO est autorisée en France depuis l'arrêté du 28 février 2017 relatif à la liste des carburants autorisés au regard des dispositions de l'art 265 ter du code des douanes, exclusivement pour les flottes de véhicules professionnels ayant une logique d'approvisionnement adaptée (nécessite une cuve spécifique pour le stockage du carburant).

Par ailleurs, les véhicules Euro VI fonctionnant au HVO sont considérés comme des véhicules à faibles émissions dans le cadre du décret n°2017-23 du 11 janvier 2017 uniquement pour les services de transport urbain des agglomérations de moins de 250 000 habitants (et hormis les communes soumises à un Plan de Protection de l'Atmosphère).

4.2.2. Fiscalité

Le HVO est soumis à la TICPE au même indice que le gazole (Indice 22 et 59,40 € par hectolitre).

Les entreprises de transport de voyageurs peuvent récupérer la fraction de la TICPE dans les mêmes conditions que pour le gazole.

Le HVO donne droit à minoration du taux de la TGAP.

4.3. Maturité de la filière

4.3.1. Disponibilité des véhicules

Comme le HVO est immédiatement utilisable dans les moteurs diesel actuels (pur ou mélangé au gazole), en théorie, tous les véhicules fonctionnant au diesel peuvent circuler au HVO. Cependant, il est nécessaire d'en demander confirmation auprès de son constructeur.



4.3.2. Conditions d'avitaillage et d'implantation des infrastructures

En France, le HVO n'est pas encore commercialisé. Cependant, la 1^{ère} bio-raffinerie française de taille mondiale a été mise en service à La Mède (13) en juin 2018. 500 000 tonnes de HVO doivent être produites chaque année. Le carburant ne sera disponible qu'en station privée.

Aucune infrastructure spécifique n'est à prévoir si ce n'est une cuve réservée au HVO pour conserver ses gains inhérents.

4.3.3. Exploitation

L'autonomie d'un véhicule circulant au HVO est similaire à celle d'un véhicule circulant au gazole.

Ce carburant est utilisé depuis 2007 dans les pays d'Europe du nord.

4.3.4. Maintenance

L'utilisation du HVO peut nécessiter une recalibration du système d'injection de carburant afin d'optimiser le fonctionnement du moteur, ainsi que quelques modifications des cuves de stockage du carburant.

4.4. Données économiques

Le prix du HVO est plus élevé que celui du gazole en raison du coût de production plus élevé et du coût de la matière première.

4.5. Impacts environnementaux

	Oxydes d'azote (Nox)	Particules (PM)	GES
HVO	Réduction des émissions locales pour les véhicules antérieurs à l'Euro VI. Aucune réduction statistiquement significative observée pour l'Euro VI		≥ 50 % du puits à la roue

Une étude réalisée début 2018 par Man, Total, GRdF, la FNTV PACA, le CRMT et l'ADEME, sur 2 autocars EURO VI sur 2 lignes interurbaines en conditions réelles de circulation a permis de mesurer en continu la consommation de carburant des véhicules et les émissions de CO₂ et de NOx.

Les 2 véhicules ont permis de comparer le comportement de l'autocar diesel fonctionnant alternativement au gazole puis au HVO et l'autocar fonctionnant au GNV.

Seuls les résultats portant sur le roulage de type urbain (et donc similaire au profil de roulage d'un autobus) seront exploités pour cette étude.

Pollution locale

Pour les NOx, les niveaux obtenus sont globalement très bas par rapport à la norme Euro VI de 0,69 g/kWh : 0,17 et 0,21 g/kWh respectivement pour le gazole et le HVO en cycle urbain. Ces valeurs sont très proches, et démontrent qu'il n'existe aucun gain pour la filière éthanol sur cycle urbain.

Pollution globale

Comme le HVO est un carburant renouvelable au sens de la directive européenne 2003-30, il doit donc garantir un abattement réglementaire minimal de 50 % des émissions de CO₂ du puits à la roue par rapport au gazole (en fonction de la matière première utilisée pour le HVO, cet abattement peut atteindre 75 %).



L'expérimentation a montré une consommation moyenne proche entre gazole et HVO : respectivement 45,2 et 44,6 l/100km en cycle urbain. En termes d'émissions de CO₂ du réservoir à la roue, l'expérimentation indique une réduction de 11 % en faveur du HVO (à 1081,4 g/km).

Autres impacts

La production de HVO peut impacter l'économie de la filière agricole avec d'un côté la consommation de matières premières agricoles et à l'inverse la production de co-produits utilisables pour l'alimentation du bétail.

Une Légère réduction des nuisances sonores et visuelles a été observée.

4.6. Synthèse

Le HVO permet d'apporter une réponse immédiate aux problématiques de qualité de l'air pour les véhicules antérieurs à la norme Euro VI, en se substituant au gazole pour réduire les émissions de polluants. Dans tous les cas, il permet de diminuer de moitié les émissions de GES du puits à la roue.

Malheureusement le HVO n'est pas encore commercialisé en France et son coût est pour l'instant supérieur à celui du gazole.

Technique	Environnemental	Economique
+ Aucune modification des véhicules	+ Réduction des émissions de GES de l'ordre de 50 %	Investissements modestes en infrastructures (cuves)
+ Totalement substituable (et miscible) au gazole	+ Pour les véhicules antérieurs à l'Euro VI, réduction des émissions d'oxydes d'azotes et de particules	- Coût du carburant supérieur au gazole pour l'instant
- Carburant non encore disponible en France		

5. Filière GTL

5.1. Présentation / caractéristiques

Le GTL (Gas-To-Liquid) est produit à travers une transformation chimique du gaz naturel, selon le procédé Fischer-Tropsch. Les molécules de gaz (méthane) sont « cassées » et synthétisées sous une nouvelle forme, permettant de produire un carburant liquide. Ce dernier, à l'inverse du GNL (issu d'une transformation physique du gaz naturel), ne nécessite plus de précautions particulières pour rester sous la forme liquide à température ambiante.

Peu de compagnies pétrolières produisent et distribuent le GTL. On retrouve principalement le GTL de Shell qui est produit exclusivement dans l'usine Pearl au Qatar et distribué en Europe depuis quelques années et depuis 2017 en France (à la date de son autorisation réglementaire).

Le carburant GTL peut être utilisé dans n'importe quel moteur diesel sans aucun besoin de modifications.

5.2. Cadre réglementaire et fiscal

5.2.1. Réglementation

Le GTL est un carburant de synthèse qui répond aux spécifications de la norme EN15940, relative aux carburants paraffiniques de type gazole (avril 2016). La norme EN15940 est proche de la norme EN590 (gazole). Les deux principales différences sont la densité et l'indice de cétane.

Le GTL est autorisé en France depuis février 2017 uniquement pour le transport professionnel à condition de disposer d'une logistique d'approvisionnement spécifique.

Par ailleurs, les véhicules Euro VI fonctionnant au GTL sont considérés comme des véhicules à faibles émissions dans le cadre du décret n°2017-23 du 11 janvier 2017 uniquement pour les services de transport urbain des agglomérations de moins de 250 000 habitants (et hormis les communes soumises à un Plan de Protection de l'Atmosphère).

5.2.2. Fiscalité

Le GTL est soumis à la TICPE au même indice que le gazole. (Indice 22 et 59,40 €/hectolitre).

Les entreprises de transport routier de voyageurs peuvent récupérer une fraction de la TICPE dans les mêmes conditions que pour le gazole.

Maturité de la filière

5.2.3. Disponibilité des véhicules

Tous les véhicules diesel peuvent fonctionner au GTL pur ou mélangé sans aucune modification. Toutefois, il est préférable de s'en assurer auprès du constructeur.

5.2.4. Conditions d'avitaillage et d'implantation des infrastructures

L'utilisation du GTL ne nécessite ni investissements, ni infrastructures spécifiques. Néanmoins, une cuve dédiée est préconisée pour assurer une bonne conservation des avantages du GTL.

En raison de sa stabilité à l'oxydation, le GTL peut être stocké sur du long terme.



5.2.5. Exploitation

La consommation d'un véhicule roulant au GTL est équivalente à celle d'un véhicule diesel. En effet, si la densité du GTL est plus faible que celle du gazole, il bénéficie d'une meilleure combustion, son pouvoir calorifique massique ainsi que son indice de cétane (meilleure performance de démarrage à froid) sont plus élevés. De fait, la consommation s'équilibre.

5.2.6. Maintenance

L'utilisation du GTL ne nécessite pas en principe de maintenance particulière.

Le GTL permettrait (données Shell) de réduire significativement les coûts de maintenance des systèmes de post-traitement.

5.3. Données économiques

Le coût du carburant GTL est supérieur au gazole (surcoût de 5 % selon l'expérimentation menée par la Compagnie des Transports Strasbourgeois en 2016, qui peut être récupéré par un entretien allégé).

5.4. Impacts environnementaux

	Oxydes d'azote (Nox)	Particules (PM)	GES
GTL	Réduction des émissions locales pour les véhicules antérieurs à l'Euro VI. Aucune réduction statistiquement significative observée pour l'Euro VI		Identique au gazole du puits à la roue

Pollution locale

Concernant l'Euro VI, aucune réduction importante n'a été observée a priori. Pour les véhicules antérieurs à l'Euro VI, une étude de TNO en 2014 a montré que pour des systèmes relativement simples, par exemple de type Euro III, les réductions de NOx sont de l'ordre de 5 à 19 % et les réductions des particules de l'ordre de 10 à 34 %. Pour les moteurs qui disposent de systèmes de réduction des émissions plus sophistiqués, les variations relatives au niveau des NOx et des particules peuvent être plus importantes. Pour des moteurs SCR Euro V, les mesures ont montré des réductions de NOx de l'ordre de 5 à 37 % et des réductions de particules allant jusqu'à 33 %.

Les HC seraient réduits de l'ordre de 60 % par rapport au gazole et le CO de l'ordre de 75 %.

Pollution globale

L'empreinte CO₂ du puits à la roue est identique à celle du gazole utilisé en Europe (l'évaluation de l'intensité CO₂ du GTL, disponible dans la Directive sur la qualité des carburants Annexe 7a, est de 94,3 gCO₂e/MJ, et sa valeur pour le gazole conventionnel est de 95,1 gCO₂e/MJ).

Selon Shell, on constate une diminution d'environ 5 % du réservoir à la roue (lié au contenu énergétique supérieur et au rapport hydrogène/carbone plus élevé du GTL).

Autres impacts

L'utilisation de ce carburant permet de réduire la pollution sonore (bénéfices de 1 à 4 décibels), les odeurs (quasi absence d'aromatiques -benzène-) et les fumées pour les véhicules antérieurs à l'Euro VI grâce à une meilleure combustion liée à un indice de cétane élevé (les véhicules Euro VI ne produisant que très peu de fumée).

Selon Shell, ce carburant n'est pas nocif en cas d'inhalation et moins irritant. Il est classé comme « rapidement biodégradable » et non cancérogène.



5.5. Synthèse

L'intérêt de ce carburant est de pouvoir être utilisé sans aucune transformation par un moteur diesel standard et quasiment sans coût d'infrastructure, hormis une cuve dédiée.

Le GTL offre une réponse immédiate aux problématiques de qualité de l'air pour les véhicules antérieurs à la Norme Euro VI, en se substituant au gazole pour réduire les émissions de polluants locaux. Il laisse aux collectivités « le temps de faire mieux ».

Technique	Environnemental	Economique
+ Aucune modification des véhicules	+ Réduction des émissions d'oxydes d'azotes et de particules pour les véhicules antérieurs à la norme Euro VI	Investissements modestes en infrastructures
+ Totalement substituable, et miscible, au gazole	+ Réduction des nuisances sonores, olfactives et visuelles	- Coût du poste carburant supérieur au diesel (le surcoût peut être récupéré par un entretien allégé)
+ Amélioration de la puissance du moteur à froid	+ Carburant non-toxique, non-cancérogène et biodégradable	
Disponibilité de l'approvisionnement en GTL à vérifier	Emissions de CO ₂ du puits à la roue identiques	



La filière gaz

Filière GNC

Filière biogaz

Filière GNL

Le Gaz Naturel pour Véhicule (GNV) est composé de plus de 85 % de méthane, de 2 à 8 % d'éthane et d'une très faible quantité d'autres hydrocarbures comme le propane et le butane.

Le méthane est un gaz incolore et inodore. C'est le principal composant du gaz naturel, deux fois moins inflammable que les autres carburants hydrocarbures. Plus léger que l'air, le GNV se dissipe rapidement en cas de fuite, contrairement aux autres carburants. Il est stocké et utilisé sous forme gazeuse ou liquide et est distribué en station-service dédiée à caractère privatif ou public.

Le GNV regroupe trois gaz naturels carburants :

- Le Gaz Naturel Comprimé ou Compressé (GNC) couvre l'ensemble des usages de la mobilité (voiture particulière, autobus, véhicules utilitaires, poids lourds) – forme gazeuse
- Le Gaz Naturel Liquéfié (GNL) est particulièrement adapté aux longues distances grâce à son autonomie importante – forme liquide cryogénique
- Le bioGNV est obtenu grâce à la méthanisation de déchets organiques, qui peut ensuite être utilisé sous forme compressée (bioGNC) ou liquide (bioGNL)



6. Filière GNC

6.1. Présentation / caractéristiques

Le GNC est comprimé à la station à plus de 200 bars puis stocké sous haute pression dans les stations-services où il sera utilisé pour remplir les véhicules grâce à des buses de remplissage spécifiques. Pour information, un réservoir de 100 litres à 200 bars contient environ 16 kg de GNC, équivalent en consommation à 22,5 litres de diesel. Pour un bus standard, on retrouve plusieurs réservoirs (en général entre 4 et 8) d'une contenance totale de l'ordre de 1200 litres.

Les réservoirs utilisés sur les bus GNV résistent à des pressions supérieures à 500 bars. Ils sont de deux types :

- Type 3 (ou CNG 3) réservoir en matériaux composites avec un liner (enveloppe interne pour l'étanchéité) en aluminium ;
- Type 4 (ou CNG 4) réservoir en matériaux composites avec un liner en polyéthylène.

6.2. Cadre réglementaire et fiscal

6.2.1. Réglementation

L'exploitation de véhicules GNV (le cadre réglementaire applicable au GNC est le même que celui du GNV) est soumise à une réglementation stricte afin de garantir une sécurité maximale.

Véhicules :

Le Règlement européen ECE R110 (Norme R110) révisé GNC, annexé à l'accord de Genève du 20 mars 1958, est applicable en France depuis le 1^{er} juillet 2004. Révisé le 30 mai 2008, il décrit les prescriptions relatives à l'homologation des composants de véhicules fonctionnant au GNV (conformité des pièces de rechange).

Chaque réservoir doit être équipé : d'une électrovanne asservie au fonctionnement du moteur du véhicule et de fusibles haut débit qui se déclenchent à partir d'une certaine température (~100°C).

Les visites réglementaires sont identiques à celles d'un véhicule diesel auxquelles s'ajoute une inspection tous les 4 ans des réservoirs et des dispositifs d'alimentation du moteur. Cette inspection est réalisée par le Comité Français pour les Essais Non Destructifs (COFREND) grâce à la méthode du Contrôle par Inspection Détaillée (CID) pour les véhicules dont le PTAC est supérieur à 3,5 tonnes.

Par ailleurs, les véhicules GNV sont catégorisés dans le groupe 2 des types d'autobus à faibles émissions du décret n°2017-23 du 11 janvier 2017.

Installations :

Le GNC relève de la rubrique 1413 de la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). Il existe 2 systèmes distincts d'autorisation d'ouverture de site selon le débit ou la capacité des installations (déclaration ou autorisation préfectorale).

La procédure ICPE 1413 est variable selon le débit de la station :

- Pas de classement si le débit est inférieur ou égal à 80 m³/h
- Soumise à déclaration et à des contrôles périodiques si le débit est compris entre 80 m³/h et 2000 m³/h ou si la masse totale de gaz contenu dans l'installation est supérieure à 1 tonne
- Soumise à autorisation si le débit est supérieur à 2000 m³/h ou si la masse totale de gaz contenu dans l'installation est supérieure à 10 tonnes
- Classement Seveso¹¹ si le stockage de gaz naturel comprimé excède 50 tonnes
- Aucun seuil d'Autorisation avec Servitude (AS) pour les stations GNV rubrique 1413

¹¹ En référence à une série de directives européennes qui imposent l'identification des sites industriels présentant des risques d'accidents majeurs et le maintien d'un haut niveau de prévention.



Normalisation par rapport aux zones d'habitations :

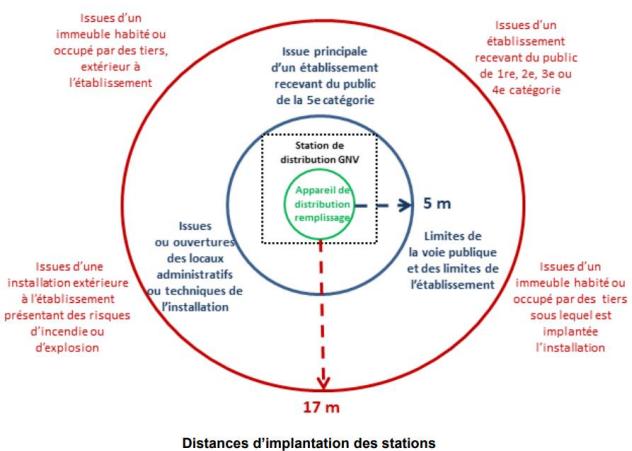
- Des distances de sécurité entre les équipements de la station
- Des distances entre les équipements et un bâtiment recevant du public

Visite annuelle obligatoire pour :

- Les installations de compression
- Les ateliers où les systèmes de détection de gaz et des dispositifs de sécurité sont vérifiés

Les principales règles à prendre en considération pour l'implantation des stations GNV sont les suivantes :

- Les installations de compression, stockage et distribution de gaz naturel ne doivent pas être implantées en rez-de-chaussée ou en sous-sol d'un immeuble habité ou occupé par des tiers ;
- Les équipements de compression et de stockage peuvent être placés dans des locaux spécialement et uniquement affectés à cet effet (possibilité de station en milieu clos) mais seront de préférence placés à l'air libre ;
- Les bornes de distribution ne peuvent être installées en milieu clos ;
- Les pistes, lorsqu'elles existent, et les aires de stationnement des véhicules en attente de distribution sont disposées de telle façon que les véhicules puissent évoluer en marche avant. Les véhicules ne doivent pas stationner en impasse ;
- Un dispositif (de dépressurisation) à déclenchement thermique permet la dépressurisation automatique des réservoirs en cas d'incendie. Le rejet se fera à au moins trois mètres au-dessus du point le plus haut du stockage, au-dessus de toutes constructions sur le site (y compris d'un éventuel auvent) et à au moins trois mètres de la limite de propriété ;
- Respecter des distances de sécurité (par rapport aux appareils de distribution et/ou de remplissage -entre 5 et 17 m- et pour le stockage des bouteilles de gaz -réervoir enterré ou non, entre 6 et 7,5 m-) ;



- Les équipements de compression et de stockage du gaz naturel doivent également être éloignés des installations de stockage et de distributions des autres carburants (entre 5 et 6 m) ;
- Les émissions sonores émises par l'installation ne doivent pas être à l'origine, dans les zones à émergence réglementée, d'une émergence supérieure aux valeurs admissibles (réglementation sur le bruit ambiant de l'arrêté du 23 janvier 1997).

En parallèle, la réglementation ATEX (Atmosphère Explosive) impose de maîtriser les risques relatifs à l'explosion de ces atmosphères. Une évaluation du risque d'explosion dans une installation est nécessaire pour permettre d'identifier tous les lieux où peuvent se former des atmosphères explosives ainsi que les mesures à mettre en place pour les réguler.

Une installation est classée ATEX lorsque la présence d'éléments susceptibles d'être inflammables est constatée. Ces éléments sont classés et des périmètres doivent être mis en place autour de chaque zone à risque d'explosion (zones 0, 1 et 2).

Obligations liées à la réglementation ATEX :

- Détermination des caractéristiques physico-chimiques des matières explosives
- Zonage des emplacements où des atmosphères explosives peuvent se former
- Signalisation des emplacements dangereux
- Mise en place de mesures préventives

Les trois mots d'ordre liés à une zone ATEX sont :

- La prévention : information du personnel sur le gaz naturel et sur les conduites à tenir en cas de détection de fuite.
- La détection : un système de détection (détecteurs et/ou infrarouge) permet de détecter toute fuite de gaz éventuelle et de déclencher certaines actions de prévention en fonction de l'importance de la fuite : ouvertures des aérations en toiture, coupure de l'électricité et du gaz, alerte par signaux lumineux ou sonores...
- Le traitement : le niveau comprend l'ensemble des mesures à prendre en cas d'alerte : évacuation du personnel, ventilations, coupure générale des énergies, alerte des secours, procédures diverses...

6.2.2. Fiscalité

Le GNV est soumis depuis 2011 à la Taxe Intérieure sur la Consommation des Produits Energétiques (TICPE) – Code des douanes art 265 – indice 36. 2018 = 5,80 €/100m³. Il ne bénéficie pas du remboursement partiel de la TICPE.

Le GNV est exonéré de la Taxe Intérieure de Consommation sur le Gaz Naturel (TICGN) du fait de l'usage carburant.

Le GNC est soumis à la TVA pétrole.

La loi de finances pour 2018 a prolongé de deux ans, jusqu'au 31 décembre 2021, le suramortissement de 60 % prévu pour l'achat d'un véhicule de 3,5 à 16 t roulant au GNV, et de 40 % prévu pour l'achat d'un véhicule de plus de 16 t roulant au GNV.

Les véhicules spécialement équipés pour fonctionner exclusivement ou non au GNV peuvent être exonérées, sur délibération du conseil régional, en totalité ou à concurrence de la moitié de la taxe proportionnelle sur les certificats d'immatriculation prévue au I de l'article 1599 sexdecies du CGI (cartes grises).

Le GNV ne rentre pas dans l'assiette de la TGAP.

6.3. Maturité de la filière

6.3.1. Disponibilité des véhicules

Offre abondante pour les autobus.

6.3.2. Conditions d'avitaillement et d'implantation des infrastructures

La disponibilité du GNC semble comparable à celle du diesel sur l'ensemble du territoire français au regard de la densité des réseaux de gaz naturel existants (réseaux de transports et de distribution).

Plusieurs infrastructures sont nécessaires pour assurer l'exploitation des véhicules fonctionnant au gaz naturel :

- Une station de compression (nécessite une arrivée de gaz à proximité du dépôt d'au minimum 4 bars ; 16 bars sont préférables pour alimenter les véhicules lourds)
- Un aménagement du dépôt (sécurisation)
- Un aménagement de l'atelier (sécurisation, zone ATEX et équipements).

On distingue ensuite 2 types d'avitaillement :

- L'avitaillement rapide (charge rapide) : 5 à 10 minutes (dans ce cas, le plein complet n'est pas garanti, on observe jusqu'à 20 % de gaz en moins)
- L'avitaillement à la place (charge lente) : 5 à 8 heures.



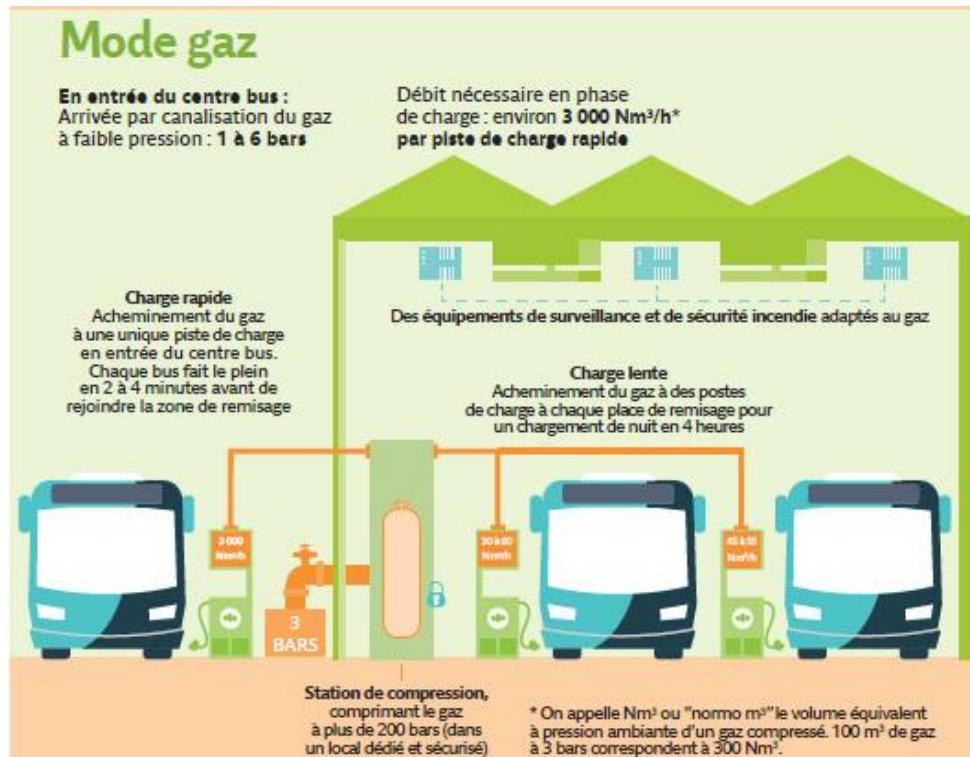


Figure 33 : Représentation schématique d'une station bus filière gaz

6.3.3. Exploitation

La capacité du véhicule GNC est identique à celle du véhicule diesel. Le stockage du gaz à haute pression (200 bars) permet une autonomie de l'ordre de 400 km (le pouvoir calorifique d'1 Nm³ de gaz à pression atmosphérique et à température ambiante est sensiblement identique à celui du gazole).

Il est nécessaire, selon le mode d'avitaillement retenu, de prendre en compte le temps de connexion du véhicule à la station de charge et à sa déconnexion avant le départ dans le cas d'une charge lente au dépôt.

Les conducteurs de véhicules doivent participer à une demi-journée de formation, et le personnel d'exploitation doit également être formé.

Les zones de travail sur les véhicules GNC doivent être séparées des autres sources d'ignition (meulage, découpage ...).

Les zones techniques d'entretien des véhicules GNC doivent être définies par marquage au sol ou provisoire (plots, chaînes, balisage ATEX).

Un balisage ATEX fixe ou mobile doit être prévu dans les zones de consignation et d'intervention. Des balisages provisoires portatifs ATEX d'intervention ou d'urgence seront apposés en cas de fuite en dehors des zones de consignation.

En dehors des zones ATEX et des zones contrôlées par un dispositif fixe ou mobile (cabines de peintures, zones de stockage confinées ...), les intervenants sur les véhicules peuvent être dotés de détecteurs de gaz portatif. Le cas échéant, ils pourront déclencher l'alarme par arrêt d'urgence géré par la centrale d'alarme et à proximité immédiate des zones d'interventions sur véhicules.



Figure 34 : Balisage ATEX

6.3.4. Maintenance

Pour une sécurité optimale, les ateliers opérant des véhicules GNC doivent être configurés pour éviter toute zone de confinement : hauteur sous plafond minimale, ventilation naturelle suffisante, absence de source d'ignition, détection du gaz, présence d'extincteurs à poudre.

La gestion des véhicules en maintenance doit être assurée par des intervenants du niveau requis suivant la localisation du dysfonctionnement.

Pour permettre une mise en sécurité optimale des véhicules, un nombre suffisant de formations des conducteurs et du personnel pouvant être présent au dépôt doit être assuré pour assurer une isolation de fuite par fermeture des vannes manuelles des réservoirs et de la vanne générale à proximité immédiate du moteur.

