

Transition énergétique

Etude comparative sur les différentes motorisations des autobus

Mise à jour Novembre 2022

Version 3



Le mot de la Présidente d'AGIR Transport

Après une première parution en 2014, puis une mise à jour en 2017, la Centrale d'Achat du Transport Public (CATP) actualise en 2022 (mise à jour en novembre suite à la hausse des prix de l'énergie) l'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.

La CATP a été créée en 2011 par des élus locaux et des entreprises publiques locales de transport pour se doter d'un service d'achats publics performant. Depuis 2021, ce service est venu s'ajouter à l'offre de services de l'Association AGIR Transport, qui réunit 480 adhérents, collectivités territoriales et opérateurs de transport indépendants, pour composer une plate-forme complète d'assistance opérationnelle : service question/réponse, formation, études, échanges, etc.

Centrale d'achat dédiée aux produits et services en lien avec la mobilité, la CATP s'est notamment imposée comme le spécialiste de l'acquisition de bus et de cars. Elle dispose d'une expertise inédite et reconnue dans ce domaine qui demande la maîtrise de compétences variées sur les aspects techniques et financiers, mais aussi sur les contraintes liées à l'exploitation et à la maintenance. Avec le développement des motorisations alternatives au diesel, la CATP a actualisé ses connaissances pour répondre au besoin de conseil de ses adhérents sur les offres des industriels dans chaque filière : Euro VI, gaz, électrique, hybride, hydrogène, nouveaux carburants.

Conscient des enjeux, AGIR transport a souhaité réaliser cette étude et la diffuser largement afin d'éclairer la profession sur les coûts réels et les performances de chaque filière et d'aider ainsi les acheteurs publics dans leurs projets d'investissements.

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 règlementaires.....	7
II. Technologies de véhicules à motorisation thermique, hybride ou électrique.....	9
1. Véhicules thermiques diesel	9
2. Véhicules thermiques à carburants alternatifs	14
3. Véhicules thermiques au Gaz Naturel (GNV).....	21
4. Véhicules à motorisation hybride	28
5. Véhicules électriques à batterie	34
6. Véhicules électriques trolleybus	42
7. Véhicules hydrogène.....	46
III. Synthèse comparative des différentes motorisations.....	53
IV. Les éléments de choix en fonction des particularités territoriales	56
Conclusion	60
Annexe.....	61
1. Règlementations et outils	61
2. Exemple d'application - Bassin de Briey.....	63
Lexique	69

Préambule

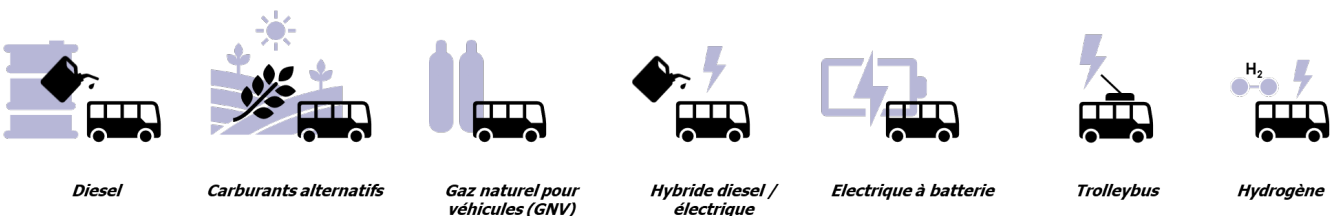
Depuis la dernière mise à jour de cette étude, les dispositions de la LOM¹ et de la loi Climat-Résilience² ont fait évoluer les réglementations en matière d'achat de véhicules. Le contexte technologique a également évolué avec le déploiement, la recherche et le développement de nouvelles motorisations 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 procédures de passation des accords-cadres de la CATP avec les constructeurs ;
- 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 (Legifrance, 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.



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

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.

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 la CATP. 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 d'hypothèses de prix d'énergie actualisés ;
- le coût de maintenance, correspondant aux engagements des constructeurs.

Même si les informations fournies dans cette étude sont issues des données de références, elles doivent être utilisées avec précaution notamment dans un contexte où le prix de l'énergie est relativement volatile à la hausse et à la baisse.

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.

Les collectivités et les entreprises qui souhaiteraient approfondir le sujet du choix de motorisations et des dépenses liées aux infrastructures devront mener des études plus complètes tenant compte des particularités locales. A ce titre, et compte tenu des enjeux pour les collectivités, AGIR Transport et la CATP ont décidé de proposer aux collectivités qui le souhaitent un accompagnement plus ou moins étendu en fonction de leurs besoins.

