

Transition énergétique

ÉTUDE COMPARATIVE

SUR LES DIFFÉRENTES MOTORISATIONS DES AUTOBUS

Mise à jour
Juin 2024

Le mot de la Présidente d'AGIR Transport

Tant pour lutter contre la pollution atmosphérique locale que pour freiner les dérèglements climatiques qui affectent la planète, l'Union Européenne et l'Etat Français ont fait le choix d'imposer de nouvelles normes aux collectivités territoriales.

Conscientes des enjeux et animées par un devoir d'exemplarité, les collectivités jouent indéfectiblement le jeu de la transition énergétique depuis de nombreuses années, quand bien même l'impact de leur parc de bus n'est pas réellement significatif dans le total des émissions sur le plan local comme national contrairement à la voiture individuelle.

Désormais, elles doivent donc intégrer dans leur réflexion, de nouvelles normes très directives alors même que les filières industrielles d'avenir garantissant la fiabilité des véhicules ne sont pas encore complètement en place et que les coûts d'achat et d'usage très élevés de ces véhicules ne sont pas accompagnés par l'Etat.

AGIR Transport considère que ces moyens devraient plutôt être affectés à renforcer l'offre en termes de transports publics, de mobilités douces et partagées. En effet, l'augmentation de l'offre, notamment dans les territoires les moins denses, est la seule solution pour déclencher le transfert modal de la voiture individuelle vers des transports plus vertueux.

Afin d'éclairer les collectivités sur les coûts réels et les performances de chaque filière énergétique, après une première parution en 2014, des mises à jour successives en 2017, 2021 et 2022, la Centrale d'Achat du Transport Public (CATP) actualise une nouvelle fois en juin 2024 son étude comparative sur les différentes motorisations d'autobus avec des données récentes sur les coûts de possession et les coûts des infrastructures des différentes technologies existantes d'autobus standard de 12m.

Les experts de la CATP sont à votre disposition pour répondre aux questions relatives à cette étude ainsi que pour vous accompagner dans vos démarches d'achats de véhicules.

Catherine PILA

Présidente d'AGIR Transport



Sommaire

Préambule	4
I. Obligations réglementaires	7
II. Etat du parc d'autobus en France	9
1. Les véhicules en circulation	9
2. Les immatriculations des autobus	11
III. Technologies de véhicules à motorisation thermique, hybride ou électrique ..	12
1. Véhicules thermiques diesel	12
2. Véhicules thermiques à carburants alternatifs	17
3. Véhicules thermiques au Gaz Naturel (GNV)	23
4. Véhicules à motorisation hybride (Diesel/GNV)	30
5. Véhicules électriques à batterie	36
6. Véhicules électriques trolleybus	45
7. Véhicules électriques à hydrogène	49
IV. Synthèse comparative des différentes motorisations	55
1. Tendances	55
2. Prolongement de la durée de vie des autobus	59
V. Les éléments de choix en fonction des particularités territoriales	61
Conclusion	65
Annexes	66
1. Réglementations et outils	66
2. Exemple d'application - Bassin de Briey	69
Lexique	74

Préambule

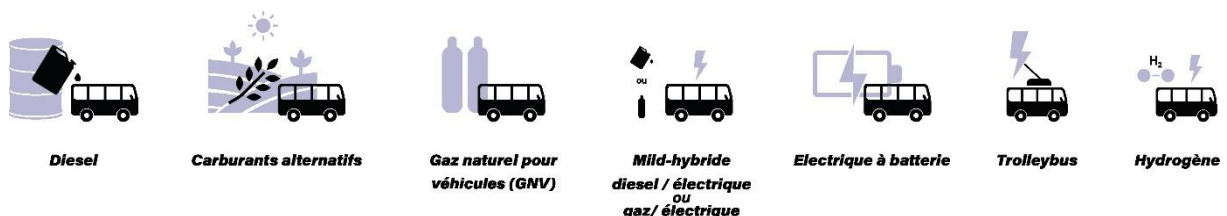
Depuis 2017, les dispositions de la LOM¹ et de la loi Climat-Résilience² ont fait évoluer les réglementations en matière d'achat de véhicules. Le contexte technologique a également évolué avec la recherche, le développement et le déploiement de nouvelles motorisations comme l'hydrogène décarboné.

Avec un rappel du cadre réglementaire actuel et les comparaisons entre différentes motorisations, l'objectif de cette étude est d'accompagner les acheteurs publics dans le choix de l'énergie la plus adaptée à leur contexte local à partir de critères économiques, techniques et environnementaux.

Pour réaliser cette mise à jour, la CATP s'est principalement appuyée sur :

- les données obtenues au travers des différentes procédures de passation des accords-cadres de la CATP avec les constructeurs, dont une bonne part a été renouvelée au 1^{er} semestre 2024 ;
- les retours des techniciens qui exploitent et entretiennent les véhicules et les infrastructures de transport, notamment ceux des adhérents d'AGIR Transport ;
- les études et documents de référence (Légifrance, ADEME, SDES, INRS, etc.).

Les principales technologies de véhicules ont été regroupées en sept familles de motorisation et d'énergie : les véhicules diesel, les carburants alternatifs, les véhicules au GNV, les véhicules à motorisation hybride, les véhicules électriques à batterie, les trolleybus, et les véhicules à l'hydrogène.



Afin de permettre la comparaison entre les technologies, l'étude a été réalisée avec les données suivantes :

- Les véhicules considérés sont des autobus standards de 12 m ;
- Base de kilométrage : 40 000km/an, soit le kilométrage annuel moyen parcouru par un autobus en France (source : Service de l'Observation et des Statistiques)³.

¹ LOI n° 2019-1428 du 24 décembre 2019 d'orientation des mobilités (LOM)

² LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets

³ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-11/datalab-essentiel-35-transport-collectif-routier-voyageurs-2015-septembre2016.pdf>

Cette étude comparative prend en considération les données les plus récentes concernant le coût global de possession des véhicules, ainsi que des estimations des coûts des infrastructures à prévoir.

Le coût global de possession est issu des prix actuels du catalogue de véhicules de la CATP, dont près de 80 % a été renouvelé au cours du 1^{er} semestre 2024. Il est calculé en effectuant une moyenne des données fournies par les constructeurs et n'intègre pas les éventuelles subventions liées à l'achat de véhicules. Il comprend :

- le coût d'acquisition des véhicules, options comprises ;
- le coût énergétique, sur la base du prix de l'énergie actuel ;
- le coût de maintenance préventive, correspondant aux engagements des constructeurs.

Afin de comparer les coûts énergétiques liés aux différentes énergies, l'étude se base sur les consommations résultant des essais normalisés SORT pour les véhicules thermiques et des retours de simulations pour les véhicules électriques. Afin de représenter au mieux les résultats observés dans un environnement urbain dense, les coûts énergétiques des différents types de véhicules sont calculés avec une vitesse commerciale moyenne de 12 km/h (SORT1).

Même si les informations fournies dans cette étude sont issues des données de référence, elles doivent être utilisées avec précaution notamment dans un contexte de volatilité des prix de l'énergie, à l'instar de ce que nous avons pu observer post pandémie et guerre en Ukraine.

Le calcul du coût de possession n'inclut pas les coûts liés à la mise en place des stations de distribution ni les coûts d'adaptation des ateliers. Néanmoins, afin d'accompagner les acheteurs publics dans leurs réflexions, l'étude fournit des ordres de grandeur sur ces coûts dits « d'infrastructures » dont les montants peuvent parfois être significatifs. Ces coûts sont également à utiliser avec précaution, car très dépendants de la taille du parc, du contexte local et des particularités du projet.

Depuis ces quelques mois, les coûts énergétiques semblent connaître une relative stabilité, sans pour autant retrouver les niveaux antérieurs.

Les collectivités et les entreprises qui souhaiteraient approfondir le sujet du choix de motorisations et des dépenses liées aux infrastructures pourront mener des études plus complètes tenant compte des particularités locales. A ce titre, et compte tenu des enjeux pour les collectivités, AGIR Transport propose aux collectivités qui le souhaitent, un accompagnement plus ou moins étendu en fonction de leurs besoins (disponible au catalogue « prestations intellectuelles » de la CATP).

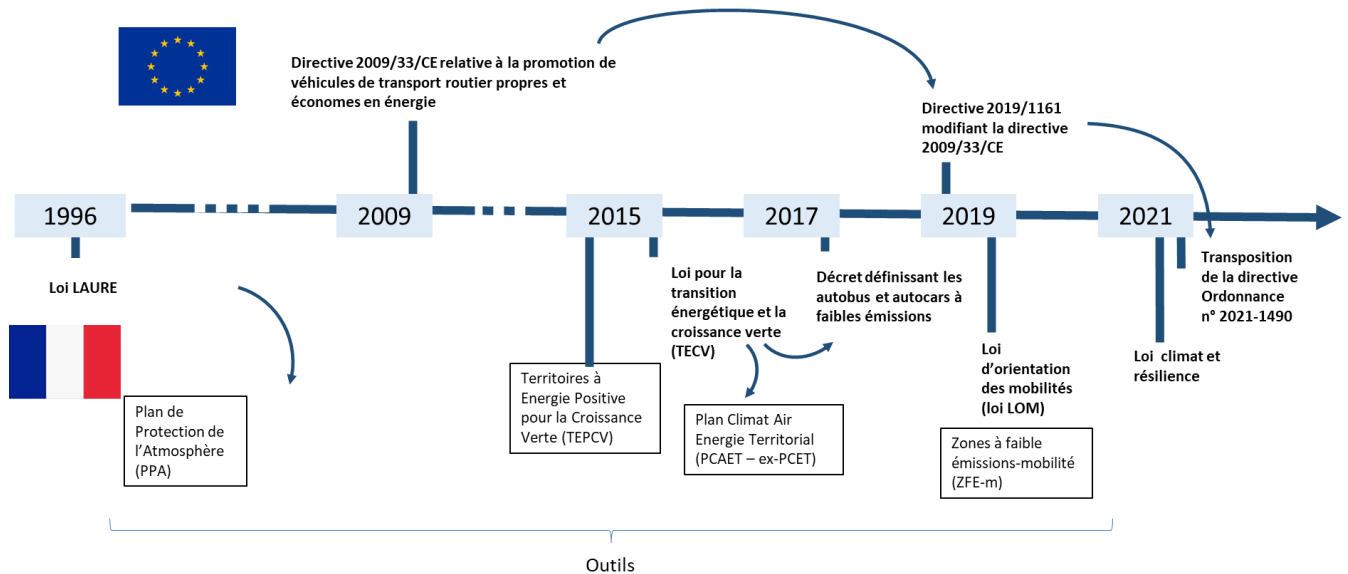
L'étude comparative est organisée en cinq parties :

- La partie I rappelle le cadre réglementaire et les outils relatifs à la transition énergétique ;
- La partie II dresse une photographie du parc d'autobus et son évolution au cours des 6 dernières années ;
- La partie III présente les spécificités et coûts de chaque technologie de motorisation, avec des points d'entrée identiques pour en faciliter la comparaison : énergie, véhicule, infrastructure, formation, impacts environnementaux, exemples et coûts de possession ;
- La partie IV dresse une comparaison multicritère des technologies sur les volets économiques, techniques et environnementaux ; elle aborde également l'hypothèse de prolongement de la durée de vie des véhicules ;
- La partie V vise à mettre en exergue des critères de choix d'une ou plusieurs motorisations pour une collectivité territoriale.

I. Obligations réglementaires

La prise en compte du contexte réglementaire est indispensable car elle permet d'identifier d'une part les obligations de verdissement qui s'imposent aux acteurs de la mobilité et d'autre part les recommandations et outils mis à disposition pour définir une stratégie de déploiement de motorisations alternatives au diesel et sa mise en place opérationnelle.

Le cadre réglementaire et les outils relatifs à la transition énergétique



La loi pour la transition énergétique et la croissance verte⁴, la LOM et plus récemment l'ordonnance n° 2021-1490⁵ et ses décrets d'application ont défini des objectifs à atteindre, à la fois qualitatifs et quantitatifs (détail fourni en Annexe 1.).

Plusieurs groupes de véhicules sont définis :

- Groupe 1 : véhicules électrique, hydrogène ou trolleybus uniquement mus électriquement ;
- Groupe 1 bis : véhicules GNV avec 20% minimum de gaz d'origine renouvelable (30% à partir du 01/01/2025), véhicules hybrides électrique/gaz avec 20% minimum de gaz d'origine renouvelable (30% à partir du 01/01/2025), véhicules hybrides électrique/diesel avec un carburant très majoritairement d'origine renouvelable ;
- Groupe 2 : véhicules GNV, véhicules fonctionnant exclusivement au B100, GTL, XTL ou HVO, véhicules hybrides électrique/gaz et électrique/diesel ;
- Groupe 3 : véhicules dont la motorisation est hybride ne relevant pas des groupes 1, 1 bis ou 2, ou satisfaisant au moins à la norme Euro VI.

⁴ LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte

⁵ Ordonnance du 17 novembre 2021 portant transposition de la directive (UE) 2019/1161 du Parlement européen et du Conseil du 20 juin 2019 modifiant la directive 2009/33/CE relative à la promotion de véhicules de transport routier propres et économes en énergie <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000044336091>

Les obligations de verdissement prévues au code de l'environnement concernent les autorités organisatrices lorsqu'elles gèrent directement ou indirectement un parc de plus de 20 autobus et autocars pour assurer des services de transport public réguliers ou à la demande.

Les entités doivent investir, dans le cadre du renouvellement de leur parc, dans les véhicules à faibles émissions (VFE) : 50% jusqu'au 31 décembre 2024 et 100% à compter du 1^{er} janvier 2025. Selon le type de service de transport public et la zone de circulation des véhicules (notamment au regard du nombre d'habitants, de l'existence d'un Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) ou d'une Zone à faibles émissions – mobilité (ZFE-m)), les obligations sont variables.

En résumé, plus un territoire est urbanisé et concerné par des mesures de lutte contre la pollution atmosphérique, plus la définition de véhicules à faibles émissions est restrictive. *A contrario*, au sein des territoires moins urbanisés et non soumis à des mesures de lutte contre la pollution atmosphérique, le régime est plus souple et il est possible de choisir librement d'investir dans les véhicules du groupe 1, 1bis, 2 ou 3.

Par ailleurs, les textes prévoient que, pour l'exécution des services de transport urbain, dans les territoires de plus de 250 000 habitants, la moitié au moins des proportions de véhicules à faibles émissions précitées doit être constituée d'autobus à très faibles émissions (VTFE - groupe 1 et véhicules rétrofités en électrique ou hydrogène). Cette obligation renforcée est applicable depuis le 1^{er} juillet 2022.

Cas pratique pour une agglomération de plus de 250.000 habitants pour le renouvellement de 12 véhicules de catégorie M3⁶ sur une année

Calendrier	Renouvellement total	Non VFE (dont groupes 2 et 3)	VFE groupe 1 et 1bis	VFTE groupe 1 et rétrofités
Jusqu'au 30/06/2022	12	6	6	0
Du 01/01/22 au 31/12/2024	12	6	3	3
A partir du 01/01/2025	12	0	6	6

⁶ 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

II. Etat du parc d'autobus en France

1. Les véhicules en circulation

Selon le SDES, au 1^{er} janvier 2023, plus de 45 millions de véhicules en circulation composent le parc automobile français⁷. Pour l'essentiel (98,44 %), ce sont des véhicules particuliers et des véhicules utilitaires légers, utilisés par des particuliers ou des entreprises.

Le transport routier, quant à lui, qu'il soit « de marchandises » ou « de voyageurs » concerne les 1,56 % restant, soit environ 715 000 véhicules.

Avec près de 94 000 véhicules en circulation, le transport routier de voyageurs représente 0,20 % de l'ensemble des véhicules en circulation, dont 70 % d'autocars (66 248 ; 0,14 % du parc total) et 30 % d'autobus (27 826 ; 0,06 % du parc total).

Ces derniers ont augmenté de plus de 35 % en 10 ans, puisqu'ils étaient d'environ 20 500 unités en 2013.

Propriétés des AOM et des opérateurs publics ou privés, ils assurent une mission de service public dans les agglomérations de différentes tailles, en France métropolitaine ou en outre-mer.

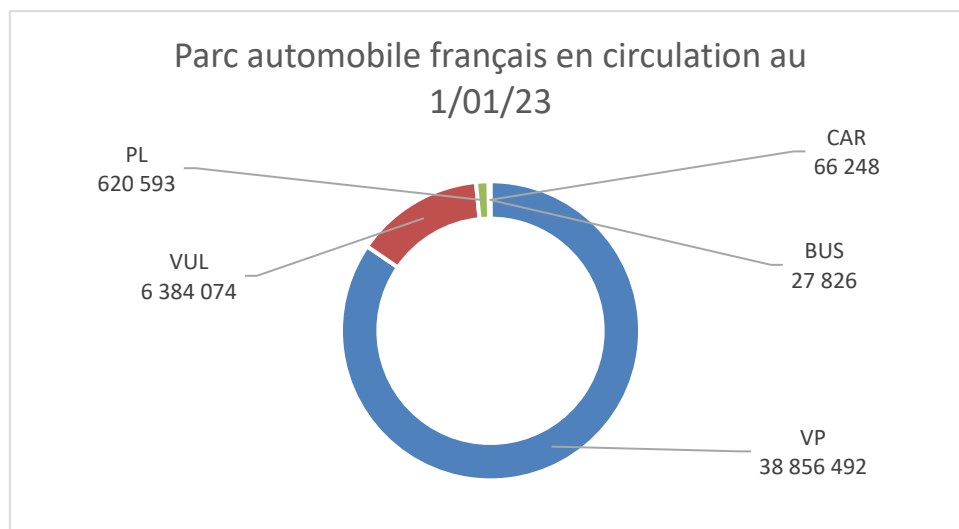


Fig : Répartition du parc automobile français en circulation par type (CATP – données SDES)

Encore récemment, ces autobus étaient quasi exclusivement équipés d'une motorisation thermique fonctionnant au gazole ou au gaz. Les obligations réglementaires ont depuis impactées l'état du parc en termes de motorisations et d'énergies utilisées.

Bien que le diesel occupe une part encore prépondérante, depuis 2018 la tendance est à la baisse, passant de 86 % à 74 % des véhicules en circulation. Pour moitié, cette diminution se fait au profit du gaz (+6 %) et représente désormais 18 % du parc total.

⁷ Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>

L'électrique, jusque-là assez marginal, augmente également de manière progressive pour atteindre 7 % des autobus en circulation en 2023.

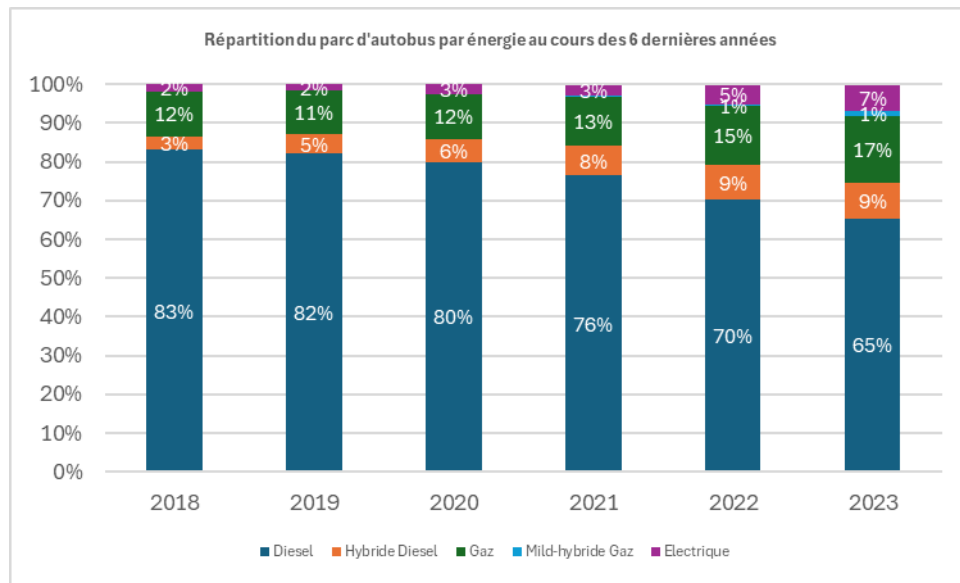


Fig : Répartition du parc d'autobus en circulation par motorisation (CATP – données SDES)

2. Les immatriculations des autobus

Plus spécifiquement, si l'on se concentre sur l'évolution des immatriculations annuelles, l'évolution du parc en termes de motorisation est encore plus visible.

En effet, en 2018, les bus diesel y compris dans leur version full-hybride, représentaient près de 79 % des immatriculations, 18 % pour le gaz et seulement 3 % pour l'électrique.

A compter de 2019, commence une nouvelle dynamique avec les ventes de bus diesel qui chutent de 20 % au profit du gaz et de l'électrique.

On peut observer qu'après le succès mitigé du full hybride abandonné en 2021 à l'occasion du passage au step E de la norme Euro VI, c'est le début de la commercialisation des technologies mild-hybrides gaz et diesel, beaucoup moins coûteuses que leurs ainées.

Concernant l'électrique, la relative fiabilisation et l'amélioration progressive des batteries a convaincu les collectivités à intégrer des véhicules dans leur parc et à initier un mix énergétique.

Il est important de noter que ces répartitions sont fortement impactées par les commandes destinées à l'Île de France qui représentent en moyenne près de la moitié des véhicules immatriculés.