Certains équipements particuliers sont nécessaires pour la maintenance des véhicules GNC :

- Passerelle mobile pour le travail en hauteur
- Equipement pour levage du capotage des réservoirs de gaz
- Outilage spécifique au gaz : détection de fuite, intervention sur véhicule
- DéTECTEURS DE GAZ ET INSTALLATION DE ZONES ATEX

En outre, dans le cadre d'une intervention majeure sur le circuit de gaz haute pression, la procédure de remise en pression progressive permet de s'assurer de la bonne étanchéité du circuit haute pression. Différents types de fuites peuvent apparaître à basse et/ou à haute pression, il est indispensable dans ces cas de :

- Disposer d'un équipement doté d'un manomètre étalonné permettant les épreuves de 5 minutes pour chacun des 4 paliers de pression (10 bars, 50 bars, 100 bars puis à 200 bars)
- Vérifier l'étanchéité à l'aide d'un tensioactif aux points d'intervention et aux organes critiques (raccordement des appareils, raccords de tuyauterie ...)
- Contrôler l'absence de bulles pendant 5 minutes entre chaque palier (ces contrôles par épreuves peuvent être réalisés à l'azote permettant ainsi un dernier palier à 250 bars)



Figure 35 : Atelier de maintenance RATP

6.4. Données économiques

Le développement d'une flotte fonctionnant au GNV (GNC ou GNL) requiert une infrastructure spécifique dont le coût dépend de plusieurs facteurs :

- Nombre de véhicules
- Type de charge (rapide, lente)
- Présence ou non d'autres flottes captives publiques (collecte des déchets, ...)
- Ouverture ou non au public ou à d'autres flottes privées (transport de marchandises, ...)



Pour les structures ne disposant pas à ce jour d'une installation adaptée, l'exploitant doit budgérer entre 20 et 25 k€ par autobus pour un parc de 20 à 40 véhicules.

Le coût moyen d'acquisition d'un bus GNV standard (12 m) est de presque 300 k€ (soit un surcoût constaté de l'ordre de 15-20 % par rapport à un bus diesel).

Le coût moyen énergétique est calculé sur la base d'une consommation moyenne de ~40 kg/100 km. Le GNV est de 30 à 50 % moins cher que le diesel (avec une hypothèse de 0,60 € le kg de GNC).

Le coût moyen de maintenance préventive est de l'ordre de 0,21 € par kilomètre.

6.5. Impacts environnementaux

	Oxydes d'azote (NOx)	Particules (PM)	Gaz à effet de serre (GES)
GNC	-20 à -40 %	Aucun rejet mesurable par un PEMS* (également vrai pour la filière gazole EURO VI)	Jusqu'à -4,5 % du réservoir à la roue et aucun gain du puits à la roue

* PEMS = Portable emissions measurement system

Une première étude, réalisée entre le 5 et le 21 décembre 2017 par l'ADEME, Scania et le Centre de Recherches en Machines Thermiques, visait à mesurer les émissions de polluants en conditions réelles de circulation (800 km parcourus) pour le GNV, l'éthanol et le diesel. Cette campagne de mesures a été réalisée sur des autocars EURO VI. Des analyseurs de gaz ont été embarqués à bord des véhicules dont les trajets, simulant un cycle de type ISC type M3 ISC = In Service Conformity) ont été décomposés ainsi : urbain (45 %), interurbain (25 %) et autoroute (30 %). Les émissions de CO₂, de CO, HC, NO et de NOx ainsi que la consommation de carburant ont pu être évaluées. Le véhicule fonctionnant au diesel (320 cv) était équipé d'une boîte de vitesse automatique à glissement alors que le véhicule GNV (320 cv) avait une boîte robotisée.

Une deuxième étude réalisée début 2018 par Man, Total, GRdF, la FNTV PACA, le CRMT et l'ADEME, sur 2 autocars EURO VI sur 2 lignes interurbaines en conditions réelles de circulation a permis de mesurer en continu la consommation de carburant des véhicules et les émissions de CO₂ et de NOx. Les 2 véhicules ont permis de comparer le comportement de l'autocar diesel fonctionnant alternativement au gazole puis au HVO et l'autocar fonctionnant au GNV.

Pour ces deux études, seuls les résultats portant sur le roulage de type urbain (et donc similaire au profil de roulage d'un autobus) seront exploités.

Enfin, le laboratoire finlandais « VTT » publie régulièrement des résultats de mesures environnementales réalisées sur un banc à rouleaux pour véhicules lourds, sur lesquelles il est également possible de s'appuyer afin d'évaluer les gains environnementaux des différentes filières.

Pollution locale

L'ensemble des études listées ci-dessus permet d'estimer un gain de 20 à 40 % en roulage urbain sur les NOx pour l'autobus GNV (versus l'autobus gazole). Ces gains sont assez variables d'une étude à l'autre, et dépendent de nombreux facteurs (vitesse commerciales, utilisation des auxiliaires, conditions météorologiques, etc.). A noter que les niveaux de NOx mesurés sont très en deçà de ceux imposés par la norme EURO VI.

Remarque : en cas de départ à froid (ce qui n'est pas regardé dans la norme), ces gains peuvent moteur jusqu'à 50% pour une journée entière d'exploitation. En effet, durant cette phase de montée en température du moteur, le traitement des NOx sur un moteur Diesel est peu efficace du fait des températures trop faibles au niveau de l'échappement, phénomène auquel n'est pas soumis l'autocar GNV.

L'ADEME souligne que des solutions existent pour réduire l'impact de cette phase de montée en température, tant au niveau des constructeurs d'autocar qu'au niveau des opérateurs des véhicules

Pollution globale

Pour la première étude, si on regarde uniquement la phase d'utilisation du véhicule (du réservoir à la roue), les valeurs d'émissions de CO₂ sont proches pour l'autocar GNC et l'autocar diesel. Sur cycle urbain, elles sont respectivement de 83,2 et 82,6 kgCO₂/100km. Des consommations moyennes de 30,8 l/100km et 30,3 kg/100km ont été relevées respectivement pour l'autocar diesel et GNC en cycle urbain.

La deuxième étude a relevé des consommations moyennes pour le gazole et le GNC de respectivement 45,2 l/100km et 42,5 kg/100km en cycle urbain. En termes d'émissions de CO₂ du réservoir à la roue, l'expérimentation indique une réduction de 3,7 % en faveur du GNC.

Enfin, les relevés du VTT montrent un léger gain de l'ordre de 4,5 % sur les émissions de CO₂ du réservoir à la roue.

Autres impacts

La diminution des nuisances sonores perçues est de l'ordre de 50 % par rapport au diesel

Suppression des fumées (nuisance visuelle) et des odeurs (nuisance olfactive).

6.6. Synthèse

La filière GNC est déjà active sur plusieurs réseaux de transport en commun urbain. L'usage du GNC permet de réduire les émissions locales (les émissions de GES sont quasi identiques avec celles d'un véhicule diesel).

Néanmoins, les coûts d'accès à la filière restent très élevés (avec une flotte de 50 bus diesel, 6 à 7 ans sont nécessaires pour atteindre un retour sur investissement, après construction de la station et renouvellement du parc). Une étude de faisabilité et d'implantation est obligatoire avant toute prise de décision.

Les possibilités de mutualisation de la station (autres types de services de la collectivité, ouverture à d'autres professionnels, ouverture public/privé, ...) doivent être regardées de prêt afin de rendre la filière encore plus compétitive.

A noter que l'utilisation d'une flotte au GNC permet d'envisager le basculement partiel ou complet sur du bioGNC sans modification de la flotte et avec un impact limité sur la station (raccordement et pompes supplémentaires si mix GNC/bioGNC).

Technique	Environnemental	Economique
+ Avitaillement rapide possible : 5 à 10 minutes	+ Réduction des émissions d'oxydes d'azote	+ Coût du carburant au km inférieur à un véhicule diesel Euro VI
+ Fiabilité équivalente aux véhicules diésel	+ Division par deux des nuisances sonores	- Surcoût du véhicule à l'achat
- Nécessité d'une formation spécifique pour le personnel de conduite et de maintenance	Emissions de GES légèrement inférieures du réservoir à la roue. L'incorporation à terme de bioGNC permettra de réduire considérablement les émissions de GES du puits à la roue.	- Coûts élevés de la station d'avitaillement
- Temps de rechargement important pour un avitaillement à la place		- Coûts de sécurisation de l'atelier de ses équipements et de l'outillage de maintenance
- Rédaction de procédures de sécurité		- Coûts de maintenance plus élevés que sur un véhicule diesel Euro VI



7. Filière biogaz

7.1. Présentation / caractéristiques

Le biogaz est produit à partir de déchets organiques issus de l'industrie agro-alimentaire, d'ordures ménagères et de boues de station d'épuration. Le biogaz est composé d'environ 50 % de méthane (contre plus de 90 % pour le GNV) et de 50 % de dioxyde de carbone et d'éléments indésirables (sulfure d'hydrogène, azote, siloxanes...). Après une épuration poussée, le biogaz devient du biométhane. Ce gaz d'origine renouvelable possède les mêmes propriétés que le gaz naturel et peut donc être injecté directement (depuis 2011) dans le réseau de distribution. Utilisé en tant que carburant à la pompe, il est appelé bioGNV.

A l'horizon 2020, un procédé, actuellement au stade de la démonstration préindustrielle, pourrait permettre d'obtenir du biométhane à partir de biomasse (bois, paille...) par un procédé thermochimique (la gazéification) suivi d'un procédé de méthanisation (conversion catalytique de l'hydrogène et du monoxyde de carbone en méthane). A l'horizon 2030 le biométhane pourrait également être produit grâce à des micro-algues par dégradation biologique.

Le bioGNV peut être produit localement alors que le GNV est le plus souvent importé. Ces deux carburants chimiquement identiques sont totalement miscibles entre eux. L'utilisation du bioGNV ne nécessite donc aucune adaptation, ni des véhicules fonctionnant au GNV ni des infrastructures de distribution, et permet de valoriser les déchets organiques des habitants d'une collectivité.

Dans le cas d'utilisation du biogaz en phase gazeuse compressée, on parle de bioGNC, et de bioGNL en phase liquéfiée.

7.2. Cadre réglementaire et fiscal

7.2.1. Réglementation

La réglementation applicable au biogaz (pour les véhicules, leur exploitation et les infrastructures de compression/distribution) est la même que celle applicable pour le GNC.

Des différences sont à noter au niveau de la production du biogaz et de son injection dans le réseau mais cela ne concerne pas la partie exploitation d'une flotte de bus roulant au biogaz.

Par ailleurs, les véhicules BioGNV sont catégorisés dans le groupe 1 des types d'autobus à faibles émissions du décret n°2017-23 du 11 janvier 2017.

7.2.2. Fiscalité

La fiscalité applicable au biogaz est la même que celle applicable pour le gaz dans le cas d'un usage carburant (cf. filière GNC).

7.3. Maturité de la filière

7.3.1. Disponibilité des véhicules

Se reporter à la partie 6.3.1.

7.3.2. Conditions d'avitaillement et d'implantation des infrastructures

Se reporter à la partie 6.3.2.

7.3.3. Exploitation

Se reporter à la partie 6.3.3.

7.3.4. Maintenance

Les véhicules fonctionnant au biogaz sont les mêmes que ceux fonctionnant au GNC (dans le cas de bioGNC) ou que ceux fonctionnant au GNL (dans le cas de bioGNL), seule l'origine du gaz change.

Les conditions d'avitaillement, d'exploitation et de maintenance sont également les mêmes que celles prévalant pour les véhicules fonctionnant au GNV (se reporter à la partie 6.3.4).

On peut néanmoins mettre en avant comme différence avec le GNV les synergies possibles entre les compétences collecte et traitement d'une intercommunalité, lorsqu'une unité de méthanisation de déchets existe, et la compétence mobilité, pour alimenter avec son propre biogaz sa flotte de bus.

7.4. Données économiques

Les coûts sont identiques à ceux d'un autobus alimenté au GNV (en faisant l'hypothèse que le bioGNV est injecté dans le réseau de gaz naturel), hormis le coût du carburant lui-même (surcoût observé de l'ordre de 20 % du bioGNV par rapport au GNV).

En outre, si on considère une station de bioGNV alimentée directement par une unité de méthanisation, sans passer par le réseau de gaz naturel, le prix du carburant peut être plus élevé car il ne bénéficie pas du tarif d'achat du biométhane (jusqu'à 25 % constaté).

Concernant la phase de production du bioGNV, comme ordre de grandeur, GRDF indique que les déchets¹² produits par 7 000 habitants permettent de produire l'équivalent en carburant -biométhane- de la consommation d'un autobus pendant un an.

7.5. Impacts environnementaux

	Oxydes d'azote (NOx)	Particules (PM)	Gaz à effet de serre (GES)
BioGNC	-20 à -40 %	Aucun rejet mesurable par un PEMS* (également vrai pour la filière gazole EURO VI)	-75 % par rapport à la filière GNV du puits à la roue

* PEMS = Portable emissions measurement system

Autant les valeurs d'émissions de polluants atmosphériques sont identiques entre le GNC et sa version bioGNC, autant la réduction des émissions de GES ne sont pas extrapolables de l'un à l'autre. En effet, l'incorporation de bioGNC dans le GNC permet de diminuer considérablement les émissions globales de gaz à effet de serre du puits à la roue (le CO₂ libéré correspond au CO₂ absorbé par les végétaux méthanisés).

L'ADEME et GRDF communiquent actuellement sur une diminution des émissions de CO₂ de 75 % de la filière BioGNV par rapport à la filière GNV du puits à la roue.

¹² Un habitant produit chaque année environ 65 kg de déchets méthanisables, ce qui permet de produire 4 kg de bioGNV.



7.6. Synthèse

Identiquement à la filière GNC, les coûts d'accès à la filière bioGNC restent très élevés, mais le bioGNC permet de réduire considérablement les émissions de GES (en plus de la réduction des émissions de polluants atmosphériques).

Le développement de cette filière est conditionné à la montée en puissance des capacités d'injection de biométhane dans les réseaux de gaz naturel. Malgré un gisement considérable (quasi doublement annuel de la capacité d'injection et plus que doublement annuel des quantités injectées sur ces dernières années), la dynamique de la filière est encore trop faible pour atteindre l'objectif national de 10 % de gaz renouvelable consommé en France, quel que soit son usage (l'étude prospective de l'ADEME « Vision 2030-2050 » indique qu'aucun décollage significatif n'est envisagé à l'horizon 2030 sur le secteur du transport de passagers). De nombreux projets ont été identifiés mais leur concrétisation se heurte souvent à des difficultés à obtenir les financements nécessaires, notamment du fait de leur faible rentabilité lorsque l'on n'intègre pas les subventions.

Concernant le bioGNL, sur toute la France, un seul projet pilote industriel en Ile-de-France existe (BioGNVAL).

Technique	Environnemental	Economique
+ Avitaillement rapide possible : 5 à 10 minutes	+ Réduction des émissions d'oxydes d'azote	+ Coût du carburant au km inférieur à un véhicule diesel Euro VI
+ Fiabilité équivalente aux véhicules diésel	+ Division par deux des nuisances sonores	- Surcoût du véhicule à l'achat
- Nécessité d'une formation spécifique pour le personnel de conduite et de maintenance	+ Réduction importante des émissions de GES du puits à la roue	- Coûts élevés de la station d'avitaillement
- Temps de rechargement important pour un avitaillement à la place	+ Baisse de la dépendance énergétique du territoire	- Coûts de sécurisation de l'atelier de ses équipements et de l'outillage de maintenance
- Rédaction de procédures de sécurité		- Coûts de maintenance plus élevés que sur un véhicule diesel Euro VI

8. Filière GNL

8.1. Présentation / caractéristiques

Le Gaz Naturel Liquéfié (GNL) constitue l'une des deux formes de GNV.

Le GNL est un gaz naturel converti en liquide par une opération de refroidissement à -161°C. Il prend la forme d'un liquide clair, transparent, inodore, non corrosif et non toxique.

Sa densité énergétique est 2,8 fois plus importante que celle du GNC, ce qui signifie une augmentation de l'autonomie du véhicule tout en réduisant le volume de carburant embarqué (une plus grande quantité peut être transportée sur une plus longue distance)¹³.

Le GNL est stocké à bord du véhicule dans des réservoirs cryogéniques (basse température) complexes à doubles épaisseurs, le vide étant réalisé entre les deux parois pour améliorer l'isolation thermique.

Comme pour le GNC, le véhicule doit être adapté et équipé d'un moteur à allumage commandé et d'un dispositif de stockage de carburant spécifique. Comme on ne peut odoriser le GNL en raison de sa température peu élevée (comme avec le thiolane qui donne son odeur caractéristique au gaz naturel), le véhicule doit donc être muni d'un détecteur de méthane.

A noter que plusieurs constructeurs européens se penchent actuellement sur le développement d'un système d'injection combiné GNL et gazole dit « dual-fuel HPDI » pour brûler le GNL avec l'efficacité d'un moteur diesel (grâce à une pompe cryogénique à haute-pression à l'intérieur du réservoir). Le process de combustion du GNL est initié par une petite quantité de gazole (5 % en moyenne¹⁴).

8.2. Cadre réglementaire et fiscal

8.2.1. Réglementation

Les installations de remplissage ou de distribution de gaz inflammables liquéfiés relèvent de la rubrique n°1414-3 de la nomenclature des ICPE (arrêté du 30 août 2010, modifié par l'arrêté du 1^{er} juillet 2013) et sont soumises à un système déclaratif. La rubrique concerne particulièrement les installations de remplissage de réservoirs alimentant des moteurs ou autres appareils d'utilisation comportant des organes de sécurité (jauge et soupape).

Règles d'implantation :

- Appareil de distribution privé :
 - o Distance entre le réservoir aérien de gaz inflammable liquéfié et les bouches de remplissage de 4 à 6 mètres sous conditions
 - o Parois de l'appareil séparées des limites de propriété et des voies de communication publiques d'une distance minimale de 15 mètres
 - o Séparé du réservoir par un écran composé de matériaux de classe A1 ou A2
 - o Situé sur un îlot dédié aux gaz inflammable liquéfié
 - o Associé à une seule aire de remplissage
- Intégration dans le paysage
- Habitations interdites au-dessus des installations
- Aménagement de l'aire de remplissage : pour chaque appareil de distribution une aire de remplissage est matérialisée sur le sol. Deux aires de remplissage associées à la distribution de gaz inflammable liquéfié sont distantes d'au moins 1 mètre.
- Construction des appareils de distribution :

¹³ Stocké sous forme liquide, le gaz naturel occupe 600 fois moins de volume qu'à l'état gazeux (non compressé). Par exemple dans un volume de 495 litres on peut stocker 205 kg de GNL

¹⁴ Tests sur des camions uniquement pour l'instant. Des systèmes bi-carburation classiques diesel/GNV « dual-fuel » ont déjà été montés en rétrofit sur des bus en Argentine, Chine, Croatie, Egypte, ...



- Les socles des appareils de distribution sont ancrés et situés sur un îlot d'au moins 0,15 mètres de hauteur
- Chacune des extrémités de l'îlot est équipée d'un moyen de protection contre les heurts des véhicules

Par ailleurs, les véhicules GNL sont catégorisés dans le groupe 2 des types d'autobus à faibles émissions du décret n°2017-23 du 11 janvier 2017.

8.2.2. Fiscalité

Le GNL est soumis depuis 2011 à la Taxe Intérieure sur la Consommation des Produits Energétiques (TICPE) – Code des douanes art 265 – indice 36. 2017 = 5,80 €/100m³. Des incitations fiscales ont été mises en œuvre : l'exonération de la Taxe Intérieure de Consommation sur le Gaz Naturel (TICGN), la prolongation de deux ans par la loi de finances pour 2018, jusqu'au 31 décembre 2021, du suramortissement de 60 % prévu pour l'achat d'un véhicule de 3,5 à 16 t roulant au GNL, et de 40 % prévu pour l'achat d'un véhicule de plus de 16 t roulant au GNL et pour les cartes grises : possibilité pour les Conseils régionaux d'exonérer partiellement ou totalement du paiement de la taxe selon un fonctionnement intégral ou non au GNV.

La TVA pétrole n'est pas applicable au GNL – Art L 298 Code général des douanes. Cependant la TVA de droit commun est applicable.

Le GNL relève de l'usage combustible - Circulaire du 29 avril 2014 relative à la TICGN publiée au BOD n°7022 – et carburant.

8.3. Maturité de la filière

8.3.1. Disponibilité des véhicules

Malgré une utilisation croissante dans le secteur du transport de marchandises (du fait de la grande autonomie, ~1 000 km, que le GNL confère), le GNL est encore en cours de développement pour les véhicules de transport en commun. Ce développement concerne plus spécifiquement les autocars, qui ont besoin davantage d'autonomie que les autobus.

On peut néanmoins citer l'autocar Interlink GNL de Scania présenté en septembre 2018 et surtout le Citymood 12 LNG de Industria Italiana Autobus dont 31 modèles (basés sur le Citymood 12 CNG) devraient être déployés à l'été 2020 en Emilie-Romagne en Italie (Bologne et Ferrare).

Des Solbus Solcity 12 LNG (ainsi que des 18 LNG) auraient dû équiper le réseau polonais de Cracovie. Un incendie sur un bus lors d'un test sur route en 2010 a fait annuler le contrat.

Pour le moment aucun contrat n'a été passé pour l'exploitation de tout ou partie d'un réseau de lignes urbaines au GNL en France.

8.3.2. Conditions d'avitaillage et d'implantation des infrastructures

Les stations de ravitaillement en GNL dépendent de la livraison de carburant par des camions-citernes, comme pour les autres carburants liquides. Comme le GNL doit être stocké à -161 °C pour demeurer liquide, il est livré et stocké dans un réservoir cryogénique isolé en station (une ou plusieurs citernes), d'où il est pompé pour ensuite être distribué (une ou plusieurs pompes) de la même façon que les autres carburants liquides.

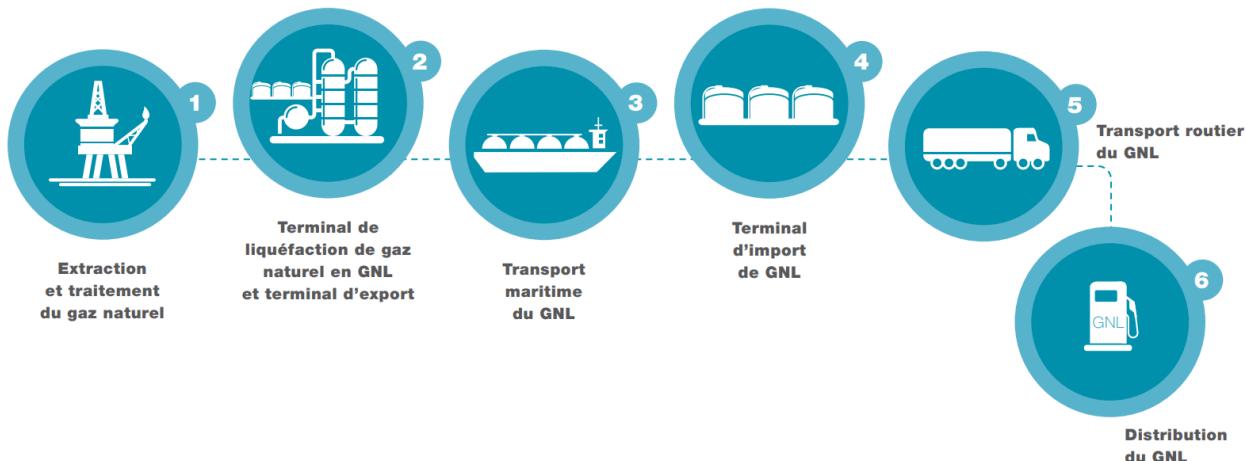


Figure 36 : Schéma de fabrication et de distribution du GNL © Total

Pour faire le plein, il faut s'équiper d'un écran facial (pour le visage), de gants contre les brûlures froides, et de vêtements à manches longues.

8.3.3. Exploitation

L'utilisation de la technologie GNL permet d'accroître l'autonomie des véhicules grâce à sa densité énergétique supérieure par rapport au GNC (nécessite moins de volume embarqué pour une autonomie similaire). Cependant, la consommation de carburant est impactée par le phénomène de « boil-off » (le GNL doit être utilisé dans un certain laps de temps, sans quoi il se réchauffe et retourne à l'état gazeux).

Le plein est effectué en moins de 10 minutes.

L'utilisation de cette technologie nécessite une formation spécifique pour le remplissage et de prendre des précautions particulières pour le remisage des véhicules (pas de confinement).

8.3.4. Maintenance

En plus des contraintes propres à un véhicule gaz (se reporter à la partie 6.3.4), la partie cryogénique demandera une maintenance spécifique.

8.4. Données économiques

On peut considérer que le surcoût à l'achat par rapport à un bus diesel sera de l'ordre de 30 à 40 % en raison des réservoirs cryogéniques (sur la base des surcoûts constatés sur les camions).

De la même façon, en se basant sur les coûts d'investissements des stations publiques GNC et GNLC, on peut estimer le coût d'une station GNLC non raccordée au réseau supérieur d'environ 20 % à celui d'une station GNC raccordée au réseau.

Le coût de maintenance sera a priori supérieur à celui d'un véhicule fonctionnant au GNC à cause de toute la partie cryogénique spécifique.



8.5. Impacts environnementaux

	Oxydes d'azote (NOx)	Particules (PM)	Gaz à effet de serre (GES)
GNL	-20 à -40 %	Aucun rejet mesurable par un PEMS* (également vrai pour la filière gazole EURO VI)	Jusqu'à -4,5 % du réservoir à la roue et aucun gain du puits à la roue

* PEMS = Portable emissions measurement system

Les émissions de polluants atmosphériques sont identiques entre le GNC et le GNL ainsi que les émissions de GES à l'échappement. Si par contre on prend en compte les émissions du puits au réservoir, ces dernières sont 59 % plus élevées pour le GNL que pour le GNC (source NGVA, mi-2017, pour des semi-remorques), ce qui donne un surplus d'émissions de GES de 11 % du puits à la roue.

En outre, des pertes de carburant par évaporation (perte en poids d'environ 1 % par jour lorsque le véhicule n'est pas utilisé) peuvent venir pénaliser le bilan gaz à effet de serre.

8.6. Synthèse

Autant la filière GNL est intéressante sur des applications nécessitant beaucoup d'autonomie ou de puissance, autant sa pertinence sur des applications urbaines ne va pas de soi.

En outre, l'aspect cryogénique vient complexifier la maintenance.

Enfin, l'offre de bus urbains GNL est (quasi) inexistante et la demande actuelle, inexistante en France et (quasi) dans le reste du monde, ne semble ainsi pas en mesure de dynamiser la filière.

A plus long terme, comme pour le GNC, le bioGNL pourrait être là aussi une alternative intéressante, quand les conditions seront réunies pour légitimer son existence.