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

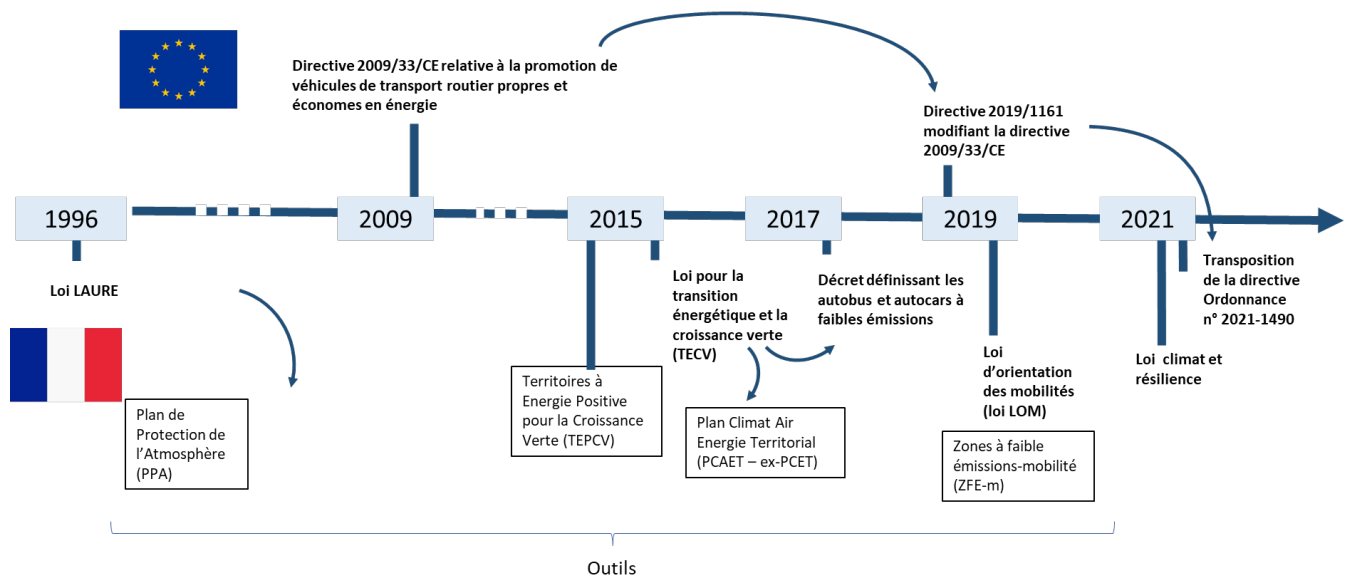
L'étude comparative est organisée en quatre parties :

- La partie I rappelle le cadre réglementaire et les outils relatifs à la transition énergétique ;
- La partie II 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 III dresse une comparaison multicritère des technologies sur les volets économiques, techniques et environnementaux ;
- La partie IV 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 I.).

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 une fraction du gaz d'origine renouvelable, véhicules hybrides électrique/diesel avec un carburant très majoritairement d'origine renouvelable ;

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>

- 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.

Les obligations de verdissement prévues au code de l'environnement concernent directement 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 : 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 ou d'une Zone à faibles émissions – mobilité), 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 (groupe 1 et véhicules rétrofités en électrique ou hydrogène). Cette obligation renforcée n'est applicable qu'à compter du 1^{er} Juillet 2022.

Cas pratique pour une agglomération de plus de 250.000 habitants pour le renouvellement de 12 véhicules M3 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 01/07/22 au 31/12/2024	12	6	3	3
A partir du 01/01/2025	12	0	6	6

II. 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 2030 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 (2022)** : 1,33 €/L (HT, incluant le remboursement partiel de TICPE), hypothèse prix à la cuve novembre 2022⁶

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.



Exemple autobus Diesel : Evobus, Citaro - Diesel

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

⁶ Source : Comité National Routier, <https://www.cnr.fr/indexation-gazole-mode-demploi>

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.

- **Coût moyen d'acquisition :**

- 193 400 € HT pour un véhicule Euro VI step E, hors options
- Coûts des options : 80 000 € HT (valeur moyenne constatée par la CATP)

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 :** 42,9 L / 100km, basé sur cycle SORT 1

Le coût de consommation d'AdBlue⁷ 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
- **Coût moyen de maintenance :** 0,19 €/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.

⁷ L'AdBlue est un additif antipollution qui permet de réduire les oxydes d'azote (NOx)

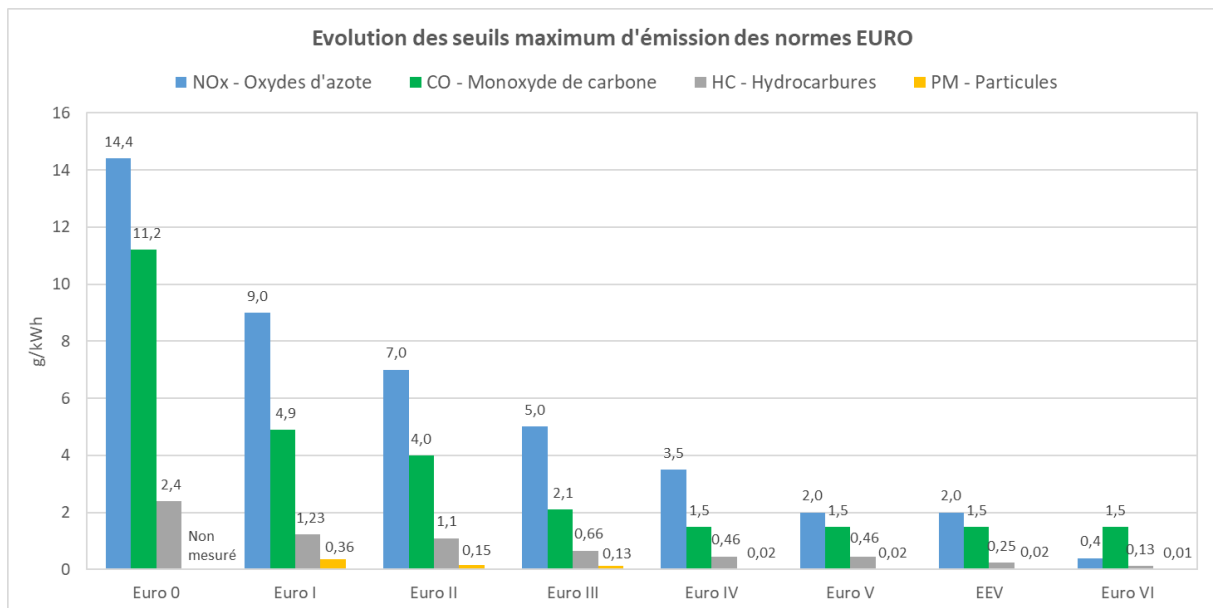
d. Formation

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 2002⁸ 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.