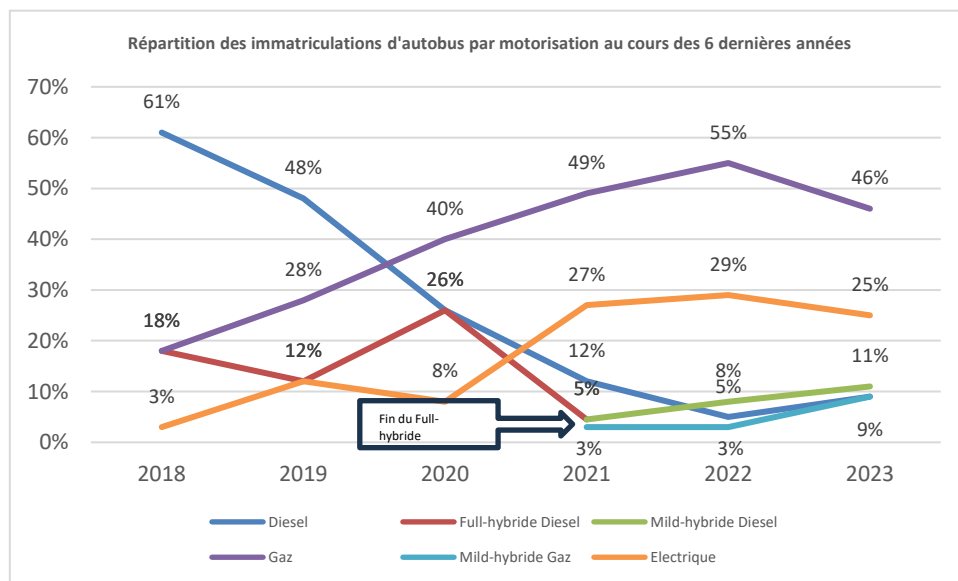


Fig : Répartition des immatriculations d'autobus par motorisation (CATP)

Les obligations de verdissement vont logiquement continuer à influencer sur le choix des motorisations.

Pour faire face à ces obligations et notamment aux surcoûts liés à l'acquisition de véhicules plus propres, les AOM seront tentées de prolonger la durée de vie des véhicules exploités. Nous avons donc intégré à cette étude la comparaison des coûts de possession au-delà des 15 ans et jusqu'à 20 ans (cf. partie IV.2.)

III. Technologies de véhicules à motorisation thermique, hybride ou électrique


1. Véhicules thermiques diesel

a. Energie

Le moteur diesel est alimenté par du gazole, un carburant issu du raffinage du pétrole. Longtemps encouragé par les pouvoirs publics au travers d'une fiscalité avantageuse, le gazole fait de plus en plus l'objet de mesures restrictives compte tenu de son impact sur la qualité de l'air. Le déploiement progressif d'ici 2025 des zones à faible émissions mobilité (ZFE-m) vise à accélérer la conversion du parc automobile vers des motorisations alternatives au gazole.

- **Prix du gazole** : 1,25 €/L (HT, incluant le remboursement partiel de TICPE), moyenne du prix à la cuve de janvier à mars 2024⁸

Le prix du gazole connaît une hausse soutenue depuis octobre 2020. Cette hausse pourrait se poursuivre dans les années à venir portée par la reprise de la croissance et sous l'effet du contrôle de la production de pétrole par les pays producteurs. Du fait de son origine fossile, le prix du gazole sera également impacté par la fiscalité et l'augmentation du prix d'échanges des quotas-carbone EU-ETS.

- **Tendance** : à la hausse 

b. Véhicule

A la recherche d'une diminution des émissions polluantes, les premières normes imposées aux constructeurs de véhicules datent de 1990 (Euro 0). A mesure que les seuils de restrictions d'émissions ont été abaissés, les performances techniques des moteurs thermiques ont largement été améliorées.

La norme la plus récente, en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2014, est la norme Euro VI. Les différentes étapes ou « step » de la norme Euro VI (a, b c et d) sont venues préciser les conditions dans lesquelles le véhicule est tenu de respecter les valeurs d'émissions. Le step E de la norme Euro VI, qui est obligatoire depuis le 1er janvier 2022, met l'accent sur les phases de démarrage à froid. Une nouvelle norme Euro VII⁹, plus contraignante, prendra effet le 29 mai 2028 pour les nouveaux types¹⁰ d'autobus et d'autocars et à partir du 29 mai 2029 pour les nouveaux autobus et autocars. Elle ne se contente pas de cibler les émissions d'échappement, mais elle prend également en compte d'autres sources de pollution, telles que l'abrasion des pneus et les particules émises lors du freinage.

⁸ Source : Comité National Routier, <https://www.cnr.fr/espaces/22/indicateurs/100?noContext=1>

⁹ Le règlement (UE) 2024/1257 du Parlement européen et du Conseil du 24 avril 2024 relatif à la réception par type des véhicules à moteur et des moteurs, ainsi que des systèmes, des composants et des entités techniques distinctes destinés à ces véhicules, en ce qui concerne leurs émissions et la durabilité de leurs batteries (Euro 7) est disponible [en cliquant ici](#).

¹⁰ Au sens du règlement 2018/858 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif à la réception et à la surveillance du marché des véhicules à moteur et de leurs remorques, ainsi que des systèmes, composants et entités techniques distinctes destinés à ces véhicules, modifiant les règlements (CE) n°715/2007 et (CE) n°595/2009 et abrogeant la directive 2007/46/CE

- **Coût moyen d'acquisition :**

- 213 400 € HT pour un véhicule Euro VI step E, hors options
- Coûts des options : 80 000 € HT (valeur moyenne constatée par la CATP)

NB : Bien que le coût d'acquisition ait augmenté de 7,32 % en 2 ans, l'augmentation reste inférieure à l'inflation constatée sur la même période (+ 5,2 % en 2022 et 4,9 % en 2023). Le coût intègre également la mise en œuvre de la norme GSR II¹¹ (environ 8 000 € HT par véhicule).

LE SAVIEZ-VOUS ?

Le coût des options d'un véhicule est très variable et représente entre 30 000 € et 130 000 € HT : climatisation, équipements embarqués, nombre et types de portes, vitrage athermique...

La norme Euro VI a contraint les constructeurs à développer une nouvelle génération de moteurs moins polluants, qui ont aussi l'avantage d'être plus sobres. Une diminution de consommation de 5 % par rapport à l'Euro V était annoncée par la plupart des constructeurs.

- **Consommation moyenne :** 43,9 L / 100km, basé sur cycle SORT 1 (step E)

Le coût de consommation d'AdBlue¹² qui est très faible au regard de la consommation énergétique de gazole, n'a pas été intégré dans les calculs.

La durée de vie des véhicules diesel Euro VI est en général de 15 ans, conformément à l'amortissement économique et technique courant des véhicules.

- **Durée de vie / kilométrage :** 15 ans / 600 000km (cf. hypothèse à 20 ans – partie IV.2.)
- **Coût moyen de maintenance préventive :** 0,28 €/km

c. Infrastructure

L'exploitation d'un parc de véhicules diesel nécessite l'aménagement d'une station de distribution du gazole et l'aménagement d'un atelier-dépôt.

Pour de nombreuses collectivités, ces aménagements correspondent à des investissements passés, le plus souvent amortis. L'enjeu porte alors sur l'adaptation des équipements existants vers de nouvelles technologies.

¹¹ La norme General Safety Regulation 2 impose de nouveaux standards de sécurité, pour tous les véhicules neufs vendus sur le territoire

¹² L'AdBlue est un additif antipollution qui permet de réduire les oxydes d'azote (NOx)

d. Formation

La réalisation d'activités de maintenance de véhicules nécessite le suivi a minima d'une formation professionnelle de 2 ans conduisant à un diplôme (ou un titre homologué du champ professionnel) de niveau V selon la nomenclature des niveaux de formation (équivalent CAP / BEP). La mention complémentaire « maintenance des moteurs diesel et de leurs équipements » définie par l'arrêté du 31 juillet 2002¹³ étend le savoir-faire opérationnel et peut être obtenue après une formation complémentaire en milieu professionnel d'une durée de douze semaines.

e. Impacts environnementaux

La norme Euro VI impose des seuils maximums d'émissions très faibles par rapport aux anciens véhicules.

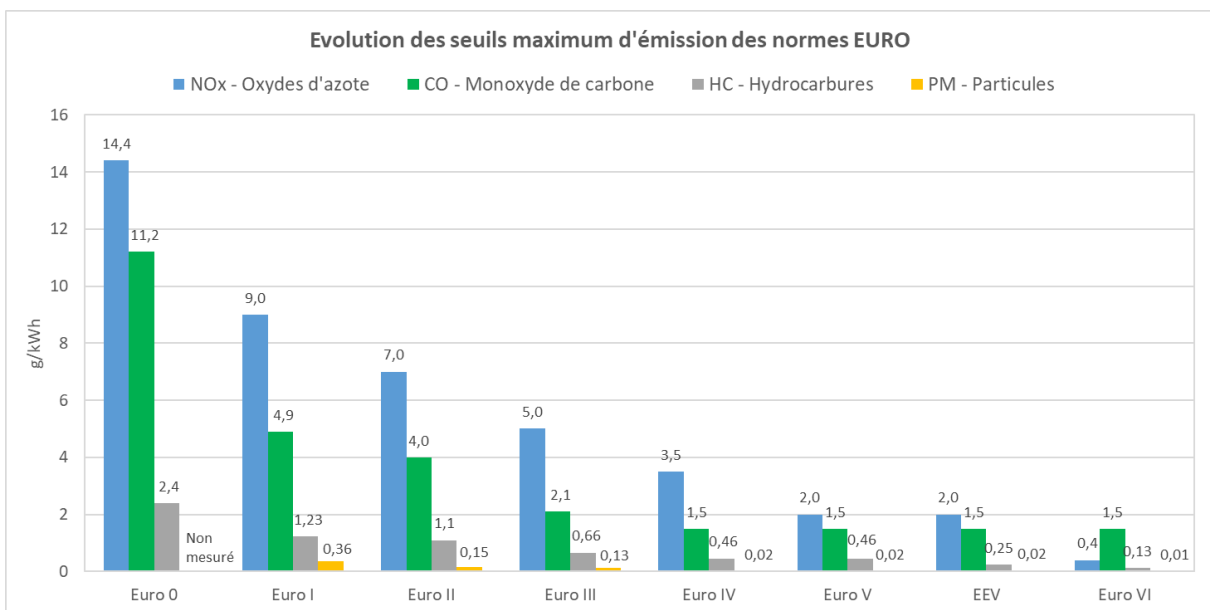


Fig : Evolution des seuils maximum d'émissions des normes EURO (CATP)

En comparaison avec l'Euro V, la norme Euro VI a permis de réduire significativement les émissions de NOx, d'hydrocarbures et de particules.

- **Emissions de polluants** (banc d'essai moteur, cycle WHTC) :
 - NOx : 0,148-0,338 g/kWh
 - CO : N/C
 - HC : <0,01 g/kWh
 - PM : 0,0023-0,0046 g/kWh
- **Emissions de CO₂** (en kg équivalent CO₂, facteurs d'émission ADEME) :
 - En sortie de véhicule : 1,011-1,138 kg/km
 - Du puits à la roue : 1,212-1,497 kg/km

¹³ Source : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000592746>

Le bruit lié à la circulation des autobus dépend de trois sources principales d'émissions sonores : le moteur, le roulement des pneus sur la chaussée et le bruit causé par le freinage. La réglementation R51-03 UN ECE fixe les valeurs limites à respecter.

Type d'autobus	Valeur limite
>3,5 tonnes et >150kW	80dB(A)

Ces valeurs limites sont imposées lors des tests d'homologation. Elles correspondent à une mesure du bruit lors d'un passage de l'autobus à 50 km/h.

- **Bruit moyen d'un véhicule roulant** : 72 à 77 dB(A)

f. Quelques repères

Au 1^{er} janvier 2023, le parc d'autobus français se décomposait de la façon suivante :

	Euro 0 & I	Euro II	Euro III	Euro IV	Euro V	Euro VI	NC	Total
Rappel : dates de mise en application	A partir du 1/10/1990(0) 1/10/1993(I)	A partir du 1/10/1996	A partir du 1/10/2001	A partir du 1/10/2006	A partir du 1/10/2009	A partir du 31/12/2013		
Quantités	29	190	1 367	3 276	7 288	15 655	21	27 826
%	0,10%	0,68%	4,91%	11,77%	26,19%	56,26%	0,09%	100%

Fig : Répartition du parc en service selon la norme Euro du véhicule¹⁴

Si les véhicules Euro IV ou antérieurs représentent encore un peu plus de 17% du parc d'autobus début 2023, les autobus Euro VI sont désormais nettement majoritaires en France (56,26% du parc total).

¹⁴ Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/transports>

g. Coûts de possession d'un véhicule de 12m sur 15 ans

Véhicule diesel Euro VI step E, options comprises

Coût moyen d'acquisition :

- 293 400 € HT

Coût énergétique :

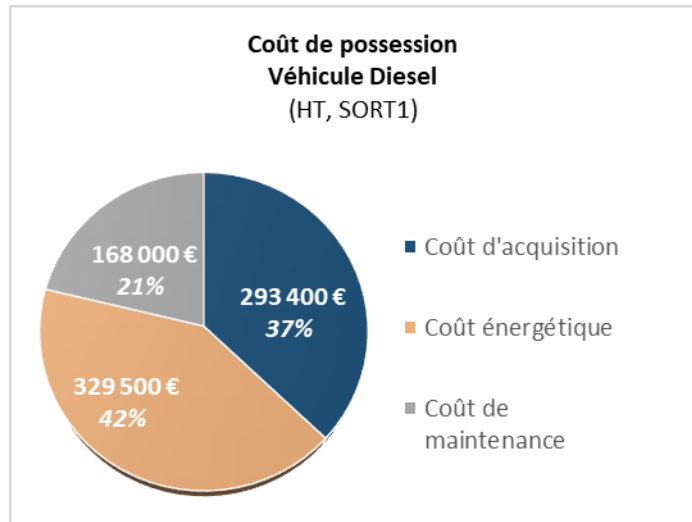
- 329 500 € HT

Coût moyen de maintenance préventive :

- 168 000 € HT

Coût de possession total :

- **790 900 € HT**
soit 1,32 €/km



A noter que 42% du prix de possession sur les 15 ans d'un véhicule Euro VI thermique est lié au prix du gazole.

2. Véhicules thermiques à carburants alternatifs

a. Energie

Les carburants alternatifs au diesel ont été développés dans le but d'accompagner la transition énergétique. Généralement moins polluants et/ou d'origine renouvelable, ils peuvent être utilisés dans un moteur thermique standard avec peu, voire aucune adaptation technique.

Ils peuvent être classés en deux sous-groupes :

- Les carburants d'origine non renouvelable, incluant certains carburants de synthèse (XtL) : le GtL (Gas-to-Liquid), le CtL (Coal-to-Liquid) ou encore le PtL (Power-to-Liquid ou encore « e-fuel ») si l'électricité est produite à partir d'une source non renouvelable. Ce type de carburant est peu utilisé dans les transports publics. Des expérimentations ont été réalisées sur des réseaux urbains comme Strasbourg. La CTBR 67 utilise actuellement le GtL pour exploiter le réseau de car du Bas-Rhin.
- Les carburants d'origine renouvelable, nommés biocarburants ou encore agrocarburants. Ce sont des carburants produits à partir de matières premières renouvelables. 3 typologies de biocarburants se distinguent :
 - Le biodiesel, créé à partir d'huiles végétales et/ou huiles alimentaires usagées. Ce biocarburant est utilisé dans certains moteurs diesel spécifiques. Il peut être utilisé seul dans les moteurs (B100) ou mélangé avec du gazole (B10, B30, la valeur correspondant au % d'incorporation du biodiesel).
 - L'éthanol ou ED95, créé à partir de résidus de vinification (marc de raisin) ou de production sucrière (betterave, canne à sucre, etc.). L'ED95 est un bioéthanol (95 % d'éthanol issu de la biomasse et 5% d'additifs non pétroliers) fonctionnant dans des moteurs diesel adaptés. La technologie de véhicules ED95 n'est actuellement plus commercialisée en France pour le transport de voyageurs.
 - Les carburants de synthèse (XtL) d'origine renouvelable : il s'agit de carburants paraffiniques de synthèse, produits à partir de matières premières renouvelables. Ils fonctionnent dans des moteurs diesel standard. Deux catégories principales se distinguent : l'HVO (huile végétale hydrogénée) et le BtL (Biomass-to-Liquid). Le BtL n'est pas disponible actuellement en France pour le transport de voyageurs.

LE SAVIEZ-VOUS ?

A l'heure actuelle, les services de transport collectif utilisant les biocarburants sont encore très majoritairement les transports interurbains, mais les transports urbains commencent à s'y intéresser.

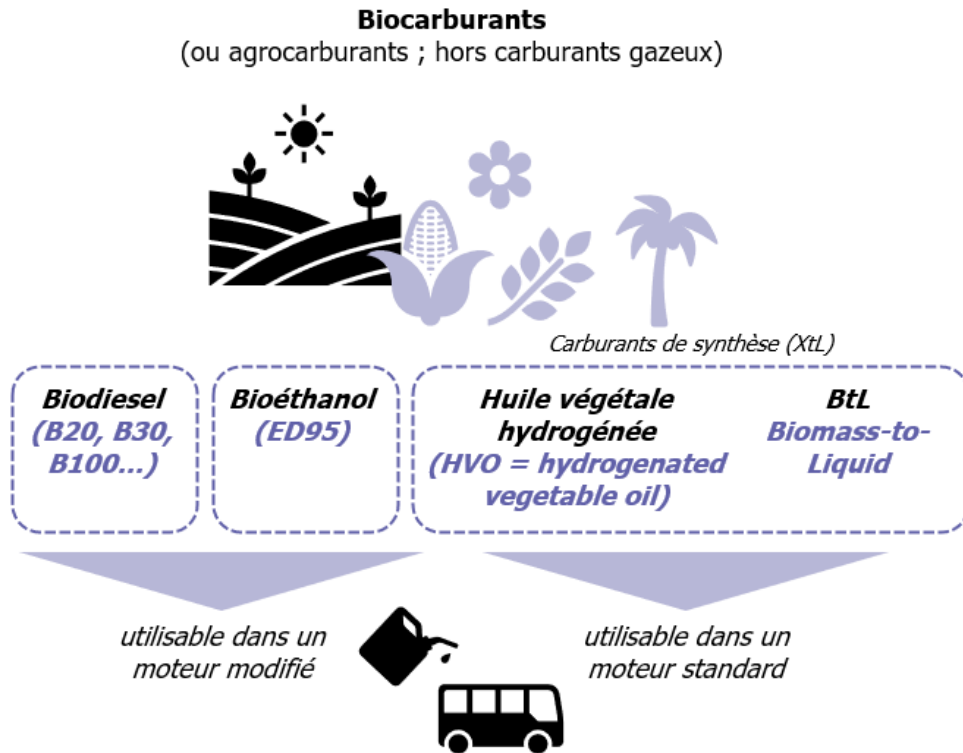


Fig : Typologie des biocarburants (CATP)

Concernant les ressources renouvelables, les biocarburants évoluent :

- La 1ère génération provient de biomasse qui peut également être dédiée à l'alimentation (par exemple à partir d'huile végétale) ;
- La 2ème génération provient de biomasse qui ne rentre pas en concurrence avec l'alimentation ;
- La 3ème génération est en stade de recherche et devrait exploiter des micro-algues.

L'étude se focalise sur les deux biocarburants alternatifs qui intéressent le plus les collectivités aujourd'hui : le B100 et l'XtL (HVO).

• **Prix des biocarburants :**


Afin de rester attractif par rapport au prix du gazole, certains fournisseurs de biocarburants font le choix d'indexer le prix du biocarburant sur celui du gazole. Ce prix dépend néanmoins des quantités, de la situation logistique et peut donc varier d'une collectivité à l'autre.

Les distributeurs de B100 mettent en avant un prix identique au gazole net de remboursement forfaitaire de TICPE, le B100 bénéficiant pour l'heure d'une TICPE allégée.

Le prix de l'XtL (HVO) présente un surcoût par rapport au gazole, de l'ordre de +15 %.

- B100 : 1,25 €/L (HT, TICPE réduite comprise), basé sur la moyenne du prix de gazole à la cuve de janvier à mars 2024,
- XtL (HVO) : 1,44 €/L (HT, incluant le remboursement partiel de TICPE), basé sur la moyenne du prix de gazole à la cuve de janvier à mars 2024.

L'évolution du prix des biocarburants dépendra du développement de la filière, du nombre d'acteurs sur le marché, ainsi que des politiques de soutien.

- **Tendance** : à la hausse 

b. Véhicule

A la différence des autres technologies, la mise en œuvre de biocarburants peut être rapide car elle ne nécessite pas, le plus souvent, l'acquisition de nouveaux véhicules.

Pour un véhicule diesel Euro VI, le B100 est une option sur la motorisation (homologation du constructeur nécessaire). Le surcoût moyen constaté à l'achat est d'environ 6 300 € HT mais cette solution n'est pas proposée par tous les constructeurs. Il est possible d'utiliser des véhicules aux normes inférieures à l'Euro VI mais cela nécessite la mise en place d'un kit rétrofit¹⁵ (coût 2 000 à 5 000 € HT). Concernant le XtL (HVO), un véhicule diesel standard peut être utilisé sans modification chez la plupart des constructeurs (certains constructeurs indiquent un surcoût de l'ordre de 5 000 € HT pour le XtL 100% exclusif).

Coût moyen d'acquisition :

- B100 : 219 700 € HT pour un véhicule Euro VI agréé, hors options
- XtL (HVO) : 218 400 € HT pour un véhicule Euro VI, hors options
- Coût des options : 80 000 € HT (valeur moyenne pour les véhicules diesel)

NB : bien qu'ils aient augmenté de 7,77 % (B100) et 8,75 % (XtL) en 2 ans, les surcoûts restent inférieurs à l'inflation constatée sur la même période (+ 5,2 % en 2022 et 4,9 % en 2023). A cela s'ajoute la prise en compte de la norme GSR II (environ + 8 000 € HT).

Consommation moyenne (estimation basée sur des sources constructeurs) :

- B100 : 45,9 L / 100km (3 à 6% de plus que diesel Euro VI)
- XtL (HVO) : 43,9 L / 100km (proche diesel Euro VI)

La durée de vie des véhicules à carburants alternatifs est en général de 15 ans, conformément à l'amortissement économique et technique courant des véhicules.

- **Durée de vie / kilométrage** : 15 ans / 600 000km (cf. hypothèse à 20 ans – partie IV.2.)
- **Coût moyen de maintenance préventive** (estimation basée sur des sources constructeurs) :

L'utilisation du B100 génère un surcoût de maintenance d'environ 10 à 15 % qui s'explique notamment par le besoin de faire des vidanges plus régulières. Pour le XtL (HVO), les caractéristiques du carburant laissent penser que le coût de maintenance est similaire au gazole, en attente de retours d'expériences significatifs.