Technique	Environnemental	Economique
+ Avitaillement rapide <10 minutes	+ Réduction des émissions d'oxydes d'azote	+ Coût du carburant au km inférieur à un véhicule diesel Euro VI
+ Autonomie doublée par rapport au GNC	+ Division par deux des nuisances sonores	- Surcoût du véhicule à l'achat
Station de remplissage spécifique non connectée au réseau de gaz	- Dégazage en cas d'absence d'utilisation générant des émissions de méthane	- Coûts élevés de la station d'avitaillement
- Pas de véhicules commercialisés	- Aucun gain sur les émissions de GES du puits à la roue	- Coûts de maintenance plus élevés que sur un véhicule diesel Euro VI
- Descente et maintien de la température du GNL à - 161°C pour le conserver à l'état liquide		
- Nécessité d'une formation spécifique pour le remplissage du réservoir		

La filière électrique

Filière hybride

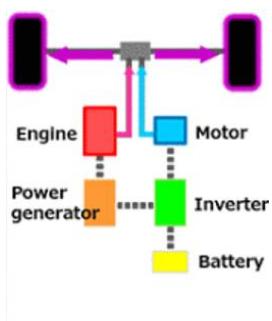
Filière hybride rechargeable

Filière tout électrique

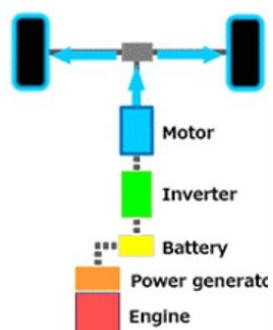
Les bus hybrides, qui combinent deux sources d'énergie, l'une thermique, l'autre électrique ou hydraulique, permettent de récupérer et d'emmageriser l'énergie au freinage normalement dissipée sous forme de friction et de chaleur. Une motorisation hybride a ainsi pour but de valoriser et d'optimiser au maximum la gestion de l'énergie.

Le véhicule hybride rechargeable combine également deux systèmes de motorisation, électrique et thermique. Par contre, c'est uniquement le moteur électrique qui tracte le véhicule. La motorisation thermique est utilisée en tant que prolongateur d'autonomie, en entraînant une génératrice, ce qui permet d'augmenter l'autonomie de la batterie.

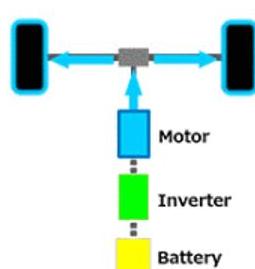
Dans le cas du véhicule électrique, il n'existe qu'une motorisation électrique, alimenté par des batteries, qui sert à propulser le véhicule.



Technologie hybride
(conventionnel)



Technologie hybride rechargeable
(prolongateur d'autonomie)



Technologie tout électrique

Figure 37 : Les 3 technologies de la filière électrique



9. Filière hybride

9.1. Présentation / caractéristiques

Le système hybride consiste à combiner deux sources d'énergie dont l'une thermique :

- Diesel/électrique : association d'un moteur thermique et d'un groupe électrique moteur générateur, l'énergie étant emmagasinée dans des batteries ou des « super-capacités » qui fonctionnent en continu. Le moteur thermique se déclenche en soutien lors des phases d'accélération. La batterie se recharge automatiquement pendant les phases de décélération et de freinage grâce à l'énergie cinétique ou à l'aide du moteur thermique couplé au moteur électrique qui peut servir de générateur.
- Ethanol/électrique : remplacement du moteur fonctionnant au gazole par un moteur fonctionnant à l'éthanol (développé par Scania)
- GNC/électrique : l'autobus VanHool Exqui City 24 HYB GNV est un BHNS GNV/électrique. Le véhicule est équipé d'un moteur thermique fonctionnant au GNV et de 2 moteurs de traction électrique
- Thermique/hydraulique : une hybridation hydraulique permet d'associer un moteur thermique avec un système pompe-moteur-accumulateur. Cette technologie n'est pas encore développée sur les autobus en série même si des expérimentations ont déjà eu lieu.
- Electrique/hydraulique/diesel : technologie développée par Safra à travers le Businova ; le système de motorisation est équipé de 2 chaînes de traction (électrique et hydraulique) couplées à un prolongateur d'autonomie thermique de faible cylindrée (cf. § 9.7.2)

La motorisation hybride la plus répandue est l'hybridation diesel/électrique. Seule cette technologie hybride électrique sera donc développée ci-après. Un focus sur l'hybridation thermique/hydraulique est néanmoins présenté à la fin de cette fiche filière.

L'hybridation permet de réduire la taille, la cylindrée (d'environ 30 % en passant d'environ 9 l à 5-7 l en moyenne selon les constructeurs) et la puissance des moteurs thermiques, ce qui génère la réduction de la consommation de carburant, mais aussi du niveau sonore intérieur et extérieur et enfin des vibrations

On distingue 2 types de technologies :

- Les hybrides séries :
 - o Le véhicule possède une transmission électrique alimentée par un groupe électrogène (moteur thermique) et des batteries ou des supercondensateurs.
 - o Il y a récupération de l'énergie produite durant le freinage. Cette dernière est alors absorbée et stockée dans des batteries ou des supercondensateurs qui peuvent la restituer.
 - o Le moteur thermique se coupe automatiquement à l'arrêt (fonction stop & start).
 - o Le moteur thermique est utilisé lorsqu'il n'y a plus d'énergie électrique.
 - o La suppression de la chaîne cinématique classique permet d'envisager des changements pour optimiser les fonctionnalités des véhicules (accès, flux de passagers, confort, ...).

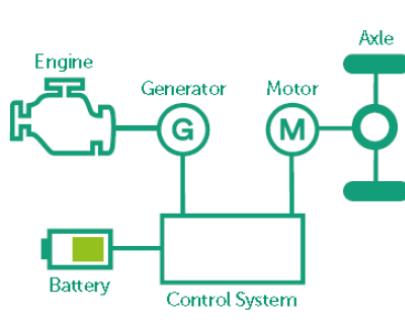


Figure 38 : Architecture chaîne de traction hybride série

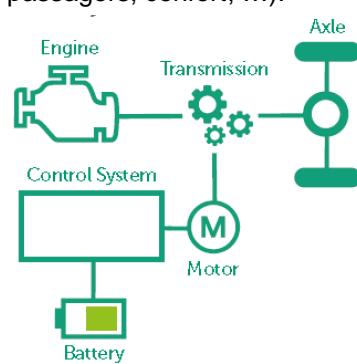


Figure 39 : Architecture chaîne de traction hybride parallèle

- Les hybrides parallèles :
 - o Les moteurs thermique et électrique sont situés sur le même axe, ce qui permet au premier d'assister le deuxième lors des phases d'accélération. L'énergie est récupérée en phase de décélération ou freinage.
 - o La boîte de vitesses est remplacée par un modèle intégrant un moteur électrique réversible.
 - o Le moteur thermique se déclenche vers 20 km/h.
 - o La puissance est fournie aux roues grâce aux 2 moteurs avec des options de répartition.
 - o La conception est moins coûteuse.
 - o Cela permet le fonctionnement du véhicule en mode dégradé si une panne du système électrique survient.

Pour conserver le plancher bas, les équipements de stockage de l'énergie sont généralement installés en toiture.



Figure 40 : Composants d'un autobus hybride © AVEM

9.2. Cadre réglementaire et fiscal

9.2.1. Réglementation

Les véhicules hybrides répondent aux spécifications des normes Euro. Ils sont conçus pour fonctionner avec du gazole standard répondant à la norme EN 590.

Par ailleurs, ces véhicules sont catégorisés dans le groupe 2 des types d'autobus à faibles émissions du décret n°2017-23 du 11 janvier 2017.

9.2.2. Fiscalité

La fiscalité est identique à celle des véhicules diesel sur le plan du carburant.



9.3. Maturité de la filière

9.3.1. Disponibilité des véhicules

Les premiers bus hybrides ont circulé en France dès 2009 dans le cadre d'expérimentations. L'année 2013 marque un tournant dans le développement de cette filière avec la mise en service d'un parc important (plusieurs dizaines de bus) à Dijon et Bordeaux.

Il existe actuellement une offre abondante pour les autobus : les constructeurs proposent désormais des véhicules hybrides de différents gabarits (standard et articulé) dans leurs catalogues.

A ce jour, seul Volvo et Solaris privilégient l'hybride parallèle, alors qu'Irisbus, Heuliez, MAN, Mercedes et Van Hool développent une hybridation série.

9.3.2. Conditions d'avitaillage et d'implantation des infrastructures

L'hybride classique diesel/électrique utilisant du gazole, aucune modification par rapport au carburant n'est à prévoir.

Aucune infrastructure spécifique n'est nécessaire. Cependant, le gabarit des véhicules hybrides est souvent plus haut que celui des véhicules diesel : il est donc nécessaire de s'assurer que la hauteur des accès des bâtiments est compatible avec celle des véhicules.

9.3.3. Exploitation

La capacité et l'autonomie des véhicules sont identiques à celles d'un véhicule diesel de la même catégorie. Grâce au principe de récupération d'énergie -lors des phases de décélération- la consommation des véhicules hybrides est moindre (environ 10 à 20 %) que celle d'un véhicule diesel selon l'utilisation.

Une formation pour les conducteurs est nécessaire pour optimiser la récupération d'énergie pendant les phases de décélération (2 heures par conducteur).

Les procédures de prise et de fin de service appliquées aux véhicules diesel sont transposables aux véhicules hybrides.

Le ressenti des conducteurs sur la conduite est excellent. Le comportement du véhicule est jugé identique aux bus diesel. Le confort de conduite est jugé meilleur : souplesse et réactivité de la motorisation, simplicité d'utilisation (même si un léger travail d'apprentissage est nécessaire pour utiliser au mieux la récupération d'énergie de freinage et bien doser la décélération), absence d'à-coups de la boîte de vitesse, réduction du bruit, accélérations et ralentissements sont plus doux qu'avec un système de freins conventionnel.

En phase d'exploitation commerciale, aucune contrainte spécifique n'est à mentionner.

9.3.4. Maintenance

Les équipements électriques sont installés sur le toit des bus. L'utilisation de bus hybrides nécessite donc l'aménagement des ateliers de maintenance pour le travail en hauteur.

Les bus diesels hybrides-série seraient moins affectés de pannes que les bus diesels classiques du fait du lissage des charges, du régime constant, de la simplification à l'extrême de la transmission. Au contraire l'hybride parallèle est affecté du cumul des défauts des deux systèmes et d'une complexité supplémentaire due au couplage/découplage dynamique du moteur thermique sur la propulsion en fonction de la charge et de la vitesse.

En revanche, en cas de panne, ces dernières sont souvent de nature immobilisante, la technologie hybride étant plus complexe que son homologue diesel.



Le personnel de maintenance doit être formé à la technologie électrique :

- Formation réglementaire pour intervenir sur les composants électriques sous tension : 2 à 3 jours
- Formation spécifique liée à la technologie des véhicules électriques : 1 semaine minimum par mécanicien.

Par ailleurs, différents types d'équipements de maintenance sont impératifs :

- Une passerelle mobile pour travailler en hauteur
- Un chariot élévateur ou une potence
- Un outillage spécifique pour intervenir sur des composants électriques.

9.4. Données économiques

Le coût d'acquisition d'un véhicule hybride est plus élevé qu'un véhicule diesel en raison de sa double motorisation (~+40 % par rapport à un diesel Euro VI).

A priori le coût supplémentaire lié à la formation des conducteurs est compensé par une diminution de la consommation comprise entre 10 et 20 %.

Le CGDD, dans son rapport d'octobre 2018, indique un coût d'entretien moyen de 25 c€/km, supérieur à celui d'un véhicule diesel, à cause de sa double motorisation et de l'usure importante des trains de pneus sur l'essieu moteur en phases d'accélération et de décélération. Cependant deux autres types d'éléments (non quantifiés) peuvent venir modifier cette valeur :

- Un possible surcoût de maintenance lié aux batteries
- Des coûts globaux de maintenance globalement inférieurs à ceux d'un véhicule diesel grâce à une meilleure utilisation du moteur thermique, une absence de certaines pièces dont l'usure entraîne des coûts (embrayage, démarreur, alternateur, courroie), la chaîne de distribution qui ne nécessite pas de remplacement et la réduction de l'usure des plaquettes du fait du freinage régénératif

9.5. Impacts environnementaux

	Oxydes d'azote (NOx)	Particules (PM)	Gaz à effet de serre (GES)
Hybride	-30 % (fortement variable avec la vitesse commerciale)	Aucun rejet mesurable par un PEMS* (également vrai pour la filière gazole EURO VI)	-10 à -20 %

* PEMS = Portable emissions measurement system

Plusieurs expérimentations ont eu lieu sur des bus hybrides :

- Exp 1 : 1 Solaris Urbino 18 Euro V hybride parallèle articulé, en 2009 et sur 2 ans, sur le réseau de la Compagnie des Transports Strasbourgeois, avec comparaison à 9 bus articulés de même millésime. Mesures embarquées réalisées par le CRMT, avec un véhicule lesté à 4t et sans utilisation de la climatisation, pour les émissions de polluants et mesures de la consommation réalisées par la CTS. Ligne urbaine de 16 km avec 49 arrêts et une vitesse commerciale moyenne de 14,5 km/h
- Exp 2 : 3 Solaris Urbino 12 EEV (SCR/EGR sans FAP) hybride parallèle, en 2010, sur le réseau de Coulommiers. Mesures des émissions polluantes et de la consommation sur l'un des 3 véhicules sur le banc à rouleau de l'UTAC (cycle ADEME/RATP et cycle Japon JE05) à la demi-charge utile du bus (14,6t) et relevé des consommations en exploitation par Transdev/Coulommiers. Ligne urbaine de 16 km avec 35 arrêts, une vitesse commerciale moyenne de 15,5 km/h, un taux de remplissage moyen de 30 % et une pente moyenne de 4 %
- Exp 3 : 1 Heuliez Bus GX 427 HYB 18m EEV hybride série, en 2010, sur le réseau de transport urbain Vitalis du Grand Poitiers. Mesures embarquées réalisées par le CRMT, avec un véhicule lesté à 4t. Trajet aller-retour effectué en ~2,3h, pour une distance parcourue de 44 km, soit une vitesse moyenne de l'ordre de 20 km/h
- Exp 4 : 6 bus hybrides neufs EEV (3 marques -Iveco Citelis série, Man City série, Volvo 7900 parallèle- avec 2 bus par marque), en 2013 sur 1 an, pour le Syndicat mixte des transports pour le Rhône et



l'agglomération lyonnaise (SYTRAL), avec comparaison à 2 bus diesel neufs EEV de référence. 4 lignes différentes testées avec rotation de ligne tous les 15 jours

		Exp 1 18m Euro V, parallèle	Exp 2 12 m EEV, parallèle	Exp 3 18m EEV série	Exp 4 12m EEV série et parallèle
Mesures embarquées	NOx	-30 %	13,3 g/km	En augmentation +28 % à l'aller +6 % au retour Trajet retour complètement à chaud, et avec une plus grande sollicitation moteur (dénivelé positif)	-33 % (variable avec la vitesse moyenne commerciale, le gain pouvant même être nul dans certains cas)
	HC		0,009 g/km (ADEME/RATP) 0,005 g/km (JE05)	-50 à -70 %	
	CO		1,73 g/km (ADEME/RATP) 0,44 g/km(JE05)	Ecart non significatif	
	PM		0,13 g/km (ADEME/RATP) 0,05 g/km (JE05)		
	CO ₂	-15 %	-24 % cycle ADEME/RATP -35 % sur cycle JE05 (impact de la vitesse moyenne supérieure testée 27,3 km/h vs 10,8 km/h)	-16 %	
Relevé des consommations en conditions d'exploitation		Avec Webasto : -11,5 % 54,5 L/100km Hors Webasto : -15,9 % 52,2 L/100km	-15 % 34,3 L/100km		-26 % (variable avec la vitesse moyenne commerciale)

Les pourcentages indiquent le différentiel par rapport au bus diesel de référence alors que les valeurs absolues se rapportent directement au bus hybride testé.

Pollution locale

Une moindre utilisation de l'énergie mécanique lors des phases d'accélération réduit les émissions de polluants.

Pollution globale

Les émissions de gaz à effet de serre étant strictement proportionnelles à la consommation de carburants, tout litre de carburant non consommé engendre une réduction des émissions de GES. Le gain moyen calculé à partir des relevés de consommations en conditions d'exploitation est inférieur d'une dizaine de points au gain calculé par mesures embarquées.

Un comparatif bus hybride / bus diesel Euro VI montre également une baisse des émissions de 15 à 27 % selon le cycle Sort.

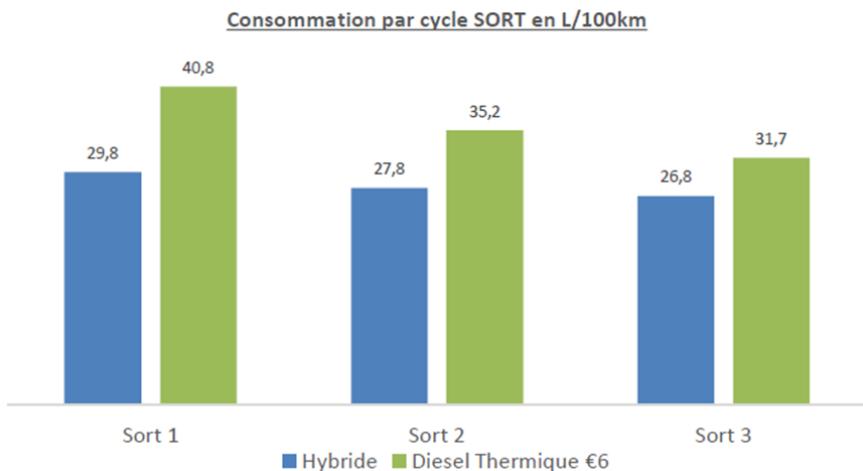


Figure 41 : Comparaison des consommations par cycle SORT Hybride / Euro VI - CATP 2017

La RATP a également relevé une baisse des émissions de CO₂ de -24 %, mais moyennant un travail d'optimisation du véhicule en lien avec le constructeur (rodage du véhicule, calibration des calculateurs, ...).

Autres impacts

On constate une réduction des nuisances sonores (à l'intérieur comme à l'extérieur) en particulier lors des phases de démarrage, et des vibrations.

Concernant la problématique liée à la fabrication des batteries des véhicules (et leur fin de vie), se reporter à la partie 11.5.

9.6. Synthèse

Cette technologie permet de réduire les émissions de CO₂ et les émissions de polluants atmosphériques.

Aucune infrastructure particulière n'est nécessaire, mais le véhicule, lui, est spécifique. Le problème est que les gains de consommation ne compensent pas les surcoûts d'achat et de maintenance.

Les performances des autobus hybrides ne sont pas différentes de celles des autobus diesel. Le bénéfice provient principalement d'une meilleure réactivité au démarrage, amorcé en mode électrique. L'autobus hybride n'a pas l'avantage d'une motorisation électrique classique et cumule la complexité de 2 systèmes de motorisation.

Les deux architectures hybrides, comparables à l'heure actuelle, risquent de se différencier dans les années à venir grâce aux progrès sur les systèmes électriques, qui donneront a priori un avantage à l'architecture hybride série (qui est une transition vers le tout électrique).

Technique	Environnemental	Economique
+ Récupération de l'énergie du freinage	+ Réduction des émissions d'oxydes d'azote	+ Réduction de la consommation de gazole
+ Agrément et confort de conduite	+ Réduction des émissions de GES	Travail d'apprentissage de la part des conducteurs
	+ Réduction des nuisances sonores	- Surcoût du véhicule à l'achat
		- Formation des agents de maintenance
		- Coûts de maintenance plus élevés que sur un véhicule diesel Euro VI



9.7. Focus sur l'hybridation thermique/hydraulique

9.7.1. Hybride hydraulique

Dans le cas de l'hybridation thermique/hydraulique, le moteur électrique du bus hybride diesel/électrique est remplacé par un moteur hydraulique et les batteries par des accumulateurs hydropneumatiques.

Aucune offre constructeur n'est actuellement disponible sur le marché. Bien que prometteuse sur d'autres segments de marché, elle n'a pas convaincu les constructeurs de bus urbains qui ont axé leur développement sur l'hybridation électrique.

On peut néanmoins citer une expérimentation sur un bus prototype articulé GNV/hydraulique, testé à Lille de 2010 à début 2013 (ligne de 7 km, 300 km/jour, soit 50 000 km parcourus). Iveco Bus et Transpole, l'exploitant du réseau de transport en commun sur le territoire de Lille Métropole Communauté Urbaine, ont choisi une motorisation GNV pour permettre une intégration simple et rapide du système d'hybridation hydraulique.

Les moteurs hydrauliques sont implantés dans chaque roue de l'essieu milieu. Afin de minimiser les longueurs de cheminement hydraulique, les accumulateurs hydropneumatiques et le bloc hydraulique multifonction ont été implantés au-dessus de l'essieu milieu côté gauche du véhicule. A noter que cette opération a entraîné la suppression de deux places assises dans le véhicule. L'ensemble du système d'hybridation hydraulique pèse 1 tonne à l'état prototype.

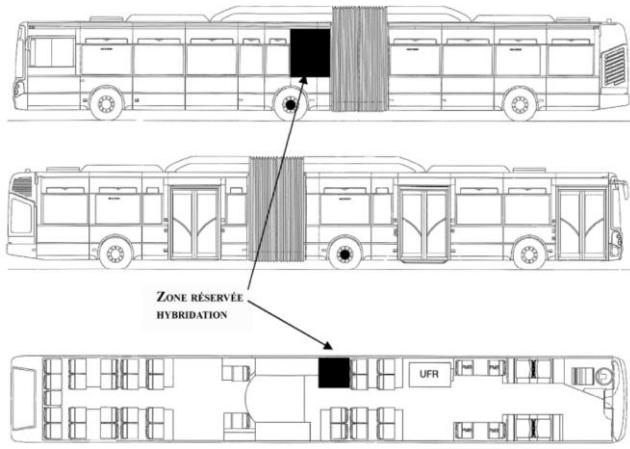


Figure 42 : Bus Iveco hybride GNV/hydraulique

Principe de fonctionnement (de 0 à 40 km/h) :

1. Récupération de l'énergie au freinage à la roue grâce au moteur hydraulique installé dans le moyeu
2. Stockage de l'énergie dans l'accumulateur hydraulique
3. Restitution de l'énergie à l'accélération directement à la roue

En exploitation, le gain moyen mesuré sur les consommations a été de 13 %, et a pu aller jusqu'à 18 % dans certaines conditions. Le système a réduit de 60 à 100 % les émissions de NOx en réduisant (voire en éliminant) les pics d'émissions à chaque accélération.

Le véhicule s'est avéré fiable (bien que dans un état prototype) et compatible avec les contraintes d'exploitation. Une optimisation du système (masses, efficacité) aurait pu permettre un gain supplémentaire estimé de 3 à 5 %. Enfin, l'utilisation d'un démarreur hydraulique pour réaliser une fonction Stop & Start aurait encore pu apporter un gain supplémentaire (environ 7 %).

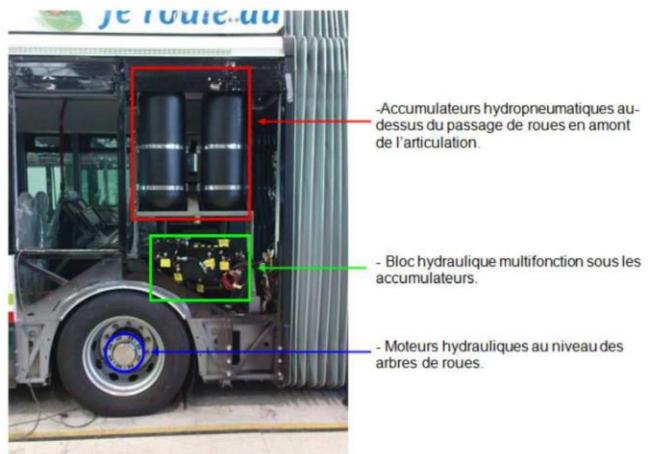


Figure 43 : Détail de la partie hydraulique

9.7.2. Hybride GNV

L'autobus VanHool Exqui City 24 HYB GNV est un BHNS GNC/électrique dont le système de motorisation permet de récupérer l'énergie au freinage.

Le véhicule de 24 m, à double articulation « Megabus » possède un poste de conduite séparé de l'habitacle passagers. Il est équipé d'un moteur thermique au gaz naturel, de 2 moteurs de traction électrique Siemens et de 5 réservoirs à gaz d'une capacité unitaire de 292 litres.

Le véhicule offre 47 places assises et 97 places debout, soit une capacité totale de près de 150 places.

La commune de Nîmes envisage de commander 16 de ces autobus dont les premiers devraient entrer en service fin 2019.



Figure 44 : Le VanHool Exqui City 24 HYB GNV © VanHool

Ces véhicules sont estimés à un prix unitaire de 998 000 euros.

9.7.3. Multi-hybride

La gamme Businova de Safra propose une version hybride électrique/hydraulique/thermique, en 3 dimensions : midibus S 9,5 m, midibus L 10,5 m et standard 12 m.

Il s'agit d'un véhicule hybride électrique rechargeable (un pack batterie de 132 kWh) assisté par une motorisation hydraulique et un prolongateur d'autonomie thermique (diesel ou GNV).

Les deux chaines de traction, électriques et hydrauliques, s'articulent autour d'une boîte de couplage qui transmet aux roues l'intégralité du couple utile à la propulsion. L'énergie électrique est ainsi utilisée dans les phases de croisière nécessitant un apport modéré et constant de puissance alors que le système hydraulique apporte toute sa force lors des phases de démarrage et freinage nécessitant de la puissance pour propulser et freiner le bus. L'avantage de la motorisation hydraulique est double : l'énergie cinétique récupérée au freinage est emmagasinée dans des accumulateurs pressurisés et est ensuite restituée au redémarrage en préservant les batteries Lithium-ion des forts appels de puissance. Enfin la motorisation thermique de faible cylindrée est utilisée en tant que prolongateur d'autonomie. Cette dernière entraîne directement une génératrice et permet d'augmenter l'autonomie.

Selon le modèle, le Businova est capable d'embarquer entre 60 et 100 passagers. Selon Safra, le système offre une autonomie totale de 200 km et permettrait de diviser par trois la consommation de carburant (15 L/100 km) et les émissions de CO₂ par rapport à un bus standard.



Figure 45 : Les 2 midibus L Businova déployés sur le réseau du Grand Périgueux © Philippe Greiller

Le coût de ces véhicules reste important : 916 000 euros pour les 2 midibus déployés par le Grand Périgueux.



10. Filière hybride rechargeable

10.1. Présentation / caractéristiques

Le Véhicule Hybride Rechargeable (VHR) combine deux systèmes de motorisation dont l'un est obligatoirement électrique. Le moteur électrique est alimenté par une batterie. Une motorisation thermique (diesel ou GNV) de faible cylindrée est utilisée en tant que prolongateur d'autonomie. Cette dernière entraîne directement une génératrice et permet d'augmenter l'autonomie.

Ainsi, par rapport à un bus hybride thermique/électrique classique, le moteur électrique est plus puissant, le système de stockage de l'énergie plus performant et il existe des équipements spécifiques pour le système de recharge.



Figure 46 : Autobus hybride rechargeable © Volvo

Avec la technologie hybride, la majeure partie de l'énergie cinétique du véhicule peut être récupérée lors des freinages ou dans les descentes.

Les systèmes de rechargement liés à la motorisation électrique (pantographe et induction) sont détaillés dans la filière tout électrique du présent document.

10.2. Cadre réglementaire et fiscal

10.2.1. Réglementation

Le véhicule hybride rechargeable répond à la même réglementation que son homologue hybride.

10.2.2. Fiscalité

La fiscalité est identique à celle des véhicules diesel sur le plan du carburant.

Depuis le 1^{er} janvier 2017, le tarif réduit sur la taxe de consommation finale de l'électricité (TICFE) fixe à 0,50 €/MWh s'étend aux bus électriques ou hybrides rechargeables (au lieu de 22,5 € /MWh avant cette date). Ce tarif réduit ne s'appliquait jusqu'ici qu'aux train, métro, tramway, câble et trolleybus.