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 : 0,06-0,34 g/kWh
- CO : 0,04-0,12 g/kWh
- HC : <0,01 g/kWh
- PM : 0,0023-0,0046 g/kWh

⁸ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000592746>

- **Emissions de CO₂** (en kg équivalent CO₂, facteurs d'émission ADEME) :
 - En sortie de véhicule : 0,973-1,203 kg/km
 - Du puits à la roue : 1,212-1,497 kg/km

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 2020, le parc d'autobus français se décomposait de la façon suivante :

	Euro I	Euro II	Euro III	Euro IV	Euro V	EEV	Euro VI	Total
Quantités	127	757	3 731	3 997	4 483	4 261	10 251	27 607
%	0,5%	2,7%	13,5%	14,5%	16,2%	15,4%	37,1%	100%

Fig : Répartition du parc en service selon la norme Euro du véhicule⁹

Si les véhicules Euro IV ou antérieurs représentent encore un peu plus de 30% du parc d'autobus début 2020, les autobus Euro VI sont désormais majoritaires en France (37,1% du parc).

⁹ Source : Parc d'autobus et d'autocars au 1er janvier 2019, selon la carburation, norme euro
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>

g. Coûts de possession d'un véhicule de 12m

Véhicule Diesel Euro VI step E, options comprises

Coût moyen d'acquisition :

- 273 400 € HT

Coût énergétique :

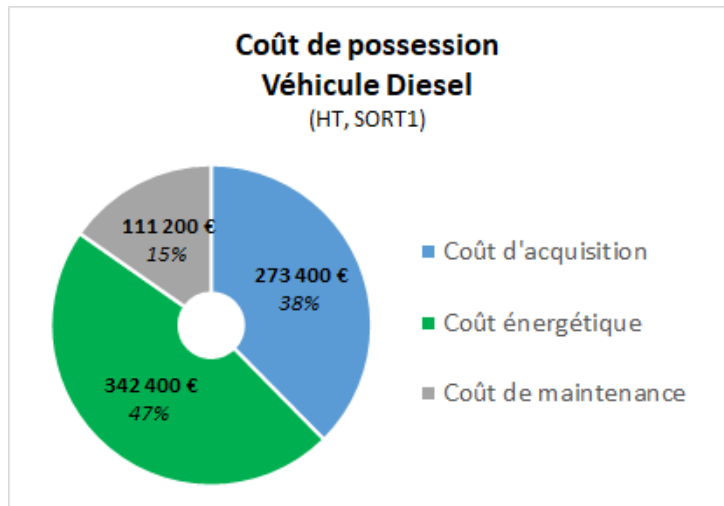
- 342 400 € HT

Coût moyen de maintenance préventive :

- 111 200 € HT

Coût de possession total :

- **727 000 € HT**
soit 1,21 €/km



A noter que 47% du prix de possession sur les 15 ans d'un véhicule Euro VI thermique est lié au prix du gazole.

Une augmentation du coût du gazole de 33% (augmentation constatée entre septembre 2021 et septembre 2022) conduirait ainsi à une hausse du coût global de possession d'environ 13%.

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 agro-carburants. 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 très majoritairement les transports interurbains.

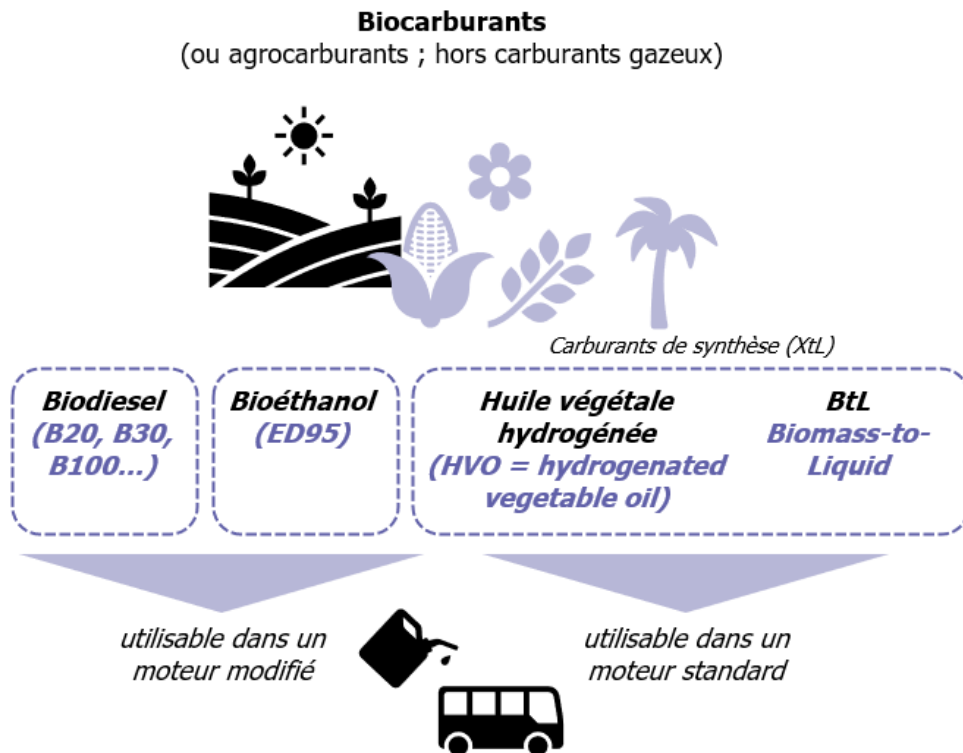


Fig : Typologie des biocarburants

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 (2022) :**

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 : 1,33 €/L (HT, TICPE réduite comprise), hypothèse prix à la cuve
- XtL (HVO) : 1,53 €/L (HT, incluant le remboursement partiel de TICPE), hypothèse prix à la cuve

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** : N/C

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 4 700 € HT mais il reste très variable selon 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 rétrofit¹⁰ (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 néanmoins un léger surcoût de l'ordre de 1 000 € HT).