- B100 : 0,31 €/km (hypothèse de surcoût de 11%)
- XtL (HVO) : 0,28 €/km (hypothèse de calcul : idem diesel)

¹⁵ Le rétrofit est une opération consistant à remplacer des composants anciens ou obsolètes par des composants plus récents.

c. Infrastructure

De même que pour le gazole, l'avitaillement en biocarburants nécessite la mise en place d'une station de distribution (cuve + pompes). La réutilisation des cuves existantes est possible. Plusieurs distributeurs de biocarburants prennent en charge les coûts d'installation et de mise à disposition de la cuve dans leur offre commerciale.

A la différence de l'XtL (HVO) qui est soumis aux mêmes mesures de sécurité qu'un gazole standard, le B100 est non ATEX et non classé ICPE.

d. Formation

L'utilisation de carburants B100 et XtL (HVO) ne nécessite pas de formation supplémentaire par rapport à celles requises pour les véhicules diesel (cf. partie III.1.d.).

e. Impacts environnementaux

En comparaison avec les véhicules diesel, les fournisseurs de biocarburants annoncent une réduction sensible des émissions de polluants CO, HC et PM, à l'exception des émissions de NOx qui seraient en légère baisse pour la filière XtL (HVO) et en hausse pour le B100.

Il convient de noter que les mesures de ces émissions ne sont pas toujours réalisées selon le même protocole que les constructeurs de véhicules. Les valeurs indiquées ci-après sont donc à lire comme des tendances, mais ne peuvent être directement comparées avec les valeurs fournies dans les autres parties.

En comparaison avec le gazole, les biocarburants ont peu d'impact sur les émissions de CO₂ en sortie de véhicule, mais leur impact du puits à la roue permet de réduire les émissions de CO₂ de 60% pour le B100 et de 50 à 75% pour l'XtL (HVO) en fonction de la matière première utilisée.

La production de biocarburants soulève néanmoins le débat sur l'utilisation de la terre pour la production d'énergie versus la production alimentaire. A l'échelle mondiale, le développement des biocarburants devrait accroître les prix des denrées alimentaires et pour limiter cette augmentation cela impliquerait que d'importantes superficies de terres soient converties en usage agricole. La conversion de forêts en terres agricoles détériore le bilan environnemental des biocarburants.

- **Emissions de polluants** : (source fournisseurs, comparaison avec gazole)

B100	XtL (HVO)
▪ NOx : jusqu'à +20%	▪ NOx : jusqu'à -9%
▪ CO : jusqu'à -50%	▪ CO : jusqu'à -24%
▪ HC : jusqu'à -50%	▪ HC : N/C
▪ PM : N/C	▪ PM : jusqu'à -33%

- **Emissions de CO₂** (en kg équivalent CO₂) :

B100	XtL (HVO) ¹⁶
<ul style="list-style-type: none">▪ Sortie de véhicule : pas d'écart significatif avec le gazole▪ Du puits à la roue : -60% par rapport au gazole	<ul style="list-style-type: none">▪ Sortie de véhicule : légère baisse par rapport au gazole▪ Du puits à la roue : -50% à -75% en fonction de la matière première

Il convient également de noter que le B100 peut être fabriqué sur le territoire français, alors que l'XtL (HVO) est fabriqué ailleurs en Europe (5 usines) ce qui soulève la question de l'acheminement et de ses conséquences environnementales (au même titre que le gazole).

- **Bruit moyen d'un véhicule roulant :**

- B100 : 72 à 77 dB(A)
- XtL (HVO) : 72 à 77 dB(A)

f. Quelques repères

Selon les chiffres UTP du 1^{er} janvier 2022¹⁷, les carburants B10, B30 et B100 alimentent environ 0,80% du parc d'autobus standard en France. Ils se répartissent de la façon suivante :

- Biodiesel 10%, 30 % : 0,60%
- B100 : 0,20%

Il convient également de noter que le gazole vendu à la pompe en France est un B7 qui incorpore 7% de biocarburant.

Les biocarburants sont encore en phase de développement en France, leur disponibilité ne peut être totalement assurée notamment pour des gros volumes.

Le Syndicat mixte d'Artois Gohelle exploite 26 autobus hybrides alimentés avec du carburant B100 produit à partir d'huiles végétales de colza français.

¹⁶ Source : <https://www.ademe.fr/panorama-evaluation-differentes-filieres-dautobus-urbains>

¹⁷ Source : Le parc des véhicules urbains des services urbains au 1^{er} janvier 2022, UTP

g. Coûts de possession d'un véhicule de 12m sur 15 ans

Véhicule B100 12m, options comprises

Coût moyen d'acquisition :

- 299 700 € HT

Coût énergétique :

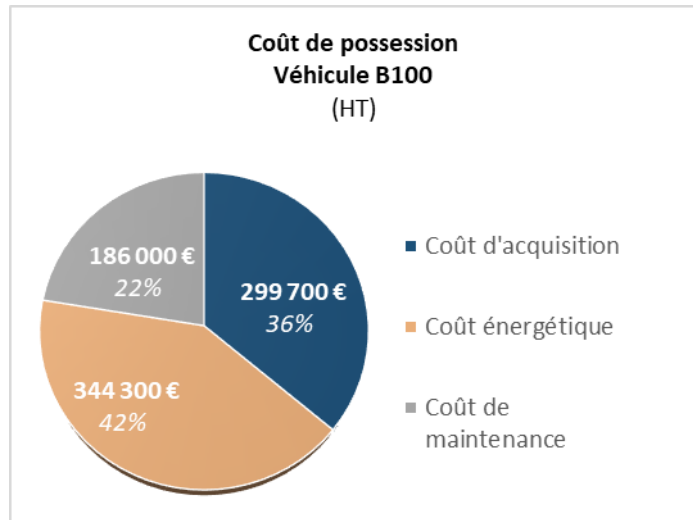
- 344 300 € HT

Coût moyen de maintenance préventive :

- 186 000 € HT

Coût de possession total :

- **830 000 € HT**
soit 1,38 €/km



Véhicule XtL (HVO) 12m, options comprises

Coût moyen d'acquisition :

- 298 400 € HT

Coût énergétique :

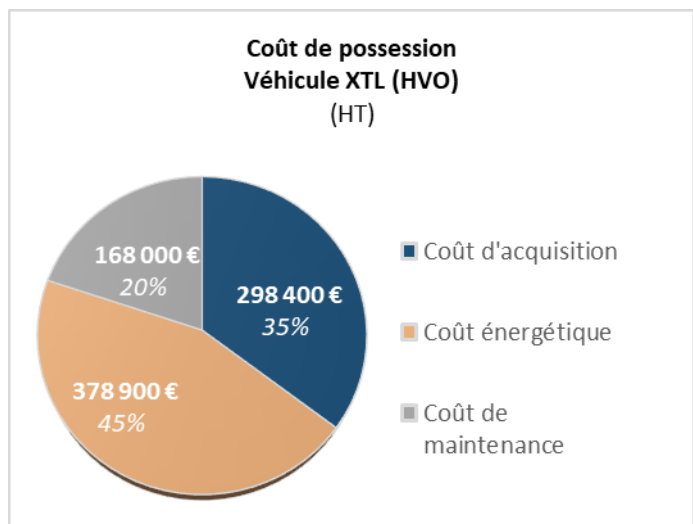
- 378 900 € HT

Coût moyen de maintenance préventive :

- 168 000 € HT

Coût de possession total :

- **845 300 € HT**
soit 1,41 €/km



Sur une durée de 15 ans, les coûts des autobus B100 et de l'XtL (HVO) sont, en moyenne, respectivement 5% et 7% plus élevés que ceux d'un Euro VI thermique.

3. Véhicules thermiques au Gaz Naturel (GNV)

a. Energie

Le gaz utilisé pour les transports publics peut être :

- du gaz naturel, ou gaz fossile, obtenu par extraction, composé majoritairement de méthane ;
- du biogaz ou biométhane, carburant d'origine renouvelable, issu de la fermentation de matières organiques : cultures végétales, déchets ménagers et agricoles, boues d'épuration, etc.

Une fois produit, le biogaz a deux issues pour sa consommation : soit il est consommé directement sur le lieu de production, soit il est injecté dans le réseau de gaz naturel. Dans ce dernier cas, le consommateur peut se fournir en biogaz auprès des fournisseurs grâce au système de garanties d'origine.

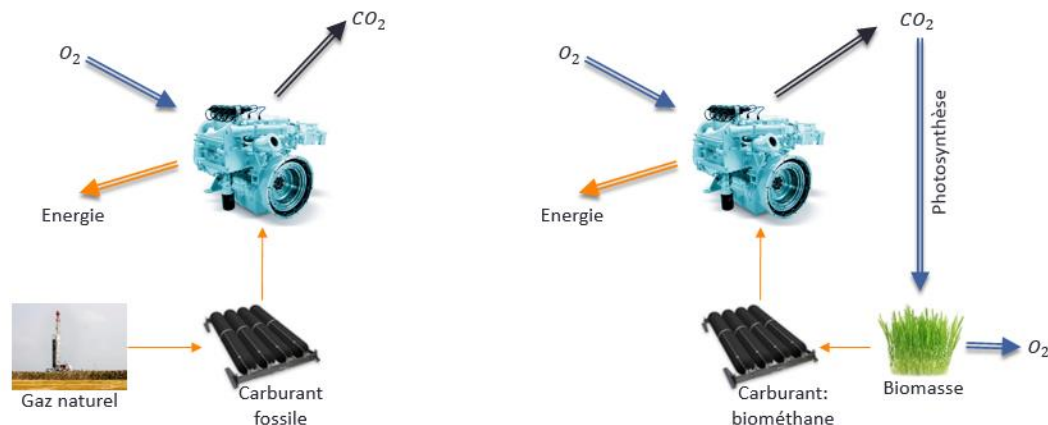


Fig : Cycle vertueux du carbone dans la combustion du biométhane (CATP)

• Prix du gaz :

- GNV : 0,81 €/kg (HT, TICGN comprise), hors coûts de la station de distribution, sur une base du prix du gaz de 55 à 57 €/MWh (moyenne de janvier à mars 2024¹⁸) ;
- BioGNV : 0,92 €/kg (HT, TICGN comprise), hors coûts de la station de distribution.

De par son origine fossile, le prix du gaz naturel pourrait connaître une tendance à la hausse dans les prochaines années, porté par une fiscalité défavorable et l'augmentation du prix d'échanges des quotas-carbone EU-ETS. Concernant le biogaz, on peut regretter qu'il ne bénéficie pas d'une fiscalité plus favorable.

¹⁸ Source Comité National Routier, <https://www.cnr.fr/espaces/13/indicateurs/85>

- **Tendance :**

- GNV : à la hausse
- BioGNV : à la hausse

b. Véhicule

Les véhicules au GNV sont équipés d'un moteur à combustion interne adapté au gaz naturel. Pour être utilisé par les autobus, le gaz est comprimé à 200-220 bars puis stocké dans des réservoirs généralement localisés sur le toit des véhicules.

Des variantes de stockage sous forme liquide à très basse température (GNL) ont été développées pour offrir une plus grande autonomie des véhicules mais il n'y a pas d'offre constructeurs aujourd'hui en France pour des autobus GNL.

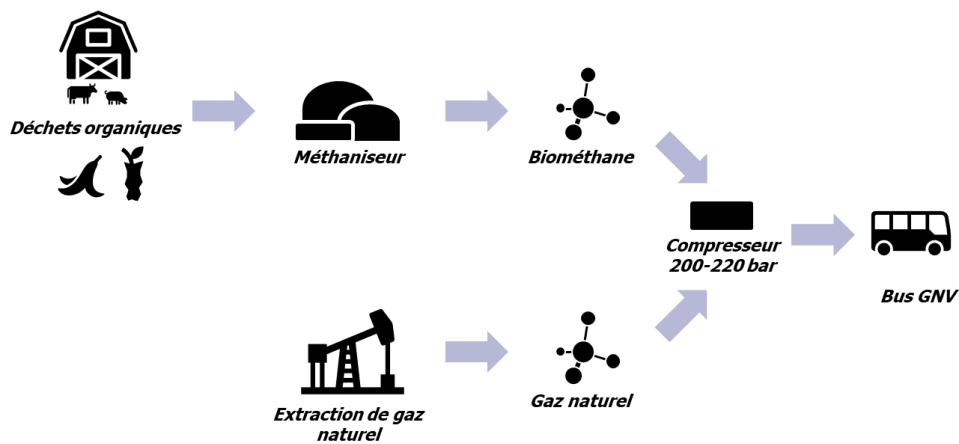


Fig : Principe de base du GNV (CATP)

L'offre des constructeurs sur le marché des autobus GNV tend à se réduire mais couvre encore plusieurs catégories de véhicules allant des gabarits réduits aux articulés de 18 mètres.

Pour respecter le step E de la norme Euro VI, certains constructeurs ajoutent un filtre à particules aux véhicules GNV.



Exemple autobus GNV : Iveco Urbanway

- **Coût moyen d'acquisition :**

- 230 300 € HT, pour un véhicule Euro VI step E, hors options
- Coût des options : 80 000 € HT (valeur moyenne pour les véhicules diesel)

NB : bien qu'il ait augmenté de 6,89 % en 2 ans, le surcoût reste inférieur à l'inflation constatée sur la même période (+ 5,2 % en 2022 et 4,9 % en 2023). A cela s'ajoute la prise en compte de la norme GSR II (environ + 8 000 € HT).

LE SAVIEZ-VOUS ?

La consommation de GNV dépend de la qualité du gaz. Selon l'origine du gaz, le GNV n'a pas toujours le même Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI). Le calcul de la consommation moyenne fournit ci-dessous se base sur une hypothèse de PCI moyen de 10,4 kWh/m³.

- **Consommation moyenne :** 47,2 kg / 100km basé sur cycle SORT1 (step E)

La durée de vie des véhicules GNV est en général de 15 ans, conformément à l'amortissement économique et technique courant des véhicules.

- **Durée de vie / kilométrage :** 15 ans / 600 000km (cf. hypothèse à 20 ans – partie IV.2.)
- **Coût moyen de maintenance préventive :** 0,35 €/km

c. Infrastructure

Un réseau décidant d'investir dans une flotte de véhicules au gaz doit prendre en compte les contraintes techniques spécifiques à l'aménagement d'une station « gaz » et les coûts d'adaptation de l'atelier. En particulier, les surfaces nécessaires pour accueillir les infrastructures doivent être prévues.

Deux postes peuvent être distingués :

- La station de distribution du GNV : elle est équipée d'un ou plusieurs compresseurs qui transforment le gaz à une pression de 200-220 bars pour pouvoir alimenter les véhicules GNV. L'avitaillement des autobus peut s'effectuer en recharge rapide (5 à 10 min) ou en recharge lente (6 à 8 h), mais il est à noter que la charge rapide ne permet pas d'avoir la même autonomie qu'une charge lente, lié à l'échauffement du gaz.

Dans le cas de la recharge lente, le remplissage se fait généralement de nuit et chaque emplacement de stationnement doit donc posséder une arrivée de gaz. En fonction du nombre de postes de charge et du temps de charge souhaité par véhicule, le dimensionnement des compresseurs peut varier, et un stockage tampon haute pression peut être inclus ou pas dans la station. Par exemple, une recharge simultanée de plusieurs autobus en moins de 10 minutes peut être possible même sans stockage tampon – tout dépend de la puissance des compresseurs. Il existe aussi des stations mixtes avec des postes de charge rapide et de charge lente. Les stations de distribution de GNV sont toujours soumises à la réglementation ATEX, et classées ICPE 1413 à partir d'un débit de 80 Nm³/h.

- L'adaptation de l'atelier : les ateliers de maintenance doivent respecter les réglementations et normes de sécurité (réglementation ATEX / APSAD, ICPE 2930 et arrêté du 12 mai 2020) relatives à l'organisation humaine et matérielle qui définissent les zones de travail, les exigences en termes de ventilations, outils de détection, les mesures de prévention du risque incendie etc.

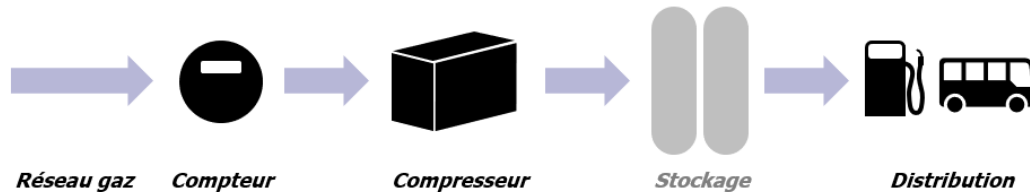


Fig : Station de distribution du GNV (CATP)

Le coût de l'infrastructure de charge dépend de nombreux paramètres : nombre de postes de charge, type de charge (rapide ou lente), présence de stockage tampon, présence ou non d'autres flottes captives publiques (collecte des déchets, etc.), ouverture au public ou à d'autres flottes privées (transport de marchandises), etc.

- **Coût des infrastructures :**

- Station de distribution (recharge lente) :
 - de 1,3 à 2,0 M€ HT pour une cinquantaine de véhicules ;
 - de 2,5 à 3,5 M€ HT pour une centaine de véhicules ;
- Station de distribution (recharge rapide) : de 1,2 à 1,8 M € HT pour le rechargement simultané d'une quinzaine de véhicules.

Ces coûts, très variables, comprennent les compresseurs, stockages, postes de distribution, mais aussi le génie civil, les raccordements et frais d'installation.

- Adaptation de l'atelier : de l'ordre de 60 000 à 100 000 € par travée.

Ces coûts dépendent fortement de la configuration de l'atelier. Ils se composent principalement des travaux liés à la mise aux normes de l'atelier (sécurité incendie, réglementation ATEX) ainsi que des adaptations techniques pour assurer la maintenance des autobus GNV (plus de hauteur, équipements pour accès aux toitures, etc.).

d. Formation

Les personnels opérant en maintenance sur des véhicules GNV doivent suivre des formations spécifiques et disposer d'une habilitation établie par le chef d'établissement¹⁹. Trois niveaux de qualifications sont distingués, selon le domaine d'intervention visé.

Niveau de qualification	Domaine d'intervention autorisé	Formation reçue
1	Circuit basse pression	Information sur GNV et formation constructeur
2	Circuit basse et haute pression, sauf démontage / remontage de la vanne sur le réservoir	Formation spécifique constructeur
3	Intégralité du système GNV	Formation spécifique constructeur complétée par d'autres formations

Fig : Niveaux d'habilitation pour le GNV

e. Impacts environnementaux

En comparaison avec les véhicules diesel, la combustion de gaz permet de réduire sensiblement les émissions d'oxyde d'azote (NOx), en revanche les impacts sur les particules fines (PM) restent dans des plages de valeurs similaires.

Les émissions de CO₂ des véhicules fonctionnant au GNV restent proches d'un véhicule diesel Euro VI. Le recours à du biogaz permet de limiter significativement les émissions de carbone (recours à de l'énergie non fossile) du puits à la roue.

- **Emissions de polluants** (banc d'essai moteur, cycle WHTC) :
 - NOx : 0,0767-0,1061 g/kWh
 - CO : N/C
 - HC : <0,01 g/kWh
 - PM : 0,0037-0,0093 g/kWh

- **Emissions de CO₂** (en kg équivalent CO₂, facteurs d'émission ADEME) :

GNV	BioGNV
▪ Sortie de véhicule : 1,043-1,2026 kg/km	▪ Sortie de véhicule : 1,043-1,2026 kg/km
▪ Puits à la roue : 1,282- 1,400 kg/km	▪ Puits à la roue : 0,263- 0,288 kg/km

- **Bruit d'un véhicule roulant** : 73-76 dB(A)

¹⁹ Véhicules fonctionnant au gaz naturel, INRS <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206003>

f. Quelques repères

Au 1er janvier 2023²⁰, 18,5% du parc français d'autobus circulait au GNV (5145 véhicules). Cette part est restée relativement stable entre 2011 et 2020 mais elle est en nette augmentation depuis (+77%). Les plus grosses flottes se situent à Paris, Lille, Bordeaux, Nantes et Toulouse.

LE SAVIEZ-VOUS ?

Les autobus au gaz ont fait leur apparition en France au début des années 90 à titre expérimental mais c'est véritablement à partir de 1998 que les ventes de véhicules GNV ont progressé de manière significative.

²⁰ Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/transports>

g. Coûts de possession d'un véhicule de 12m sur 15 ans

Véhicule GNV, options comprises

Coût moyen d'acquisition :

- 310 300 € HT

Coût énergétique :

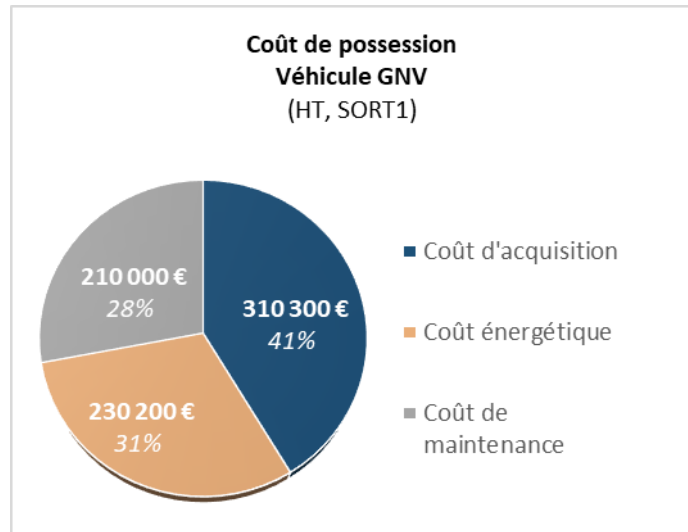
- 230 200 € HT

Coût moyen de maintenance préventive :

- 210 000 € HT

Coût de possession total :

- **750 500 € HT**
soit 1,25 €/km



Véhicule BioGNV, options comprises

Coût moyen d'acquisition :

- 310 300 € HT

Coût énergétique :

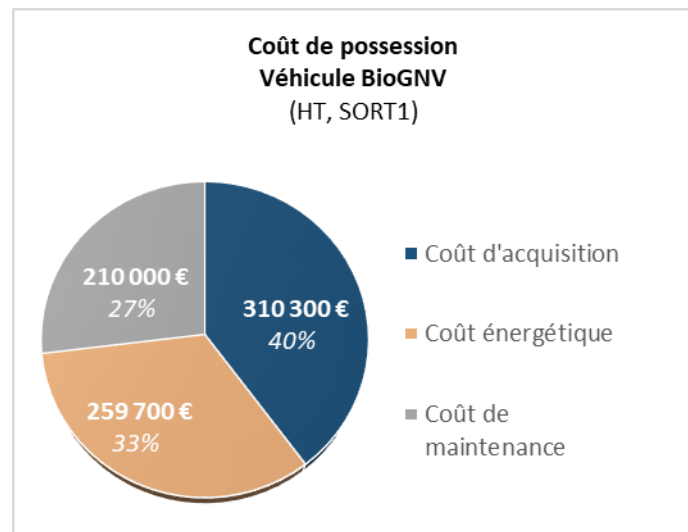
- 259 700 € HT

Coût moyen de maintenance préventive :

- 210 000 € HT

Coût de possession total :

- **780 000 € HT**
soit 1,30 €/km



Sur une durée de 15 ans, le coût d'un autobus fonctionnant au GNV est 5% plus faible que celui d'un Euro VI thermique. Le coût d'un autobus BioGNV est très proche de celui Euro VI thermique.