10.3. Maturité de la filière

10.3.1. Disponibilité des véhicules

Peu de constructeurs proposent des véhicules hybrides rechargeables.

On peut citer Volvo et Iveco mais aussi Businova (avec 2 chaînes de traction, l'une électrique, l'autre hydraulique et un prolongateur d'autonomie qui peut soit être diesel soit GNV, cf. détail au §9.7.2).

10.3.2. Conditions d'avitaillage et d'implantation des infrastructures

Se reporter à la partie 11.3.2

10.3.3. Exploitation

Plusieurs expérimentations concluantes ont eu lieu en 2014 en Allemagne (Hambourg) et en Suède (Göteborg et Stockholm) puis dès 2017 en Belgique (Namur, ...). Les caractéristiques du Volvo 7900 hybride électrique lui permettent de rouler au moins 7 kilomètres sur son seul moteur électrique (ce qui peut représenter une part importante de l'itinéraire). Ensuite, c'est un bloc diesel à 4 cylindres en ligne et doté d'une rampe commune d'injection qui prend le relais. Le système de recharge permet de recharger automatiquement les batteries. Il est conçu pour s'intégrer aux arrêts d'autobus classiques et inclut une interface complète entre le réseau électrique et le véhicule. La recharge s'amorce automatiquement lorsque l'autobus est immobilisé dans la bonne position. Le conducteur n'a aucune manipulation à faire.

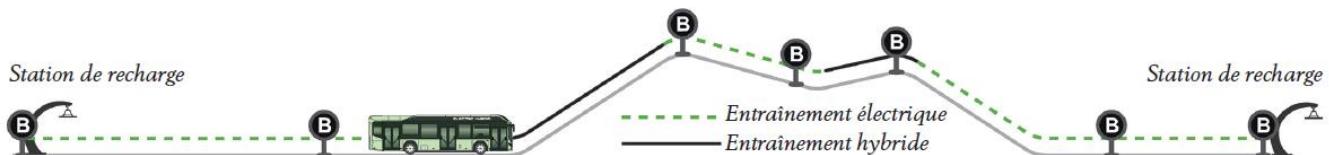


Figure 47 : Exemple de schéma d'exploitation d'un bus hybride rechargeable © Volvo

Des mesures d'optimisation sont nécessaires en cas d'encombrements routiers car à cause de la densité du trafic urbain, les bus peuvent ne pas recharger le temps requis et ainsi compenser par le mode thermique diesel (des mesures portées par les Autorités Organisatrices de la Mobilité -bande pour les bus, sites propres, feux intelligents... - peuvent permettre de résorber cet inconvénient).

10.3.4. Maintenance

La maintenance est similaire à celle réalisée sur le véhicule hybride ou électrique. Cependant, des spécificités existent. En effet, le système de fonctionnement du pantographe et les batteries doivent être contrôlées régulièrement dans la mesure où ces fonctions sont primordiales pour assurer l'exploitation du véhicule.

Les contacts de recharge sont reliés à l'autobus par le toit, une configuration optimale en termes de sécurité. Toutes les pièces mobiles sont intégrées dans la structure de la station de recharge, tandis que les contacts sur l'autobus sont des connecteurs fixes. Cela réduit le besoin en maintenance supplémentaire sur le véhicule et le poids de ce dernier, augmentant ainsi la capacité d'accueil.

10.4. Données économiques

Volvo indique un gain énergétique de 60 % par rapport à la référence diesel (moyenne annuelle pour un itinéraire européen de 10 km, une vitesse moyenne de 18 km/h et des temps de chargement de 6 minutes réalisé à chaque terminus).

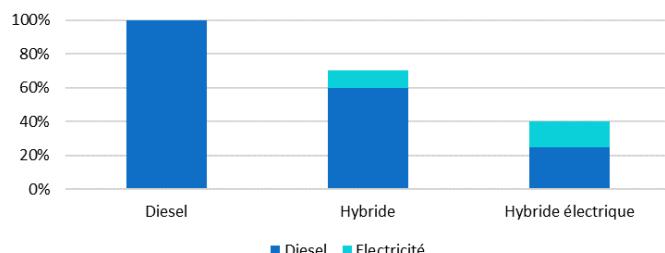


Figure 48 : Economies d'énergie selon le type de motorisation © Volvo



Ce gain est contrebalancé par le surcoût à l'achat du véhicule (~+40 k€ par rapport à un véhicule électrique -sans les batteries-), le prix des batteries (batteries Li-Ion de 19 kWh pour le Volvo 7900 hybride rechargeable contre 11 kWh pour un bus hybride classique standard¹⁵ -Urbanway, Citelis-) et le coût de l'infrastructure de recharge électrique (se reporter à la partie 11.4 pour plus de détails).

10.5. Impacts environnementaux

	Oxydes d'azotes	Particules (PM)	Gaz à effet de serre (GES)
Hybride rechargeable	Entre -30 et -100 %	Jusqu'à -100 %	Entre -20 et -90 %

Les gains environnementaux liés à l'utilisation d'un bus électrique rechargeable par rapport à un bus diesel vont être compris entre ceux d'un véhicule hybride classique (cf. §9.5) et ceux d'un véhicule tout électrique (cf. §11.5). Ces gains vont dépendre :

- De la puissance de la motorisation électrique (i.e. quelle autonomie sur le seul moteur électrique)
- De l'autonomie « électrique » en conditions d'exploitation (i.e. quel type de recharge en ligne est déployée)
- De la vitesse commerciale du véhicule
- Du mix énergétique de l'électricité

10.6. Synthèse

Le bus hybride rechargeable est un bus tout électrique inavoué. Il marque la transition entre un système hybride classique et un système tout électrique.

La filière est contrainte en termes d'exploitation (recharge en ligne), pénalisée par des surcoûts importants par rapport au diesel (acquisition, batteries, infrastructures de recharge) et pauvre en offre constructeur.

En outre la concurrence avec le bus tout électrique tourne au désavantage du bus hybride rechargeable.

Technique	Environnemental	Economique
+ Récupération de l'énergie du freinage	+ Réduction des émissions d'oxydes d'azote et de particules fines	+ Gains sur le poste énergie
+ Agrément et confort de conduite	+ Réduction des émissions de GES	- Surcoût du véhicule à l'achat
- Offre restreinte de véhicules	+ Réduction des nuisances sonores	- Importance du coût des batteries et de leur renouvellement
- Dégradation progressive de l'autonomie des batteries	- Impact environnemental de la fabrication des batteries	- Coût des infrastructures
- Infrastructure de recharge spécifique (au dépôt ou sur la ligne)		- Formation des conducteurs de bus et des techniciens

¹⁵ Les capacités des batteries pour les véhicules hybrides classiques vont dépendre du type d'hybridation (série ou parallèle) et du type de stockage (batteries -principalement Li-Ion- ou supercapacités). En parallèle, la capacité est supérieure à 1 kWh alors qu'elle est supérieure à 10 kWh en série. Les supercapacités ont une capacité de l'ordre de 0,5 kWh et les batteries de un à plusieurs dizaines de kWh.

11. Filière tout électrique

11.1. Présentation / caractéristiques

Les véhicules électriques circulent à l'aide d'une chaîne de traction couplée à un moteur électrique, dont l'alimentation peut s'effectuer de 2 manières :

- La captation du courant à l'aide de perches comme pour un trolley
- L'énergie embarquée (généralement dans des batteries mais la production d'électricité peut être faite en direct par exemple avec une pile à combustible, cf. filière hydrogène)

Le stockage de l'énergie est assuré grâce à des batteries d'accumulateurs au lieu du réservoir de carburant des véhicules thermiques.

Le bus électrique présente un moteur à fort rendement. Les principales problématiques sont l'autonomie des véhicules et le temps de recharge des batteries.

Les modalités de gestion des batteries sont sous-tendues par deux modèles économiques différents :

- L'achat du pack batteries
- La location du pack batterie

Les batteries embarquées offrent actuellement une autonomie moyenne de 200 km pour un autobus standard.

11.2. Cadre réglementaire et fiscal

11.2.1. Réglementation

Les véhicules électriques n'émettent aucune émission au roulage (hormis les particules liées à l'abrasion et au freinage) et ne sont pas soumis aux normes Euro. Ils répondent ainsi aux restrictions de circulation imposées dans certaines agglomérations (notamment les zones de circulation restreinte).

Par ailleurs, ces véhicules électriques sont catégorisés dans le groupe 1 des types d'autobus à faibles émissions du décret n°2017-23 du 11 janvier 2017.

L'arrêté du 3 août 2018 définit de nouvelles règles pour l'installation de bornes de recharge dans les dépôts de bus électriques (le texte allège les demandes administratives et oblige les propriétaires des lieux à installer des systèmes de sécurité). Cet arrêté adapte celui du 29 mai 2000 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 2925 « accumulateurs ».

Le décret n°2010-1118 du 22/09/2010 relatif aux opérations sur les installations électriques ou dans leur voisinage impose à l'entreprise de définir et mettre en œuvre les mesures de prévention pour son personnel exposé aux risques électriques en effectuant préféablement les travaux hors tension. Ce décret est à l'origine de la norme NF C18-550 « Opérations sur les véhicules et engins automobiles à motorisation thermique, électrique ou hybride ayant une énergie électrique embarquée – préventive de risque électrique » (août 2015).

La norme s'applique aux véhicules ayant une source d'énergie électrique embarquée du domaine Très Basse Tension (TBT : < 50 volts en courant alternatif ; < 120 volts en courant continu) et Basse Tension (BT : entre 50 et 1 000 volts en courant alternatif ; entre 120 et 1 500 volts en courant continu).

Les dispositions du document s'appliquent également aux opérations sur les batteries embarquées dans le véhicule et restent applicables lorsqu'elles sont déposées pour des raisons de maintenance, recharge, stockage, remplacement...



Ainsi, tout personnel qui peut être en contact avec une batterie doit être habilité pour pouvoir intervenir « dès lors qu'il y a un risque électrique lors d'une opération sur un générateur ou dans la continuité directe des conducteurs » (article R4544-9 du Code du travail renforcé par l'article R4544-10).

11.2.2. Fiscalité

L'électricité utilisée pour le transport routier de voyageurs ne bénéficie pas d'une taxation à taux réduit contrairement à celle utilisée pour le transport ferroviaire.

Des aides locales ou nationales pour l'acquisition d'un véhicule électrique se traduisent par des :

- Bonus écologiques
- Réductions sur le coût des cartes grises.

Ces exonérations ou allégements sont à étudier lors de l'achat.

La loi de finances pour 2018 a prolongé de deux ans, jusqu'au 31 décembre 2021, le suramortissement de 60 % prévu pour l'achat d'un véhicule de 3,5 à 16 t roulant à l'électricité, et de 40 % prévu pour l'achat d'un véhicule de plus de 16 t roulant à l'électricité.

11.3. Maturité de la filière

11.3.1. Disponibilité des véhicules

Aujourd'hui, 28 constructeurs se partagent le marché de l'autobus électrique, couvrant tous les gabarits de véhicules.

De nombreuses AOM ont lancé des marchés conséquents de renouvellement de tout ou partie de leur flotte vers des bus électriques.

La maturité de la filière a permis de développer des modèles de batteries standards, même si la technologie continue à évoluer rapidement.

Les tests récents ou en cours ne reviennent pas sur la pertinence de la motorisation électrique mais sur l'optimisation des techniques de recharge des véhicules. On retrouve par exemple :

- Expérimentation du Bluetram de Bolloré, similaire à un BHNS électrique avec biberonnage, fin 2015 à Paris pendant 2 mois
- Test de PVI (WATT) en 2015 d'une navette à l'aéroport de Nice déployant comme mode de recharge le bras articulé en station
- Expérimentation dans les communes de Nîmes et d'Amiens d'un bus articulé en site propre en biberonnage grâce à un pantographe.

11.3.2. Conditions d'avitaillage et d'implantation des infrastructures

Des infrastructures spécifiques doivent être développées (théoriquement la recharge des batteries d'un véhicule électrique peut être effectuée en stations publiques mais ces stations ne sont a priori pas adaptées pour accueillir un bus).

Une station privée nécessite l'achat d'un ou plusieurs chargeurs dont la puissance détermine le temps de charge et le nombre de véhicules pouvant être rechargés simultanément.

Les batteries peuvent se recharger de plusieurs manières :

- Charge lente : au dépôt sur borne individuelle
- Charge rapide :
 - o Au terminus : pendant le temps de battement
 - o En ligne avec biberonnage : recharge à chaque arrêt en quelques secondes (moins d'une dizaine) grâce aux surcapacités du véhicule, à l'aide d'un bras articulé intégré au mobilier urbain, par

- induction au sol (enfouis sous la chaussée, soit le véhicule s'abaisse, soit la plate-forme s'élève)
- o A noter que selon le profil de la ligne, il peut y avoir la nécessité d'installer plusieurs stations



Figure 49 : Autobus électrique en cours de recharge au dépôt



Figure 50 : « Montmartrobus » en phase de biberonnage au terminus © RATP

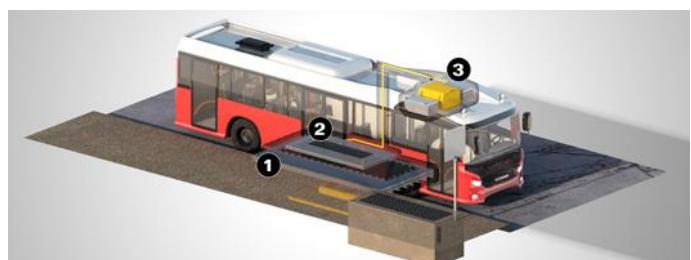


Figure 51 : Système de recharge des batteries par induction
Avec installation du système dans le cas de la Compagnie des Transports de Londres (TFL)

Concernant la technologie de recharge par induction, les bobines situées sous la route et dans le plancher du bus permettent, sans contact physique de transférer de l'électricité qui est acheminée jusqu'à la batterie sur le toit du



véhicule (le rechargement complet se fait en moins d'une dizaine de minutes). Par contre les chargeurs n'étant pas interopérables, cela ne permet pas un déploiement rapide de ce type de matériel. En fonction de la puissance nécessaire au rechargement des véhicules et de la localisation du site de recharge, un réseau de moyenne tension et un transformateur (en amont des stations de charge) devront être implantés (coûts supplémentaires à évaluer).

Le gabarit des véhicules électriques peut être légèrement plus haut que celui des véhicules diesel, ce qui implique une hauteur des bâtiments de maintenance ou de remisage adaptée.

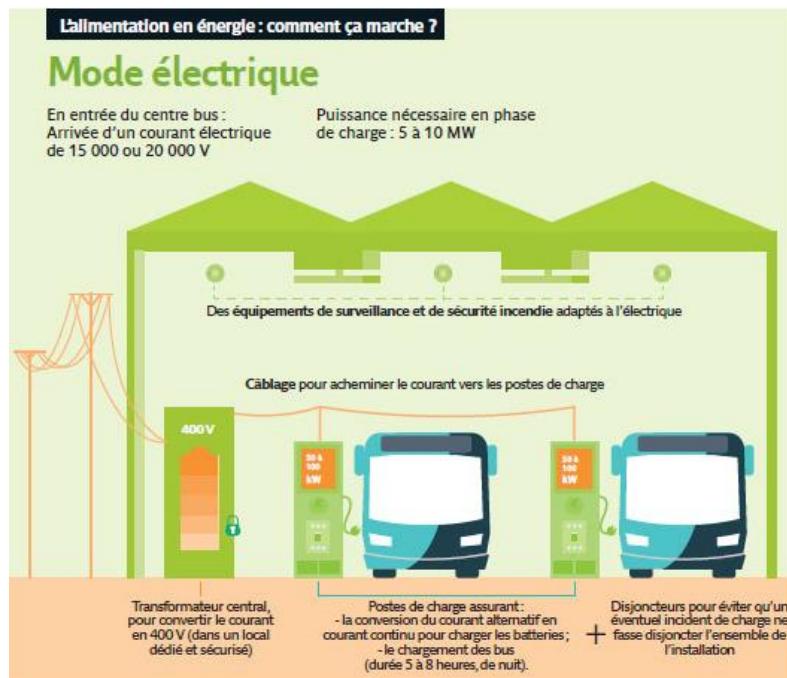


Figure 52 : Schéma d'infrastructure de recharge au dépôt

11.3.3. Exploitation

Des retours d'expérimentation, aux niveaux national et européen, ont mis à jour d'importantes différences en termes d'exploitation entre bus électriques et bus thermiques, comme notamment :

- Un moindre rendement pour un même service (1 bus thermique = 1,2 bus électrique) en raison de la moindre autonomie (~150 km), d'une souplesse d'exploitation dégradée et d'une capacité d'accueil voyageurs légèrement moindre
- Une augmentation de l'usure des pneumatiques
- Des habilitations spécifiques pour les personnels de maintenance, au regard des obligations normatives (NF C 18-550)
- La diminution de la capacité de remisage et l'impact des exigences ICPE des dépôts
- La puissance de raccordement au réseau électrique (plusieurs MW de puissance nécessaires pour un dépôt de bus 100 % électrique)

Concernant la consommation moyenne de ces bus, elle est fortement dépendante de plusieurs facteurs :

- La consommation électrique peut varier de 15 % selon le nombre de passagers.
- Le chauffage/climatisation peut entraîner une surconsommation jusqu'à 25 % de la consommation électrique.
- La vitesse moyenne de l'autobus va également avoir un impact sur sa consommation moyenne (+8 % en baissant de 5 km/h la vitesse moyenne, de 20 à 15 km/h).
- Compte-tenu de l'ensemble des critères pouvant impacter le profil de consommation du bus, on peut considérer une consommation moyenne comprise entre 1,3 et 1,6 kWh/km.

L'autonomie diminuera progressivement après les 5 premières années d'utilisation en raison du vieillissement des batteries (peut atteindre jusqu'à -20 %).

Le temps de recharge total des batteries (en charge au dépôt) est compris entre 6 et 8 heures en utilisation normale. Des solutions permettent de recharger plus rapidement ou de faire des recharges partielles, mais cela peut user prématurément les batteries en fonction de la technologie utilisée (notamment pour les Li-Ion).

Une procédure de secours est à mettre en place en cas de défaillance du système de charge ou de coupure de courant.

Les véhicules électriques sont très silencieux : des systèmes annexes visuels et sonores sont alors nécessaires pour prévenir tout risque de collision avec des piétons.

Cette technologie offre un confort de conduite et une qualité de transport supérieure pour les usagers :

- Transmission continue
- Couple à bas régime
- Souplesse.

La technologie électrique permet de récupérer jusqu'à 30 % d'énergie au freinage à condition d'adapter la conduite. Une formation des conducteurs est nécessaire pour optimiser cette récupération d'énergie (~2h).

11.3.4. Maintenance

Le personnel de maintenance doit être formé à la technologie électrique :

- Formation obligatoire réglementaire : 2 à 3 jours pour l'intervention sur les composants électriques
- Formation spécifique liée à la technologie des véhicules électriques : 1 semaine minimum par mécanicien

Equipements nécessaires :

- Passerelle mobile pour travailler en hauteur
- Chariot élévateur ou potence
- Outilage spécifique pour intervention sur des composants électriques

La maintenance d'une chaîne de traction électrique est généralement plus simple que celle d'un moteur thermique.

La fiabilité des véhicules de faible capacité est aujourd'hui équivalente à celle d'un véhicule diesel.

Une usure plus rapide des trains de pneus sur l'essieu moteur est à prévoir.

11.4. Données économiques

Le véhicule électrique devient rentable à partir d'un kilométrage quotidien et d'une fréquence d'utilisation permettant d'amortir l'investissement initial.

En effet, l'autobus électrique présente un réel surcoût à l'achat par rapport à un autobus diesel :

- <100 k€ pour l'achat du véhicule lui-même (avec une convergence des prix d'achat entre les modèles diesel et électrique projetée à l'horizon 2025), amortissement du véhicule sur 20 ans
- >100 k€ pour un pack batteries (avec changement du pack au bout de 7 ans)

Le prix des batteries pourrait diminuer de ~10 % chaque année jusqu'en 2030 si la demande à l'échelle européenne augmentait (<200 €/kWh actuellement).

Le prix varie en fonction du mode d'acquisition des batteries :

- L'achat : coût inférieur privilégié, mais l'autonomie et plus généralement les performances des batteries, restant incertaines, cet investissement revêt un risque technologique.
- La location : permet de limiter le risque technologique mais s'avère plus onéreuse sur la durée de vie du véhicule car le constructeur intègre le risque industriel (remplacement du pack si nécessaire) et financier (financement de l'investissement)

On note une différence de prix concernant les batteries en fonction du type de charge. Dans le cas de la recharge par opportunité, les capacités de stockage de l'énergie sont inférieures du fait du rechargement durant le trajet ou au terminus. Le besoin est moindre et donc le prix inférieur.



En outre, le coût d'une infrastructure de recharge électrique pour un autobus (borne individuelle) est de l'ordre de 40 k€ pour une borne rapide située dans le dépôt (les technologies du pantographe et de l'induction avoisinent les 350 k€ pour une station, hors génie civil ; cette valeur moyenne est amenée à fluctuer en fonction de plusieurs facteurs discriminants dont la technologie retenue, la topographie, la distance de la ligne, la puissance à fournir au point de recharge, ...).

Selon que le bus est rechargé au dépôt ou durant la phase d'exploitation (en ligne ou au terminus), la répartition des coûts varie. En effet, lorsque le bus est rechargé au dépôt, le coût d'acquisition est plus élevé (45 %) qu'en biberonnage (35 %) mais le coût d'infrastructure en biberonnage est de l'ordre de 30 % du coût total alors qu'il n'en représente que ~15 % pour un autobus rechargé au dépôt. Les coûts opératoires sont semblables pour les deux modes de recharge.

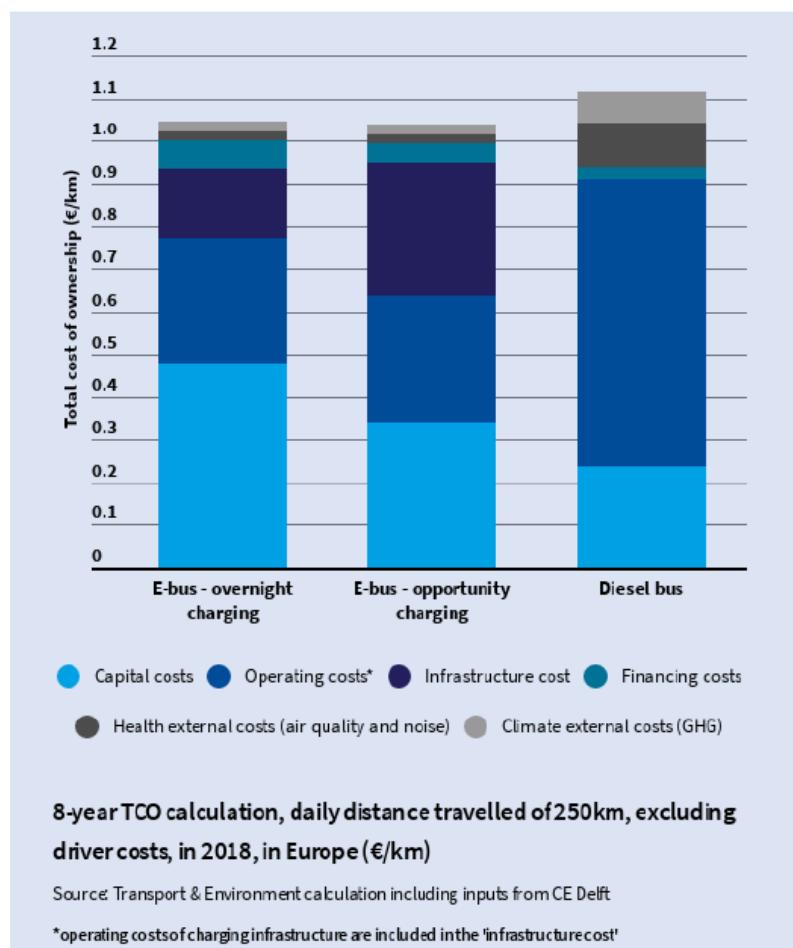


Figure 53 : Comparaison des coûts de détention entre 2 technologies de bus électriques et un bus diesel avec prise en compte des coûts externes (sur 8 ans, 250 km/jour) © Transport & Environment

Par ailleurs, les coûts d'entretien et d'assurance sont inférieurs à ceux d'un véhicule diesel en raison d'une conception plus simple.

Le gain pour l'exploitant sur le poste énergie est important avec une facture énergétique plus de cinq fois moins élevée que celle d'un véhicule thermique (lié au différentiel de coût des 2 énergies et du poids de la fiscalité sur le gazole -relativement à l'électricité-).

La période de formation (éco-conduite, contrôles mécaniques et entretien) est par contre synonyme de surcoûts (compter ~5 000 € pour la formation des conducteurs à la conduite optimisée pour la récupération d'énergie, ~2 000 € pour la formation obligatoire des mécaniciens et ~5 000 € pour leur formation à la technologie électrique).

Dans le calcul du coût de revient, le nombre de véhicules sera impactant si la station de charge est mutualisée entre plusieurs bus (recharge en ligne ou au terminus, mais ce ne sera pas le cas au dépôt où l'infrastructure de charge est propre à chaque unité).

Ainsi, à court terme, même au dépôt, des solutions d'infrastructures mutualisées permettront de procéder aux chargements pilotés de plusieurs véhicules simultanément, le but étant de délivrer l'énergie nécessaire au véhicule qui en a le plus besoin. Ce système prend donc en compte l'état de charge des autres véhicules et son coût sera réparti entre les différents véhicules.

11.5. Impacts environnementaux

	Oxydes d'azote (NOx)	Particules (PM)	Gaz à effet de serre (GES)
Electrique	-100 %	-100 %	-90 % à minima

Pollution locale

L'utilisation d'un véhicule électrique permet d'éliminer toutes les émissions polluantes à l'échappement (NOx, PM, COV, ...).

Pollution globale

Un véhicule électrique n'émet aucun GES dans sa phase d'usage. Par contre, selon le processus de production de l'électricité, des émissions amont sont à intégrer (le mix énergétique français est avantageux à cet égard avec une part prépondérante d'énergie nucléaire faiblement carbonée).

Ainsi, un bus électrique consommant 1,5 kWh/km émettrait (du puits à la roue sans prise en compte des phases de construction/déconstruction et en prenant comme hypothèse dans la base carbone 57,1 g de CO₂/kWh produit pour le mix France 2018) l'équivalent de 85 g de CO₂ par km parcouru. A comparer à un bus diesel qui émet environ 1 200 g de CO₂/km, cela fait donc une réduction des émissions de CO₂ de 93 %.