Exemple autobus carburant alternatif - Man Lion's City

Coût moyen d'acquisition :

- B100 : 198 100 € HT pour un véhicule Euro VI agréé, hors options
- XtL (HVO) : 194 400 € HT pour un véhicule Euro VI, hors options

¹⁰ Le rétrofit est une opération consistant à remplacer des composants anciens ou obsolètes par des composants plus récents.

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

Consommation moyenne (estimation basée sur des sources fournisseurs) :

- B100 : 44,8 L / 100km (3 à 6% de plus que diesel Euro VI)
- XtL (HVO) : 42,9 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

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.

- **Coût moyen de maintenance préventive** (estimation basée sur des sources fournisseurs) :
 - B100 : 0,21 €/km (hypothèse de surcoût de 10 à 15%)
 - XtL (HVO) : 0,19 €/km (hypothèse de calcul : idem diesel)

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 II.1.0.).

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) ¹¹
▪ Sortie de véhicule : pas d'écart significatif avec le gazole	▪ Sortie de véhicule : légère baisse par rapport au gazole
▪ Du puits à la roue : -60% 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)

¹¹ Source : <https://www.ademe.fr/panorama-evaluation-differentes-filieres-dautobus-urbains>

f. Quelques repères

Selon les chiffres UTP du 1^{er} janvier 2020¹², les carburants B10, B30 et B100 alimentent environ 1,2% du parc d'autobus standard en France. Ils se répartissent de la façon suivante :

- Biodiesel 10% : 0,75%
- Biodiesel 30% : 0,45%
- B100 : 0,01%

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 a annoncé en 2021 que 26 autobus hybrides seront alimentés avec du carburant B100 produit à partir d'huiles végétales de colza français.

g. Coûts de possession d'un véhicule de 12m

Véhicule B100 12m, options comprises

Coût moyen d'acquisition :

- 278 100 € HT

Coût énergétique :

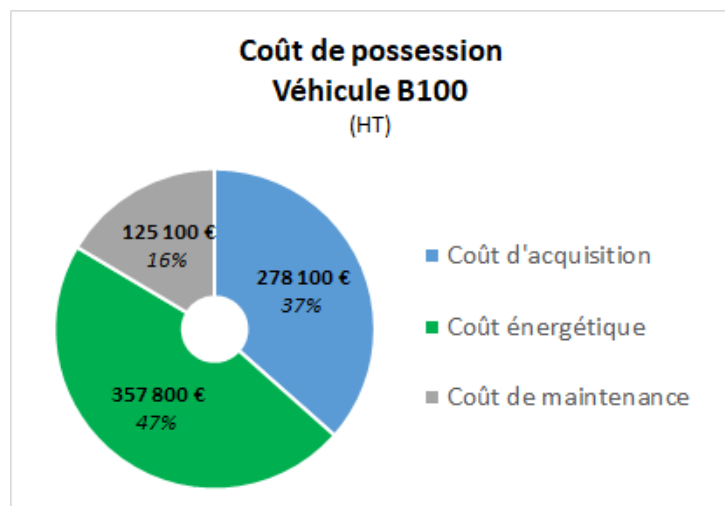
- 357 800 € HT

Coût moyen de maintenance préventive :

- 125 100 € HT

Coût de possession total :

- **761 000 € HT**
soit 1,27 €/km



¹² Source : Le parc des véhicules urbains des services urbains au 1^{er} janvier 2020, UTP

Véhicule Gazole XtL (HVO) 12m, options comprises

Coût moyen d'acquisition :

- 274 400 € HT

Coût énergétique :

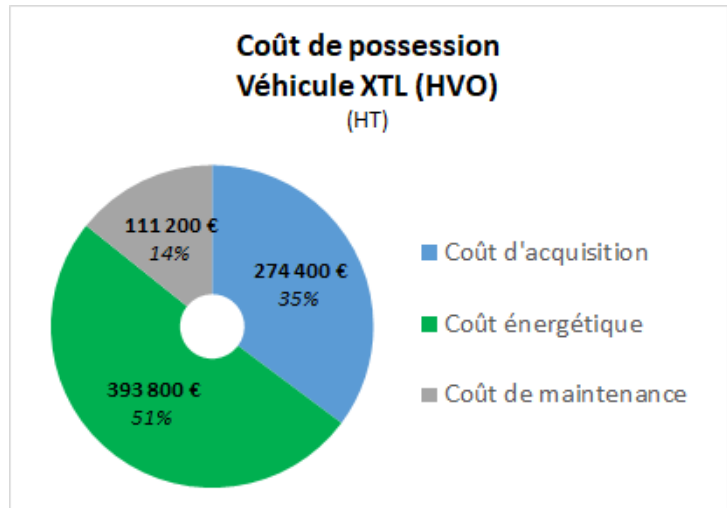
- 393 800 € HT

Coût moyen de maintenance préventive :

- 111 200 € HT

Coût de possession total :

- **779 400 € HT**
soit 1,30 €/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.