4. Véhicules à motorisation hybride (Diesel/GNV)

Propos liminaires

Les véhicules hybrides se distinguent par le degré d'hybridation et la technologie utilisée (hybride série vs. hybride parallèle).

L'hybride rechargeable qui permet une autonomie en mode 100% électrique sur plusieurs kilomètres n'est pas traité ici car non disponible pour les autobus.

L'énergie pour la propulsion provient donc toujours à la base du moteur thermique.

La technologie hybride associe plusieurs moteurs pour alimenter ou propulser le véhicule.

Dans le cas de l'**hybride série**, seul le moteur électrique entraîne les roues. Le moteur thermique alimente, via un générateur, soit directement le moteur électrique, soit une batterie. La batterie peut, quant à elle, soit alimenter le moteur électrique, soit être rechargée : par le moteur électrique lors des décélérations ou par le moteur thermique via un générateur.

Dans le cas de l'**hybride parallèle**, les deux moteurs (électrique et thermique) peuvent entraîner les roues, avec plusieurs scénarios de répartition. La batterie qui alimente le moteur électrique est rechargée par le moteur électrique lors des décélérations, et peut parfois être rechargée par le moteur thermique.

Le degré d'hybridation est déterminé par le dimensionnement des composants :

- Dans un **mild-hybride** (ou hybridation légère), on trouve ainsi un alterno-démarrreur à la place du moteur électrique et un système de stockage de l'électricité (supercondensateur ou batterie LTO, cf. partie III.5.a.). Les composants électriques ne sont pas suffisamment dimensionnés pour permettre une propulsion 100% à l'électrique ; le système électrique vient seulement en appui du moteur thermique mais permet de réduire sa consommation.
- En revanche, dans un **full-hybride** (ou hybridation totale) – les composants électriques étant plus performants – cela peut être possible en fonction des spécifications du véhicule. Sur un hybride parallèle, le mode électrique soutient le moteur thermique en cas de besoin.

Une réduction de la consommation de carburant est commune à toutes ces formes d'hybridation, parce que le moteur thermique peut être davantage utilisé dans des régimes où il présente un meilleur rendement. Le rendement d'un moteur électrique est beaucoup moins impacté par son régime et se prête ainsi particulièrement à la circulation en milieu urbain, avec des nombreuses situations de freinage, redémarrage et accélération.

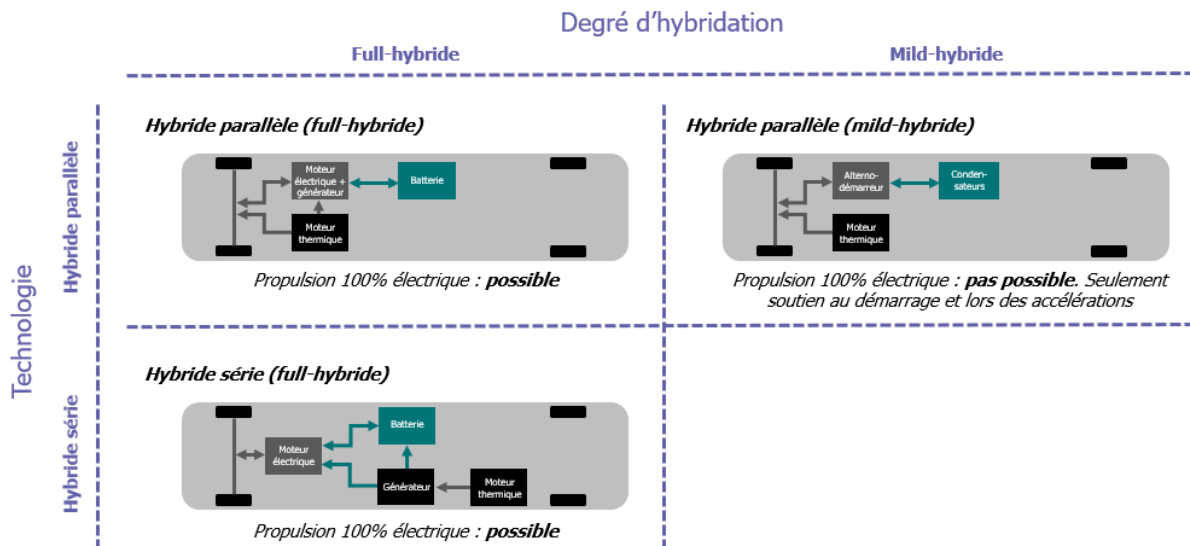


Fig : Technologies de véhicules hybrides (CATP)

a. Energie

La technologie hybride associe plusieurs moteurs pour alimenter ou propulser le véhicule. La filière industrielle développe aujourd'hui quasi exclusivement des systèmes diesel et électrique ou GNV et électrique.

Comme indiqué en partie II.1.a. et II.3.a. les prix du gazole et du GNV/bioGNV pourraient poursuivre une tendance à la hausse dans les années à venir.

- **Prix des énergies :**

- Gazole : 1,25 €/L (HT, incluant le remboursement partiel de TICPE), moyenne du prix à la cuve de janvier à mars 2024²¹
- GNV : 0,81 €/kg (HT, TICGN comprise), hors coûts de la station de distribution, sur une base du prix du gaz de 55 à 57 €/MWh (moyenne de janvier à mars 2024²²) ;
- BioGNV : 0,92 €/kg (HT, TICGN comprise), hors coûts de la station de distribution.

- **Tendance :**

- Gazole : à la hausse
- GNV : à la hausse
- BioGNV : à la hausse

b. Véhicule

Suite au passage au step E de la norme Euro VI, la technologie full-hybride tend à disparaître de l'offre des constructeurs. La plupart d'entre eux ont abandonné cette technologie au profit de la solution mild-hybride, cette dernière présentant l'avantage d'être moins coûteuse (surcoût divisé par 4), pour des gains de consommation relativement similaires.

²¹ Source : Comité National Routier, <https://www.cnr.fr/espaces/22/indicateurs/100?noContext=1>

²² Source : Comité National Routier, <https://www.cnr.fr/espaces/13/indicateurs/85>

La technologie full-hybride ne sera donc pas abordée dans cette étude.



Exemple autobus mild-hybride : Man Lion's City

• **Coût moyen d'acquisition :**

- Mild-hybride gazole : 219 500 € HT, hors options
- Mild-hybride GNV/BioGNV : 244 600 € HT, hors options
- Coûts des options : 80 000 € HT (valeur moyenne pour les véhicules diesel)

NB : les surcoûts constatés sont sensiblement ceux des véhicules diesel et restent donc en dessous de l'inflation constatée sur la même période.

• **Consommation moyenne :**

- Mild-hybride gazole : 36,7 L / 100km (basée sur cycle SORT 1)
- Mild-hybride GNV/BioGNV : 42,4 kg / 100km (basée sur cycle SORT 1)

Important : comme précisé dans le préambule, le coût énergétique présenté prend en compte une vitesse commerciale moyenne de 12 km/h. La technologie mild-Hybride offre des gains de consommation bien moins importants à mesure que la vitesse commerciale moyenne des véhicules augmente. Par exemple, pour un autobus fonctionnant au GNV, les gains de consommation théoriques avoisinent les 10% en moyenne pour une vitesse commerciale moyenne de 12 km/h, contre 8% en moyenne pour une vitesse commerciale moyenne de 18 km/h.

La durée de vie des véhicules à motorisation hybride est en général de 15 ans, conformément à l'amortissement économique et technique courant des véhicules.

- **Durée de vie / kilométrage** : 15 ans / 600 000km (cf. hypothèse à 20 ans – partie IV.2.)
- **Coût moyen de maintenance préventive** :
 - Mild-hybride gazole : 0,29 €/km
 - Mild-hybride GNV/BioGNV : 0,33 €/km

c. Infrastructure

L'infrastructure d'avitaillement pour les autobus hybrides non rechargeables est celle des véhicules diesel ou GNV.

Les ateliers de maintenance sont concernés par la rubrique ICPE 2930. L'arrêté du 12 mai 2020²³ classe les ateliers de réparation et entretien pour véhicules hybrides comme « locaux à risque » qui doivent être protégés du risque incendie. Le respect des contraintes propres au GNV est aussi à intégrer (cf. partie III.3.c).

- **Coût des infrastructures :**

- Adaptation de l'atelier : de l'ordre de 20 000 à 50 000 € par travée, auquel doit se rajouter, les coûts spécifiques liés au GNV (cf. partie III.3.c).

Ces coûts dépendent fortement de la configuration de l'atelier. Ils se composent principalement des travaux liés à la mise aux normes de l'atelier (sécurité incendie) ainsi que des adaptations techniques pour assurer la maintenance des autobus hybrides (plus de hauteur, équipements pour accès aux toitures, etc.).

d. Formation

Outre les formations requises pour les véhicules diesel (cf. partie III.1.d.), ou pour les véhicules GNV (cf. partie III.3.d.), la réalisation d'opérations de maintenance sur véhicules hybrides nécessite également des habilitations électriques, selon le type d'activité réalisé.

La réglementation fixée par le décret 2010-1118 du 22 décembre 2010²⁴ exige en effet que les opérations sur les installations électriques ou dans leur voisinage soient réalisées par des personnes habilitées. L'équipement électrique des véhicules à motorisation hybride ayant une source d'énergie embarquée fait partie de ces installations. Les habilitations passent notamment par une formation préalable à la sécurité (cf. partie III.5.d.).

e. Impacts environnementaux

L'hybridation pose toujours la question de l'emploi d'un carburant fossile, qui même à un niveau de consommation réduit, rejette des polluants et du CO₂.

- **Emissions de polluants** (banc d'essai moteur, cycle WHTC) :

Mild-hybride gazole	Mild-hybride GNV/BioGNV
▪ NOx : 0,148-0,338 g/kWh	▪ NOx : 0,0767-0,1061 g/kWh
▪ CO : N/C	▪ CO : N/C
▪ HC : <0,01 g/kWh	▪ HC : 0,01 g/kWh
▪ PM : 0,0023-0,0038 g/kWh	▪ PM : 0,0001-0,0024 g/kWh

²³ Source : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041876039>

²⁴ Source : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000022845983/>

- **Emissions de CO₂** (en kg équivalent CO₂, facteurs d'émission ADEME) :

Mild-hybride gazole	Mild-hybride GNV/BioGNV
▪ Sortie de véhicule : 0,876-0,951 kg/km	▪ Sortie de véhicule : 0,9206-1,20 kg/km
▪ Puits à la roue : 1,128 kg/km	▪ Puits à la roue : 0,954 kg/km

- **Bruit moyen d'un véhicule roulant :**

- Mild-hybride gazole : 72-77 dB(A)
- Mild-hybride GNV/BioGNV : 73-76 dB(A)

f. Quelques repères

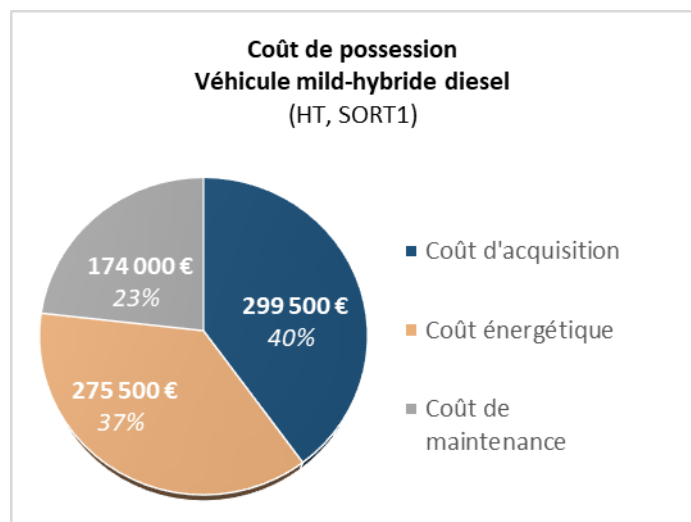
Les premiers véhicules full-hybrides ont fait leur apparition en France en 2009, dans le cadre d'expérimentations.

Au 1^{er} janvier 2023²⁵, les véhicules hybrides sont en légère progression, impulsés par la technologie mild-hybride commercialisée depuis 2018 et représentent dorénavant 10,2% du parc d'autobus français avec des flottes importantes en région parisienne, à Dijon, Lens, Bordeaux, Angoulême...

g. Coûts de possession d'un véhicule de 12m sur 15 ans

Véhicule « mild-hybride gazole » 12m, options comprises

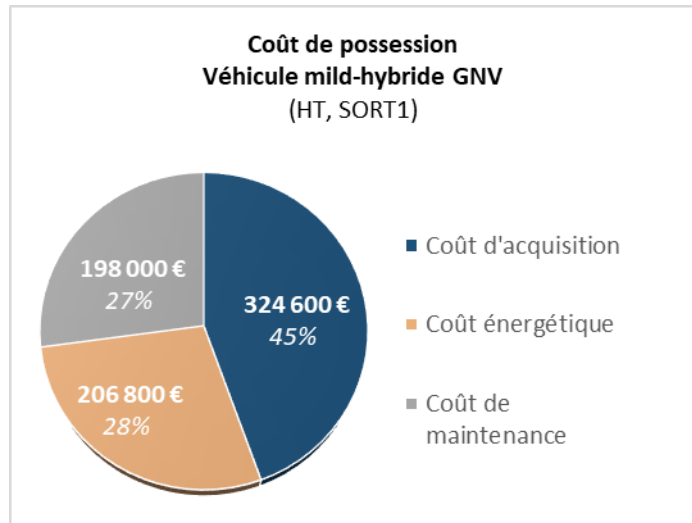
- Coût moyen d'acquisition :
 - 299 500 € HT
- Coût énergétique :
 - 275 500 € HT
- Coût moyen de maintenance préventive :
 - 174 000 € HT
- **Coût de possession total :**
 - **749 000 € HT**
soit 1,25 €/km



²⁵Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/transports>

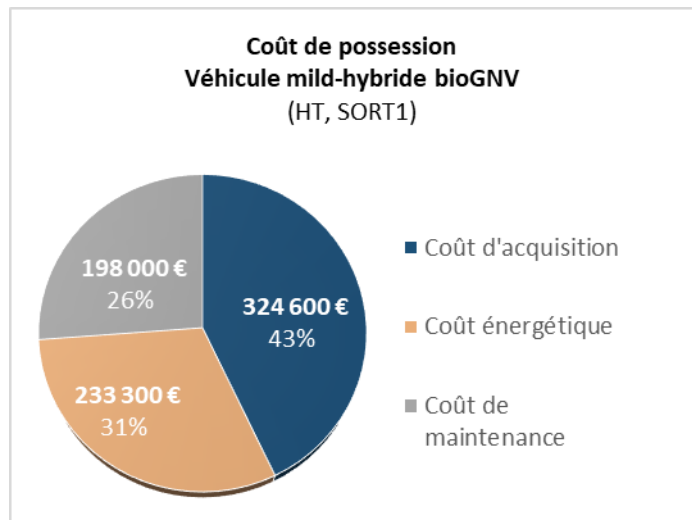
Véhicule « mild-hybride GNV » 12m, options comprises

- Coût moyen d'acquisition :
 - 324 600 € HT
- Coût énergétique :
 - 206 800 € HT
- Coût moyen de maintenance préventive :
 - 198 000 € HT
- **Coût de possession total :**
 - **729 400 € HT**
soit 1,22 €/km



Véhicule « mild-hybride BioGNV » 12m, options comprises

- Coût moyen d'acquisition :
 - 324 600 € HT
- Coût énergétique :
 - 233 300 € HT
- Coût moyen de maintenance préventive :
 - 198 000 € HT
- **Coût de possession total :**
 - **755 900 € HT**
soit 1,26 €/km



Sur une durée de 15 ans, les coûts d'un autobus « mild-hybride », qu'il soit diesel ou GNV sont légèrement inférieurs de ceux d'un Euro VI thermique (-5 % pour le gazole, -8% pour le GNV et -4% pour le BioGNV). Quel que soit le type d'énergie, le coût énergétique représente environ 1/3 du coût total de possession.


5. Véhicules électriques à batterie

a. Energie

Les véhicules électriques à batterie se déplacent grâce à une chaîne de traction fonctionnant avec un moteur électrique alimenté par des batteries. Les véhicules électriques à batterie utilisent ainsi l'électricité comme unique source d'énergie.

En 2023, le mix électrique français provient principalement du nucléaire (64,8%), suivi par l'hydraulique (11,9%), l'éolien (10,3%), le thermique (6,5%), le solaire (4,4%) et les bioénergies (2,1%)²⁶. De l'électricité 100% renouvelable peut être achetée auprès des fournisseurs grâce au système de garanties d'origine.

Le prix de l'électricité qui augmentait de façon régulière depuis plusieurs années, a vu son prix plus que doubler depuis la flambée du prix de l'énergie en 2021 et 2022.

- **Prix de l'électricité** : 0,20 €/kWh (HT), moyenne de janvier à mars 2024, hors coûts d'infrastructure de la station de distribution²⁷ ;
- **Tendance** : à la hausse 

b. Véhicule

Plusieurs systèmes d'entraînement sont développés par les constructeurs :

- Le moteur électrique entraîne le pont par l'intermédiaire d'un arbre de transmission puis les roues (architecture identique à celle d'un bus thermique) ;
- La motorisation électrique est située directement sur l'essieu arrière, par le biais de deux moteurs-roues.

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

La batterie est le plus souvent stockée sur le toit ou dans le compartiment moteur situé à l'arrière du véhicule. Chez certains constructeurs, elle peut aussi être positionnée dans le plancher.

Il existe de nombreuses technologies de batteries qui diffèrent selon la nature chimique de leurs électrodes ou de leur électrolyte. A l'heure actuelle, les constructeurs laissent rarement le choix technologique des batteries. Ces dernières bénéficient d'optimisations régulières tous les deux ans environ et évoluent très vite.

²⁶ Source : <https://www.rte-france.com/actualites/bilan-electrique-france-2023-nouvel-equilibre-systeme-electrique>

²⁷ Source : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010764291>

NMC (Nickel Manganèse Cobalt)

C'est l'accumulateur le plus utilisé sur les autobus dans un contexte de charge lente. Il comporte une électrode positive composée de nickel, manganèse et cobalt, et présente des caractéristiques intéressantes en termes d'énergie. Le dispositif de gestion de la batterie doit être performant afin d'éviter tout risque d'incendie ou d'explosion en cas de surcharge. Le cobalt est un élément peu abondant sur Terre, et les réserves principales sont concentrées dans quelques pays uniquement. Les recherches en cours sur ces batteries consistent à diminuer la proportion de cobalt au profit du nickel, qui est beaucoup plus abondant.

LMP : Lithium Métal Polymère

Cet accumulateur utilise un électrolyte solide plutôt que liquide, ce qui permet d'améliorer la sécurité de la batterie en évitant les courts-circuits internes. Des décharges profondes sont possibles sans incidence notable sur la durée de vie, elles ont une capacité d'énergie utile importante. La batterie a la particularité de fonctionner avec une température interne élevée (70°C - on les qualifie de « batteries chaudes ») et quand le véhicule est stationné, il doit être branché afin que le dispositif de maintien de la température interne de la batterie soit activé. Le rendement est meilleur quand les températures extérieures sont élevées.

LFP ou LiFePO4 (Lithium Fer Phosphate)

Cet accumulateur présente l'avantage d'être très stable (moins de risque d'emballement thermique), d'avoir une bonne durée de vie, ainsi que d'utiliser des matériaux abondants et neutres pour l'environnement. Sa densité d'énergie et sa puissance longtemps restées en retrait, peuvent aujourd'hui rivaliser avec celles des accumulateurs NMC. Des recherches sont en cours pour les perfectionner.

LTO (Lithium titanate)

Cet accumulateur est privilégié dans le cas de recharges rapides, car il supporte un grand nombre de cycles de charge/décharge avec des courants élevés. En contrepartie, sa densité et son énergie sont peu élevées. Le titanate est abondant à l'état naturel et non toxique pour l'environnement.



Exemple autobus électrique : Evobus eCitaro

A ce jour, aucune technologie ne semble se démarquer chez les fournisseurs de batteries, chacune présentant ses avantages et ses inconvénients. Néanmoins, on peut constater qu'il y a une répartition homogène entre les technologies NMC et LFP en 2024 (alors qu'en 2018, la répartition était de 20 % LFP / 80% NMC).

Certains constructeurs proposent les 2 électrochimies NMC et LFP. Dans ce cas, on observe d'une part que les batteries NMC permettront d'atteindre des autonomies supérieures à celles des LFP, et peuvent supporter (occasionnellement) des puissances de recharge supérieures. D'autre part, à capacité équivalente, la moins-value pour l'achat des LFP est d'environ 15 à 20% (en première monte – lors de l'acquisition du véhicule).