A noter qu'avec la prise en compte de la fabrication du véhicule (dont la batterie), cet écart se réduit considérablement selon l'étude E4T (<https://www.ademe.fr/bilan-transversal-l-impact-de-l-electrification-segment>) menée par l'IFPEN pour le compte de l'ADEME courant 2018 :



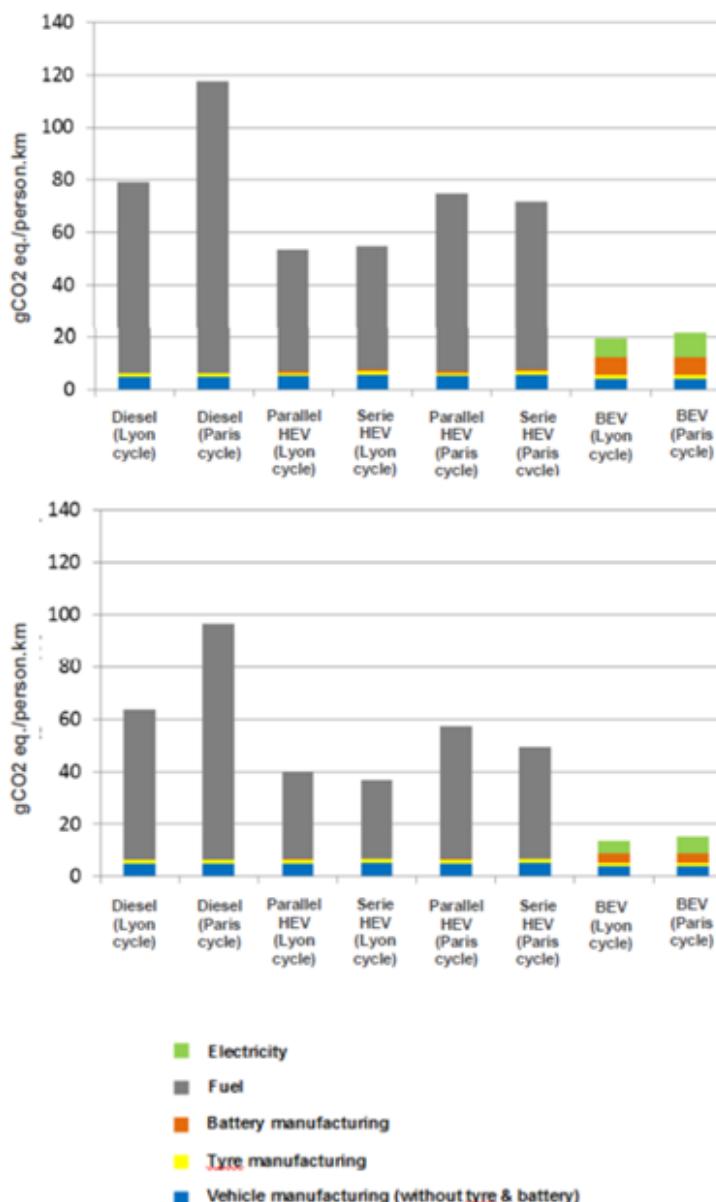


Figure 54 : Impacts sur le changement climatique d'une personne prenant le bus pour différentes technologies et différents cycles. Horizons temporels 2015 (en haut) et 2030 (en bas)

Autres impacts

La motorisation électrique permet une absence de nuisances sonores et olfactives.

Pour autant les émissions sonores en conditions réelles d'exploitation ne sont pas nulles. Des mesures ont été réalisées en Allemagne en 2018 sur des autobus électriques Sileo S18, Solaris Bus Urbino 18 Electric, VDL Citea SLFAe-181. Effectuées grâce à un sonomètre en roulage sur chaussée ouverte, elles montrent, tous modèles confondus, que les émissions sonores sont plus élevées à l'arrière du véhicule (ce qui est logique en raison de la présence du moteur) qu'à l'avant. En effet, à l'avant les émissions sonores moyennes sont comprises entre 58,5 dB et 60 dB, au milieu entre 63 dB et 69 dB et à l'arrière entre 63 dB et 70,5 dB selon le constructeur et la vitesse commerciale (de 30 à 50 km/h).

La fabrication des batteries des véhicules, outre l'impact sur les émissions de GES, implique l'extraction de métaux lourds et consomme une forte quantité d'eau et de produits chimiques.

Le recyclage des batteries est quant à lui encadré par une filière à responsabilité élargie des producteurs. La filière existe bel et bien et se développe (pour les batteries lithium) à mesure que le nombre d'unités en fin de vie augmente. Il faut également mentionner que le système s'appuie sur la seconde vie des accumulateurs, qui peuvent servir à des applications de stockage tampon lorsque leur autonomie est trop réduite, notamment dans le cadre du stockage des énergies issues d'énergies renouvelables.

11.6. Synthèse

Aujourd'hui, l'utilisation d'une flotte de bus électriques pose encore des contraintes en termes d'exploitation (les exploitants estiment à ~20 % le nombre d'autobus supplémentaires par ligne pour assurer l'offre de transports) et surtout de coûts (prix d'acquisition du véhicule, prix d'achat et du renouvellement des batteries, prix des infrastructures de recharge rapides, ...).

Autant la fonction moteur est maîtrisée et efficace, autant la fonction stockage n'est pas encore totalement maîtrisée, ni totalement efficace. La recherche et développement sur ce dernier domaine (que ce soit au niveau de leur capacité ou de leur vitesse de chargement) avance fortement et rapidement. On estime qu'à l'horizon 2030, la technologie électrique devrait être complètement stabilisée.

Néanmoins les politiques publiques, en particulier en rapport avec la qualité de l'air en zone urbaine, poussent au déploiement de cette filière dans une optique de décarbonation des transports, et on voit se planifier, de façon parfois massive, l'arrivée de bus électriques dans de nombreux réseaux urbains.

Technique	Environnemental	Economique
+ Amélioration de la performance énergétique des moteurs (du réservoir à la roue)	+ Absence d'émissions polluantes à l'échappement	+ Gains sur le poste énergie
+ Récupération d'énergie au freinage	+ Forte réduction des émissions de GES	- Coût élevé des véhicules
+ Simplicité de la chaîne de traction électrique	+ Diminution des nuisances sonores et olfactives	- Importance du coût des batteries et de leur renouvellement
+ Confort de conduite supérieur	+/- Adéquation avec la capacité du réseau de distribution électrique et la gestion des pointes de consommation à vérifier	- Coût des infrastructures (de moyen -borne- à élevé - pantographe ou induction-)
+/- Temps de recharge des batteries (long sur borne, rapide en biberonnage)	- Impact environnemental de la fabrication des batteries	- Formation des conducteurs de bus et des techniciens
- Dégradation progressive de l'autonomie des batteries		
- Infrastructure de recharge spécifique (au dépôt ou sur la ligne)		



La filière hydrogène

Filière hydrogène à pile à combustible

Plusieurs projets faisant appel à diverses solutions « hydrogène » sont apparus au début des années 90 :

- Moteur thermique à hydrogène pur ou à mélange gaz-hydrogène (hythane)
- Moteur électrique alimenté par une pile à combustible (PAC), de divers types (AFC, PAFC, PEFMC)

Tous les projets de bus à hydrogène dans le monde adoptent aujourd’hui la technologie PAC avec le type de pile PEFMC. C'est cette filière spécifique qui est développée ci-après.

A noter qu'un bus à PAC reste un véhicule électrique (l'hydrogène n'est qu'un vecteur énergétique permettant, grâce à sa densité énergétique importante de stocker de l'énergie à bord et ainsi d'augmenter l'autonomie des bus électriques).

12. Filière Hydrogène

12.1. Présentation / caractéristiques

Un autobus équipé d'une pile à combustible (PAC) est un véhicule électrique dont l'énergie est produite directement à bord (les batteries sont remplacées par le réservoir d'hydrogène et la PAC).

Le bus à hydrogène (FCEB = Fuel Cell Electric Bus) stocke son énergie dans un réservoir à hydrogène (monté sur le pavillon du bus), semblable à un réservoir d'essence. Cet hydrogène va être transformé en électricité par une pile à combustible (pile de type PEFC). Ce courant va alimenter le moteur électrique qui va le convertir en énergie mécanique pour faire tourner les roues. En outre, le moteur électrique est capable, lors des freinages, de convertir l'énergie mécanique en excès en énergie électrique. Cette énergie électrique créée est alors stockée dans la batterie de régulation.

La pile à combustible est un dispositif électrochimique (2 électrodes, l'anode et la cathode, séparées par un électrolyte) dans lequel l'hydrogène et l'oxygène gazeux se combinent pour fournir de l'électricité, de l'eau et de la chaleur suivant un processus inverse de celui de l'électrolyse de l'eau : à l'anode, l'oxydation électrochimique de l'hydrogène produit 2 protons qui traversent l'électrolyte et 2 électrons qui passent dans le circuit extérieur en produisant l'énergie électrique et vont réduire électro-chimiquement l'oxygène (de l'air) en produisant de l'eau.

Ces réactions peuvent se produire à la température ambiante grâce à un catalyseur favorisant la coupure des liaisons chimiques dans les molécules d'hydrogène et d'oxygène.

La durée de vie d'une pile à combustible est de l'ordre de 7 000 heures soit, à 20 km/h en moyenne, une durée de vie de l'ordre de 140 000 km.

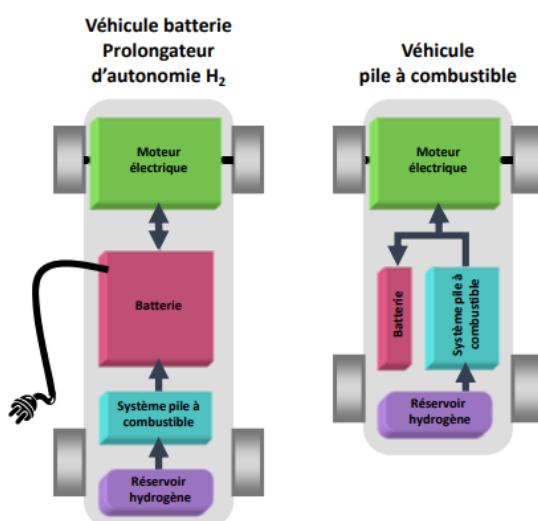


Figure 55 : Schémas de fonctionnement d'un bus hydrogène (avec une PAC prolongateur d'autonomie ou une PAC pleine puissance)

Seuls les véhicules à PAC pleine puissance sont détaillés ci-après.

12.2. Cadre réglementaire et fiscal

12.2.1. Réglementation

Les véhicules à pile à combustible sont catégorisés dans le groupe 1 des types d'autobus à faibles émissions du décret n°2017-23 du 11 janvier 2017.



Le stockage de l'hydrogène relève de la rubrique 4715 de la nomenclature des IPCE. On distingue 2 systèmes d'autorisation d'ouverture de site selon le débit ou la capacité des installations : déclaration préfectorale (entre 100 kg et 1 000 kg) ou autorisation préfectorale (entre 1 t et 50 t : installation soumise à autorisation, au-delà de 50 t : installation soumise à autorisation et servitudes d'utilité publique). Pas de classification au-dessous de 100 kg stockés sur site.

12.2.2. Fiscalité

Le dispositif, voté en commission dans le cadre du projet de loi de finances pour 2019 (PLF 2019), proroge jusqu'à fin 2021 le dispositif de déduction exceptionnelle en faveur des véhicules lourds, notamment pour ceux fonctionnant grâce à une motorisation électrique ou à pile à hydrogène. En revanche, elle réserve désormais le dispositif à l'acquisition des seuls véhicules neufs. Ce dispositif permet aux sociétés de déduire de leur impôt une somme égale à 40 % de la valeur des véhicules de plus de 16 tonnes qu'elles acquièrent, prennent en crédit-bail ou en location avec option d'achat (et 60 % de la valeur des véhicules compris entre 3,5 et 16 tonnes).

12.3. Maturité de la filière

12.3.1. Disponibilité des véhicules

Les constructeurs qui proposent des autobus avec pile à combustible sont encore peu nombreux. En Europe, les constructeurs Mercedes, Van Hool et Solaris ont été les précurseurs de la motorisation hydrogène.

A ce jour, il n'y a pas de bus circulant avec une pile à combustible en France même si plusieurs réseaux devraient déployer en 2019 les premières flottes de bus à hydrogène (Pau, Lens et Versailles notamment). On peut néanmoins citer les déploiements internationaux dans le cadre de projets européens.

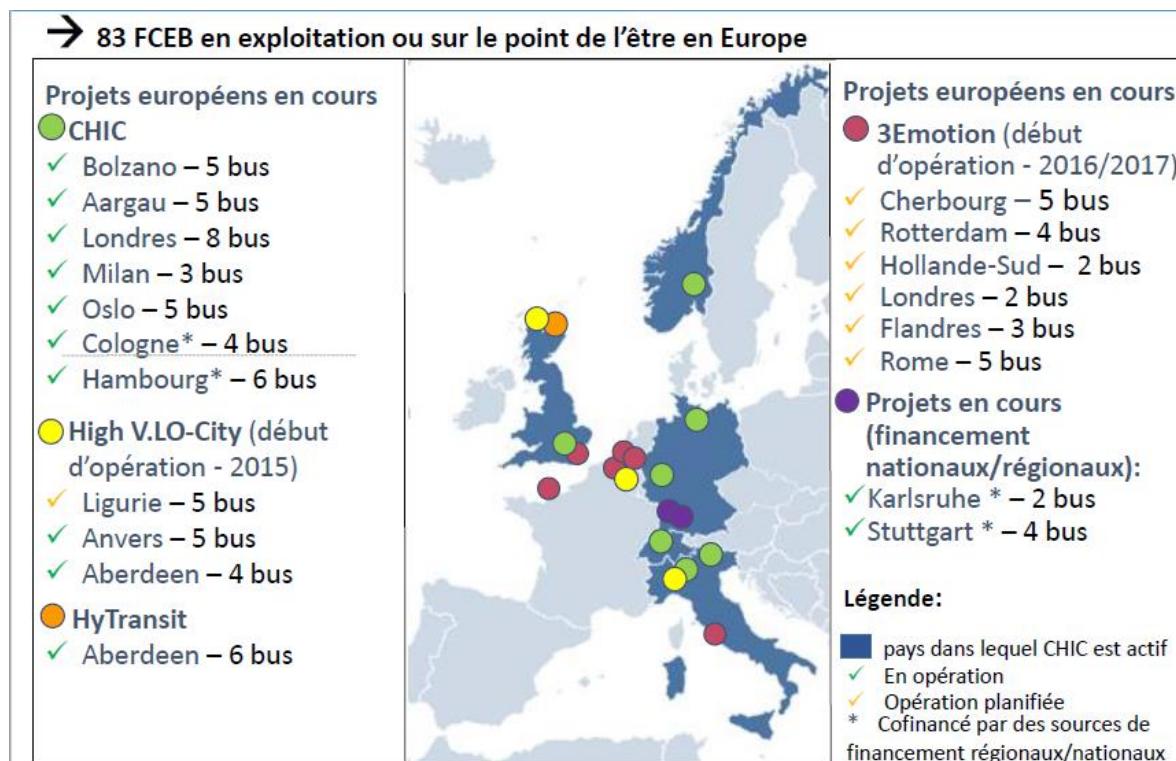


Figure 56 : Projets européens de déploiement de bus hydrogène

12.3.2. Conditions d'avitaillage et d'implantation des infrastructures

L'exploitation d'une flotte de bus fonctionnant à l'hydrogène nécessite une structure d'approvisionnement dédiée. L'utilisation de l'hydrogène permet un remplissage rapide en station (de l'ordre de 5 à 10 minutes).

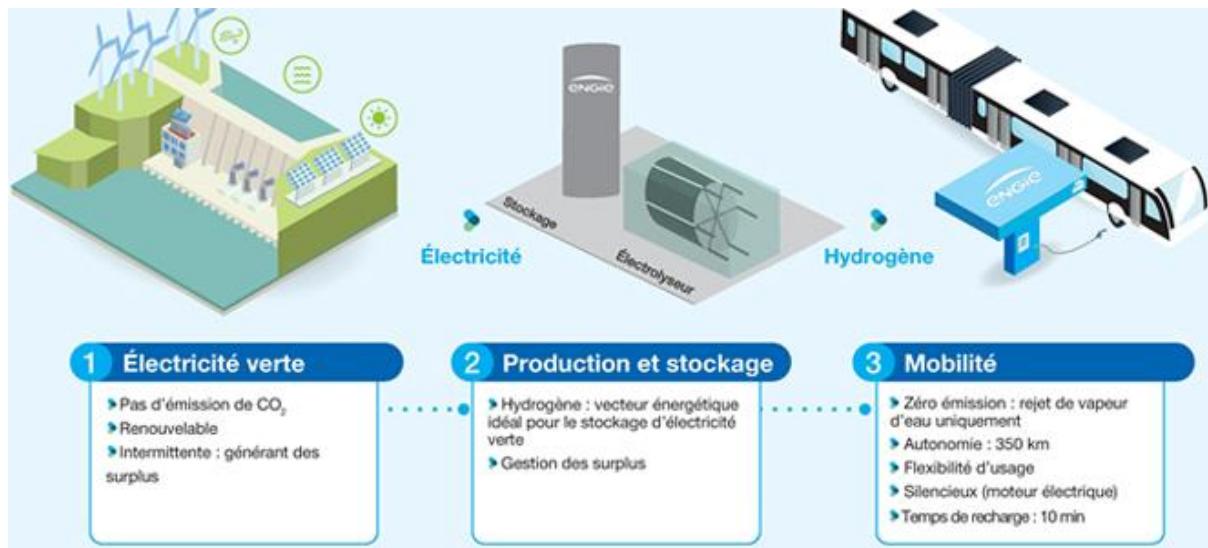


Figure 57 : Schéma d'approvisionnement de l'hydrogène de l'usine au bus © Engie

A noter que conformément aux préconisations de l'ADEME, le recours à la filière hydrogène n'a de sens que :

- pour une production locale (ce qui exclut le transport de l'hydrogène par camion de type tube-trailer jusqu'à la station),
- si l'on a recours à de l'électricité verte.

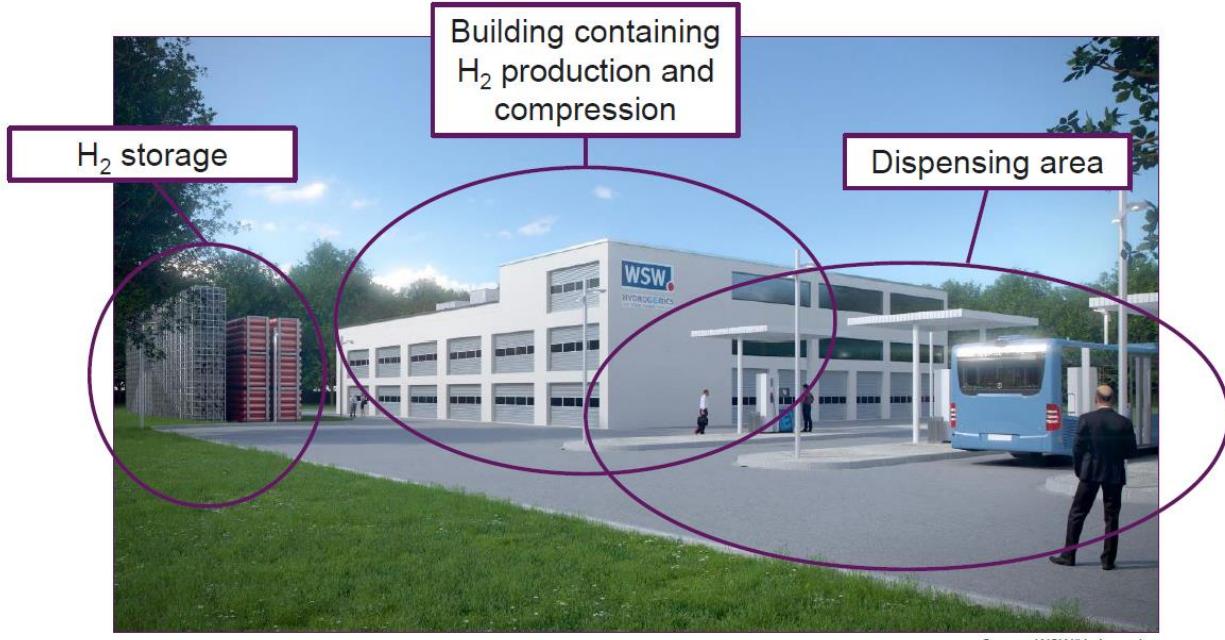


Figure 58 : Vue d'artiste de déploiement d'une station au dépôt (zone de stockage de l'hydrogène, bâtiment abritant la production et la compression de l'hydrogène et zone de recharge pour les bus)



12.3.3. Exploitation

L'autonomie des véhicules permet de parcourir entre 300 et 500 km selon la pression dans les réservoirs d'hydrogène et leur taille.

Par rapport à un bus diesel, le bus à hydrogène permet de parcourir plus de 40 % de distance en plus (ramené à la tep).

La consommation moyenne est inférieure à 10 kgH₂/100km.

La demande quotidienne pour une flotte d'une centaine de bus dépasse les 2 tH₂/jour.

12.3.4. Maintenance

Les retours d'expérience étrangers montrent une meilleure disponibilité du bus hydrogène par rapport à son homologue diesel.

12.4. Données économiques

Le coût d'acquisition d'un bus hydrogène est multiplié presque par 4 par rapport à l'achat d'un véhicule diesel (entre 600 et 800 k€ pour un bus standard avec des projections à ~450 k€ à l'horizon 2025).

Le coût de maintenance, très élevé également, avoisine les 0,65 €/km (malgré une meilleure fiabilité que son équivalent diesel).

Le coût moyen de l'hydrogène (incluant le coût de l'infrastructure) se situe aux alentours de 8 €/kgH₂ (allant de 4 à plus de 10 €/kgH₂, à 350 bars (source : projet NBF, newbusfuel.eu)).

12.5. Impacts environnementaux

	Oxydes d'azote (Nox)	Particules (PM)	GES
Hydrogène PAC	Réduction de 100 % des émissions locales		Selon la source de production de l'hydrogène* (-91 % électrolyse PEM éolien, -72,5 % électrolyse mix français et -17 % SMR)

*avec les hypothèses suivantes issues d'une l'analyse de cycle de vie menée par l'ADEME en 2013 :

Origine de la production de l'H ₂	Facteur d'émission (en kg CO ₂ eq. pour 1 kg d'H ₂ produit)
Electrolyse PEM éolien	1,04
Electrolyse avec mix réseau électrique	3,3
Vaporéformage de gaz naturel	9,98

Pollution locale

L'utilisation d'une pile à combustible permet de supprimer toutes les émissions polluantes à l'échappement (rejette uniquement de la vapeur d'eau).

Comme pour n'importe quel bus électrique, les émissions de particules fines dues à l'abrasion et au freinage sont, elles, toujours présentes, bien que réduites par rapport à un bus thermique classique (la récupération de l'énergie au freinage permettant un moindre usage des freins).

Pollution globale

L'impact global du puits à la roue a été estimé en 2015 dans le cadre d'une étude européenne à 108 kgCO₂/100km pour la technologie SMR (vaporeformage de méthane) et à 31 kgCO₂/100km par électrolyse (avec le mix électrique français), pour une référence diesel calculée à 122 kgCO₂/100km.

Pour information, une analyse de cycle de vie détaillée, conduite par l'ADEME en 2013 permet d'estimer (du puits à la roue, sans prise en compte de la phase de construction/déconstruction du véhicule) qu'un bus qui consomme 10 kg d'H₂/100km (soit 0,1 kg d'H₂/km) émet 104 g de CO₂/km pour une production au pied de l'éolienne, 330 g de CO₂/km pour une production par électrolyse avec mix France, 998 g de CO₂/km pour une production par vaporeformage de gaz naturel. A comparer à un bus diesel qui émet environ 1 200 g de CO₂/km, cela fait donc une réduction des émissions de CO₂ de 91 %, 72,5 % et 17 %.

Par ailleurs, des solutions pour limiter l'emploi de certains métaux précieux doivent être étudiées et mises en place (recyclage, amélioration des technologies actuelles).

Autres impacts

L'utilisation d'une pile à combustible permet de réduire les nuisances sonores et olfactives.

12.6. Synthèse

Les technologies associées à l'hydrogène mobilité sont encore chères et les expérimentations et déploiements à venir nécessitent, comme toute technologie émergente, un soutien pour amorcer la demande de véhicules et accélérer l'industrialisation. Les enjeux sont en partie liés à la mise en place de chaînes d'assemblage automatisées, pour les piles mais aussi pour certains équipements périphériques, qui permettra de baisser les coûts.

Technique	Environnemental	Economique
+ Recharge rapide inférieure à 10 minutes	+ Absence d'émissions polluantes à l'échappement et réduction des émissions de GES	- Coût élevé des véhicules
- Nécessite des conditions de stockage de l'hydrogène particulières	+ Réduction des nuisances sonores et olfactives	- Coût élevé des infrastructures
- Nécessite des stations de remplissage spécifiques		- Formation des conducteurs de bus et des techniciens



13. Conclusion

L'apparition de réglementations locales ciblant les émissions polluantes en milieux urbains participe à faire émerger le marché des véhicules « zéro émission à l'usage ». Dans l'attente d'un degré de maturité suffisant pour toutes ces filières spécifiques, les autres filières présentées dans ce document peuvent apporter une réponse immédiate aux problématiques de qualité de l'air en diminuant les émissions polluantes des parcs de véhicules tout en réduisant également les émissions de gaz à effet de serre.

Quelle que soit la technologie envisagée, il conviendra de lever l'ensemble des freins au développement de ces filières qu'ils soient de natures économiques, technologiques ou politiques.

Du point de vue économique, les principaux facteurs à prendre en compte, qui vont constituer une différence majeure en termes d'investissement, vont concerner la nécessité d'acheter ou non un bus dédié et l'éventuelle mise en place d'une infrastructure d'approvisionnement.

Les technologies évoluent rapidement et à terme, des modèles économiques devraient être atteignables pour l'ensemble des filières.

Comme toutes les alternatives au diesel présentées dans ce panorama ont leur pertinence (à des horizons et degrés différent), le développement d'une filière énergétique ou d'une autre sera porté par les choix politiques de chaque territoire.

Annexes

Annexe 1 – Rappels sur le contexte réglementaire relatif aux autobus

Annexe 2 – Eléments de réflexion sur l'économie des filières

Annexe 3 – Facteurs d'émissions pour les autobus



14. Annexe 1 – Rappels sur le contexte réglementaire relatif aux autobus

L'autobus est un véhicule affecté au transport urbain de voyageurs (assis ou debout), et dont la taille est variable :

- Minibus : environ 30 places
- Midibus : entre 70 et 80 places
- Standard (12 m) : environ 100 places
- Articulé (18 m) : entre 175 et 200 places
- Grande capacité (24 m) : entre 275 et 300 places

14.1. Masses et dimensions

Pour le code de la route, « Un autobus est un véhicule de transport en commun qui, par sa construction et son aménagement, est affecté au transport en commun de personnes et de leurs bagages. C'est un véhicule routier limité en longueur à 13,50 m pour les bus standards à deux essieux (15 m pour trois essieux ou plus), 18,75 m pour les bus articulés et 24,50 m pour les bus biarticulés. Il appartient à la catégorie « M » de véhicules. Par ailleurs, sa largeur est limitée à 2,55 m hors rétroviseurs et sa hauteur à 4 m ».

Extrait de l'article R311-1 du code de la route :

1. Véhicules de catégorie M : véhicules à moteur conçus et construits pour le transport de personnes et ayant au moins quatre roues :
 - 1.1. Véhicule de catégorie M1 : véhicule conçu et construit pour le transport de personnes et comportant, outre le siège du conducteur, huit places assises au maximum
 - 1.2. Véhicule de catégorie M2 : véhicule conçu et construit pour le transport de personnes, comportant, outre le siège du conducteur, plus de huit places assises et ayant un poids maximal inférieur ou égal à 5 tonnes
 - 1.3. Véhicule de catégorie M3 : véhicule conçu et construit pour le transport de personnes, comportant, outre le siège du conducteur, plus de huit places assises et ayant un poids maximal supérieur à 5 tonnes**

Extrait de l'article R312-4 du code de la route :

- I. Le poids total autorisé en charge d'un véhicule ne doit pas dépasser les limites suivantes :
 - 1° Véhicule à moteur à deux essieux, ou remorque à deux essieux : 19 tonnes**
 - 2° Véhicule à moteur à trois essieux, ou véhicule remorqué à trois essieux ou plus : 26 tonnes
 - 3° Véhicule à moteur à quatre essieux ou plus : 32 tonnes
 - 4° Autobus articulé comportant une seule section articulée : 32 tonnes**
 - 5° Autobus articulé comportant au moins deux sections articulées :

14.2. Normes EURO

NB : Les dates qui figurent dans les tableaux ci-dessous correspondent aux véhicules « nouveau type » (véhicule nouveau). Pour les véhicules « tout type » (véhicule déjà existant), il faut généralement rajouter une année supplémentaire.