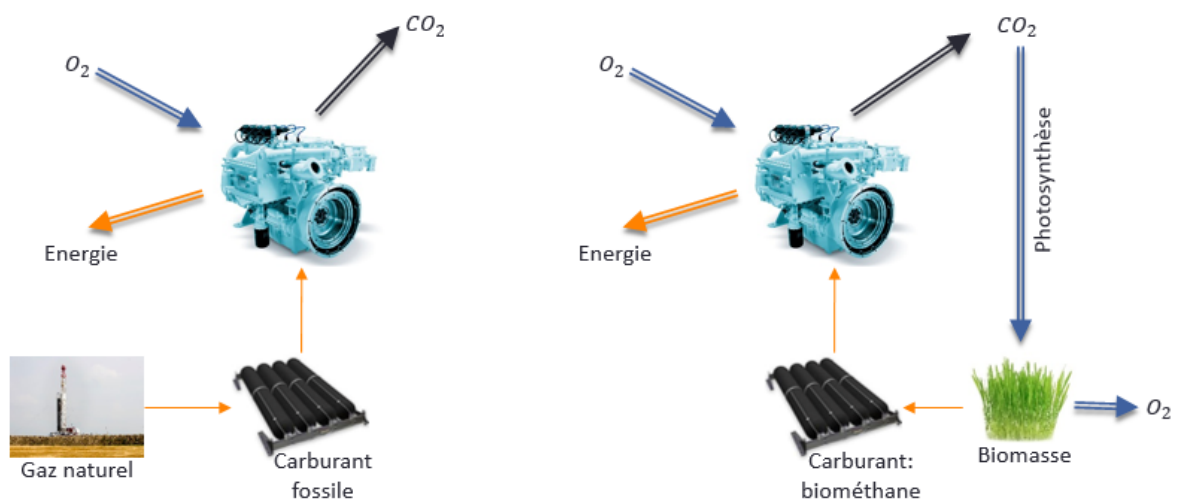


Fig : Cycle vertueux du carbone dans la combustion du biométhane



• Prix de l'énergie (2022)

- GNV : 1,77 €/kg (HT, TICGN comprise), hors coûts de la station de distribution, sur une base du prix du gaz de 129 €/MWh (hypothèse valeur novembre 2022) ;
- BioGNV : 2,00 €/kg (HT, TICGN comprise), hors coûts de la station de distribution.

Du fait de 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. A contrario, le biogaz pourrait bénéficier d'une fiscalité plus favorable et donc présenter des perspectives de prix plus stables.

• **Tendance :**

- GNV : à la hausse 
- BioGNV : stabilité 

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.

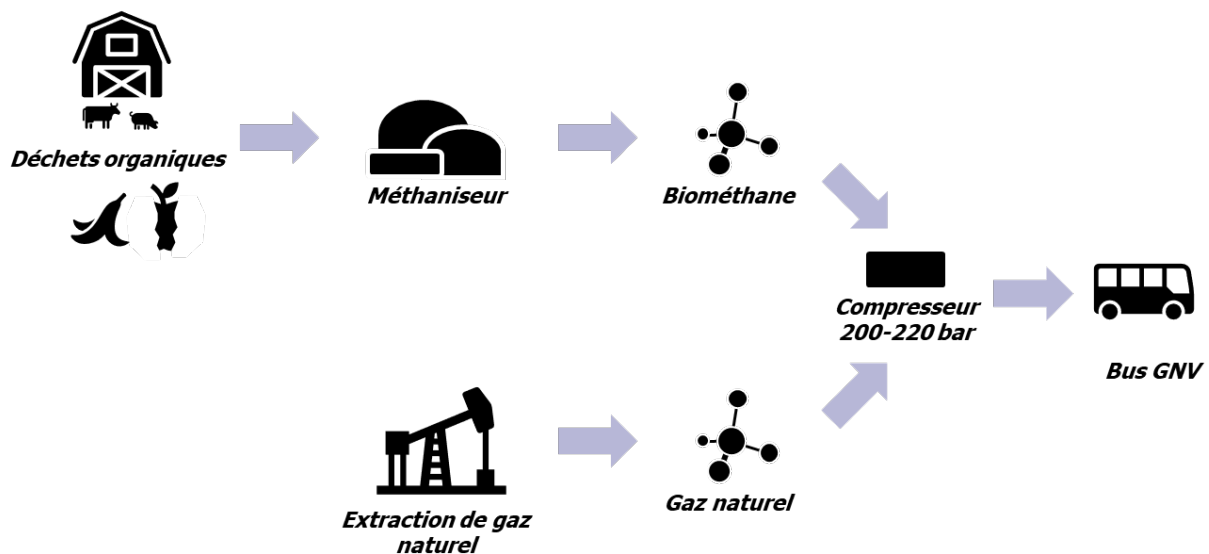


Fig : Principe de base du GNV

L'offre sur le marché des autobus GNV est assez large et couvre plusieurs catégories de véhicules allant des minibus aux articulés de 18 mètres.

Le step E de la norme Euro VI exige l'ajout d'un filtre à particules pour les véhicules GNV. Cet ajout constitue un nouveau défi pour les constructeurs et sa mise en œuvre a été différée au 1^{er} janvier 2024.



Exemple autobus GNV : Scania Citywide LF

- **Coût moyen d'acquisition :**

- 210 300 € HT, pour un véhicule Euro VI step E, hors options
- Coût des options : 80 000 € HT (valeur moyenne pour les véhicules diesel)

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 10,4kWh/m³.

- **Consommation moyenne :** 45,3 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
- **Coût moyen de maintenance préventive :** 0,18 €/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.

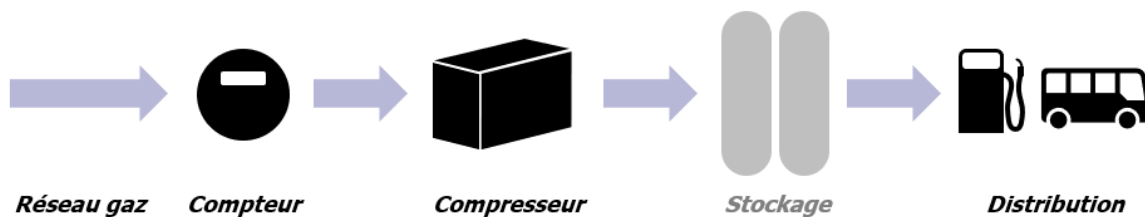


Fig : Station de distribution du GNV

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'établissement¹³. 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 : 0,09-0,19 g/kWh
 - CO : 0,05-0,24 g/kWh
 - HC : <0,01 g/kWh
 - PM : 0,0002-0,0058 g/kWh

¹³ Véhicules fonctionnant au gaz naturel, INRS
<https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206003>

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

GNV	BioGNV
▪ Sortie de véhicule : 1,043-1,140 kg/km	▪ Sortie de véhicule : 1,043-1,140 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** : 72-77 dB(A)

Le GNV permet de diminuer légèrement les nuisances sonores par rapport à un bus diesel.

f. Quelques repères

Au 1er janvier 2020¹⁴, 11% du parc français d'autobus circulait au GNV (3 075 véhicules). Cette part est restée relativement stable entre 2011 et 2020. Les plus grosses flottes se situent à Lille, Bordeaux, Nantes, Toulouse et Paris.