La technologie LTO est réservée aux applications de bus électrique avec recharge en bout de ligne par pantographe ou alors dans les usages où la batterie est sollicitée sur de fréquents cycles de charge/décharge journaliers que l'on retrouve également dans les véhicules mild hybride, hydrogène ou trolleybus.

La capacité nominale avec le nombre maximal de packs batteries proposé sur des véhicules électriques à charge lente peut aujourd'hui atteindre 600 kWh, ce qui donne une capacité réellement utilisable en pratique (capacité utile) d'environ 450-500 kWh. Le dimensionnement du nombre de packs doit répondre au compromis entre autonomie, coût d'achat, et éventuelle perte du nombre de places debout. Selon les situations, il n'est pas toujours opportun de choisir le nombre maximal de packs.

Il existe trois stratégies d'acquisition concernant les batteries :

- Achat du pack batterie ;
- Location du pack batterie en full maintenance (proposé par une partie seulement des constructeurs ou par des prestataires tiers) ;
- Véhicule en contrat d'entretien complet.

LE SAVIEZ-VOUS ?

Depuis avril 2020 (Arrêté du 13 mars 2020²⁸), la conversion d'un véhicule thermique en électrique – le retrofit - est autorisée, sous certaines conditions, dont notamment : autobus de plus de 5 ans, maintien des dimensions du véhicule (Depuis l'entrée en vigueur de l'arrêté du 12 septembre 2023, il est admis une augmentation de la hauteur du véhicule de 80 cm par rapport au hors tout déclaré du véhicule de base ; et modification du porte-à-faux arrière dans les limites prévues du constructeur), un maintien de la puissance du moteur thermique et de la masse maximale admissible (sauf autorisation du constructeur), la masse à vide ne pouvant dépasser 20% de celle initiale (30 % pour les véhicules de catégories M3).

A ce jour, les cas de retrofit en France concernent exclusivement les autocars.

²⁸ Arrêté du 13 mars 2020 relatif aux conditions de transformation des véhicules à motorisation thermique en motorisation électrique à batterie ou à pile combustible ; modifié par un arrêté du 12 septembre 2023.

L'étude porte sur l'autobus électrique à batterie à charge lente.

- **Coût moyen d'acquisition :**

- 474 500 € HT pour un véhicule de base, hors options (dont coût batterie : 139 000 € HT pour une capacité de 450 kWh) ;
- Coût des options : 80 000€ HT (valeur moyenne pour les véhicules diesel)

NB : le coût moyen d'acquisition est équivalent à février 2022. On peut donc considérer qu'il a diminué ces 2 dernières années si l'on tient compte de l'inflation constatée sur la même période (+ 5,2 % en 2022 et + 4,9 % en 2023), des surcoûts liés à la mise en place de la norme GSR II (environ + 8 000 € HT) et du progrès des performances des batteries.

En effet, la capacité des batteries a considérablement évolué ces dernières années. Les batteries peuvent aujourd'hui assurer une autonomie maximale en conditions réelles comprise entre 220 km avec le chauffage en conditions hivernales et supérieure à 330 km en absence de confort climatique. Cette autonomie reste néanmoins très variable et dépend de nombreux paramètres : auxiliaires, confort thermique (chauffage, climatisation, etc.), présence de relief, conduite du conducteur (anticipation freinage), etc.

- **Consommation moyenne :** 125 kWh / 100 km (de 100 à 140 kWh /100 km)

La durée de vie des véhicules électriques à batterie est en général de 15 ans, conformément à l'amortissement économique et technique courant des véhicules. Un remplacement des batteries est à prévoir autour de 9 ans (auparavant à 7,5 ans). Cela pose donc la question du prolongement de la durée de vie du véhicule au-delà des 15 ans afin d'optimiser ce surcoût de remplacement de batteries (cf. partie IV.2.).

Cette durée de vie des batteries varie selon le niveau d'utilisation, le relief, etc. Leur capacité utile tend à baisser pendant la durée de vie ; on considère qu'une batterie perd 20 à 25% de sa capacité initiale au bout de 9 ans. A noter que les améliorations de leurs caractéristiques permettent à certains constructeurs d'annoncer des durées pouvant aller jusqu'à 14 ans, au prix de concessions sur l'autonomie pour les dernières années d'exploitation du véhicule.

Lors du changement des packs, il faut s'attendre à ce que la technologie ait beaucoup évolué.

- **Durée de vie / kilométrage :**

- Véhicule : 15 ans / 600 000km (cf. hypothèse à 20 ans – partie IV.2.)
- Batterie : 9 ans

Le prolongement de la durée de vie des batteries pose la question de la pertinence ou non de leur remplacement à mi-vie ainsi qu'à l'âge de réforme des véhicules : remplacement à mi-vie avec ou sans prolongement de la durée de vie au-delà de 15 ans ; non remplacement des batteries).

- **Coût moyen de maintenance préventive :**

- Hors renouvellement batterie : 0,22 €/km
- Renouvellement batterie : 139 000 € HT

c. Infrastructure

Un réseau décidant d'investir dans une flotte de véhicules électriques doit prendre en compte les contraintes techniques spécifiques à l'aménagement d'une station de distribution dédiée et les coûts d'adaptation de l'atelier. En particulier, les surfaces nécessaires pour accueillir les infrastructures doivent être prévues.

Deux types de charge sont disponibles en fonction des besoins ²⁹ :

La charge lente

La charge lente est réalisée au dépôt à l'aide de bornes raccordées au réseau électrique. En fonction de la puissance totale sur le dépôt, l'installation d'un transformateur peut être nécessaire. Selon les chargeurs et leurs puissances, 1 ou 2 véhicules (voire plus, jusqu'à 8 véhicules sur certains chargeurs) peuvent être alimentés simultanément.

Les difficultés rencontrées par le passé concernant l'interopérabilité des chargeurs tendent à diminuer avec la multiplication des projets et l'application de la norme ISO 15118³⁰, qui définit un standard de communication entre les véhicules électriques et les infrastructures de charge.

Toutefois, certaines strates doivent venir encore alimenter cette norme avec la standardisation de certaines fonctionnalités comme le pré-conditionnement.

Des obligations sont à respecter pour les stations électriques afin de prévenir tout risque d'incendie. Si l'atelier de charge contient au moins 10 véhicules (présents simultanément dans l'atelier de charge), l'arrêté du 3 août 2018³¹ impose le respect de distances d'isolement entre l'aire de charge et des installations tierces mais ces limites peuvent être réduites avec l'installation de parois coupe-feu, de systèmes de sprinklage, etc. L'installation de charge est classée ICPE 2925 si la puissance maximale de courant continu est supérieure à 50 kW.

Les ateliers de maintenance sont concernés par la rubrique ICPE 2930. L'arrêté du 12 mai 2020³² classe notamment les ateliers de réparation et entretien pour véhicules électriques comme « locaux à risque » qui doivent être protégés du risque incendie.

• **Coût des infrastructures :**

- Chargeur 50 kW : de 30 000 à 60 000 € HT par borne ;
- Chargeur 150 kW : de 45 000 à 90 000 € HT par borne.

Il s'agit de coûts totaux comprenant les bornes de charge et leur installation, mais aussi le génie civil, le raccordement, le transformateur et la supervision.

- Adaptation de l'atelier : environ 20 000 à 50 000 € par travée.

²⁹ Adoption du règlement délégué, concernant les normes applicables sur les systèmes de charge des autobus électriques, par la Commission européenne le 17 juin 2021. Les spécifications s'appliquent aux points de recharge installés à partir du 26 septembre 2023 :

³⁰ Source : <https://www.iso.org/fr>

³¹ Arrêté du 3 août 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux ateliers de charge contenant au moins 10 véhicules de transport en commun de catégorie M2 ou M3 fonctionnant grâce à l'énergie électrique et soumis à déclaration sous la rubrique n° 2925 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement

³² Arrêté du 12 mai 2020 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n° 2930 (Ateliers de réparation et d'entretien de véhicules et engins à moteur, y compris les activités de carrosserie et de tôlerie) de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement

Ces coûts dépendent fortement de la configuration de l'atelier. Ils se composent principalement des travaux liés à la mise aux normes de l'atelier (sécurité incendie) ainsi que des adaptations techniques pour assurer la maintenance des autobus électriques (plus de hauteur, équipements pour accès aux toitures, etc.).

La charge rapide

La charge rapide est un mode d'alimentation réalisé au point d'arrêt. Seule la quantité d'énergie nécessaire pour aller au prochain point de recharge est accumulée. La charge rapide permet ainsi de réduire significativement la taille des batteries embarquées et donc le poids et le coût des véhicules.

Deux stratégies de charge rapide peuvent être distinguées :

- La recharge en bout de ligne. Ce système consiste à recharger un véhicule électrique en bout de ligne pour lui permettre une autonomie suffisante sur la ligne exploitée. Le véhicule se recharge donc rapidement (6 à 8 mn) à chaque terminus, généralement via un pantographe permettant des intensités électriques élevées.
- Le biberonnage : la recharge à chaque arrêt. Ce système consiste à recharger un véhicule électrique à chaque arrêt. Le véhicule est équipé de supercapacités ce qui lui permet une recharge très courte (quelques dizaines de secondes), généralement grâce à un bras articulé intégré au mobilier urbain. A noter que l'augmentation des capacités de batterie pourrait réduire l'intérêt du biberonnage dans les années à venir.

Dans les deux cas, il est possible également d'effectuer la recharge par induction : un système d'alimentation sans contact, empêchant tout risque d'électrocution et sans impact visuel sur l'environnement et le patrimoine urbain. La recharge se fait alors soit par le sol (enfouis sous la chaussée), soit par le toit du véhicule. Cette technologie est actuellement encore au stade d'expérimentation et présente un rendement inférieur aux systèmes avec contact.

Les retours d'expérience sur la charge rapide sont encore aujourd'hui peu nombreux, mais elle semble donner de bons résultats sur des lignes bien adaptées à l'électrification et avec un emplacement stratégique des points de recharge. Un ordre de grandeur cohérent du coût d'installation d'une station de recharge rapide avec pantographe se situe autour de 350 000 € HT (hors coûts du génie civil).

Logiciels de supervision des chargeurs et de gestion intelligente de la charge (smartcharging)

En fonction du contexte propre à chaque exploitant et de la puissance de charge disponible, des logiciels permettent de faciliter la gestion du dispositif de recharge dans son ensemble :

- Superviser à distance la charge en temps réel, alerter en cas de dysfonctionnement et enregistrer des données à des fins statistiques
- Piloter automatiquement la séquences de recharge de chaque véhicule pour tenir compte de son exploitation programmée dans le but d'optimiser la puissance disponible tout en évitant les pics de consommation. En outre, il permet de déclencher la mise en œuvre du pré-conditionnement, c'est-à-dire d'activer la gestion climatique interne propre à chaque véhicule et ainsi garantir une température optimale lors du démarrage, sans pour autant puiser dans les batteries.

Une attention particulière est à porter sur ces logiciels dans la mesure où parfois ils nécessitent d'être interfacés avec d'autres solutions, comme un outil de graphichage ou de système d'aide à l'exploitation. Ils peuvent être acquis auprès des fournisseurs de bornes de recharge mais d'autres sociétés se spécialisent dans ce domaine. Selon leurs fonctionnalités, leurs coûts peuvent être très variables (de 5 000 € à plusieurs dizaines de milliers d'euros.).

d. Formation

La réglementation fixée par le décret 2010-1118 du 22 décembre 2010³³ exige que tous les travailleurs qui effectuent des opérations sur les installations électriques ou dans leur voisinage disposent d'une habilitation électrique.

Les formations préalables à l'habilitation électrique comprennent deux parties : une partie théorique pour l'acquisition des savoirs et une partie pratique pour l'acquisition des savoir-faire.

La norme NF C 18-550 définit les différents symboles d'habilitation en fonction, entre autres, de la nature de l'opération et de l'environnement électrique. L'habilitation est symbolisée de manière conventionnelle par des caractères alphanumériques (ex : B1L, B2VL, BCL, B2XL, etc.). Elle est délivrée par l'employeur.

Système de classification des habilitations électriques				
1 ^{er} caractère	2 ^e caractère	3 ^e caractère	Dernière lettre	Attributs
B : basse tension et très basse tension (valeur nominale de tension inférieure à 1000 V en courant alternatif et 1500 V en courant continu)	0 : opérations d'ordre non électrique		L : opérations sur les véhicules ou engins à énergie électrique embarquée	Chargé de réparation Exécutant
	1 : exécutant de travaux d'ordre électrique 2 : chargé de travaux d'ordre électrique	T : travaux sous tension, (y compris nettoyage) V : travaux au voisinage		Dépannage remorquage Déconstruction Contrôle technique Crash test et homologation Services de secours Opération batterie
		X : opérations particulières liées aux métiers		
	C : consignation électrique R : intervention			
	E : essai ou expertise			Essai Expertise auto

Fig : les symboles d'habilitation électrique³⁴

³³ Source : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000022845983/>

³⁴ Source : L'habilitation électrique - Opérations sur véhicules et engins, INRS <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206313>

e. Impacts environnementaux

Du point de vue de l'impact environnemental, la technologie électrique ne produit aucune émission directe, ni en gaz à effet de serre ni en polluants. La production d'électricité peut, selon la source d'énergie, avoir des impacts plus ou moins importants sur l'environnement.

- **Emissions de polluants :**

- NOx : 0 g/kWh
- CO : 0 g/kWh
- HC : 0 g/kWh
- PM : 0 g/kWh

- **Emissions de CO₂** (en kg équivalent CO₂, facteurs d'émission ADEME) :

- En sortie du véhicule : 0 kg/km
- Du puits à la roue : 0,088 kg/km, sur la base du mix électrique français 2020 de 59,9 g/kWh

La question de l'impact environnemental de certaines technologies de batteries et de leur recyclage doit également être considérée étant donné les matériaux nécessaires à leur fabrication : extraction et production des éléments chimiques et des matériaux rares (cobalt, lithium, cuivre, nickel), émissions de CO₂ pour la fabrication des cellules (dépendant du mix énergétique du pays de production), transport, impact sur la santé sur les populations des zones minières, etc.

- **Bruit moyen d'un véhicule roulant :** 65 à 72,2 dB(A)

En ce qui concerne le bruit, la motorisation électrique réduit considérablement les nuisances sonores et vibrations.

f. Quelques repères

Au 1^{er} janvier 2023³⁵, la France comptait 1 915 autobus électriques en exploitation, avec des flottes importantes en Ile-de-France, Amiens, Nantes, Bayonne et Aix-en-Provence.

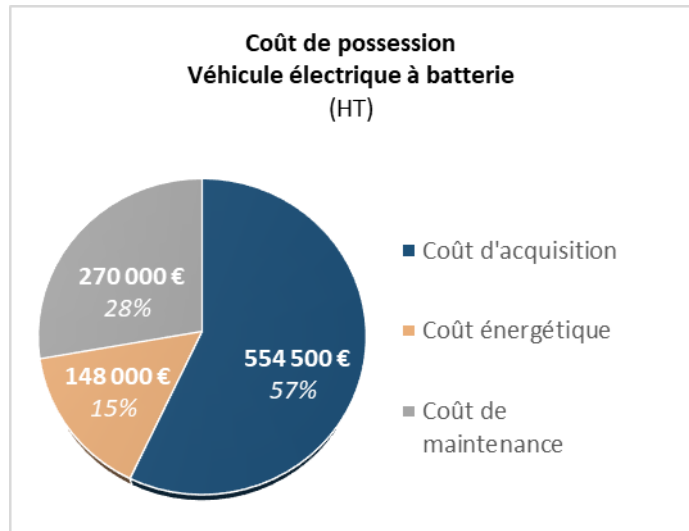
Récemment, Ile-de-France Mobilités (IDFM) a annoncé vouloir passer commande pour la fourniture d'environ 1 500 autobus électriques de tous gabarits sur les 10 prochaines années.

³⁵Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/transports>

g. Coûts de possession d'un véhicule de 12m sur 15 ans

Véhicule électrique à batterie charge lente 12m, options comprises

- Coût moyen d'acquisition :
 - 554 500 € HT
- Coût énergétique :
 - 148 000 € HT
- Coût moyen de maintenance préventive :
 - 270 000 € HT, y compris renouvellement de batteries
- **Coût de possession total :**
 - **972 500 € HT**
soit 1,62 €/km



Sur une durée de 15 ans, les coûts d'un véhicule à batterie sont, en moyenne, 23% plus élevés que ceux d'un Euro VI thermique.

Le prolongement de la durée de vie des batteries (9 ans contre 7,5 ans auparavant et pouvant aller jusqu'à 14 ans au prix de concessions sur l'autonomie pour les dernières années d'exploitation) ouvre des options quant au choix du meilleur modèle économique avec 3 hypothèses :

- Exploiter l'autobus 15 ans en changeant les batteries à mi-vie,
- Exploiter l'autobus 20 ans en changeant les batteries à mi-vie,
- Exploiter l'autobus 15 ans SANS changer les batteries à mi-vie.

La partie IV.2. estime ces différentes hypothèses.

Concernant l'électricité, bien que son prix ait plus que doublé depuis 2 ans, elle ne représente qu'une part minoritaire du coût total de possession.


6. Véhicules électriques trolleybus

a. Energie

Les véhicules électriques trolleybus sont des véhicules à moteurs électriques alimentés en courant par des lignes aériennes de contact (LAC) également appelées lignes bifilaires.

Les trolleybus utilisent ainsi l'électricité comme source d'énergie. De même que pour les véhicules électriques à batterie, l'électricité peut provenir du mix électrique français ou être 100% renouvelable grâce au système de garanties d'origine.

Comme indiqué en partie III.5.a., le prix de l'électricité pourrait poursuivre une tendance à la hausse dans les années à venir.

- **Prix de l'électricité** : 0,20 €/kWh (HT), moyenne de janvier à mars 2024, hors coûts d'infrastructure ;
- **Tendance** : à la hausse 

b. Véhicule

Les trolleybus se déplacent grâce à une chaîne de traction fonctionnant avec un moteur électrique alimenté par un courant capté à l'aide de perches situées en toiture du véhicule.

Les anciennes générations de trolleybus étaient équipées d'un petit moteur diesel permettant de circuler sur de courtes distances sans être reliées à la ligne bifilaire. Cette autonomie pouvait servir par exemple à circuler dans les ateliers, ou dévier les véhicules de leur itinéraire en cas de travaux ou de coupure de courant.

Les nouveaux trolleybus « IMC » (In Motion Charging) sont désormais 100% électrique. L'alimentation sans contact filaire est assurée à l'aide de batteries installées sur le toit qui se rechargent en mode filaire lors du roulage et en mode autonome lors du freinage.

Les performances d'accélération sont identiques quel que soit le mode de roulage, en autonomie ou en bifilaire. A noter qu'à l'heure actuelle, les constructeurs imposent des ratios entre le temps passé au fil et le temps passé sur batterie.

Les trolleybus sont aujourd'hui disponibles en véhicules de 12m, 18m et 24m.



Exemple trolleybus 24 m : HESS XLighTram 25DC

- **Coût moyen d'acquisition** :

- Trolleybus IMC 12m : 650 000 € HT, options comprises

Sans boîte de vitesses, ni moteur thermique, les trolleybus IMC peuvent rouler avec ou sans contact filaire en mode électrique, et ce sur plusieurs kilomètres, permettant d'envisager des traversées de centres historiques tout en évitant l'impact paysager des lignes aériennes.

Les trolleybus IMC sont dotés de batteries lithium-ion oxyde de titane (LTO) d'une capacité d'un peu moins de 50 kWh. Leur durée de vie peut être estimée à 10 ans environ.

- **Consommation moyenne** : 190 kWh / 100 km

La durée de vie des trolleybus est en général de 20 ans, conformément à l'amortissement économique et technique courant des véhicules.

- **Durée de vie / kilométrage** :

- Véhicule : 20 ans / 800 000 km
- Batterie : 10 ans, soit un remplacement à la mi-vie du véhicule

Le coût de la maintenance pour un trolleybus standard de 12m est d'environ 450 000 € HT sur 20 ans, auquel il convient d'ajouter les opérations de rénovation mi-vie d'environ 93 000 € HT.

- **Coût moyen de maintenance préventive (trolleybus IMC 12m)** :

- 0,68 €/km, y compris opérations de mi-vie et renouvellement de batterie.

IMPORTANT : pour cette étude comparative, le coût moyen d'acquisition, les coûts énergétiques et les coûts moyens de maintenance préventive ont été calculés sur une durée de vie de 15 ans et un kilométrage de 600 000 kms.

c. Infrastructure

L'alimentation électrique des trolleybus nécessite d'installer deux types d'infrastructures :

- Les sous-stations de redressement (SSR) dans lesquelles le courant électrique est transformé pour alimenter les véhicules. Les sous-stations peuvent alimenter jusqu'à 2,5 km de ligne aérienne de contact en fonction du maillage ;
- Des lignes aériennes de contact qui assurent la distribution du courant continu entre les sous-stations et les véhicules. Les lignes peuvent être ancrées en façade ou fixées sur des poteaux qui sont parfois mutualisés avec ceux utilisés pour l'éclairage public.

Enfin, les zones de garage des trolleybus sont généralement équipées de lignes bifilaires.

- **Coût des infrastructures** :

- Sous-station de redressement : environ 750 000 € HT pour une sous-station aérienne, y compris le coût de réalisation du bâtiment ;
- Ligne aérienne de contact : entre 1 M€ et 1,7 M€ HT par km de ligne, selon le type d'ancrage.

d. Formation

Les exigences en termes d'habilitation électrique pour la réalisation d'activités de maintenance sur les trolleybus sont les mêmes que celles pour les véhicules électriques à batterie (cf. partie III.5.d). La procédure de consignation pour toute intervention est de même nature entre les 2 types de véhicule.

e. Impacts environnementaux

Du point de vue des émissions, les impacts environnementaux du trolleybus sont les mêmes que ceux des véhicules électriques à batterie : aucune émission directe, ni en gaz à effet de serres ni en polluants.