Norme	Date	Cycle	CO	HC	NOx	PM	PN	Fumées
			g/kWh				1/kWh	1/m
Euro I	1992, ≤ 85 kW	ECE R-49	4,5	1,1	8,0	0,612		
	1992, > 85 kW		4,5	1,1	8,0	0,36		
Euro II	1996.10		4,0	1,1	7,0	0,25		
	1998.10		4,0	1,1	7,0	0,15		
Euro III	1999.10 EEV slt	ESC & ELR	1,5	0,25	2,0	0,02		0,15
	2000.10		2,1	0,66	5,0	0,10 ^a		0,8
Euro IV	2005.10		1,5	0,46	3,5	0,02		0,5
Euro V	2008.10		1,5	0,46	2,0	0,02		0,5
Euro VI	2013.01	WHSC	1,5	0,13	0,40	0,01	8,0×10 ¹¹	

^a PM = 0,13 g/kWh pour les moteurs < 0,75 dm³ de volume balayé par cylindre et une vitesse nominale > 3000 min⁻¹

Figure 59 : Emissions sur cycle stationnaire (uniquement pour les moteurs diesel)

Norme	Date	Cycle	CO	NMHC	CH ₄ ^a	NOx	PM ^b	PN ^d
			g/kWh					1/kWh
Euro III	1999.10 EEV slt	ETC	3,0	0,40	0,65	2,0	0,02	
	2000.10		5,45	0,78	1,6	5,0	0,16	
Euro IV	2005.10		4,0	0,55	1,1	3,5	0,03	
Euro V	2008.10		4,0	0,55	1,1	2,0	0,03	
Euro VI	2013.01	WHTC	4,0	0,16 ^c	0,5	0,46	0,01	6,0×10 ¹¹

^a pour les moteurs gaz seulement (Euro III-V : gaz naturel seulement ; Euro VI : gaz naturel + GPL)

^b non applicable pour les moteurs gaz Euro III-IV

^c THC pour les moteurs diesel

^d pour les moteurs diesel (à déterminer pour les moteurs gaz)

Figure 60 : Emissions sur cycle transitoire (pour les moteurs diesel et gaz)

Pour EURO VI, il faut également prendre en compte :

- Une limitation des particules en nombre (et plus seulement en masse)
- Une concentration limite en ammoniac de 10 ppm pour les moteurs diesel et gaz
- Une valeur limite pour les émissions de NO₂ qui sera définie ultérieurement
- La réalisation de mesures « hors cycle » durant l'homologation (approche de type « not to exceed ») sur des points de fonctionnement choisis de manière aléatoire au sein d'une zone prédefinie
- Des tests de conformité en service réalisés à l'aide d'appareils portatifs
- Des exigences accrues en matière d'OBD dans une phase ultérieure de la réglementation
- La notion de durabilité des émissions suivant le tableau défini ci-après :



Catégorie véhicule	Période *	
	Euro IV-V	Euro VI
N1 et M2	100 000 km / 5 ans	160 000 km / 5 ans
N2		
N3 ≤ 16 tonnes	200 000 km / 6 ans	300 000 km / 6 ans
M3 Classe I, Classe II, Classe A, et Classe B ≤ 7,5 tonnes **		
N3 > 16 tonnes	500 000 km / 7 ans	700 000 km / 7 ans
M3 Classe III, et Classe B > 7,5 tonnes **		

* le premier des deux (kilométrage ou nombre d'années) atteint

**

Classe A : autobus de faible capacité (maximum 22 passagers)
 Classe B : autocars de faible capacité (maximum 22 passagers)
 Classe I : autobus
 Classe II : autocars avec places destinées à des passagers debout
 Classe III : autocars (passagers assis uniquement)

Figure 61 : Durabilité

Etape	Date de mise en œuvre		Exigences OCE*/ISC**				
	Homologation de type (nouveaux types / tous véhicules)	Dernière date d'enregistrement	Seuil de puissance PEMS	Démarrage à froid inclus dans le PEMS	OCE NTE*** g/kWh	PEMS CO, HC, NMHC, CH ₄ CF	PEMS PN CF
A	2013.01/2014.01	2015.09			NOx 0,60		
B (CI)	2013.01/2014.01	2017.01			THC 0,22		
B (SI)	2015.09/2015.09	2017.01	20 %	Non	CO 2,0		-
C	2016.01/2017.01	2017.09			PM 0,016	1,50	
D	2018.09/2019.09	A déterminer					
E	A déterminer	A déterminer	10 %	Oui			A déterminer

Figure 62 : Etapes de la norme EURO VI

* OCE = Off-Cycle Emission / ** ISC = In-service Conformity / *** NTE = Not To Exceed

Test de conformité en service

La norme Euro VI a également introduit des exigences de test en cours d'utilisation qui impliquent des mesures sur le terrain avec la méthode PEMS. Les essais sont effectués en mixant des conditions urbaines (0-50 km/h), rurales (50-75 km/h) et autoroutières (> 75 km/h), avec des ratios de ces conditions dépendant de la catégorie du véhicule. Un test ISC est requis dans les 18 mois suivant la première immatriculation, sur un véhicule immatriculé dans l'UE qui a parcouru un minimum de 25 000 km.

Les autorités d'homologation peuvent demander que le véhicule soit testé avec une charge utile comprise entre 10 et 100 %.

Un facteur de conformité (CF - Conformity Factor) de 1,5 s'applique aux émissions gazeuses. Pour réussir le test, le 90^{ème} centile des émissions mesurées ne doit pas dépasser la norme d'émission CF × WHTC pour les composants respectifs. À partir de la norme Euro VI-E, les tests ISC incluront le démarrage à froid ainsi qu'une mesure du nombre de particules émises (PN - Particle Number).

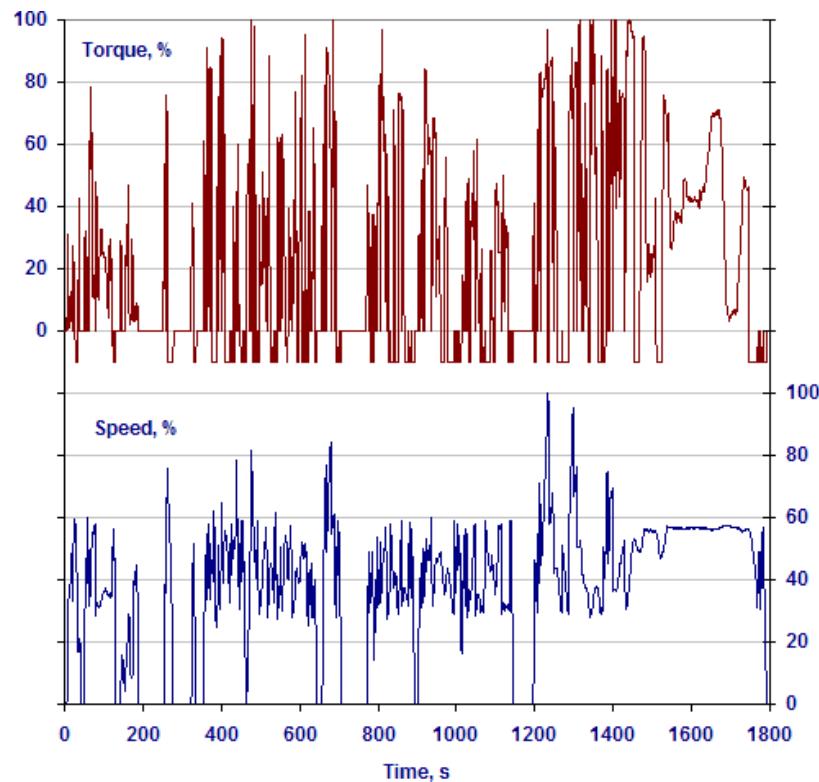


Détails des cycles WHSC et WHTC :

Cycle WHSC (World Harmonized Stationary Cycle) : départ à chaud

Mode	Régime (%)	Charge (%)	Coefficient de pondération	Durée (s) Rampe de 20 s incluse
0 (calibration)	-	-	0,24	-
1	0	0	0,17/2	210
2	55	100	0,02	50
3	55	25	0,1	250
4	55	70	0,03	75
5	35	100	0,02	50
6	25	25	0,08	200
7	45	70	0,03	75
8	45	25	0,06	150
9	55	50	0,05	125
10	75	100	0,02	50
11	35	50	0,08	200
12	35	25	0,1	250
13	0	0	0,17/2	210
TOTAL			1	1 895

Cycle WHTC (World Harmonized Transient Cycle) : départ à chaud et à froid



14.3. Projet de réglementation des émissions de CO₂ des véhicules lourds

Avant 2019, les émissions de CO₂ des véhicules lourds n'étaient pas réglementées en Europe (contrairement à d'autres pays comme le Japon, les Etats-Unis, le Canada et la Chine). En effet, seuls les moteurs (et non pas les véhicules) étaient homologués sur banc, avec simplement des seuils à respecter concernant les émissions de certains polluants (cf. partie ci-dessus).

Grâce au règlement (UE) 2018/956 du Parlement européen et du Conseil du 28 juin 2018 concernant la surveillance et la communication des données relatives aux émissions de CO₂ et à la consommation de carburant des véhicules utilitaires lourds neufs, à partir du 1^{er} janvier 2019, tous les véhicules lourds vendus en Europe devront être accompagnés d'une déclaration de consommation de carburant et d'émissions de CO₂.

Pour cela, l'outil VECTO (Vehicle Energy Consumption Calculation Tool) ou « outil de simulation de consommation d'un véhicule », développé par l'Université de Graz en Autriche en 2014 sur commande de la direction générale climat de la Commission européenne en 2010, permet de calculer un niveau d'émission de CO₂ et de consommation de carburant précis pour chaque configuration de véhicule.

Tous les composants qui ont une influence sur la consommation comme les pneumatiques, l'aérodynamique, la chaîne de propulsion, le poids, les essieux, etc. sont mesurés séparément. Les résultats alimentent ensuite l'outil de calcul VECTO qui effectuera une simulation pour évaluer les émissions de CO₂. Même s'il ne s'agit que d'une simulation informatique, les données d'entrée auront été obtenues par des essais physiques de chaque composant.

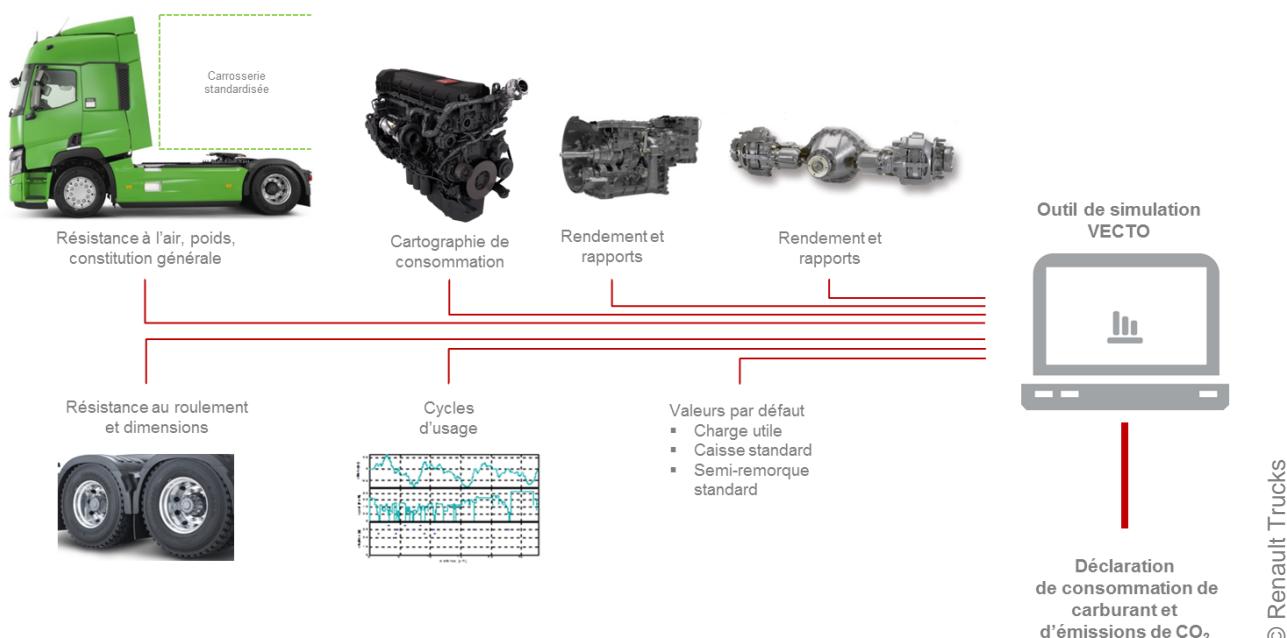


Figure 63 : Principe général du fonctionnement de Vecto

Bien qu'établis à partir de données issues d'essais physiques, les résultats définitifs demeurent le fruit d'une simulation informatique standardisée et non d'une mesure en conditions réelles d'exploitation. Les valeurs déclarées ne peuvent par conséquent pas couvrir tous les usages des exploitants. Néanmoins elles permettent de mieux comprendre l'incidence des différents facteurs mesurés et sont une aide à la décision dans la comparaison des offres des constructeurs.

Le logiciel de simulation est téléchargeable sur la page du site de Commission Européenne :

https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/vecto_en

Pour l'instant, seuls les véhicules lourds de plus de 16 t sont concernés¹⁶. La méthodologie pour les autobus et autocars est en cours d'implémentation (ainsi que pour les véhicules électriques hybrides). Les véhicules de moins de 16 t seront ensuite implémentés. Comme l'outil ne concerne que les émissions du réservoir à la roue, les véhicules électriques ne sont pas impactés.

¹⁶ Concrètement, en 2019, seuls les véhicules lourds (hors bus et cars) de plus de 16 t sont concernés. En 2020, les plus de 7,5 t seront intégrés. A plus long terme les plus de 5 t ainsi que les bus et cars seront inclus.

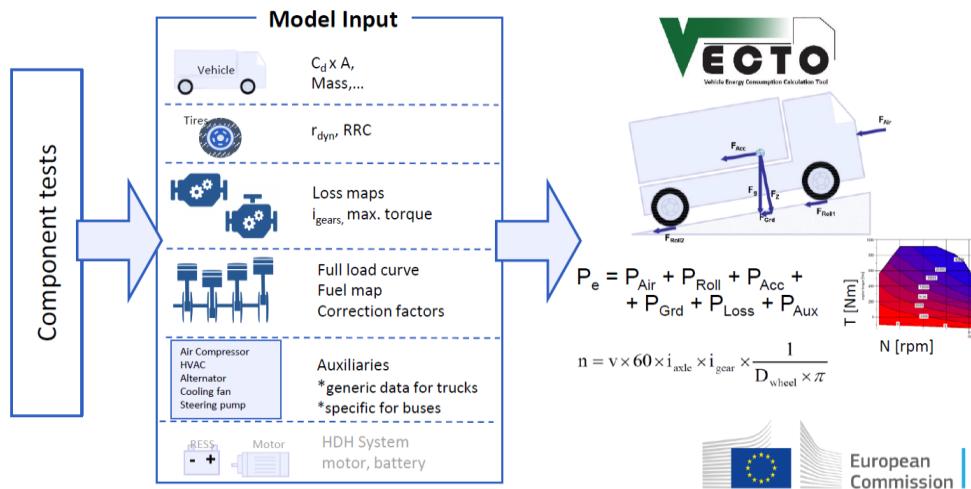


Figure 64 : Schéma de la méthode Vecto

En parallèle, le Conseil de l'UE et le Parlement européen sont parvenus, dans la nuit de lundi 18 à mardi 19 février 2019, à un accord en trilogue sur le règlement fixant, pour la première fois dans l'UE, des normes pour les émissions de CO₂ des poids lourds neufs. Leurs rejets carbone devront être 30 % inférieurs en 2030 par rapport à ceux de 2019.

Les constructeurs de poids lourds qui ne respectent pas cet objectif « devront s'acquitter d'une pénalité financière prenant la forme d'une prime sur les émissions excédentaires », précise le Conseil. Un objectif intermédiaire de -15 % entre 2019 et 2025 a également été adopté.

Les véhicules basses émissions devront représenter 2 % de part de marché en 2025 sur les ventes de nouveaux véhicules. Le texte prévoit également que la Commission propose un objectif post-2030 dès 2022 et qu'il soit « aligné sur l'Accord de Paris ».

À la suite de cet accord politique provisoire, le texte du règlement devra être officiellement approuvé par le Parlement européen et le Conseil, ce dernier prévoyant une adoption formelle d'ici à la fin du mois de mai. Dès son approbation par les deux collégislateurs, le règlement sera publié au Journal officiel de l'Union européenne et entrera immédiatement en vigueur.

La notion de véhicule à faible émission a été officialisée en France en janvier 2017 avec la parution d'une série de décrets définissant un véhicule à faible émission afin de répondre à l'obligation de renouvellement d'une partie des flottes de véhicules de l'Etat et des collectivités par des véhicules à faibles niveaux d'émissions (50 % pour l'Etat et 20 % pour les collectivités).

Le décret n° 2017-23 du 11 janvier 2017 pris pour l'application de l'article L. 224-8 du code de l'environnement définit ainsi les critères caractérisant les autobus et autocars à faibles émissions comme les véhicules neufs des catégories M2 et M3 suivants :

- Groupe 1 : Véhicules dont la motorisation est électrique, y compris les véhicules alimentés par une pile à combustible à hydrogène, ou utilise un carburant gazeux si une fraction¹⁷ du gaz consommé est d'origine renouvelable.
- Groupe 2 : Véhicules dont la motorisation est électrique-hybride, ou utilise un carburant gazeux ou les véhicules dont les moteurs sont conçus pour ne fonctionner qu'avec des carburants très majoritairement d'origine renouvelable.

Les véhicules du groupe 1 sont toujours considérés comme des véhicules à faibles émissions. Selon que l'itinéraire s'inscrit majoritairement ou non dans une liste de territoires précisés dans le décret, les véhicules du groupe 2 le sont également mais sous certaines conditions (fonctionnement uniquement en mode électrique, état du réseau électrique ou gazier, coûts économiquement acceptables, ...). Pour les « autres territoires », les véhicules des groupes 1 et 2 ainsi que les véhicules diesel Euro VI sont considérés comme des autobus et autocars à faibles émissions.

A noter qu'il est prévu une révision de ce décret courant 2019.

¹⁷ Cette fraction de gaz renouvelable est au minimum de 20 % à partir du 1^{er} janvier 2020 et de 30 % à partir du 1^{er} janvier 2025.



15. Annexe 2 – Eléments de réflexion sur l'économie des filières

Les différents éléments de coûts collectés à travers la recherche bibliographique, disponibles par paquets homogènes pour une ou plusieurs composantes de coûts et pour un ou plusieurs types de motorisations, permettent de dresser un tableau comparatif des coûts entre les différentes filières technologiques traitées dans ce panorama.

Une motorisation diesel Euro VI sur un bus standard 12 m sert de référence aux calculs des coûts.

Précautions d'usage sur l'analyse des résultats :

- Les valeurs indiquées sont des valeurs moyennes.
- La plupart des coûts proviennent de sources différentes, pas forcément exactement sur les mêmes périmètres d'analyse, mais ont été ramenés à des valeurs unitaires (coût par véhicule, coût par km, ...) afin d'être comparés entre eux.
- Les coûts d'acquisition portent sur un véhicule standard 12 m. La dispersion reste importante en fonction des technologies à l'intérieur d'une même filière (en particulier pour l'hybride), des modèles, des quantités commandées, des options, ...
- Les coûts d'infrastructure regroupent le coût de la mise aux normes des ateliers ainsi que les coûts des stations d'avitaillage. Ces coûts sont assez conséquents et très variables en fonction de la filière énergétique, du type de station retenu, du nombre de véhicules à alimenter (>20 dans les données ci-dessous) et de la configuration du site.
- Le coût de l'énergie est basé sur un coût fixe moyen de l'énergie, alors que la volatilité du prix des carburants est importante, d'autant plus sur une période de 15 ans et que les consommations moyennes peuvent varier fortement en fonction des lignes opérées.
- Les améliorations technologiques (en particulier sur les batteries) peuvent modifier de façon importante (à la baisse) certains coûts présentés ici.

Ainsi les résultats obtenus ne permettent pas forcément une appropriation en valeur absolue (donnée à titre indicatif) mais plutôt de faire ressortir des grandes tendances entre les différentes options technologiques. Une analyse de faisabilité spécifique doit être effectuée pour s'assurer de la pertinence économique de chaque type de déploiement envisagé sur un réseau donné.

Les hypothèses retenues portent sur un roulage en urbain dense de 40 000 km/an sur une durée de vie de 15 ans.

	Consommation moyenne	Unité	Coût de l'énergie (€/unité d'énergie)	Unité	Coût de l'énergie (€/km)
Diesel Euro VI (référence)	47,8	l_GO/100km	1,2	€/l_GO	0,57
ED95	66,9	l_ED95/100km	0,6	€/l_ED95	0,38
HVO	47,8	l_HVO/100km	1,44	€/l_HVO	0,69
GTL	47,8	l_GTL/100km	1,26	€/l_GTL	0,60
GNC	37,3	kg_GNV/100km	0,6	€/kg_GNC	0,22
bioGNC	37,3	kg_GNV/100km	0,72	€/kg_GNC	0,27
GNL	37,3	kg_GNV/100km	0,8	€/kg_GNL	0,30
Hybride	38,2	l_GO/100km	1,2	€/l_GO	0,46
Hybride rechargeable	15,0 156	l_GO/100km kWh/100km	1,2 0,07	€/l_GO €/kWh	0,29
Tout électrique	156	kWh/100km	0,07	€/kWh	0,11
Hydrogène	10	kg_H2/100km	7	€/kg_H2	0,70

Tableau 3 : Hypothèses de calcul du coût de l'énergie pour les différentes filières



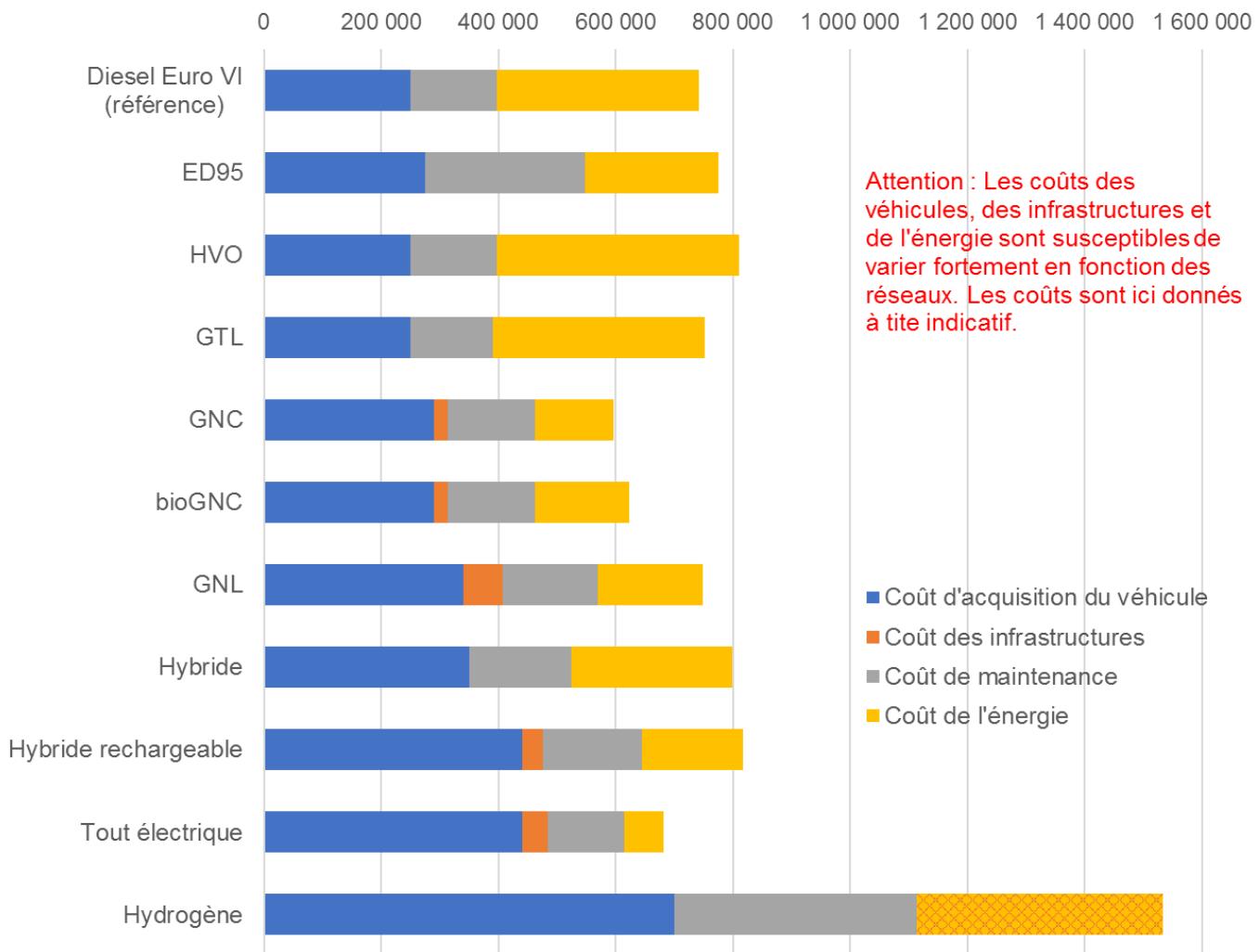


Figure 65 : Coût total de détention (TCO, en €) d'un bus standard 12 m sur sa durée de vie

NB : Pour les filières électriques, le coût des batteries (avec 1 changement du pack de batteries au bout de 7 ans) est inclus dans le coût d'acquisition du véhicule / Pour la filière hydrogène, le coût des infrastructures est inclus dans le coût de l'énergie

Le coût d'acquisition du véhicule augmente en fonction des filières : diesel → gaz → électrique (à cause des batteries).

Le coût de l'énergie des filières gaz et électriques est moins élevé que celui des filières de transition.

Seules les filières gaz et électriques (y compris la filière hydrogène) sont impactées par le coût des infrastructures.

La filière hydrogène possède le coût de détention le plus élevé.

L'analyse coût-bénéfice pour la collectivité, prenant en compte la monétarisation des externalités négatives, n'a pas été effectuée dans cette annexe. Des résultats pour plusieurs filières (diesel, GNV, hybrides et électrique) sont présentés dans le rapport « Analyse des coûts bénéfices des véhicules électriques : autobus et autocars » du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) paru en octobre 2018. D'autres résultats sont également disponibles dans l'étude E4T pour les filières diesel, hybrides et électriques, menée par l'IFPEN pour le compte de l'ADEME courant 2018 (<https://www.ademe.fr/bilan-transversal-limpact-lelectrification-segment>).



16. Annexe 3 – Facteurs d'émissions pour les autobus

16.1. Base de données ADEME

La base de données de l'ADEME permet de calculer des facteurs d'émissions pour le rejet des principaux polluants réglementés, du CO₂ ainsi que pour la consommation de carburant des véhicules lourds de plusieurs types (autobus, autocars, camions, bennes à ordures ménagères).