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.

¹⁴ Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/69-000-autocars-en-circulation-au-1er-janvier-2020>

g. Coûts de possession d'un véhicule de 12m

Véhicule GNV, options comprises

Coût moyen d'acquisition :

- 290 300 € HT

Coût énergétique :

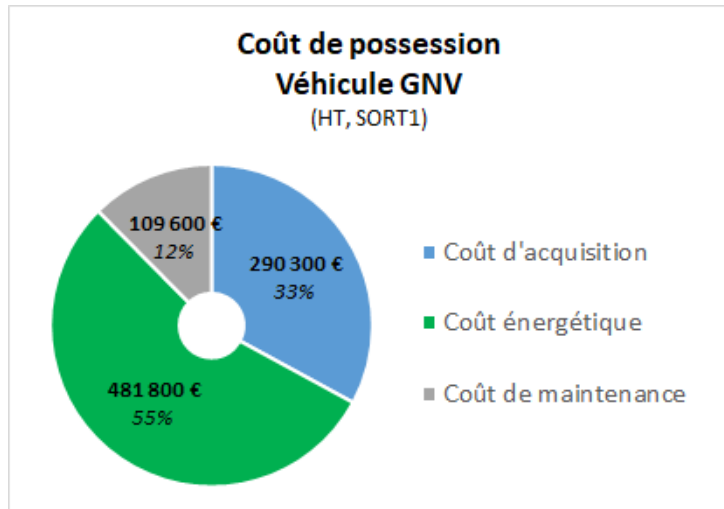
- 481 800 € HT

Coût moyen de maintenance préventive :

- 109 600 € HT

Coût de possession total :

- **881 700 € HT**
soit 1,47 €/km



Véhicule BioGNV, options comprises

Coût moyen d'acquisition :

- 290 300 € HT

Coût énergétique :

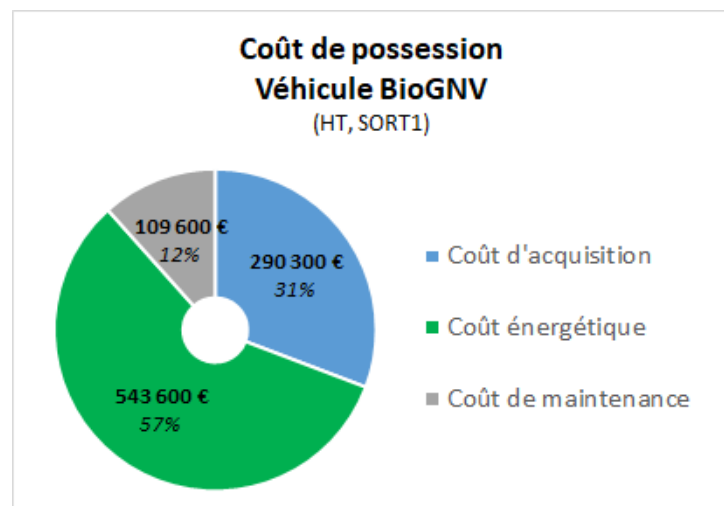
- 543 600 € HT

Coût moyen de maintenance préventive :

- 109 600 € HT

Coût de possession total :

- **943 500 € HT**
soit 1,57 €/km



Sur une durée de 15 ans, le coût d'un autobus GNV est 21% plus élevé que celui d'un Euro VI thermique. Le coût d'un autobus BioGNV est, quant à lui, supérieur de 30 % de celui Euro VI thermique.

4. Véhicules à motorisation hybride

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. D'autres systèmes, plus marginaux, conduisent à une double, voire une triple hybridation :

- GNV / Electrique ;
- GNV / Hydraulique ;
- Diesel / Electrique / Hydraulique.

Bien qu'équipés de deux moteurs, les véhicules hybrides diesel / électrique ne disposent que d'une seule source d'énergie : le gazole.

Comme indiqué en partie II.1.a., le prix du gazole pourrait poursuivre une tendance à la hausse dans les années à venir.

- **Prix du gazole (2022)** : 1,33 €/L (HT, incluant le remboursement partiel de TICPE), hypothèse prix à la cuve à novembre 2022¹⁵
- **Tendance** : à la hausse ↗

b. Véhicule

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.



Exemple autobus hybride : Volvo Bus 7900

¹⁵ Source : Comité National Routier, <https://www.cnr.fr/indexation-gazole-mode-demploi>

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 hybride légère), on trouve ainsi un alternateur à la place du moteur électrique et un système de stockage de l'électricité plus léger qu'une batterie (condensateur). 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 hybride totale) – les composants électriques étant plus performants – cela peut être possible en fonction des spécifications du véhicule. Le mode électrique soutient le 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.