La production d'électricité peut, selon la source d'énergie, avoir des impacts plus ou moins important sur l'environnement. En outre, la question de l'impact environnemental des batteries et de leur recyclage doit également être considérée étant donné les matériaux nécessaires à leur fabrication.

- **Emissions de polluants :**

- NOx : 0 g/kWh
- CO : 0 g/kWh
- HC : 0 g/kWh
- PM : 0 g/kWh

- **Emissions de CO₂ (en kg équivalent CO₂) :**

- En sortie du véhicule : 0 kg/km
- Du puits à la roue : 0,115 à 0,165 kg/km, sur la base du mix électrique français 2020 de 59,9 g/kWh

L'impact visuel des lignes bifilaires peut constituer un frein au développement du trolleybus, dans un contexte où les collectivités cherchent à enfouir les câbles aériens. En permettant de s'affranchir de ligne bifilaire sur plusieurs kilomètres, la technologie trolleybus IMC offre aujourd'hui des débouchés prometteurs.

- **Bruit moyen d'un véhicule roulant : 75 dB(A)**

En ce qui concerne le bruit, la motorisation électrique réduit les nuisances sonores et vibrations par rapport au diesel mais le bruit mesuré reste légèrement plus élevé qu'un autobus électrique à batterie. A 50km/h, il est d'environ 75dB(A), tant en mode « trolley » qu'en mode « batterie ».

f. Quelques repères

Adopté par de nombreuses villes au XXème siècle, le trolleybus a connu une période de déclin qui a vu certaines collectivités se tourner vers d'autres technologies (Grenoble, Marseille et Nancy) avant de faire son retour en 2001 avec les trolleybus de nouvelle génération.

Aujourd'hui, quatre réseaux français exploitent des trolleybus : Lyon, St-Etienne, Limoges et Nancy.

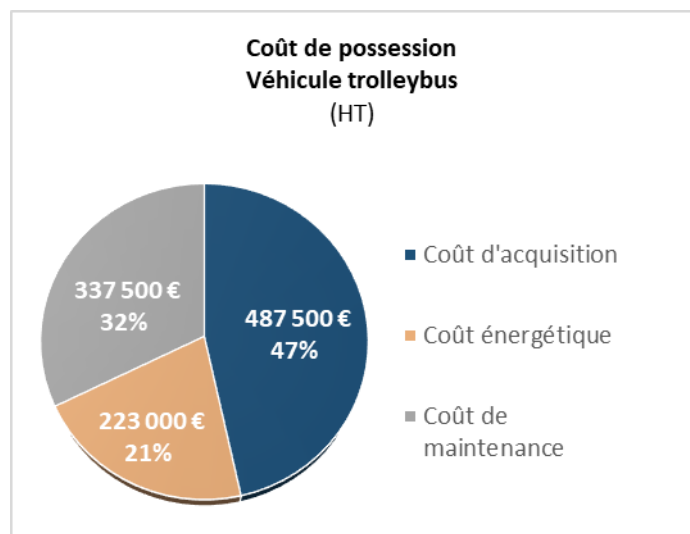
Le Sytral (Lyon) a inauguré en avril 2021 ses premiers trolleybus IMC. Il s'agit de véhicules articulés qui ont d'abord été déployés sur la ligne C13 puis depuis septembre sur la ligne C11. Depuis février 2021, Saint-Étienne Métropole fait également rouler des trolleybus IMC. Les véhicules font 12m de longueur et peuvent embarquer 94 passagers (dont 22 places sont assises). Au total, 22 trolleybus ont été commandés.

Prochainement (début 2025), la métropole du Grand Nancy exploitera 25 trolleybus IMC articulés de 24m en remplacement de son tramway TVR sur la ligne Tempo1.

g. Coûts de possession d'un véhicule de 12m sur 15 ans

Trolleybus 12m, options comprises

- Coût moyen d'acquisition :
 - 487 500 € HT
- Coût énergétique :
 - 223 000 € HT
- Coût moyen de maintenance préventive :
 - 337 500 € HT
- **Coût de possession total :**
 - **1 048 000 € HT**
soit 1,75 €/km



Pour permettre la comparaison avec les autres motorisations, le coût d'acquisition du trolleybus a été proratisé sur 15 ans (malgré sa durée de vie de 20 ans), soit les ¾ du montant global d'acquisition. Les coûts énergétiques et de maintenance ont été calculés sur une base de 15 ans et 600 000 kms (hors coûts de rénovation à mi-vie). Comme pour l'autobus électrique à batteries, le coût énergétique est minoritaire.

7. Véhicules électriques à hydrogène

a. Energie

Un autobus à hydrogène est un véhicule à motorisation électrique alimenté en courant par une pile à combustible (PAC). L'énergie est produite directement à bord. Le dihydrogène (H_2) contenu dans des réservoirs est mélangé au dioxygène (O_2) présent dans l'air extérieur. Une réaction d'oxydoréduction se forme permettant de créer de l'électricité et rejetant de l'eau (H_2O).

La production d' H_2 peut venir de deux principales sources :

- L' H_2 « carboné », appelé « hydrogène gris » est obtenu par conversion thermique de combustibles fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon). Le reformage à la vapeur, ou vaporeformage, est actuellement le processus de production et de consommation le plus répandu dans l'industrie.
- L' H_2 « décarboné » est obtenu par électrolyse de l'eau à partir d'une électricité provenant du nucléaire (on parle alors d' « hydrogène jaune ») ou d'énergies renouvelables (soleil, vent, eau, etc., on parle alors d' « hydrogène vert »). Dans ce dernier cas, l'électricité peut être achetée auprès des fournisseurs grâce au système de garanties d'origine ou alors produite localement (autoconsommation). L' H_2 « décarboné » est aujourd'hui l'option privilégiée pour la filière transport, portée par des subventions massives de l'Etat dans le cadre de la stratégie nationale pour l'hydrogène décarboné³⁶.

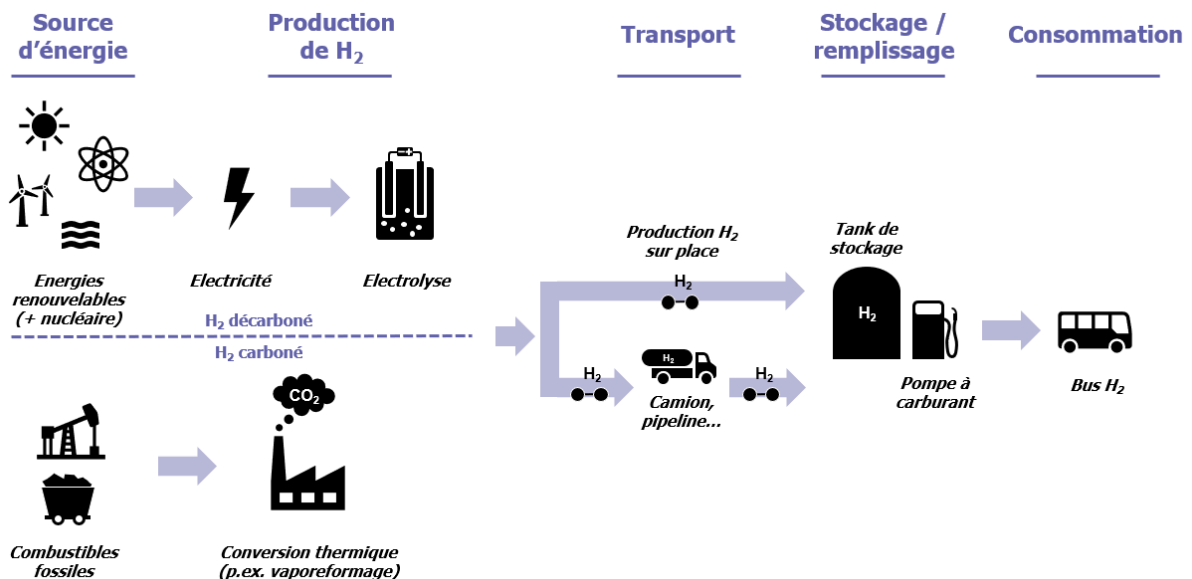


Fig : Chaîne de production de l'hydrogène (CATP)

Le prix de l' H_2 décarboné est aujourd'hui assez variable. Il dépend de la puissance de l'électrolyseur, de ses modalités d'acheminement, de la source de production d'électricité (solaire, éolien, nucléaire, etc.), etc.

³⁶ <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-developpement-lhydrogene-decarbone-en-france>

Le prix de production de l'H₂ décarboné devrait connaître une baisse importante dans les années à venir compte tenu de la décroissance attendue du coût d'investissement des électrolyseurs³⁷.

- **Prix de l'hydrogène :**

- 9 €/kg (HT, y compris aides de l'ADEME, hypothèse à fin mars 2024), hors coûts d'infrastructure de la station de distribution ;
- Le prix à la pompe, qui inclut les coûts de la station de distribution, est aujourd'hui d'environ 10 à 14 €/kg (HT, y compris aides de l'ADEME), selon la puissance installée.

- **Tendance :** N/C

b. Véhicule

Afin d'embarquer une grande quantité d'énergie, l'hydrogène est comprimé à haute pression (350 bars pour les autobus) puis stocké dans des réservoirs généralement localisés sur le toit des véhicules.



Exemple autobus hydrogène : Solaris New Urbino

Deux architectures de véhicules sont rencontrées :

- Dans le « full H₂ », le véhicule est alimenté exclusivement par l'hydrogène. Une batterie est présente sur la chaîne de traction, généralement de faible capacité (inférieure à 50kWh), bien que certains constructeurs proposent des valeurs allant bien au-delà. Elle se recharge lors du roulage (via la pile à combustible) et lors du freinage et peut alimenter le(s) moteur(s).

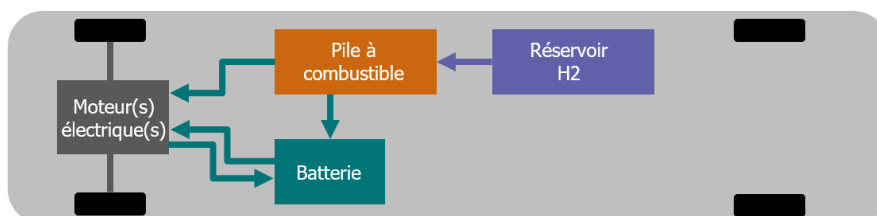


Fig : Full H₂ (CATP)

³⁷ Etude de la demande potentielle d'hydrogène renouvelable et/ou bas carbone en France à 2030, AFHYPAC 2020

- Dans la version « range extender », la pile à hydrogène sert de prolongateur d'autonomie. Les batteries du véhicule sont généralement plus capacitaires et peuvent être rechargées depuis l'extérieur.

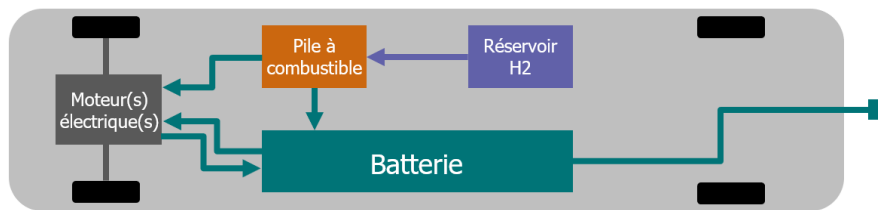


Fig : Range extender (CATP)

L'étude n'aborde pas la version « range-extender ».

- **Coût moyen d'acquisition (Full H₂) :**

- 570 000 € HT, hors options
- Coût des options : 80 000 € HT (valeur moyenne pour les véhicules diesel)

NB : le coût moyen d'acquisition est stable par rapport à février 2022 et ce malgré l'inflation constatée sur la même période (+ 5,2 % en 2022 et 4,9 % en 2023). Les surcoûts liés à la mise en place de la norme GSR II (environ + 8 000 € HT) sont aussi pris en compte.

La consommation des véhicules à l'hydrogène est très variable et dépend de nombreux paramètres : auxiliaires, confort thermique (chauffage, climatisation, etc.), présence de relief, conduite du conducteur (anticipation freinage), etc.

- **Consommation moyenne :** 8,5 kg / 100 km, varie de 7,5 à 9,5 kg / 100km (source : exploitants)

La durée de vie des véhicules électriques à l'hydrogène est en général de 15 ans, conformément à l'amortissement économique et technique courant des véhicules.

- **Durée de vie / kilométrage :**

- Véhicule : 15 ans / 600 000 km (cf. hypothèse à 20 ans – partie IV.2.)
- Pile à combustible : de 5 à 10 ans, très variable (fonction de la durée d'utilisation, de la ligne, des auxiliaires, etc.)
- Batterie : de 7,5 à 10 ans, selon la technologie de batterie

- **Coût moyen de maintenance préventive :**

- Renouvellement PAC et batterie inclus : 0,43 €/km

c. Infrastructure

Un réseau décidant d'investir dans une flotte de véhicules à l'hydrogène doit prendre en compte le coût et les contraintes techniques spécifiques à l'aménagement d'une station hydrogène et les coûts d'adaptation de l'atelier. En particulier, les surfaces nécessaires pour accueillir les infrastructures doivent être prévues.

Deux postes peuvent être distingués :

- La station de distribution hydrogène. On distingue la station autonome, pour laquelle la production d'hydrogène décarboné est réalisée sur site par électrolyse de l'eau, et la station de transfert où l'hydrogène est approvisionné de l'extérieur. La station est équipée d'un ou plusieurs compresseurs qui transforment l'hydrogène à une pression de 350-500 bars (moyenne pression). Un stockage intermédiaire ou « buffer » est prévu pour pouvoir alimenter les véhicules hydrogène. L'avitaillement des autobus prend environ 15min. Les stations de distribution d'hydrogène sont toujours soumises à la réglementation ATEX, et classées ICPE 1416 à partir d'une quantité d'hydrogène distribuée de 2 kg/jour.
- L'adaptation de l'atelier : les ateliers de maintenance doivent respecter les réglementations et normes de sécurité (réglementation ATEX / APSAD, ICPE 2930 et arrêté du 12 mai 2020) relatives à l'organisation humaine et matérielle qui définissent les zones de travail, les exigences en termes de ventilations, outils de détection hydrogène, les mesures de prévention du risque incendie etc. Une étude spécifique est nécessaire pour confirmer la faisabilité d'adapter un dépôt existant à l'hydrogène : accès aux toits des véhicules, détecteurs d'hydrogène, équipements de ventilations, sol antistatique, éclairages certifiés ATEX, etc.³⁸

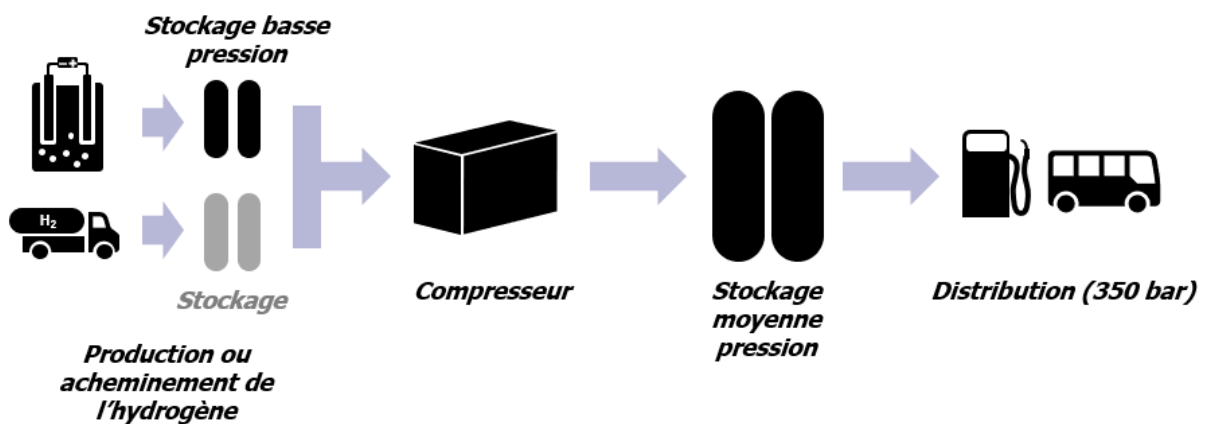


Fig : Infrastructures de distribution de l'hydrogène (CATP)

- **Coût des infrastructures :**
 - Station de distribution (avec une production locale d'H₂) :
 - De 2 à 3 M€ HT pour 10 à 15 de véhicules ;
 - De 3,5 à 4,5 M€ HT pour 20 à 30 véhicules ;

Ces coûts, très variables, comprennent les compresseurs, stockages, postes de distribution, mais aussi le génie civil, les raccordements et les frais d'installation.

Certains fournisseurs proposent des solutions transitoires de petites stations de distribution approvisionnées par camion pouvant alimenter de 1 à 10 véhicules pour un coût variant de 200 à 600 k€ HT.

- Adaptation atelier : environ 60 000 à 100 000 € par travée.

Ces coûts dépendent fortement de la configuration de l'atelier. Ils se composent principalement des travaux liés à la mise aux normes de l'atelier (sécurité incendie,

³⁸ Pour aller plus loin : *Comment déployer les bus électriques à hydrogène en France, Livre Blanc AFHYPAC, juin 2020, https://www.afhypac.org/documents/documentation/publications/AFHYPAC-H2MF_Livre%20blanc%20Bus%20H2_VDEF_15062020.pdf*

règlementation ATEX) ainsi que des adaptations techniques pour assurer la maintenance des autobus hydrogène (plus de hauteur, équipements pour accès aux toitures, etc.).

d. Formation

Les exigences en termes d'habilitation électrique pour la réalisation d'activités de maintenance sur les véhicules hydrogène sont les mêmes que celles pour les véhicules électriques à batterie (cf. partie III.5.d.).

En outre, pour des raisons de sécurité et du fait de la nature encore récente de la technologie hydrogène, les techniciens qui travaillent sur des équipements hydrogène nécessitent une formation sur les risques liés à l'H₂ et dont l'objectif est d'acquérir des connaissances sur les systèmes hydrogène.

e. Impacts environnementaux

L'utilisation de la pile à combustible ne dégage que de l'eau. Du point de vue des émissions, les impacts environnementaux de l'autobus à hydrogène sont les mêmes que ceux des véhicules électriques à batterie : aucune émission directe, ni en gaz à effet de serres ni en polluants.

- **Emissions de polluants :**

- NOx : 0 g/kWh
- CO : 0 g/kWh
- HC : 0 g/kWh
- PM : 0 g/kWh

La production d'électricité peut, selon la source d'énergie, avoir des impacts plus ou moins importants sur l'environnement.

En outre, la question de l'impact environnemental de certaines technologies de batteries et de leur recyclage doit également être considérée étant donné les matériaux nécessaires à leur fabrication.

- **Emissions de CO₂** (en kg équivalent CO₂) :

- En sortie du véhicule : 0 kg/km
- Du puits à la roue : 0,330 kg/km³⁹ pour une production par électrolyse avec mix France

- **Bruit moyen d'un véhicule roulant** : 65 à 72,2 dB(A)

En ce qui concerne le bruit, le véhicule à hydrogène bénéficie des avantages de la motorisation électrique qui permet de réduire significativement les nuisances sonores et vibrations par rapport au diesel.

f. Quelques repères

³⁹ Source : <https://www.ademe.fr/panorama-evaluation-differentes-filieres-dautobus-urbains>

Au 1^{er} janvier 2023⁴⁰, les véhicules à hydrogène représentent 0,09% du parc d'autobus standard en France, soit 27 véhicules.

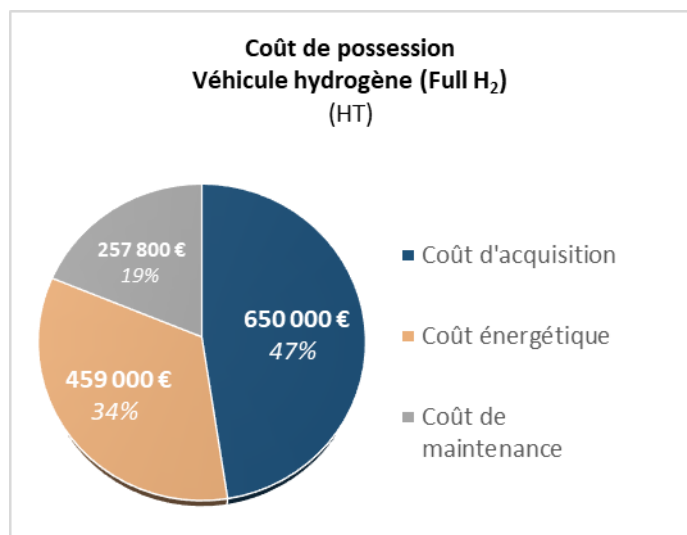
Le Syndicat Mixte des Transports Artois-Gohelle a mis en service dès 2019 6 autobus standards de 12m à hydrogène sur la ligne Bulle 6 (Bruay-la-Buissière - Auchel). Il a été suivi par la mise en service sur le réseau de l'agglomération de Pau Béarn Pyrénées de huit articulés de 18m roulant à l'hydrogène.

Plus récemment en 2024, Grand Belfort Communauté d'Agglomération a reçu ses 7 premiers autobus 12m et prévoit l'acquisition de 20 véhicules supplémentaires à court termes. IDFM devrait recevoir une vingtaine d'unités en 2025.

g. Coûts de possession d'un véhicule de 12m sur 15 ans

Véhicule électrique à hydrogène (Full H₂) 12m, options comprises

- Coût moyen d'acquisition :
 - 650 000 € HT
- Coût énergétique :
 - 459 000 € HT
- Coût moyen de maintenance préventive :
 - 257 800 € HT
- **Coût de possession total :**
 - **1 366 800 € HT**
soit 2,28 €/km



Sur une durée de 15 ans, le coût total de possession d'un véhicule à hydrogène (full H₂) est en moyenne, près de 73 % plus élevé que celui d'un Euro VI thermique et 41% de plus qu'un électrique. Le coût d'acquisition représente près de la moitié du coût total et un tiers concerne le coût énergétique.