Ces facteurs sont extraits de mesures effectuées sur le banc à rouleau de l'UTAC ou du VTT (laboratoire finlandais) et sont représentatifs d'un roulage en milieu urbain embouteillé en ce qui concerne les bus standards.

Les conditions d'essai sont les suivantes : autobus lesté à 50 % de sa charge utile, pente nulle et mesures répétées 6 fois puis moyennées.

Facteurs d'émissions par filière sur cycle ADEME/RATP										
Filière	Norme EURO	CO (g/km)	HC NM (g/km)	CH4 (g/km)	HCt (g/km)	Part (g/km)	Nox (g/km)	CO2 combustion (g/km)	Consommation (L/100km ou Nm3/100km)	CO2 amont et combustion (g/km)
Hybride diesel électrique	Hybride EEV	2,18			0,03	0,13	13,15	1070	40,8	1292
Diesel	Diesel EURO 6	0,02			0,01	0,01	4,17			
	Diesel EEV	0,48			0,04	0,06	11,68	1473	56,1	1779
	Diesel EURO 4	1,06			0,10	0,06	18,68	1484	56,5	1792
	Diesel EURO 3	2,38			1,03	0,18	19,51	1562	59,5	1887
	Diesel EURO 2	3,59			1,03	0,46	27,96	1544	58,8	1865
GNV	GNV EURO 6	0,52	0,02	0,02	0,04	NM	0,24			
	GNV EEV	1,61	0,02	0,28	0,30	0,01	1,50	1677	83,5	1894
	GNV EURO 4	2,71	0,02	0,28	0,30	0,01	1,90	1744	86,8	1970
	GNV EURO 3	3,55	0,40	1,14	1,54	0,02	8,41	1713	85,2	1935
	GNV EURO 2	4,80	0,40	7,75	8,15	0,03	12,18	1705	84,8	1926
Biogaz (calcul)	Biogaz EURO 6 (calcul)	0,52	0,02	0,02	0,04	NM	0,24			
	Biogaz EEV (calcul)	1,61	0,02	0,28	0,30	0,01	1,50	1677	83,5	464
	Biogaz EURO 4 (calcul)	2,71	0,02	0,28	0,30	0,01	1,90	1744	86,8	482
	Biogaz EURO 3 (calcul)	3,55	0,40	1,14	1,54	0,02	8,41	1713	85,2	474
	Biogaz EURO 2 (calcul)	4,80	0,40	7,75	8,15	0,03	12,18	1705	84,8	472

Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- Facteur d'émission gazole amont et combustion (kg CO₂/L) : 3,17 (www.bilans-ges.ademe.fr)
- Facteur d'émission GNV amont et combustion (kg CO₂/m³) : 2,27 (www.bilans-ges.ademe.fr)
- Facteur d'émission biométhane carburant amont et combustion (g CO₂/MJ) : 17 (valeur issue de la directive ENR 2009, avec un biogaz produit à partir de déchets organiques ménagers et utilisé comme gaz naturel comprimé)
- Facteur d'émission biométhane carburant amont et combustion (g CO₂/m³) : 555,9 (Calcul ADEME à partir de la valeur ci-dessus).

16.2. Logiciel COPERT

Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport (COPERT 5) est un logiciel qui permet de calculer des émissions polluantes réglementées pour le secteur des transports : <https://copert.emisia.com/>.

Il est développé par l'Agence européenne de l'environnement (EEA) et le laboratoire de la Commission européenne (JRC).

COPERT 5 (mis en ligne en septembre 2016, la dernière version de novembre 2018 est la 5.2.1) est une version actualisée de COPERT 4 incluant des éléments méthodologiques révisés et une nouvelle interface.

L'approche est la suivante : des tests physiques sont réalisés sur des véhicules et sur des bancs moteurs, puis un modèle numérique est créé par famille de véhicule et permet de simuler les émissions polluantes pour chaque cycle de roulage. Chaque cycle ayant sa propre vitesse moyenne, on associe ainsi chaque facteur d'émission (CO, HC, ...) à la vitesse moyenne du cycle, ce qui permet in fine d'obtenir une courbe : facteur d'émission = f (V_{moyenne}).

Les facteurs d'émissions dépendent ainsi de la vitesse véhicule (mais on peut aussi faire varier la charge, la pente, etc.), et sont disponibles ici : <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>.



NB : Les facteurs d'émissions présentés ci-après sont issus de COPERT 5 (le choix des vitesses moyennes de 11, 20, et 30 km/h a été fait de manière arbitraire). Les conditions d'essais relatives aux tableaux portent sur un autobus lesté à 50 % de sa charge utile et une pente nulle.

Les hypothèses de calcul suivantes (www.bilans-ges.ademe.fr) ont été posées : PCI gazole = 42 MJ/kg, densité gazole = 0,845 kg/L, PCI gaz naturel = 49,6 MJ/kg, densité gaz naturel = 0,654 kg/m³, facteur d'émission gazole amont+combustion (kg) = 3,17 kg CO₂eq/L et facteur d'émission gaz naturel amont+combustion = 2,27 kgCO₂eq/m³.

en vert = valeur COPERT en orange = valeur calculée

16.2.1. Bus diesel 12 m

Vitesse moyenne : 11 km/h							
Norme EURO	CO (g/km)	COV (g/km)	PM (g/km)	NOx (g/km)	Consommation (g/km)	Consommation (L/100 km)	CO ₂ eq (g/km) du puits à la roue
I	4,68	1,50	0,71	16,19	516	61,1	1 936
II	4,21	1,05	0,33	17,80	487	57,6	1 827
III	4,34	0,92	0,34	18,75	513	60,7	1 926
IV (EGR)	2,28	0,11	0,08	9,48	414	49,0	1 553
IV (SCR)	2,28	0,11	0,08	9,48	414	49,0	1 553
V (EGR)	2,16	0,25	0,07	9,30	429	50,8	1 611
V (SCR)	5,14	0,05	0,10	14,25	415	49,1	1 557
VI	0,48	0,07	0,01	0,88	426	50,5	1 600

Vitesse moyenne : 20 km/h							
Norme EURO	CO (g/km)	COV (g/km)	PM (g/km)	NOx (g/km)	Consommation (g/km)	Consommation (L/100 km)	CO ₂ eq (g/km) du puits à la roue
I	2,90	0,94	0,48	11,37	364	43,1	1 366
II	2,70	0,65	0,22	12,45	349	41,3	1 309
III	3,02	0,61	0,23	11,28	367	43,4	1 375
IV (EGR)	1,43	0,08	0,06	6,77	336	39,8	1 261
IV (SCR)	1,43	0,08	0,06	6,77	336	39,8	1 261
V (EGR)	1,18	0,16	0,06	5,86	336	39,8	1 261
V (SCR)	2,93	0,04	0,07	8,67	322	38,2	1 210
VI	0,30	0,05	0,01	0,55	333	39,4	1 249



Vitesse moyenne : 30 km/h							
Norme EURO	CO (g/km)	COV (g/km)	PM (g/km)	NOx (g/km)	Consommation (g/km)	Consommation (L/100 km)	CO ₂ eq (g/km) du puits à la roue
I	2,20	0,66	0,36	9,29	293	34,7	1 100
II	1,89	0,45	0,18	9,99	284	33,6	1 066
III	2,07	0,42	0,17	8,43	298	35,3	1 118
IV (EGR)	1,04	0,06	0,04	5,45	281	33,2	1 053
IV (SCR)	1,04	0,06	0,04	5,45	281	33,2	1 053
V (EGR)	0,80	0,12	0,05	4,38	280	33,2	1 051
V (SCR)	2,07	0,03	0,05	5,67	268	31,8	1 007
VI	0,22	0,04	0,00	0,38	277	32,7	1 038

16.2.2. Bus diesel 18 m

Vitesse moyenne : 11 km/h							
Norme EURO	CO (g/km)	COV (g/km)	PM (g/km)	NOx (g/km)	Consommation (g/km)	Consommation (L/100 km)	CO ₂ eq (g/km) du puits à la roue
I	5,58	1,62	0,83	19,38	617	73,0	2 314
II	5,66	1,14	0,43	21,29	568	67,2	2 131
III	5,82	0,99	0,38	22,18	614	72,7	2 305
IV (EGR)	2,69	0,13	0,10	11,41	520	61,5	1 951
IV (SCR)	2,69	0,13	0,10	11,41	520	61,5	1 951
V (EGR)	2,76	0,27	0,08	11,50	550	65,1	2 065
V (SCR)	6,60	0,06	0,12	15,31	521	61,6	1 953
VI	0,59	0,08	0,01	0,68	544	64,4	2 042

Vitesse moyenne : 20 km/h							
Norme EURO	CO (g/km)	COV (g/km)	PM (g/km)	NOx (g/km)	Consommation (g/km)	Consommation (L/100 km)	CO ₂ eq (g/km) du puits à la roue
I	3,94	1,01	0,60	14,35	457	54,1	1 713
II	3,71	0,68	0,30	15,31	443	52,4	1 661
III	3,98	0,64	0,28	13,91	459	54,3	1 721
IV (EGR)	1,74	0,10	0,07	8,84	425	50,3	1 595
IV (SCR)	1,74	0,10	0,07	8,84	425	50,3	1 595
V (EGR)	1,45	0,18	0,07	7,29	430	50,9	1 612
V (SCR)	3,75	0,04	0,08	8,51	411	48,7	1 543
VI	0,32	0,05	0,01	0,47	424	50,2	1 590

Vitesse moyenne : 30 km/h							
Norme EURO	CO (g/km)	COV (g/km)	PM (g/km)	NOx (g/km)	Consommation (g/km)	Consommation (L/100 km)	CO ₂ eq (g/km) du puits à la roue
I	2,90	0,72	0,45	11,84	375	44,4	1 408
II	2,54	0,49	0,24	12,47	365	43,1	1 368
III	2,66	0,45	0,21	10,56	380	44,9	1 424
IV (EGR)	1,29	0,07	0,05	7,12	366	43,4	1 374
IV (SCR)	1,29	0,07	0,05	7,12	366	43,4	1 374
V (EGR)	0,95	0,14	0,06	5,44	360	42,6	1 349
V (SCR)	2,60	0,03	0,06	5,23	346	41,0	1 298
Euro VI	0,21	0,04	0,01	0,36	354	41,9	1 328

16.2.3. Bus GNV 12 m en milieu urbain

Norme EURO	CO (g/km)	COV (g/km)	PM (g/km)	NOx (g/km)	Consommation (g/km)	Consommation (Nm ³ /100 km)	CO ₂ eq (g/km) du puits à la roue
Euro I	8,4	7	0,02	16,5	537	82	1 864
Euro II	2,7	4,7	0,01	15,0	498	76	1 730
Euro III	1,0	1,3	0,01	10,0	440	67	1 528
EEV	1,0	1,0	0,01	4,1	401	61	1 392

16.3. Guide HBEFA

Le guide « HandBook Emission FActors for road transport » (HBEFA) est un recueil de facteurs d'émissions pour tout type de véhicule (véhicules particuliers, véhicules utilitaires, autobus, autocars, camions et deux roues motorisés), répartis par type de voirie (urbain, péri-urbain, etc.) et par niveau de saturation du trafic associé (fluide, congestionné, etc.). Plus d'informations sur : www.hbefa.net/e/index.html.

Il recense les polluants réglementés, les principaux polluants non réglementés, ainsi que les émissions de CO₂ et la consommation de carburant des véhicules en g/km.

Il est développé par un consortium composé des principales agences de protection de l'environnement européennes (dont notamment celles de l'Allemagne/Suisse/Autriche qui ont initié le mouvement, suivies ensuite par celles de la Suède/Norvège/France) ainsi que du laboratoire de la commission européenne (Joint Research Center/JRC).

Les données d'entrée (tests physiques sur véhicules et sur bancs moteurs) et la méthodologie utilisée (modèle numérique de véhicule) sont identiques à celles de COPERT ; seule la présentation et l'usage des résultats est différente (cf. §16.4 « Quels facteurs faut-il utiliser ? »).

La dernière version est l'HBEFA 3.3 qui date d'avril 2017. Par rapport à la version 3.2, cette mise à jour n'impacte que les émissions de NOx à chaud des véhicules particuliers diesel.

HBEFA est une application fonctionnant sous Microsoft Access 2010. Elle est téléchargeable au tarif de 250 € pour les nouveaux utilisateurs d'HBEFA et 150 € pour les utilisateurs d'une ancienne version 1.x ou 2.x.

NB : Les tableaux ci-dessous sont une extraction des données HBEFA pour des bus 12 m et 18 m. Les conditions d'essais relatives à ces tableaux portent sur un autobus lesté à 50 % de sa charge utile, une pente nulle, un type de voirie route type nationale (vitesse limitée à 70 km/h) et ville (vitesse limitée à 50 km/h) et enfin un niveau de saturation du trafic congestionné, saturé, dense et fluide.

Les hypothèses de calcul suivantes (www.bilans-ges.ademe.fr) ont été posées : densité gazole (kg/L) = 0,845 et densité gaz naturel (kg/m³) = 0,654.



En rouge = valeurs calculées

16.3.1. Bus diesel

Type de traffic/Type de bus/Norme EURO	CO (g/km)	HC (g/km)	PM (g/km)	Nox (g/km)	CO2 (g/km)	mcarb (g/km)	Consommation (L/100km)
URB/Nationale(Transit)/70/Congestion							
Bus urbain Std >15-18t Euro-I	3,91	1,30	0,62	14,17	1425	448,80	53,1
Bus urbain Std >15-18t Euro-II	3,75	0,89	0,28	15,66	1345	423,61	50,1
Bus urbain Std >15-18t Euro-III	3,95	0,81	0,29	15,61	1413	445,09	52,7
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV EGR	1,94	0,10	0,07	8,37	1195	376,40	44,5
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV SCR	4,45	0,04	0,08	14,18	1152	362,96	43,0
Bus urbain Std >15-18t Euro-V EGR	1,65	0,22	0,07	7,57	1206	379,94	45,0
Bus urbain Std >15-18t Euro-V SCR	3,74	0,05	0,08	12,18	1173	369,31	43,7
Bus urbain Std >15-18t Euro-VI	0,41	0,07	0,01	0,97	1199	377,58	44,7
Bus urbain Artic >18t Euro-I	4,89	1,39	0,74	17,32	1726	543,64	64,3
Bus urbain Artic >18t Euro-II	5,28	0,95	0,38	18,87	1651	519,92	61,5
Bus urbain Artic >18t Euro-III	5,31	0,86	0,34	18,66	1720	541,73	64,1
Bus urbain Artic >18t Euro-IV EGR	2,31	0,11	0,09	10,55	1502	473,12	56,0
Bus urbain Artic >18t Euro-IV SCR	5,93	0,05	0,10	15,50	1445	455,04	53,9
Bus urbain Artic >18t Euro-V EGR	2,14	0,24	0,08	9,21	1512	476,37	56,4
Bus urbain Artic >18t Euro-V SCR	4,94	0,05	0,10	13,09	1460	459,89	54,4
Bus urbain Artic >18t Euro-VI	0,46	0,07	0,01	0,82	1497	471,42	55,8
URB/Nationale(Transit)/70/Saturé							
Bus urbain Std >15-18t Euro-I	1,65	0,51	0,28	8,00	771	242,78	28,7
Bus urbain Std >15-18t Euro-II	1,45	0,35	0,15	8,63	757	238,33	28,2
Bus urbain Std >15-18t Euro-III	1,56	0,32	0,14	7,04	795	250,32	29,6
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV EGR	0,82	0,05	0,04	4,76	762	240,08	28,4
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV SCR	1,89	0,02	0,04	5,57	735	231,52	27,4
Bus urbain Std >15-18t Euro-V EGR	0,58	0,10	0,04	3,73	765	241,04	28,5
Bus urbain Std >15-18t Euro-V SCR	1,73	0,02	0,04	4,14	732	230,49	27,3
Bus urbain Std >15-18t Euro-VI	0,14	0,03	0,00	0,22	753	237,28	28,1
Bus urbain Artic >18t Euro-I	2,22	0,56	0,36	10,32	994	313,05	37,0
Bus urbain Artic >18t Euro-II	1,92	0,38	0,20	10,83	981	309,10	36,6
Bus urbain Artic >18t Euro-III	1,99	0,34	0,17	8,93	1018	320,59	37,9
Bus urbain Artic >18t Euro-IV EGR	1,01	0,06	0,04	6,23	999	314,51	37,2
Bus urbain Artic >18t Euro-IV SCR	2,37	0,03	0,05	5,34	964	303,66	35,9
Bus urbain Artic >18t Euro-V EGR	0,67	0,11	0,04	4,67	1002	315,48	37,3
Bus urbain Artic >18t Euro-V SCR	2,15	0,03	0,05	3,61	959	302,07	35,7
Bus urbain Artic >18t Euro-VI	0,15	0,03	0,00	0,23	982	309,45	36,6
URB/Nationale(Transit)/70/Dense							
Bus urbain Std >15-18t Euro-I	1,66	0,45	0,27	7,81	760	239,49	28,3
Bus urbain Std >15-18t Euro-II	1,41	0,31	0,15	8,27	750	236,27	28,0
Bus urbain Std >15-18t Euro-III	1,52	0,28	0,13	6,60	783	246,47	29,2
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV EGR	0,77	0,05	0,03	4,59	764	240,75	28,5
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV SCR	1,73	0,02	0,04	4,80	736	231,89	27,4
Bus urbain Std >15-18t Euro-V EGR	0,49	0,09	0,04	3,47	768	242,00	28,6
Bus urbain Std >15-18t Euro-V SCR	1,57	0,02	0,04	3,38	733	231,00	27,3
Bus urbain Std >15-18t Euro-VI	0,12	0,03	0,00	0,19	755	237,77	28,1
Bus urbain Artic >18t Euro-I	2,28	0,51	0,36	10,17	992	312,50	37,0
Bus urbain Artic >18t Euro-II	1,86	0,35	0,20	10,47	986	310,66	36,8
Bus urbain Artic >18t Euro-III	1,95	0,31	0,16	8,50	1015	319,83	37,8
Bus urbain Artic >18t Euro-IV EGR	0,96	0,06	0,04	6,03	1011	318,47	37,7
Bus urbain Artic >18t Euro-IV SCR	2,09	0,03	0,04	4,61	977	307,76	36,4
Bus urbain Artic >18t Euro-V EGR	0,54	0,10	0,04	4,36	1014	319,51	37,8
Bus urbain Artic >18t Euro-V SCR	1,86	0,03	0,04	3,00	972	305,99	36,2
Bus urbain Artic >18t Euro-VI	0,12	0,03	0,00	0,22	994	312,93	37,0
URB/Nationale(Transit)/70/Fluide							
Bus urbain Std >15-18t Euro-I	1,70	0,40	0,26	7,36	718	226,12	26,8
Bus urbain Std >15-18t Euro-II	1,44	0,28	0,16	7,78	712	224,10	26,5
Bus urbain Std >15-18t Euro-III	1,51	0,25	0,13	6,05	743	234,07	27,7
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV EGR	0,72	0,04	0,03	4,28	729	229,45	27,2
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV SCR	1,54	0,02	0,03	3,54	698	219,96	26,0
Bus urbain Std >15-18t Euro-V EGR	0,44	0,08	0,03	3,13	731	230,25	27,2
Bus urbain Std >15-18t Euro-V SCR	1,45	0,02	0,03	2,25	694	218,54	25,9
Bus urbain Std >15-18t Euro-VI	0,12	0,02	0,00	0,18	717	225,90	26,7
Bus urbain Artic >18t Euro-I	2,26	0,45	0,34	9,42	924	291,02	34,4
Bus urbain Artic >18t Euro-II	1,89	0,31	0,21	9,71	919	289,35	34,2
Bus urbain Artic >18t Euro-III	1,95	0,28	0,16	7,75	948	298,62	35,3
Bus urbain Artic >18t Euro-IV EGR	0,88	0,05	0,04	5,43	942	296,60	35,1
Bus urbain Artic >18t Euro-IV SCR	1,75	0,02	0,04	3,39	907	285,56	33,8
Bus urbain Artic >18t Euro-V EGR	0,49	0,09	0,04	3,84	943	297,16	35,2
Bus urbain Artic >18t Euro-V SCR	1,63	0,02	0,04	2,09	900	283,40	33,5
Bus urbain Artic >18t Euro-VI	0,13	0,03	0,00	0,22	923	290,72	34,4



Type de traffic/Type de bus/Norme EURO	CO (g/km)	HC (g/km)	PM (g/km)	Nox (g/km)	CO2 (g/km)	mcarb (g/km)	Consommation (L/100km)
URB/Nationale(Ville)/50/Congestion							
Bus urbain Std >15-18t Euro-I	4,35	1,42	0,67	15,39	1517	477,67	56,5
Bus urbain Std >15-18t Euro-II	3,88	1,00	0,30	17,07	1432	451,08	53,4
Bus urbain Std >15-18t Euro-III	4,07	0,89	0,31	17,57	1510	475,53	56,3
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV EGR	2,18	0,11	0,07	9,19	1254	394,82	46,7
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV SCR	4,88	0,05	0,09	15,60	1217	383,30	45,4
Bus urbain Std >15-18t Euro-V EGR	1,90	0,24	0,07	8,70	1236	389,18	46,1
Bus urbain Std >15-18t Euro-V SCR	4,42	0,05	0,09	13,40	1205	379,38	44,9
Bus urbain Std >15-18t Euro-VI	0,51	0,07	0,01	1,30	1229	387,06	45,8
Bus urbain Artic >18t Euro-I	5,39	1,54	0,78	18,62	1827	575,57	68,1
Bus urbain Artic >18t Euro-II	5,25	1,07	0,38	20,40	1734	546,16	64,6
Bus urbain Artic >18t Euro-III	5,29	0,95	0,35	20,88	1811	570,31	67,5
Bus urbain Artic >18t Euro-IV EGR	2,58	0,12	0,09	11,48	1559	490,93	58,1
Bus urbain Artic >18t Euro-IV SCR	6,44	0,06	0,12	17,62	1503	473,45	56,0
Bus urbain Artic >18t Euro-V EGR	2,50	0,27	0,08	10,53	1544	486,38	57,6
Bus urbain Artic >18t Euro-V SCR	5,77	0,06	0,12	14,71	1491	469,47	55,6
Bus urbain Artic >18t Euro-VI	0,60	0,08	0,01	1,03	1530	481,74	57,0
URB/Nationale(Ville)/50/Saturé							
Bus urbain Std >15-18t Euro-I	2,88	0,82	0,45	11,10	1122	353,30	41,8
Bus urbain Std >15-18t Euro-II	2,58	0,56	0,24	11,96	1082	340,85	40,3
Bus urbain Std >15-18t Euro-III	2,78	0,51	0,22	10,44	1131	356,26	42,2
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV EGR	1,29	0,08	0,05	6,55	1057	332,88	39,4
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV SCR	2,99	0,03	0,06	9,09	1017	320,41	37,9
Bus urbain Std >15-18t Euro-V EGR	1,04	0,15	0,06	5,47	1061	334,25	39,6
Bus urbain Std >15-18t Euro-V SCR	2,62	0,03	0,06	7,38	1015	319,77	37,8
Bus urbain Std >15-18t Euro-VI	0,26	0,04	0,01	0,40	1048	330,04	39,1
Bus urbain Artic >18t Euro-I	3,93	0,89	0,58	14,24	1429	450,14	53,3
Bus urbain Artic >18t Euro-II	3,55	0,61	0,32	15,04	1393	488,89	51,9
Bus urbain Artic >18t Euro-III	3,68	0,55	0,26	13,20	1443	454,35	53,8
Bus urbain Artic >18t Euro-IV EGR	1,60	0,09	0,07	8,66	1384	435,86	51,6
Bus urbain Artic >18t Euro-IV SCR	3,88	0,04	0,07	8,94	1331	419,11	49,6
Bus urbain Artic >18t Euro-V EGR	1,24	0,17	0,07	6,82	1390	437,94	51,8
Bus urbain Artic >18t Euro-V SCR	3,26	0,04	0,07	6,74	1330	418,97	49,6
Bus urbain Artic >18t Euro-VI	0,28	0,05	0,01	0,39	1368	430,96	51,0
URB/Nationale(Ville)/50/Dense							
Bus urbain Std >15-18t Euro-I	1,93	0,71	0,32	8,06	791	249,07	29,5
Bus urbain Std >15-18t Euro-II	1,64	0,51	0,16	8,87	771	242,89	28,7
Bus urbain Std >15-18t Euro-III	1,88	0,49	0,18	7,12	824	259,51	30,7
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV EGR	1,04	0,06	0,04	4,52	776	244,44	28,9
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV SCR	2,01	0,03	0,05	7,60	739	232,87	27,6
Bus urbain Std >15-18t Euro-V EGR	0,86	0,13	0,05	4,06	780	245,63	29,1
Bus urbain Std >15-18t Euro-V SCR	1,87	0,03	0,05	6,33	737	232,02	27,5
Bus urbain Std >15-18t Euro-VI	0,26	0,04	0,01	0,50	775	243,96	28,9
Bus urbain Artic >18t Euro-I	2,24	0,76	0,37	9,96	965	304,00	36,0
Bus urbain Artic >18t Euro-II	2,01	0,54	0,20	10,83	951	299,54	35,4
Bus urbain Artic >18t Euro-III	2,22	0,51	0,21	8,62	1007	317,30	37,6
Bus urbain Artic >18t Euro-IV EGR	1,22	0,07	0,05	5,73	965	304,04	36,0
Bus urbain Artic >18t Euro-IV SCR	2,58	0,03	0,06	8,29	920	289,71	34,3
Bus urbain Artic >18t Euro-V EGR	0,98	0,14	0,06	4,87	970	305,64	36,2
Bus urbain Artic >18t Euro-V SCR	2,32	0,03	0,06	6,64	917	288,75	34,2
Bus urbain Artic >18t Euro-VI	0,28	0,04	0,01	0,45	960	302,22	35,8
URB/Nationale(Ville)/50/Fluide							
Bus urbain Std >15-18t Euro-I	1,74	0,68	0,31	7,18	743	233,92	27,7
Bus urbain Std >15-18t Euro-II	1,33	0,45	0,15	7,89	688	216,60	25,6
Bus urbain Std >15-18t Euro-III	1,49	0,43	0,16	6,09	734	231,17	27,4
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV EGR	0,88	0,05	0,04	3,94	700	220,59	26,1
Bus urbain Std >15-18t Euro-IV SCR	1,61	0,03	0,04	6,47	672	211,67	25,0
Bus urbain Std >15-18t Euro-V EGR	0,75	0,12	0,05	3,67	704	221,58	26,2
Bus urbain Std >15-18t Euro-V SCR	1,49	0,03	0,04	5,33	669	210,76	24,9
Bus urbain Std >15-18t Euro-VI	0,20	0,04	0,00	0,43	698	219,73	26,0
Bus urbain Artic >18t Euro-I	2,02	0,72	0,34	8,74	888	279,57	33,1
Bus urbain Artic >18t Euro-II	1,60	0,49	0,18	9,60	846	266,59	31,5
Bus urbain Artic >18t Euro-III	1,78	0,46	0,19	7,32	896	282,34	33,4
Bus urbain Artic >18t Euro-IV EGR	1,02	0,06	0,04	4,91	875	275,54	32,6
Bus urbain Artic >18t Euro-IV SCR	2,00	0,03	0,05	7,17	837	263,63	31,2
Bus urbain Artic >18t Euro-V EGR	0,87	0,13	0,06	4,38	879	276,82	32,8
Bus urbain Artic >18t Euro-V SCR	1,84	0,03	0,05	5,62	834	262,53	31,1
Bus urbain Artic >18t Euro-VI	0,24	0,04	0,01	0,41	869	273,63	32,4