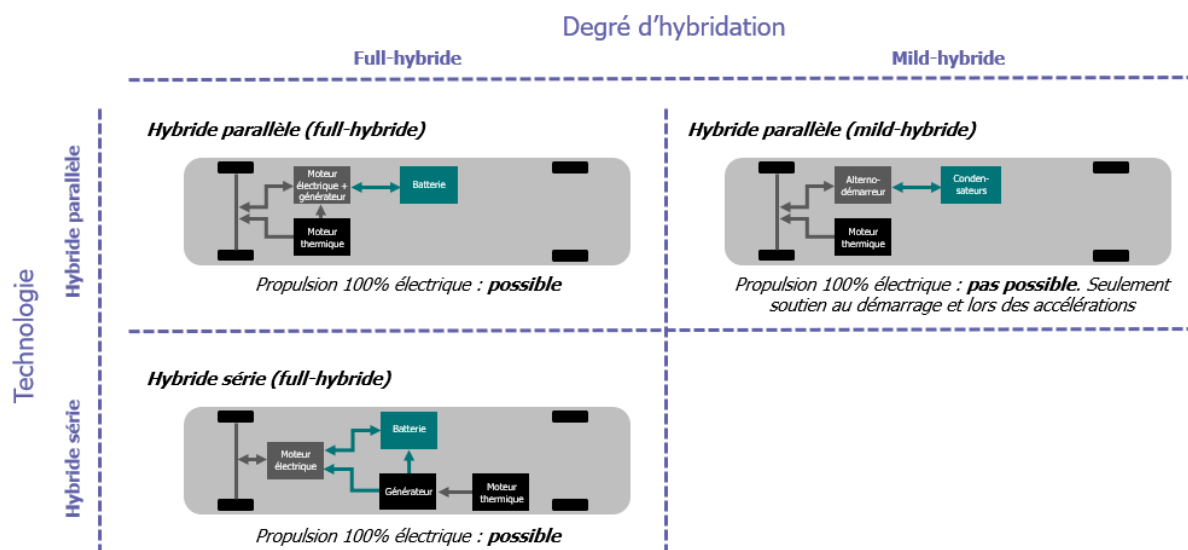


Fig : Technologies de véhicules hybrides

- **Coût moyen d'acquisition :**
 - Mild hybride: 199 000 € HT, hors options
 - Full hybride: 283 000 € HT, hors options
 - Coûts des options : 80 000 € HT (valeur moyenne pour les véhicules diesel)
- **Consommation moyenne :**
 - Mild hybride: 36,4 L/100km (basée sur cycle SORT 1)
 - Full hybride: 30,8 L/100km (basée sur cycle SORT 1)

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.

Pour un véhicule mild hybride, les condensateurs sont prévus pour la durée de vie, à la différence du full hybride où un remplacement à mi-vie de la batterie est à prévoir.

- **Durée de vie / kilométrage :**
 - Véhicule : 15 ans / 600 000km
 - Batterie (full hybride) : 7,5 ans
- **Coût moyen de maintenance préventive :**
 - Mild hybride : 0,19 €/km
 - Full hybride :
 - Hors renouvellement batterie : 0,13 €/km
 - Renouvellement batterie : 22 000 € HT

c. Infrastructure

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

Les ateliers de maintenance sont concernés par la rubrique ICPE 2930. L'arrêté du 12 mai 2020¹⁶ classe les ateliers de réparation et entretien pour véhicules hybrides comme « locaux à risque » qui doivent être protégés du risque incendie.

- **Coût des infrastructures :**
 - Adaptation de l'atelier : de l'ordre de 20 000 à 50 000 € 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) ainsi que des adaptations techniques pour assurer la maintenance des autobus hybrides (plus de hauteur, équipements pour accès aux toitures, etc.).

¹⁶ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041876039>

d. Formation

Outre les formations requises pour les véhicules diesel (cf. partie II.1.0.), 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 2010¹⁷ 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 II.5.d).

e. Impacts environnementaux

L'hybridation pose toujours la question de l'emploi du gazole, qui même à un niveau de consommation réduit, rejette des polluants et du CO₂. A noter que le full hybride peut rouler pendant 30%-50% de son temps de circulation en tout électrique selon la ligne. Les émissions de polluants indiquées ci-dessous sont mesurées sur banc d'essai moteur, sans prise en considération du temps de circulation réalisé en 100% électrique. Les émissions de polluants sont donc inférieures en conditions de roulage réelles.

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

Mild hybride	Full hybride
▪ NOx : 0,06-0,34 g/kWh	▪ NOx : 0,28 g/kWh
▪ CO : 0,04-0,12 g/kWh	▪ CO : 0,02 g/kWh
▪ HC : <0,01 g/kWh	▪ HC : 0,01 g/kWh
▪ PM : 0,0023-0,0046 g/kWh	▪ PM : 0,0025 g/kWh

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

Mild hybride	Full hybride
▪ Sortie de véhicule : 0,906 kg/km	▪ Sortie de véhicule : 0,766 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 ou full hybride : 72-77 dB(A)

La motorisation hybride réduit les nuisances sonores et vibrations lors des phases de démarrage et pendant les phases de propulsion 100% électriques.

¹⁷ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000022845983/>

f. Quelques repères

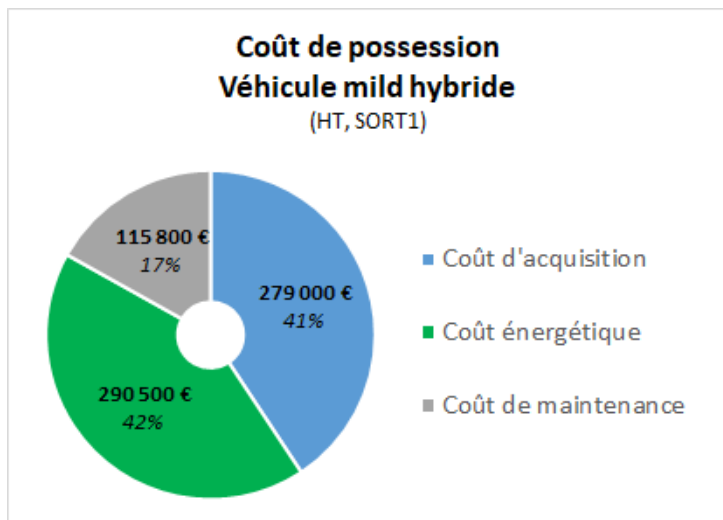
Les premiers véhicules hybrides ont fait leur apparition en France en 2009, dans le cadre d'expérimentations.