⁴⁰ Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/transports>

IV. Synthèse comparative des différentes motorisations

1. Tendances

Le tableau ci-après dresse un comparatif des différentes motorisations selon quatre familles de critères développés dans la partie précédente : véhicule, infrastructure, humain et environnement.

L'analyse comparative permet de dégager quelques grandes tendances. Les éventuelles subventions liées à l'achat de véhicules, non prises en compte dans cette étude, peuvent également influencer sur l'attractivité de certaines technologies.



Diesel

- Le **diesel**, bien que condamné à court/moyen termes, reste la technologie la mieux maîtrisée, il ne nécessite pas d'infrastructure nouvelle, le diesel Euro VI permet de remplacer rapidement les véhicules les plus anciens les plus polluants : les véhicules Euro V ou antérieurs représentent encore un peu plus de 44% du parc d'autobus français début 2023.

L'augmentation du coût de possession d'un véhicule diesel Euro VI s'explique notamment par le passage du step D au step E (augmentation de plus de 10% du prix de base du véhicule) et un coût d'achat de l'énergie qui n'a pas retrouvé son niveau de 2019.



Carburants alternatifs

- Les **biocarburants** constituent une alternative de transition qui reste toujours aujourd'hui un marché de niche (autour de 0,8 % du parc). Ils permettent de diminuer rapidement les émissions de CO₂ avec peu d'impact sur les véhicules et sans générer de surcoût d'infrastructures.

Ces biocarburants sont aujourd'hui majoritairement utilisés pour des lignes régulières interurbaines d'autocars. L'utilisation d'huiles alimentaires usagées (XtL / HVO) se heurte aujourd'hui au fait que les usines de fabrication ne sont pas localisées en France.



Gaz naturel pour véhicules (GNV)

- Le **GNV** offre un coût global de possession du véhicule légèrement plus faible que le diesel Euro VI à la condition que son coût énergétique reste suffisamment attractif, mais sa mise en œuvre nécessite d'installer des stations de recharge, d'adapter l'atelier et de former le personnel de maintenance au gaz. Au regard des coûts fixes, le choix du GNV doit s'inscrire dans une vision de long terme, c'est donc un choix de plus en plus difficile aujourd'hui avec la fin annoncée des véhicules thermiques entre 2035 et 2040⁴¹.

Comme pour le diesel, certains constructeurs abandonnent également cette énergie. Le GNV diminue les émissions d'oxyde d'azote mais les émissions de particules fines (PM) restent proches du diesel.

⁴¹ Voir le règlement (UE) 2024/1610 du Parlement européen et du Conseil du 14 mai 2024 modifiant le Règlement (UE) 2019/1242 en ce qui concerne le renforcement des normes de performance en matière d'émissions de CO₂ pour les véhicules utilitaires lourds neufs et intégrant des obligations de déclaration, modifiant le Règlement (UE) 2018/858 et abrogeant le Règlement (UE) 2018/956

Si la motorisation thermique ne permet pas de faire baisser de façon notable les émissions de CO₂, le biogaz constitue une évolution pertinente qui permet de recourir à de l'énergie non fossile.



- La filière **hybride** constitue une alternative de transition au diesel Euro VI. Le « full hybride gazole/électrique » a quasiment disparu de l'offre des constructeurs. Pour la technologie mild-hybride gazole/électrique, en dehors de quelques adaptations sur l'atelier, il ne nécessite pas d'infrastructures supplémentaires, ce qui n'est pas le cas du mild-hybride gaz/électrique.

La technologie mild-hybride permet de réduire de façon sensible les émissions de polluants et les gaz à effet de serre. Elle permet néanmoins d'engager un premier pas vers une transition pour 2035.

- La filière des **véhicules électriques à batterie à charge lente** a connu un développement important ces dernières années à la fois d'un point de vue technique et au niveau de son industrialisation.

Les performances technologiques des batteries (notamment l'autonomie et la durée de vie) et la qualité des chargeurs s'améliorent.

Les coûts d'acquisition, même s'ils restent encore très élevés, semblent se stabiliser. L'écart de coût global de possession du véhicule entre électrique et diesel Euro VI se réduit en passant de +45% (mise à jour précédente) à +23%).



Le prolongement de la durée de vie des batteries (9 ans voir 14 ans pour certains constructeurs invite à s'interroger sur le modèle économique le plus adapté : remplacement des batteries à 9 ans avec prolongement de la durée de vie du véhicule à 18/20 ans (qui impliquera dans certains cas de prévoir une rénovation/rafraichissement « esthétique » (sellerie, vitrerie, revêtement de sol, etc.) ou le non-remplacement des batteries impliquant inévitablement une baisse de son autonomie.

En outre, le passage à une flotte de véhicules électriques nécessite la mise en œuvre d'une infrastructure de distribution dédiée qui, en fonction du type de charge (lente ou rapide), peut représenter des investissements conséquents.

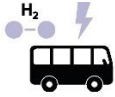
Concernant les impacts environnementaux en sortie de véhicule, la filière électrique est sans conteste la plus écologique sur les lieux d'exploitation: aucune émission de polluants, de CO₂.

En outre, le bruit généré par les véhicules est significativement réduit. Néanmoins, la question de l'impact environnemental de l'industrie minière et celle du recyclage doit être considérée.



- Le **trolleybus** est une technologie ancienne et mature, qui voit grâce à l'arrivée des trolleybus IMC une opportunité prometteuse de redynamiser la filière. Les trolleybus IMC, 100% électrique, permettent en effet de tirer le meilleur parti des autobus électriques et trolleybus ancienne génération : batterie embarquée de taille réduite, recharge en ligne, possibilité de s'affranchir de ligne aérienne au droit des secteurs les plus sensibles, zéro émission de polluants, réduction du bruit, etc.

Le trolleybus représente néanmoins des investissements importants, tant du point de vue des véhicules que des infrastructures et semblent aujourd'hui davantage réservés aux lignes structurantes des collectivités, dans des formats articulés 18m ou bi-articulés 24m.



Hydrogène

- Malgré la mise en place de la stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné fin 2020, la filière **hydrogène** décarboné peine encore à se lancer.

Les appels à projets « écosystèmes territoriaux hydrogène » portés par l'ADEME, visent à industrialiser la filière et à atteindre son horizon de maturité technologique.

Néanmoins cette énergie souffre encore de coûts de fabrication des véhicules et de la production de H₂ décarboné élevés. La compétitivité de la mobilité hydrogène par rapport aux autres motorisations n'est aujourd'hui, toujours pas au rendez-vous.

Autobus standard 12m		Véhicule				Infrastructure		Humain	Environnement		
		Durée de vie	hypothèses Ct énergie HT	Coût de possession du véhicule (1)	Maturité de la filière	Station de distribution	Adaptation atelier	Formation du personnel	Polluants à l'échappement	Emissions CO ₂ (kg eCO ₂)	Bruit moyen d'un véhicule roulant
Diesel	Euro VI	15 ans	1,25 €/l	790 900 € HT soit 1,32€ HT/km	Mature	Cuves / pompes existantes	Atelier existant	-	NOx : 0,148-0,338 g/kWh CO : N/C HC : <0,01 g/kWh PM : 0,0023-0,0046 g/kWh	Sortie de véhicule : 1,011-1,138 kg/km Puits à la roue : 1,212-1,497 kg/km	72 à 77 dB(A)
Carburants alternatifs	B100	15 ans	1,25 €/l	830 000 € HT soit 1,38€ HT/km	Début / Expérimental	Réutilisation possible des cuves	Atelier existant	-	Comparaison avec gazole NOx : jusqu'à +20% CO : jusqu'à -50% HC : jusqu'à -50% PM : N/C	Sortie de véhicule : pas d'écart significatif (vs gazole) Puits à la roue : -60%	72 à 77 dB(A)
	XL (HVO)	15 ans	1,44 €/l	845 300 € HT soit 1,41€ HT/km	Début / Expérimental			-	Comparaison avec gazole NOx : jusqu'à -9% CO : jusqu'à -24% HC : N/C PM : jusqu'à -33%	Sortie de véhicule: légère baisse (vs gazole) Puits à la roue : -50 à -75%	
GNV	GNV	15 ans	0,81 €/kg	750 500 € HT soit 1,25€ HT/km	Mature	Charge lente : 100 véh: 2,5-3,5 M€	Adaptation gaz : 60-100k€/travée	Qualification GNV (3 niveaux)	NOx : 0,0767-0,1061 g/kWh CO : N/C HC : <0,01 g/kWh PM : 0,0037-0,0093 g/kWh	Sortie de véhicule : 1,043-1,2026 kg/km Puits à la roue: 1,282-1,400 kg/km	73 à 76 dB(A)
	BioGNV	15 ans	0,92 €/kg	780 000 € HT soit 1,30€ HT/km	Mature	Charge rapide : 15 véh: 1,2-1,8M€					
Mild-Hybride	Dies/Elec	15 ans	1,25 €/l	749 000 € HT soit 1,25€ HT/km	Intermédiaire	Cuves / pompes existantes	Adaptation électricité : 20-50k€/travée	Habilitation électrique	NOx : 0,148-0,338 g/kWh CO : N/C HC : <0,01 g/kWh PM : 0,0023-0,0038 g/kWh	Sortie de véhicule : 0,876-0,951 kg/km Puits à la roue : 1,128 kg/km	72 à 77 dB(A)
	GNV/Elec	15 ans	0,81 €/kg	729 400 € HT soit 1,22€ HT/km	Intermédiaire	Charge lente : 100 véh: 2,5-3,5 M€	Adaptations électricité + gaz : 80-150k€/travée	Habilitation électrique + Qualification GNV (3 niveaux)	NOx : 0,0767-0,1061 g/kWh CO : N/C HC : <0,01 g/kWh PM : 0,0001-0,0024 g/kWh	Sortie de véhicule : 0,9206-1,20 kg/km Puits à la roue : 0,954 kg/km	73 à 76 dB(A)
	BioGNV/Elec	15 ans	0,92 €/kg	755 900 € HT soit 1,26€ HT/km		Charge rapide : 15 véh: 1,2-1,8M€					
Electrique à batteries	Recharge lente	15 ans	0,20 €/kWh	972 500 € HT soit 1,62€ HT/km	Intermédiaire	Par borne 50kW : 30-60 k€ 150kW : 45-90 k€	Adaptation électricité : 20-50k€/travée	Habilitation électrique	Aucune émission	Sortie de véhicule : 0 Puits à la roue : 0,088 kg/km	65 à 72,2 dB(A)
Trolleybus (1)	Trolleybus IMC	15 ans	0,20 €/kWh	1 048 000 € HT soit 1,75€ HT/km	Mature	750 000€ / SSR + Ligne bifilaire: 1-1,7 M€/km	Adaptation électricité	Habilitation électrique	Aucune émission	Sortie de véhicule : 0 Puits à la roue : 0,115-0,165 kg/km	75 dB(A)
Hydrogène	Full H ₂	15 ans	9 €/kg	1 366 800 € HT soit 2,28€ HT/km	Début / Expérimental	10-15 véh: 2-3 M€ 20-30 véhicules: 3,5-4,5M€	Adaptation H ₂ : 60-100k€/travée	Habilitation électrique + H ₂	Aucune émission	Sortie de véhicule : 0 Puits à la roue : 0,330 kg/km	65 à 72,2 dB(A)

(1) Bien que le trolleybus a une durée de vie de 20 ans, les coûts d'acquisition ont été réactualisés en prenant en compte le montant correspondant à 15 ans (soit les 3/4) . Les coûts de maintenance ont été calculés sur une base de 15 ans et 600 000 kms, comme pour les autobus. Ils n'intègrent pas les coûts des opérations de rénovation à mi-vie.

Fig : Tableau comparatif des différentes motorisations

2. Prolongement de la durée de vie des autobus

Pour faire face aux enjeux financiers qui s'annoncent pour les années à venir, les AOM pourraient être tentées de prolonger la durée de vie des véhicules.

La décision du prolongement de la durée de vie des autobus doit tenir compte des caractéristiques propres à chaque territoire, au réseau de transport et à l'exploitation qui est faite des véhicules. En effet, le kilométrage moyen annuel, l'état de la voirie, les températures, la météo (utilisation de sel de déneigement), la politique d'entretien et de maintenance du parc, l'optimisation de l'exploitation des véhicules, la qualité et la finition des véhicules sont autant d'éléments à prendre en considération.

Ce prolongement implique des coûts de rénovation pour maintenir un certain niveau de qualité et de fiabilité des véhicules proposés aux voyageurs.

- Pour l'ensemble, une rénovation que l'on peut qualifier d'« esthétique » : vitrages, revêtements des sols, parois, barres de maintien, sellerie, etc.
La corrosion des châssis, la tenue de la structure, la carrosserie, l'étanchéité doivent aussi faire l'objet d'une attention particulière.
- Pour les motorisations thermiques, une rénovation « technique » portant sur la chaîne cinématique (moteur, boîte de vitesses, pont, etc.) est également à intégrer.
- Pour les motorisations électriques, comme vu précédemment, la question portera sur le remplacement des batteries à mi-vie ou du maintien de celles-ci (lorsque la technologie du constructeur le permet), moyennant une perte d'autonomie au fil des années.

Les tableaux ci-après apportent un éclairage quant au TCO et aux coûts induits par ces différentes hypothèses :

Autobus standard 12m	DIESEL					
	Durée en années	Coûts de rénovation (hypothèse)	TCO	Coûts moyens annuels	Coûts moyens mensuels	Coûts moyens au km
Gazole	15		790 900,00 €	52 726,67 €	4 393,89 €	1,32 €
	20	80 000,00 €	1 036 800,00 €	51 840,00 €	4 320,00 €	1,30 €
B100	15		830 000,00 €	55 333,33 €	4 611,11 €	1,38 €
	20	80 000,00 €	1 086 800,00 €	54 340,00 €	4 528,33 €	1,36 €
XtL (HVO)	15		845 300,00 €	56 353,33 €	4 696,11 €	1,41 €
	20	80 000,00 €	1 107 700,00 €	55 385,00 €	4 615,42 €	1,38 €

GAZ						
Autobus standard 12m	Durée en années	Coûts de rénovation (hypothèse)	TCO	Coûts moyens annuels	Coûts moyens mensuels	Coûts moyens au km
GNV	15		750 500,00 €	50 033,33 €	4 169,44 €	1,25 €
	20	80 000,00 €	977 300,00 €	48 865,00 €	4 072,08 €	1,22 €
BioGNV	15		780 000,00 €	52 000,00 €	4 333,33 €	1,30 €
	20	80 000,00 €	1 016 600,00 €	50 830,00 €	4 235,83 €	1,27 €

MILD-HYBRIDE						
Autobus standard 12m	Durée en années	Coûts de rénovation (hypothèse)	TCO	Coûts moyens annuels	Coûts moyens mensuels	Coûts moyens au km
Gazole	15		749 000,00 €	49 933,33 €	4 161,11 €	1,25 €
	20	80 000,00 €	978 800,00 €	48 940,00 €	4 078,33 €	1,22 €
GNV	15		729 400,00 €	48 626,67 €	4 052,22 €	1,22 €
	20	80 000,00 €	944 300,00 €	47 215,00 €	3 934,58 €	1,18 €
BioGNV	15		755 900,00 €	50 393,33 €	4 199,44 €	1,26 €
	20	80 000,00 €	979 700,00 €	48 985,00 €	4 082,08 €	1,22 €

ELECTRIQUE						
Autobus standard 12m	Durée en années	Coûts de rénovation (hypothèse) + coûts des batteries	TCO	Coûts moyens annuels	Coûts moyens mensuels	Coûts moyens au km
AVEC changement batteries à mi-vie	15	139 000,00 €	973 500,00 €	64 900,00 €	5 408,33 €	1,62 €
	20	189 000,00 €	1 117 500,00 €	55 875,00 €	4 656,25 €	1,40 €
SANS changement batteries à mi-vie	15		834 500,00 €	55 633,33 €	4 636,11 €	1,39 €

TROLLEYBUS						
Autobus standard 12m	Durée en années	Coûts de rénovation (hypothèse)	TCO	Coûts moyens annuels	Coûts moyens mensuels	Coûts moyens au km
	15		1 210 500,00 €	80 700,00 €	6 725,00 €	2,02 €
	20	93 000,00 €	1 491 000,00 €	74 550,00 €	6 212,50 €	1,86 €

HYDROGENE						
Autobus standard 12m	Durée en années	Coûts de rénovation (hypothèse)	TCO	Coûts moyens annuels	Coûts moyens mensuels	Coûts moyens au km
	15		1 366 800,00 €	91 120,00 €	7 593,33 €	2,28 €
	20	50 000,00 €	1 655 700,00 €	82 785,00 €	6 898,75 €	2,07 €

V. Les éléments de choix en fonction des particularités territoriales

Il n'existe pas de technologies répondant à l'ensemble des attentes techniques, environnementales et économiques. Toutefois, il existe nécessairement une ou plusieurs technologies pouvant répondre le mieux aux attentes de chaque collectivité, compatible(s) avec les capacités financières, les caractéristiques du territoire et celles du réseau de transport collectif.

Afin d'identifier cette ou ces technologies, il est nécessaire de prendre en compte différents facteurs d'influence :

- L'offre et la consistance des services de transports collectifs ;
- L'exploitation des services de transports collectifs ;
- Les conditions climatiques et le relief ;
- Les opportunités territoriales et les ambitions / attentes en matière environnementale et développement durable ;
- Le coût.

Quelques questions clés sont proposées ci-dessous.

Celles-ci doivent être posées en amont d'une stratégie, et les réponses vont apporter un premier éclairage sur les propositions qui peuvent en découler.

L'offre et la consistance des services de transports collectifs

- **Combien de lignes urbaines, périurbaines, scolaires ? Ces lignes sont-elles longues, courtes ? Les véhicules sont-ils affectés aux lignes ?**

Pourquoi cette question ?

Cette question sur l'exploitation des lignes et services met en relief les contraintes et organisation d'exploitation. Le kilométrage des lignes, l'interdistance entre arrêts, la situation du dépôt, etc., sont autant d'éléments influençant le choix de la motorisation et pouvant nécessiter une autonomie plus ou moins forte. Un réseau dont les véhicules ne sont pas affectés aux lignes présente beaucoup d'avantages dans la gestion d'optimisation, mais rend plus complexe l'expérimentation et la mise en place de véhicules alternatifs au diesel.

- **Combien de véhicules compte le parc ? Quelle est la répartition par gabarit et type (bus / cars, mini / midi / standard / articulé, etc.) ?**

Pourquoi cette question ?

Tous les véhicules et toutes les dimensions n'existent pas pour chaque type de motorisation. Il est donc primordial d'identifier les types de véhicules mais aussi leur gabarit, surtout dans le cas où le réseau exploite des gabarits particuliers.

En outre, pour les motorisations nécessitant des aménagements spécifiques (avitaillement, adaptation atelier) un parc important permet d'amortir et de faire des économies d'échelle sur les infrastructures.

- **Combien de types de motorisation ?**

Pourquoi cette question ?

Cette question permet d'avoir un premier éclairage sur les habitudes et expériences en usage de véhicules hors diesel. Cela permet déjà d'identifier les pratiques en interne ou via les exploitants sur la maintenance et la gestion d'une flotte alternative au diesel. Cette question permet également d'alerter sur le fait qu'un trop grand nombre de motorisations peut être compliqué à gérer. L'utilisation de plusieurs énergies peut impacter l'organisation du réseau.

- **Existe-t-il un plan d'investissement concernant les véhicules ? Est-ce que les véhicules sont tous acquis à un même moment, ou les investissements sont-ils lissés ?**

Pourquoi cette question ?

Cette question est en lien avec la stratégie au regard de l'investissement et des infrastructures à installer. La mise en place d'un parc d'autobus au GNV/BioGNV ou à l'hydrogène nécessite par exemple d'aménager une station de distribution qui pour être rentable, doit être utilisée par un certain nombre de véhicules. Si les investissements des véhicules sont lissés, l'approche peut être différente.

La stratégie doit également tenir compte de la possibilité de mutualiser les infrastructures avec d'autres usages que celui du transport public (bennes à ordures ménagères, flottes captives, etc.).

L'exploitation des services de transports collectifs

- **Le dépôt appartient-il à la collectivité ? Quel est l'espace par rapport au nombre de véhicules ?**

Pourquoi cette question ?

Le site du/des dépôt(s) joue un rôle central, à la fois dans l'organisation même des services et la gestion des kilomètres (kilomètres haut-le-pied), mais aussi dans la mise en place potentielle d'installations. Les surfaces nécessaires pour accueillir les infrastructures doivent être prévues, en lien avec les réglementations et normes de sécurité existantes (ex. ATEX, ICPE). Sur certains réseaux il est possible d'installer des infrastructures sur un ou plusieurs dépôt(s), ce qui n'est pas envisageable sur d'autres et cela peut directement influencer l'affectation des véhicules et des lignes.

Au-delà du positionnement se pose également la question de l'appartenance du dépôt car elle peut impacter la concurrence et le modèle économique. La mise en place des installations est souvent plus aisée et pérenne quand le dépôt appartient à la collectivité.

- **La maintenance est-elle internalisée ?**

Pourquoi cette question ?

Mettre en place une nouvelle stratégie de motorisation a un vrai impact sur la maintenance, tout d'abord parce qu'en fonction des types de motorisation les qualifications, les compétences, ainsi que les pièces détachées ne sont pas du tout identiques à ceux du diesel. Des formations sont donc nécessaires.

En outre, certaines motorisations nécessitent d'apporter des adaptations à l'atelier (mises aux normes, modification des espaces de travail). Il ne s'agit pas d'un frein mais d'un élément fort à prendre en compte d'autant plus si la maintenance est totalement internalisée.

Les conditions climatiques et le relief

- **Le territoire est-il en relief ?**

Pourquoi cette question ?

La topographie du territoire est à prendre en compte car elle a une incidence directe sur la conduite, les freinages et de manière plus générale la consommation et donc l'autonomie.

La topographie peut également imposer des contraintes de gabarit aux véhicules compte tenu de la largeur des chaussées et des girations à assurer. La question du relief n'écarte pas nécessairement des technologies mais doit éclairer sur les choix possibles et actions qui peuvent être mises en place.