16.3.2. Bus GNV

Type de traffic/Type de bus/Norme EURO	CO (g/km)	HC (g/km)	PM (g/km)	Nox (g/km)	CO2 (g/km)	mcarb (g/km)	Consommation (Nm ³ /100km)
URB/Nationale(Transit)/70/Congestion							
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-II	3,85	0,95	0,30	15,95	1335	486,53	74,4
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-III	4,02	0,84	0,29	15,84	1402	511,20	78,2
Bus urbain Std >15-18t CNG EEV	0,82	0,44	0,02	4,54	1190	433,67	66,3
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-II	5,42	1,01	0,39	19,21	1638	597,15	91,3
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-III	5,41	0,89	0,34	18,93	1707	622,20	95,1
Bus urbain Artic >18t CNG EEV	1,07	0,49	0,02	5,53	1485	541,45	82,8
URB/Nationale(Transit)/70/Saturé							
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-II	1,48	0,37	0,16	8,79	751	273,73	41,9
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-III	1,59	0,33	0,14	7,15	789	287,51	44,0
Bus urbain Std >15-18t CNG EEV	0,29	0,19	0,01	2,24	748	272,52	41,7
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-II	1,97	0,41	0,21	11,03	974	355,01	54,3
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-III	2,03	0,36	0,17	9,06	1010	368,21	56,3
Bus urbain Artic >18t CNG EEV	0,34	0,22	0,01	2,80	975	355,41	54,3
URB/Nationale(Transit)/70/Dense							
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-II	1,45	0,33	0,15	8,43	744	271,37	41,5
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-III	1,55	0,29	0,13	6,70	776	283,08	43,3
Bus urbain Std >15-18t CNG EEV	0,24	0,17	0,01	2,08	749	273,08	41,8
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-II	1,91	0,37	0,21	10,66	979	356,80	54,6
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-III	1,99	0,32	0,17	8,63	1008	367,33	56,2
Bus urbain Artic >18t CNG EEV	0,27	0,20	0,01	2,61	986	359,41	55,0
URB/Nationale(Transit)/70/Fluide							
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-II	1,48	0,30	0,16	7,92	706	257,39	39,4
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-III	1,54	0,26	0,13	6,14	737	268,84	41,1
Bus urbain Std >15-18t CNG EEV	0,22	0,16	0,01	1,88	712	259,45	39,7
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-II	1,94	0,33	0,22	9,89	912	332,33	50,8
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-III	1,99	0,29	0,16	7,86	941	342,97	52,4
Bus urbain Artic >18t CNG EEV	0,24	0,18	0,01	2,30	916	333,90	51,1

Type de traffic/Type de bus/Norme EURO	CO (g/km)	HC (g/km)	PM (g/km)	Nox (g/km)	CO2 (g/km)	mcarb (g/km)	Consommation (Nm ³ /100km)
URB/Nationale(Ville)/50/Congestion							
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-II	3,98	1,07	0,31	17,38	1421	518,08	79,2
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-III	4,14	0,92	0,32	17,83	1498	546,17	83,5
Bus urbain Std >15-18t CNG EEV	0,95	0,48	0,02	5,22	1219	444,56	68,0
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-II	5,38	1,14	0,40	20,77	1721	627,29	95,9
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-III	5,38	0,99	0,36	21,19	1797	655,02	100,2
Bus urbain Artic >18t CNG EEV	1,25	0,54	0,02	6,32	1518	553,29	84,6
URB/Nationale(Ville)/50/Saturé							
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-II	2,65	0,60	0,25	12,18	1074	391,48	59,9
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-III	2,83	0,53	0,22	10,59	1122	409,18	62,6
Bus urbain Std >15-18t CNG EEV	0,52	0,29	0,01	3,28	1040	379,06	58,0
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-II	3,64	0,65	0,34	15,32	1383	504,08	77,1
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-III	3,75	0,57	0,26	13,40	1431	521,84	79,8
Bus urbain Artic >18t CNG EEV	0,62	0,34	0,01	4,09	1358	494,97	75,7
URB/Nationale(Ville)/50/Dense							
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-II	1,68	0,55	0,17	9,03	765	278,96	42,7
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-III	1,92	0,51	0,19	7,23	818	298,06	45,6
Bus urbain Std >15-18t CNG EEV	0,43	0,26	0,01	2,44	769	280,19	42,8
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-II	2,06	0,58	0,21	11,03	944	344,03	52,6
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-III	2,26	0,53	0,21	8,75	1000	364,43	55,7
Bus urbain Artic >18t CNG EEV	0,49	0,29	0,01	2,92	952	347,11	53,1
URB/Nationale(Ville)/50/Fluide							
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-II	1,36	0,48	0,15	8,03	682	248,77	38,0
Bus urbain Std >15-18t CNG Euro-III	1,52	0,44	0,16	6,18	728	265,51	40,6
Bus urbain Std >15-18t CNG EEV	0,37	0,24	0,01	2,20	692	252,37	38,6
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-II	1,64	0,52	0,18	9,78	840	306,19	46,8
Bus urbain Artic >18t CNG Euro-III	1,81	0,48	0,19	7,43	889	324,27	49,6
Bus urbain Artic >18t CNG EEV	0,43	0,27	0,01	2,63	862	314,28	48,1



16.4. Quels facteurs faut-il utiliser ?

Les facteurs d'émissions de l'ADEME sont les seuls à provenir strictement de mesures physiques sur le véhicule => ce sont donc a priori les plus réalistes, mais ils sont réservés uniquement aux bus standards (longueur 12 m) en milieu urbain dense (faible vitesse commerciale).

Les données COPERT sont fonction d'une vitesse moyenne véhicule, mais ne prennent pas en compte la dynamique du cycle de roulage. Elles permettent donc de faire des estimations « macroscopiques » de gains en polluants liés à une évolution de la vitesse de circulation des véhicules par exemple, mais sans prise en compte du type de trafic ou du type de roulage au sein du trafic.

De plus, elles permettent de faire varier simplement certains paramètres d'entrée (bus standard ou articulé, pente, etc.) contrairement aux facteurs précédents de l'ADEME.

Les données HBEFA sont plutôt focalisées sur le type de roulage du véhicule (type de voirie, fluidité de la circulation, etc.), et couvrent un large éventail de véhicules => ce sont les données les plus complètes, et probablement les plus adaptées pour simuler les émissions d'une flotte de véhicules sur plusieurs types de lignes au sein d'une collectivité.

Tableau de synthèse :

	Base de données ADEME	Logiciel COPERT	Guide HBEFA
Bus Standard	X	X	X
Bus articulé		X	X
Impact vitesse moyenne véhicule		X	X
Impact pente et charge du véhicule		X	X
Impact type de trafic			X
Impact carburant	X	X	

16.5. Base carbone

La Base Carbone est une base nationale de données publiques contenant un ensemble de facteurs d'émissions et données sources. Elle est actuellement utilisée pour la réalisation réglementaire ou volontaire de bilans Gaz à Effet de Serre. Cette base est issue des données historiques du Bilan Carbone.

Les données de la base carbone ne concernent que les émissions de CO₂ (amont ou amont et combustion). Ce sont des données en kg de CO₂/L ou en kg de CO₂/T et non pas en kg de CO₂/km comme pour les données précédentes.

Ci-dessous un extrait des principaux facteurs d'émissions du puits à la roue extraits de la base carbone (www.bilans-ges.ademe.fr).

Périmètre géographique	Libellé	Valeur	Unité
France continentale	Gazole, routier, amont et combustion	3,17	kgCO ₂ e / litre
France continentale	GNV, Gaz Naturel Véhicule, amont et combustion	3,48	kgCO ₂ e / kg
France continentale	GNL, Gaz Naturel Liquéfié, amont et combustion	3,51	kgCO ₂ e / kg
France continentale	Biodiesel, B30, amont et combustion	2,85	kgCO ₂ e / litre
France continentale	Biodiesel, B100, sans changement d'affectation des sols, amont et combustion	1,01	kgCO ₂ e / litre
Monde	Gazole, masse volumique	845	kg / m ³
Monde	Gaz Naturel, masse volumique	0,654	kg / m ³



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). Véhicules industriels équipés au gaz naturel : Mesures de prévention contre le risque d'explosion. Mai 2011
- ADEME. Les avis de l'ADEME. Les Biocarburants de première génération. Avril 2012
- Association technique énergie environnement (ATEE), Club biogaz. Le BioGNV : un carburant propre et renouvelable pour nos villes. Février 2013
- ATEE, Club Biogaz. Rouler au BioGNV : inventaire du droit applicable. Juin 2013
- TRANSITEC. Etude comparative trolleybus/ Bus hybrides – Rapport technique – Service de l'urbanisme et de l'environnement de la ville de La Chaux-de-Fonds. Novembre 2013
- Rhône Alpes Energie Environnement (RAEE), Région Rhône-Alpes. Guide technique à destination des gestionnaires de flottes des collectivités territoriales : s'équiper en véhicules GNV et évoluer vers du biométhane carburant, renouvelable et local. Janvier 2014
- FCH, Union Européenne. Présentation du projet CHIC Clean Hydrogen in European Cities Hydrogène propre dans les villes européennes Déploiement de bus électriques dans les villes européennes. Juin 2015
- ADEME. Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains. Août 2015
- FORSEE POWER, DIETRICH CAREBUS GROUP. Dietrich Carebus Group signe un accord de partenariat avec Forsee Power – Communiqué de presse. 30/09/2015
- Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe. September 2015
- ATEE, Club Biogaz. Rouler au BioGNV : Guide pratique pour les transporteurs routiers. Décembre 2015
- AFGNV. Guide pour l'adaptation des ateliers de maintenance des véhicules GNV/BioGNV. Mai 2016
- FORSEE POWER. L'excellence Electric 100% Française, Heuliez bus et Forsee power associent leurs compétences électriques – Communiqué de presse du 14/06/2016
- Conseil Général de l'Economie, de l'Industrie, de l'Energie et des Technologies. Quelle place et quelles perspectives pour l'industrie française dans les véhicules à nouvelles motorisations ? Juillet 2016
- E-CUBE STRATEGY CONSULTANTS. Le bus : première conquête de l'électromobilité : Revue de la compétitivité et du déploiement du bus électrique en Europe à l'horizon 2025. Septembre 2016
- Fédération Nationale des Collectivités Concédantes et Régies (FNCCR), GRDF. Gaz naturel véhicule : Comment porter un projet de station ouverte au public. Novembre 2016
- FORSEE POWER. Forsee power élargit sa présence dans les villes britanniques. Communiqué de presse du 14/11/2016
- Zero Emission Bus Conference & Fuel Cell Bus Workshop. 30/11/2016
- ADEME, GRDF. Bus au Gaz Naturel véhicule (GNV) : Guide des bonnes pratiques d'aménagement des locaux et d'exploitation. Décembre 2016
- EMEP. European Environment Agency (EEA). Air pollutant emission inventory guidebook 2016: Technical guidance to prepare national emission inventories. 2016
- Centre scientifique de l'Union européenne-JRC – Commission Européenne. Report on VECTO technology simulation capabilities and future outlook. 2016
- ZeEUS eBus Report. An overview of electric buses in Europe. 2016
- Compagnie de Transports Strasbourgeois (CTS), SHELL. La CTS, premier opérateur de transport public urbain français à expérimenter le GTL, un carburant alternatif au diesel distribué par Shell – Communiqué de presse du 11/01/2017
- RATP. La RATP va tester le nouveau bus électrique Alstom en lien avec Ile de France mobilités – Communiqué de presse du 09/03/2017
- Commission européenne. Règlement du parlement européen et du conseil concernant la surveillance et la communication des données relatives aux émissions de CO₂ et à la consommation de carburant des véhicules utilitaires lourds neufs du 31/05/2017
- Institute for internal combustion engines and thermodynamics and Graz university of technology. Update of emission factors for Euro IV, Euro V and Euro VI Diesel passenger cars for the HBEFA Version 3.3 - Final report. Juin 2017
- NGVA. Greenhouse Gas Intensity from Natural Gas in Transport. June 2017
- Syndicat des Transports d'Ile-de-France (STIF). Le STIF, KEOLIS et Versailles grand parc lancent l'expérimentation du nouveau bus électrique ALSTOM-NTL sur le réseau de Versailles-Vélizy – Grand Paris des bus 2017-2020 – Communiqué de presse du 26/06/2017
- Association Française du Gaz Naturel pour Véhicules (AFGNV). Accélérer le développement du gaz naturel et du biogaz dans le secteur des transports. Juillet 2017

- ILE DE France MOBILITES. Ile de France mobilités et KEOLIS inaugurent le nouveau centre de bus et la mise en service des bus électriques de Vélizy – Grand Paris des bus 2017-2020 – Communiqué de presse du 25/09/2017
- ADEME, FNTV, Régions de France. Quelles filières énergétiques pour les autocars ? Septembre 2017
- Union des Transports Publics et ferroviaires (UTP). Les externalités du domaine des transports. Septembre 2017
- UTP. Coût complet d'un bus standard 12 mètres selon les énergies. Communiqué du 04/10/2017
- HEULIEZ BUS, FORSEE POWER. Heuliez bus et Forsee power unissent leurs compétences pour accélérer l'électromobilité en France et à l'international – Communiqué de presse du 10/10/2017
- ADEME, FNTV, GRDF. Conférence FNTV PACA – Assises nationales de la mobilité. Les innovations techniques dans les transports routiers de voyageurs – Assises nationales de la mobilité. Novembre 2017
- North American Fuel Cell Bus Conference. 02/11/2017
- FORSEE POWER. Forsee Power équipe le nouveau bus électrique du leader portugais Caetano Bus. Communiqué de presse du 14/11/2017
- FNH, ADEME, Le véhicule électrique dans la transition écologique en France, Novembre 2017
- RATP. Les lignes de bus 115 et 126 passent à l'électrique ! Communiqué de presse du 21/12/2017
- Centrale d'Achat du Transport Public (CATP). Etude comparative sur les différentes motorisations de bus. Décembre 2017
- SHELL. Guide des bénéfices : Carburant Shell GTL : une technologie de synthèse pour réduire la pollution atmosphérique. 2017
- ADEME, SCANIA. Mesures des émissions de polluants des autocars Euro VI au gaz naturel, à l'éthanol et au diesel. Janvier 2018
- Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC). Les bus à l'hydrogène. Janvier 2018
- RATP. Ile de France Mobilités et la RATP lancent le plus important appel d'offres d'Europe pour l'achat de bus électriques – Communiqué de presse du 24/01/2018
- LE PARISIEN. RATP : Gros coup d'accélérateur pour les bus 100% électriques. 24/01/2018
- UTP. Audition pour la mission CGDD pour le déploiement des VFE – Dispositions sur les véhicules à faibles émissions : points en questionnement. 23/02/2018
- ADEME. Fiche technique : L'hydrogène dans la transition énergétique. Mars 2018
- RATP. La RATP et ENEDIS signent un partenariat pour accompagner le développement des bus électriques – Communiqué de presse du 14/03/2018
- HEULIEZ BUS. La RATP a choisi Heuliez bus pour la fourniture de ses futurs bus 100% électriques – Communiqué de presse du 20/03/2018
- RATP. La RATP prépare l'arrivée des bus électriques dans ses dépôts – Communiqué de presse du 26/03/2018
- Ministères de l'intérieur et de l'Economie et des finances – Directions générales des collectivités locales et des finances publiques – Direction de la législation fiscale. Guide pratique : Taxes locales sur la consommation finale d'électricité. Mars 2018
- UTP. Note de conjoncture : Production, trafic et recettes. Avril 2018
- ADEME, IFPEN. Bilan transversal de l'impact de l'électrification par segment – Projet E4T. Avril 2018
- BOLLORE. Bluebus, 100% électrique : un nouveau souffle pour votre ville. Mai 2018
- L'USINE NOUVELLE. Premiers bus de ville à l'hydrogène 100% français. 18/05/2018
- Ile de France mobilités. Ile de France mobilités lance la plus importante étude au monde de mesure des émissions de bus diesel en conditions réelles – communiqué de presse du 22/06/2018
- ARAFER. L'Observatoire des transports et de la mobilité : Analyse du marché libéralisé des services interurbains par autocar – Bilan du 2è trimestre 2018. Juin 2018.
- CEREMA Centre est. Bus propres : règlementation et solutions. Juin 2018.
- HEULIEZ BUS. Le GX Elec récompensé en Allemagne par le prix KS de l'énergie et de l'environnement. Communiqué de presse du 05/07/2018.
- ALSTOM, FORSEE POWER. Alstom et Forsee Power annoncent leur collaboration sur la fourniture de batteries pour les bus électriques Aptis. Communiqué de presse du 18/07/2018.
- IVECO. Les essais routiers confirment qu'IVECO est le meilleur choix pour les véhicules au gaz naturel et diesel. Communiqué de presse du 30/07/2018.
- IVECO BUS. IVECO BUS remporte le titre de « Sustainable Bus of the Year » pour la deuxième fois consécutive. Communiqué de presse du 19/09/2018.
- HEULIEZ BUS. Stadtbus Rottweil en Allemagne fait l'acquisition du GX 337 Electrique d'Heuliez bus – Communiqué de presse du 25/09/2018
- IVECO BUS. IVECO révolutionne l'approche avec les 1ers Stralis X-WAY NP équipés de malaxeur électrique aux Transports J. PERRENOT – Communiqué de presse du 25/09/2018.



- IVECO BUS. IVECO BUS signe avec Limoges Métropole un premier succès avec son Crealis In-Motion-Charging. Communiqué de presse du 26/09/2018.
- France Nature Environnement (FNE). La place du GNV/ BioGNV dans la transition énergétique – note de positionnement. Septembre 2018
- Ministère de la transition écologique et solidaire – Commissariat général au développement durable (CGDD). Analyse Théma : Analyse coûts bénéfices des véhicules électriques : les autobus et les autocars. Octobre 2018
- UTP. Note technique : Acquisition d'autobus urbains : recommandations de sécurisation des systèmes de freins additionnels. Octobre 2018
- ENEDIS. La mobilité électrique – Dossier de presse. Octobre 2018
- LE PARISIEN. En attendant les bus électriques, la RATP ressort les vieux diesels du garage. 05/11/2018
- KEOLIS. Keolis exploitera à Orléans le premier réseau de transport en commun français 100% électrique – Communiqué de presse du 20/11/2018
- UTP. Le parc des véhicules des services urbains au 1^{er} janvier 2018. Novembre 2018
- TRANSPORT&ENVIRONMENT. Electric buses arrive on time: Marketplace, economic, technology, environmental and policy perspectives for fully electric buses in the EU. November 2018
- FNTV, CRMT, ADEME, MAN, TOTAL, GRDF Mesures de performances environnementales sur des autocars MAN EURO VI diesel/HVO et GNV en région PACA. 2018
- Mobilités magazine Hors-série n°2. 2018, année électrique ! Analyses, tests, prises en main, tout savoir sur la transition électrique du transport collectif. Décembre 2018
- ERDGAS. Antriebe für den OPNV im kosten-und umweltvergleich. Dezember 2018

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Parc d'autobus et d'autocars en service au 1 ^{er} janvier 2016 et kilométrages parcourus en 2015	7
Tableau 2 : Bilan des immatriculations 2014 à 2017	12
Tableau 3 : Hypothèses de calcul du coût de l'énergie pour les différentes filières	82

FIGURES

Figure 1 : Exemple de présentation d'une fiche filière	6
Figure 2 : Répartition du parc autobus au 1 ^{er} janvier 2018	7
Figure 3 : Part des énergies par autobus capacitaires ou non-capacitaires au 1 ^{er} janvier 2018	8
Figure 4 : Plan bus 2025 : Commandes de bus propres pour 2018-2020 Ile-de-France mobilités	9
Figure 5 : Campagne de promotion des bus propres par Ile-de-France mobilités	9
Figure 6 : Part des véhicules thermiques urbains selon la norme Euro au 1er janvier 2018	9
Figure 7 : Age moyen du parc autobus par pays membre de l'Union européenne (source : UITP, 2007) ...	10
Figure 8 : Part des constructeurs des autobus capacitaires au 1 ^{er} janvier 2018.....	11
Figure 9 : Part des constructeurs des autobus non-capacitaires au 1 ^{er} janvier 2018.....	11
Figure 10 : Plan du réseau bus RATP	13
Figure 11 : Autobus Aptis 100 % électrique Alstom Ligne 21	14
Figure 12 : Bluebus de la ligne 341	14
Figure 13 : Autobus Man ligne 24, 100 % GNV	14
Figure 14 : Autobus hybride Heuliez GX 337 ligne 152	14
Figure 15 : Plan général du réseau © Compagnie des Transports Strasbourgeois	15
Figure 16 : Autobus GTL en cours de ravitaillement © CTS	15
Figure 17 : Plan du réseau DIVIA de Dijon métropole	16
Figure 18 : BHNS de la ligne 6 avec bus hybride Heuliez	16
Figure 19 : Navette Bluebus 100 % électrique	16
Figure 20 : Réseau bus d'Orléans métropole	17
Figure 21 : Bus électrique en expérimentation	17
Figure 22 : Autobus 18 mètres en exploitation	17
Figure 23 : Plan du réseau bus Marinéo de Boulogne sur Mer © Marinéo	18
Figure 24 : Autobus gaz VanHool © CA du Boulonnais	18
Figure 25 : La flotte de bus GNV © Ray Ward.....	18
Figure 26 : Plan du réseau © SEMITAG	19
Figure 27 : Flotte d'autobus Iveco de Grenoble	19
Figure 28 : Autobus BioGNV du STMC	19
Figure 29 : Plan général du réseau © Idelis	20
Figure 30 : Tracé de la ligne © Fébus	20
Figure 31 : Vue d'artiste du futur BHNS © Fébus	20
Figure 32 : Schéma de production de bioéthanol	22
Figure 33 : Représentation schématique d'une station bus filière gaz	36
Figure 34 : Balisage ATEX	36
Figure 35 : Atelier de maintenance RATP	37
Figure 36 : Schéma de fabrication et de distribution du GNL © Total	45
Figure 37 : Les 3 technologies de la filière électrique	47
Figure 38 : Architecture chaîne de traction hybride série	48
Figure 39 : Architecture chaîne de traction hybride parallèle	48
Figure 40 : Composants d'un autobus hybride © AVEM	49
Figure 41 : Comparaison des consommations par cycle SORT Hybride / Euro VI - CATP 2017	53
Figure 42 : Bus Iveco hybride GNV/hydraulique	54
Figure 43 : Détail de la partie hydraulique	54
Figure 44 : Le VanHool Exqui City 24 HYB GNV © VanHool	55
Figure 45 : Les 2 midibus L Businova déployés sur le réseau du Grand Périgueux © Philippe Greiller.....	55



Figure 46 : Autobus hybride rechargeable © Volvo.....	56
Figure 47 : Exemple de schéma d'exploitation d'un bus hybride rechargeable © Volvo	57
Figure 48 : Economies d'énergie selon le type de motorisation © Volvo	57
Figure 49 : Autobus électrique en cours de rechargement au dépôt	61
Figure 50 : « Montmartrobus » en phase de biberonnage au terminus © RATP	61
Figure 51 : Système de recharge des batteries par induction.....	61
Figure 52 : Schéma d'infrastructure de recharge au dépôt	62
Figure 53 : Comparaison des coûts de détention entre 2 technologies de bus électriques et un bus diesel avec prise en compte des coûts externes (sur 8 ans, 250 km/jour) © Transport & Environnement	64
Figure 54 : Impacts sur le changement climatique d'une personne prenant le bus pour différentes technologies et différents cycles. Horizons temporels 2015 (en haut) et 2030 (en bas)	66
Figure 55 : Schémas de fonctionnement d'un bus hydrogène (avec une PAC prolongateur d'autonomie ou une PAC pleine puissance)	69
Figure 56 : Projets européens de déploiement de bus hydrogène	70
Figure 57 : Schéma d'approvisionnement de l'hydrogène de l'usine au bus © Engie	71
Figure 58 : Vue d'artiste de déploiement d'une station au dépôt (zone de stockage de l'hydrogène, bâtiment abritant la production et la compression de l'hydrogène et zone de recharge pour les bus)	71
Figure 59 : Emissions sur cycle stationnaire (uniquement pour les moteurs diesel).....	77
Figure 60 : Emissions sur cycle transitoire (pour les moteurs diesel et gaz).....	77
Figure 61 : Durabilité	78
Figure 62 : Etapes de la norme EURO VI	78
Figure 63 : Principe général du fonctionnement de Vecto.....	80
Figure 64 : Schéma de la méthode Vecto.....	81
Figure 65 : Coût total de détention (TCO, en €) d'un bus standard 12 m sur sa durée de vie.....	83

SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AOM	Autorité Organisatrice de la Mobilité
AS	Autorisation avec Servitude
ATEX	Atmosphère Explosive
BHNS	Bus à Haut Niveau de Service
CGDD	Commissariat Général au Développement Durable
CEN	Comité Européen de Normalisation (d'où découlent les normes EN)
CID	Contrôle par Inspection Détailée (CID)
COFREND	Comité Français pour les Essais Non Destructifs
COPERT	Computer Program to calculate Emissions from Road Transport
CRMT	Centre de Recherches en Machines Thermiques
CTB	Compagnie des Transports du Boulonnais
CTS	Compagnie des Transports Strasbourgeois
CVE	Centre de valorisation Energétique
DSP	Délégation de Service Public
EDF	Electricité de France
FAP	Filtre A Particules
FNTV	Fédération Nationale du Transport de Voyageurs
GNC	Gaz Naturel Comprimé
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
GNV	Gaz Naturel pour Véhicules
GRDF	Gaz Réseau Distribution France
GTL	Gaz to Liquid
HVO	Huiles Végétales Hydrotraitées
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
ISC	In Service Conformity
LTECV	Loi pour la Transition Energétique pour la Croissance Verte
NOME	Nouvelle Organisation du Marché de l'Electricité
PTAC	Poids Total Autorisé en Charge
PMR	Personne à Mobilité Réduite
RATP	Régie Autonome des Transports Parisiens
RGE/EFR	Recirculation des Gaz d'Echappement / Exhaust Gas Recirculation
RCS/SCR	Réduction Catalytique Sélective / Selective Catalytic Reduction
SMR	Site de Maintenance et de Remisage
SOES	Service de l'Observation Et des Statistiques
SORT	Standardised on Road Test Cycles
SP	Sans Plomb
SPL	Société Publique Locale
STIF	Syndicat des Transports d'Île de France
SYDEME	Syndicat des Déchets Ménagers de Moselle-Est



TAG	Transports de l'Agglomération Grenobloise
TAO	Transport de l'Agglomération Orléanaise
TICPE	Taxe Intérieure sur la Consommation des Produits Energétiques
TICGN	Taxe Intérieure de Consommation sur le Gaz Naturel
TGAP	Taxe Générale sur les Activités Polluantes
UTP	Union des Transports Publics et ferroviaires
VFE	Véhicule à Faible Emission



L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

<https://www.ademe.fr/>

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



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 un regard.



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



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.



PANORAMA ET EVALUATION DES DIFFERENTES FILIERES D'AUTOBUS URBAINS

Description, fonctionnement et mise en perspective des filières technologiques suivantes pour les bus déployés sur les réseaux urbains :

- ED95
- HVO
- GTL
- GNC
- Biogaz
- GNL
- Hybride
- Hybride rechargeable
- Tout électrique
- Hydrogène

Pour accompagner la transition énergétique, quelle alternative au bus diesel déployer sur mon réseau de transport urbain ?