- **Quelles sont les conditions climatiques ?**

Pourquoi cette question ?

Comme pour le relief, les températures peuvent influencer sur un choix. Cette question met en avant les procédures, les process d'organisation des véhicules en cas de grands chauds, grands froids. L'usage des auxiliaires, consommateurs électriques ou équipements de confort thermique (climatisation, chauffage, SAEIV, etc.) impacte aussi la consommation, et donc l'autonomie.

Les opportunités territoriales et les ambitions/attentes en matière environnementale et de développement durable

- **Des expérimentations ont-elles déjà été réalisées ?**

Pourquoi cette question ?

Il est très fréquent que les réseaux via leur(s) exploitant(s) notamment ou par opportunité (via un fournisseur d'énergie par exemple) mettent en place des expérimentations/tests sur une ou plusieurs énergies. Il est donc pertinent à la fois de récupérer la vision qualitative de ces ex-

périmentations mais aussi des éléments factuels et quantitatifs, même si parfois ces expérimentations sont assez courtes et ne permettent pas d'avoir une prise de recul suffisante notamment sur les chiffres.

- **La collectivité dispose-t-elle d'un plan climat ? D'une politique environnementale engagée avec des orientations ?**

Pourquoi cette question ?

Au-delà de l'aspect technique, le positionnement politique et les choix territoriaux sont à prendre en compte. Il est donc indispensable de bien lister les orientations qui ont été validées dans le cadre de documents de planification (réglementaires notamment). Il peut s'agir notamment du plan climat-air-énergie territorial, mais aussi dans le PLUI, dans le cadre des stratégies TEPOS, agenda 21, etc.

Certaines collectivités sont en outre tenues par des obligations réglementaires en matière d'environnement : PPA, ZFE-m, etc. (cf. partie I.).

- **La collectivité a-t-elle des attentes spécifiques en matière de qualité de vie sur certains secteurs de son territoire (bruit, qualité de l'air, confort, etc.) ?**

Pourquoi cette question ?

Les motorisations offrent des performances environnementales contrastées. Les véhicules à motorisation électrique (batterie, trolleybus IMC et hydrogène) ont une vraie pertinence sur des hypercentres dans la logique d'amélioration de la qualité de l'air ou de réduction des nuisances sonores. Une affectation ciblée est donc plus pertinente.

- **Quelles sont les opportunités du territoire en matière d'énergies ? Usine de biométhanisation, station hydrogène ?**

Pourquoi cette question ?

Cette question identifie les opportunités opérationnelles existantes sur le territoire ou en projet. Le fait d'avoir par exemple une unité de biométhanisation sur le territoire peut influencer le choix même si, en réalité, il est rare d'avoir un circuit court direct entre l'usine de biométhanisation et la consommation des véhicules.

- **Le territoire aime-t-il tester, innover ?**

Pourquoi cette question ?

Même si cette question n'a pas une vue à long terme elle permet aussi d'appréhender les choix possibles et les risques à prendre à la fois d'un point de vue financier et technique.

Conclusion

Plus de 44 % des véhicules de transport publics en circulation sont des diesels de norme Euro V ou antérieurs à cette norme, donc sont significativement polluants. Pour améliorer le bilan environnemental des réseaux, il est urgent d'accélérer le renouvellement des parcs de véhicules.

Devant cette urgence, les collectivités sont confrontées à la fin programmée des motorisations thermiques et, pour les remplacer à termes, à une offre de motorisations alternatives onéreuse. En parallèle à ce besoin de renouvellement, elles doivent maintenir voire développer une offre de mobilité durable pour inciter au transfert modal.

L'impact financier de ces renouvellements n'est pas le seul écueil qu'elles rencontrent puisque le manque de planification réglementaire et législative cohérente au niveau national et européen leur est également préjudiciable.

En effet, pour être performantes, les collectivités doivent définir des stratégies d'investissements vers telle ou telle énergie à 25 ou 30 ans tout en restant en conformité avec la réglementation. Il n'est donc pas concevable que les normes et les échéances évoluent en permanence.

Pour investir massivement et répondre aux nécessités de la transition énergétique, les industriels ont également besoin de cette visibilité de long terme. C'est aussi une condition pour maintenir une filière industrielle de proximité nationale ou européenne.

AGIR Transport appelle donc les pouvoirs publics à un moratoire sur les normes qui pèsent sur les collectivités et à une meilleure planification de ces normes dans le temps.

Marc DELAYER

Administrateur d'AGIR Transport délégué à l'activité d'achat centralisé

Annexes

1. Règlements et outils

Cette annexe vise à préciser, amener quelques éléments complémentaires concernant la réglementation et les outils.

Quelles sont les aides disponibles à l'achat ou à la location de véhicules à faibles émissions ?

Depuis janvier 2023, les autobus et les autocars ne sont plus éligibles aux dispositifs du “bonus écologique” ou à la “prime au retrofit électrique”.

Les collectivités territoriales, leurs groupements et leurs exploitants doivent désormais se tourner vers d'autres dispositifs de financement, tels que :

- Les certificats d'économies d'énergies (CEE) : Les autorités organisatrices de la mobilité et/ou les exploitants qui achètent, louent ou retrofitent des autobus ou autocars électriques peuvent bénéficier du versement d'une prime dans le cadre des CEE. Le versement de la prime varie par véhicule en fonction de certaines conditions (taille et type du véhicule, taille de l'agglomération, etc.)
- L'offre de financement “Oblibus” : Il s'agit d'une solution de financement des flottes de bus « verts » proposée par la Banque des Territoires et la Banque européenne d'investissement.

Que sont les PPA ?

Les Plans de Protection de l'Atmosphère (PPA) sont introduits par la loi n° 96-1236 sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (LAURE) en décembre 1996. Ils sont obligatoires pour les agglomérations de plus de 250 000 habitants et les zones où les valeurs limites sont dépassées ou risquent de l'être (exemple : Ile-de-France). Elaborés par les préfets, ils s'imposent au Plan de mobilité (anciennement plan de déplacement urbain (PDU)) et au Plan climat-air-énergie territorial (PCAET).

L'objectif est d'amener la pollution atmosphérique au niveau des valeurs limites ou de valeurs cibles si possible.

Les moyens à mettre en place peuvent être :

- La création d'une zone à faibles émissions mobilité (ZFE-m, anciennement désignée “zone de circulation restreinte”) ;
- La définition de mesures préventives pour réduire les émissions de polluants atmosphériques (exemples : mise en place d'une politique en faveur des transports collectifs, gratuité des transports lors des pics de pollution, promotion des véhicules propres, obligation d'élaborer un plan de mobilité employeurs, etc.).

Qu'est-ce qu'une ZFE-m ?

Une ZFE-m est une zone comportant des voies routières où la circulation des véhicules les plus polluants est restreinte selon des modalités définies par la collectivité avec l'objectif de réduire les émissions polluantes.

La couverture d'une ZFE-m sur un territoire est susceptible d'avoir un impact sur les véhicules à acquérir ou à utiliser, lors du renouvellement d'une flotte publique de véhicules.

Pour plus d'explications sur le sujet, nous vous renvoyons vers le guide 90 questions/réponses Obligations de verdissement du parc d'autobus et/ou d'autocars, publié par AGIR Transport.

Focus sur la Loi pour la Transition Energétique et la Croissance Verte (TECV) du 12/01/2017 :

Les objectifs sont les suivants :

- Réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050 (facteur 4)
- Réduire la consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à la référence 2012
- Réduire la consommation énergétique primaire d'énergies fossiles de 30 % en 2030 par rapport à la référence 2012
- Porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % de la consommation finale brute d'énergie en 2030

Des mesures concernant spécifiquement les transports et la mobilité ont été identifiées :

- Proposer 7 millions de points de recharge pour les véhicules électriques en 2030
- Renouveler des flottes publiques par une proportion minimale de véhicules à faibles émissions
- Proposer des mesures de restriction de la circulation dans les zones affectées par une mauvaise qualité de l'air

Focus sur la Loi d'orientation des mobilités (LOM) du 24 décembre 2019

Les trois piliers de la loi LOM sont les suivants :

- Investir plus et mieux dans les transports du quotidien : 13,4 Md€ d'investissements de l'État dans les transports en cinq ans (somme consacrée sur la période 2017-2022)
- Faciliter et encourager le déploiement de nouvelles solutions pour permettre à tous de se déplacer
- Engager la transition vers une mobilité plus propre

L'objectif de neutralité carbone en 2050 est inscrit dans la loi, conformément au Plan climat, avec une trajectoire claire : - 40 % d'émissions de CO₂ d'ici 2030.

Focus sur le Règlement (UE) sur la révision des normes d'émissions de CO₂ pour les autobus et autocars

Le règlement (UE) 2024/1610 du Parlement européen et du Conseil du 14 mai 2024 *modifiant le Règlement (UE) 2019/1242 en ce qui concerne le renforcement des normes de performance en matière d'émissions de CO₂ pour les véhicules utilitaires lourds neufs et intégrant des obligations de déclaration, modifiant le Règlement (UE) 2018/858 et abrogeant le Règlement (UE) 2018/956 est récemment entré en vigueur.*

Il fixe pour les constructeurs de véhicules utilitaires lourds neufs de nouveaux objectifs de performance en matière de CO₂.

Les émissions moyennes de CO₂ du parc de véhicules à moteur lourds neufs (dont les autocars) de l'Union devront être réduites dans les proportions suivantes par rapport aux émissions moyennes de CO₂ de la période de référence de l'année 2019 :

- 45 % à partir du 1er janvier 2030 ;
- 65 % à partir du 1er janvier 2035 ;
- 90 % à partir du 1er janvier 2040.

S'agissant des autobus, il est prévu que :

- 90% des autobus urbains neufs vendus entre 2030 et 2035 soient des véhicules zéro émission.
- Cet objectif est réhaussé à 100% à partir de 2035.

Il est utile de préciser que le règlement ne prévoit pas de dérogation relative à l'utilisation du biométhane.

En revanche, le règlement prévoit à son article 15, un réexamen programmé à la fin de l'année 2027, de l'efficacité et de l'impact du règlement en ce qui concerne l'objectif de neutralité climatique d'ici à 2050.

A cette occasion, la Commission soumettra au Parlement européen et au Conseil un rapport présentant notamment l'évaluation de toute contrainte particulière rencontrée, « *en raison du rapport coûts-avantages socio-économiques, compte tenu de la morphologie territoriale spécifique ou des conditions météorologiques ainsi que des investissements récents dans le biométhane déjà effectués par les autorités publiques* », pour le respect des nouveaux objectifs propres aux autobus urbains neufs.

Par ailleurs, il convient de relever que le règlement ne modifie pas les obligations de verdissement des parcs de collectivités territoriales et de leurs groupements, prévues par la directive "véhicule propre"⁴² (transposées aux articles L.224-7 et suivants du code de l'environnement).

⁴² Directive (UE) 2019/1161 du Parlement européen et du Conseil du 20 juin 2019 *modifiant la directive 2009/33/CE relative à la promotion de véhicules de transport routier propres et économes en énergie*

2. Exemple d'application - Bassin de Briey

Les éléments de choix présentés en partie IV. sont mis ici en application au travers d'un cas exemple qui concerne le syndicat mixte des transports du bassin de Briey (ST2B, en Meurthe-et-Moselle), afin de mettre en avant les cheminements de réflexion permettant de définir une ou plusieurs stratégies.



L'offre et la consistance des services de transports collectifs

Combien de lignes urbaines, périurbaines, scolaires ?

Contexte	3 lignes urbaines, 2 lignes interurbaines structurantes, 3 lignes interurbaines secondaires, un service de transport à la demande et des services spécifiques scolaires
Analyse	Le territoire est très vaste : 66 communes, avec assez peu de lignes urbaines.

Ces lignes sont-elles longues, courtes ?

Contexte	Le kilométrage des lignes est très variable, mais les distances sont globalement assez longues, avec des inter-distances importantes entre arrêts.
Analyse	Cela est notamment dû à la structure des lignes et l'étendue des communes.

Les véhicules sont-ils affectés aux lignes ?

Contexte	Les véhicules ne sont pas affectés aux lignes. Toutefois les types de véhicules sont affectés aux types de services (interurbain, urbain, scolaire et TAD).
Analyse	La non-affectation a pour objectif d'optimiser l'exploitation et de permettre plus d'agilité dans l'organisation et l'exploitation des services.

Combien de véhicules compte le parc ? Quelle est la répartition par gabarit et type ?

Contexte	76 véhicules avec 12 véhicules appartenant au ST2B (urbain et inter-urbain structurant), les véhicules sont des autobus/low-entry et cars.
Analyse	La très grande majorité des véhicules appartient à l'exploitant. Il s'agit d'un point important dans la définition de la stratégie : la mise en place de véhicules propres sur le réseau passera donc par des attentes formulées dans un contrat (ici délégation de service public), sachant que les attentes auront un impact sur le coût d'exploitation et la concurrence.

Combien de types de motorisation ?

Contexte	Les véhicules appartenant au ST2B ont une moyenne d'âge de 3,9 ans et sont tous des véhicules diesel. Il en est de même pour les 64 véhicules appartenant à l'exploitant, dont l'âge moyen est de 10,4 ans. 32 véhicules sont à la norme Euro IV.
Analyse	Les véhicules anciens sont surtout des véhicules scolaires. D'un point de vue environnemental, le renouvellement du parc scolaire aura une incidence quelle que soit l'énergie choisie.

Existe-t-il un plan d'investissement concernant les véhicules ? Est-ce que les véhicules sont tous acquis à un même moment, ou les investissements sont-ils lissés ?

Contexte	Les véhicules appartenant au ST2B ont été acquis au même moment.
Analyse	A priori les investissements futurs ne seront pas lissés, à moins que la collectivité souhaite acquérir plus de véhicules ou change de stratégie. L'acquisition de 12 véhicules permet de réfléchir à la mise en place d'infrastructures sur le dépôt même si le nombre de ces véhicules est limité. La réflexion doit intégrer les véhicules mis à disposition par l'exploitant. La prise en compte du renouvellement des véhicules dans le contrat est indispensable.

L'exploitation des services de transports collectifs

Le dépôt appartient-il à la collectivité ? Quel est l'espace par rapport au nombre de véhicules ?

Contexte	Il est mis à disposition par l'exploitant, qui est lui-même locataire. Il n'existe à l'heure actuelle qu'un seul dépôt.
Analyse	Le fait que le ST2B ne possède pas le dépôt a un impact fort sur la stratégie. De plus, la taille du territoire interroge sur le besoin d'avoir un seul ou plusieurs dépôts.

La maintenance est-elle internalisée ?

Contexte	La maintenance est réalisée en grande majorité sur le dépôt par l'exploitant, mais toute une partie est sous-traitée. Une équipe de maintenance est à disposition sur le dépôt.
Analyse	Le dépôt permet une maintenance des véhicules. Les véhicules sont issus de plusieurs constructeurs et ont différents gabarits. Actuellement il n'existe pas de pratique de maintenance sur d'autres véhicules que du diesel.

Les conditions climatiques et le relief

Le territoire est-il en relief ?

Contexte	Le territoire présente un relief marqué : point le plus haut du réseau (340m), point le plus bas (170m). Toutes les lignes sont concernées par des franchissements de vallées.
Analyse	Toutes les lignes (sauf Fil3) doivent remonter les pentes des vallées plus ou moins encaissées. Cela peut impacter l'affectation des véhicules surtout si c'est combiné à la charge (vigilance à porter sur les circuits scolaires).

Quelles sont les conditions climatiques ?

Contexte	Le climat est semi-continentale avec une température minimum moyenne de 0/-1° C en janvier-février.
Analyse	Une météo fraîche en hiver avec notamment du gel et de la neige à prendre en compte dans les propositions.

Les opportunités territoriales et les ambitions/attentes en matière environnementale et de développement durable

Des expérimentations ont-elles déjà été réalisées ?

Contexte	Oui, une expérience a été réalisée en 2020 durant 2 mois, avec la mise à disposition d'une station gaz provisoire sur le dépôt. Une alimentation gaz est déjà sur place. Les conducteurs étaient autonomes pour faire le plein. La maintenance du véhicule était entièrement prise en charge par le constructeur.
Analyse	L'expérimentation a été positive, mais les données issues de cette expérimentation ne peuvent pas apporter une analyse plus poussée.

La collectivité dispose-t-elle d'un plan climat ? Une politique environnementale engagée avec des orientations ?

Contexte	Le ST2B est un syndicat de transport, mais les EPCI qui sont inclus dans ce syndicat ont engagé des démarches environnementales, avec la mise en place d'actions spécifiques.
Analyse	Le territoire est actif, et met en place des actions environnementales. Il existe un portage à la fois technique et politique, il est donc important de le prendre en compte dans le choix des stratégies de motorisation.

La collectivité a-t-elle des attentes spécifiques en matière de qualité de vie sur certains secteurs de son territoire (bruit, qualité de l'air, confort, etc.) ?

Contexte	Le ST2B n'a pas mis en exergue d'attentes spécifiques en matière de qualité de vie sur son territoire. L'approche est surtout globale sur l'ensemble du territoire.
Analyse	Les échanges avec les acteurs et les élus n'ont pas fait ressortir des priorités ou des attentes spécifiques territorialisées.

Quelles sont les opportunités du territoire en matière d'énergies ? Usine de biométhanisation, station hydrogène ?

Contexte	<p>Il existe plusieurs projets sur le territoire et actions déjà engagées :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Une centrale de méthanisation Valbioénergie : active depuis septembre 2020 à Val-de-Briey et qui peut émettre des certificats bioGNV dédiés à la mobilité ▪ Un projet d'implantation d'une station BioGNV ▪ Une station hydrogène à Audun-le-Romain avec de la production d'hydrogène vert et des réflexions en cours pour stocker et distribuer l'H₂ ▪ Plus de 10 MW d'installations photovoltaïques à venir sur d'anciennes friches industrielles et terrains pollués ▪ Une cogénération à base d'ordures ménagères à Conflans-en-Jarnisy
Analyse	Des opportunités évidentes sur le territoire, à la fois sur l'hydrogène, le gaz et l'électricité. Il faut éviter toutefois le piège de partir sur trop de stratégies différentes.

Le territoire aime-t-il tester, innover ?

Contexte	Le territoire expérimente, teste, en fonction des opportunités qu'on peut lui proposer.
Analyse	La compétence mobilité est récente, le réseau continue à se structurer. Les tests et innovations sont des plus mais la priorité reste de pérenniser les services existants et leur bon usage.

Orientations

Le ST2B a une flotte de véhicules importante qui ne limite pas la réflexion sur le choix de motorisation, puisque la mise en place d'une installation (GNV, électrique, H₂) sur le dépôt pourrait être envisageable sur un parc de cette taille.

La particularité des services du ST2B réside dans le fait que la majorité des services assurent du transport scolaire ou interurbain. Le réseau urbain représente une part très faible du parc de véhicules.

Cela impacte donc directement le choix de motorisation. Les véhicules low-entry et cars n'ont pas la même maturité de filière que les autobus urbains. La prise en compte des caractéristiques des lignes (longueur / haut-le-pied) est également importante, car la question de l'autonomie des véhicules est d'autant plus centrale que le territoire a du relief et que la fréquentation des services est forte (notamment scolaires).

La réflexion par type de services est sans doute un enjeu même s'il est nécessaire d'être vigilant sur le fait de ne pas cumuler trop de types d'énergies.

Une réflexion spécifique sur le réseau urbain est ainsi à mener et pourrait s'orienter vers des véhicules électriques ou hydrogènes par exemple. Dans ce choix la question de l'opportunité territoriale est très forte, le territoire étant très dynamique sur les projets en lien avec l'énergie.

Dans une vision stratégique plus globale (sur l'ensemble du parc), une orientation vers le gaz est également possible.

Toutes ces réflexions peuvent être menées par étapes et une période de transition est aussi envisageable notamment sur les véhicules interurbains et scolaires (quid de l'usage de biocarburants par exemple).

Ce qui ressort aussi de cette analyse, c'est la nécessité de résoudre deux sujets indispensables au choix de la stratégie :

- Le dépôt qui est aujourd'hui mis à disposition par l'exploitant, lui-même locataire ;
- L'achat ou non par le syndicat de plus de véhicules et le lissage ou non des futurs investissements.

Le volume du parc appartenant à l'exploitant est également à prendre en considération, dans le cadre de la réflexion sur les attentes contractuelles à intégrer dans le futur contrat d'exploitation.

Autant de questions et de choix que les élus du ST2B devront arbitrer avant le renouvellement de leur DSP (si cette forme contractuelle est à nouveau retenue).

Lexique

ADEME :	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
B100 :	Biodiesel 100%
CATP :	Centrale d'achat du transport public
CO :	Monoxyde de carbone
CtL :	Coal-to-Liquid
CO2 :	Dioxyde de carbone
CTBR :	Compagnie des transports du Bas-Rhin
ED95 :	Bioéthanol composé de 95 % d'éthanol issu de la biomasse
EU-ETS :	European Union Emission Trading Scheme
GNV :	Gaz Naturel Véhicule
GtL :	Gas-to-Liquid
HC :	Hydrocarbures
HVO :	Huile végétale hydrotraitée (« Hydrotreated Vegetable Oil » en anglais)
INRS :	Institut national de recherche et de sécurité
ISO :	International Organization for Standardization
LAURE :	Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie
LOM :	Loi d'orientation des mobilités
NOx :	Oxydes d'azote
PAC :	Pile à combustible
PCAET :	Plan climat-air-énergie territorial
PDM :	Plan de mobilité (ex-plan de déplacements urbains)
PLUI :	Plan local d'urbanisme intercommunal
PM :	Particules fines (« Particulate Matter » en anglais)
PPA :	Plan de protection de l'atmosphère
SDES :	Service des données et études statistiques
SORT :	Standardised On-Road Test cycles
ST2B :	Syndicat des transports du bassin de Briey
TICGN :	Taxe intérieure de consommation sur le gaz naturel
TICPE :	Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques
XtL :	X-to-Liquid
ZFE-M :	Zone à faibles émissions – mobilité



Contact

contact@catp.fr
23, rue Daviel - 75013 PARIS

www.catp.fr
www.agir-transport.org