Au 1^{er} janvier 2020¹⁸, ils représentent 7,1% 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

Véhicule « mild hybride » 12m, options comprises

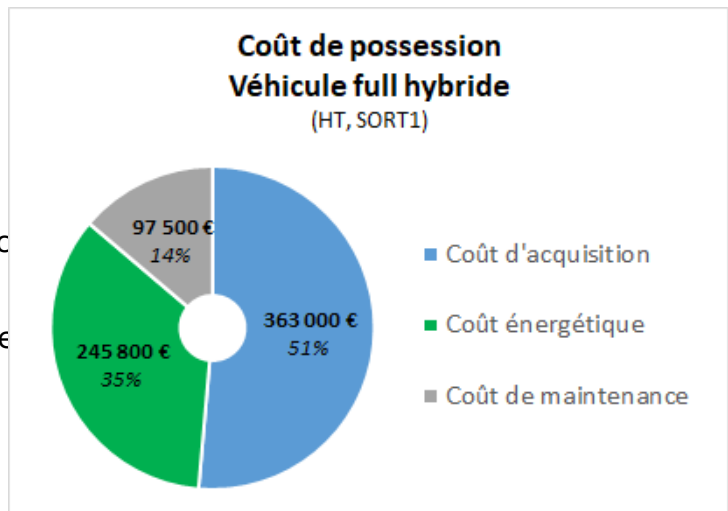
- Coût moyen d'acquisition :
 - 279 000 € HT
- Coût énergétique :
 - 290 500 € HT
- Coût moyen de maintenance préventive :
 - 115 800 € HT
- **Coût de possession total :**
 - **685 300 € HT**
soit 1,14 €/km



¹⁸Source : Service de la données et des études statistiques (SDES)

Véhicule « full hybride » 12m, options comprises

- Coût moyen d'acquisition :
 - 363 000 € HT
- Coût énergétique :
 - 245 800 € HT
- Coût moyen de maintenance préventive :
 - 97 500 € HT, y compris renouvellement de batteries
- **Coût de possession total :**
 - **706 300 € HT**
soit 1,18 €/km



Sur une durée de 15 ans, les coûts d'un autobus « mild hybride » sont inférieurs de 6 % de ceux d'un Euro VI thermique et 3 % pour un "full".

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 2020, le mix électrique français provient principalement du nucléaire (67,1%), suivi par l'hydraulique (13%), l'éolien (7,9%), le thermique (7,5%), le solaire (2,5%) et les bioénergies (1,9%)¹⁹. De l'électricité 100% renouvelable peut être achetée auprès des fournisseurs pour un surcoût limité grâce au système de garanties d'origine.

Le prix de l'électricité a augmenté de façon régulière depuis plusieurs années et cette tendance pourrait se poursuivre dans les années à venir, porté par la hausse de la demande (notamment liée à l'électrification du parc automobile) et le déploiement d'énergies renouvelables.

- **Prix de l'énergie (2022)** : 0,10 €/kWh (HT) (hypothèse novembre 2022), hors coûts d'infrastructure de la station de distribution ;
- **Tendance** : à la hausse ↗

b. Véhicule

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.



Exemple autobus électrique : HeuliezBus GX337 Elec

¹⁹ <https://www.rte-france.com/actualites/bilan-electrique-francais-2020>

Plusieurs systèmes d'entraînement sont développés par les constructeurs :

- Le moteur entraîne directement le pont puis les roues (concept le plus répandu) ;
- Le moteur entraîne une boîte à vitesses à 2 rapports, qui entraîne ensuite le pont puis les roues ;
- La motorisation est située au niveau des roues ce qui implique deux moteurs.

La capacité des batteries des véhicules électriques peut aujourd'hui atteindre 500 kWh avec des perspectives à 600-700 kWh d'ici 2023. La capacité moyenne observée par la CATP à l'heure actuelle est située entre 400 à 420 kWh.

Le saviez-vous ?

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 évoluent très vite.

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, commencent à pouvoir 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 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.

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 2020), la conversion d'un véhicule thermique en électrique – le retrofit – est autorisée, sous certaines conditions : autobus de plus de 5 ans, maintien des dimensions du véhicule (et notamment sa hauteur), de la puissance du moteur thermique et de la masse maximale admissible, la masse à vide ne pouvant dépasser 20% de celle initiale. A ce jour les projets de retrofit en France sont tous au stade de prototype.

• **Coût moyen d'acquisition :**

- 474 000 € HT pour un véhicule de base, hors options (dont coût batterie : 155 000 € HT pour une capacité de 415 kWh) ;
- Coût des options : 80 000€ HT (valeur moyenne pour les véhicules diesel)

La capacité des batteries a considérablement évolué ces dernières années. Les batteries peuvent aujourd'hui assurer une autonomie maximale d'environ 250 km en conditions réelles. Cette consommation 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 à mi-vie.

La durée de vie des batteries varie selon le niveau d'utilisation, le relief, etc. La capacité des batteries tend à baisser pendant la durée de vie, on considère qu'elle perd 20 à 25% de sa capacité initiale au bout de 7,5 ans. 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
 - Batterie : 7,5 ans
- **Coût moyen de maintenance préventive** :
 - Hors renouvellement batterie : 0,21 €/km
 - Renouvellement batterie : 155 000 € 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 peuvent être distingués²⁰ :

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 chargeurs et véhicules sont généralement interopérables car répondant à des normes, à quelques exceptions près.

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 2018 impose le respect

²⁰ 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 : <https://www.utp.fr/actualite/les-normes-des-systemes-de-charge-pour-les-bus-electriques-publiees-dans-le-reglement>

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 2020 classe 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.

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 au stade d'expérimentation et présente un rendement inférieur aux systèmes avec contact.

Les retours d'expérience sur la charge rapide sont aujourd'hui peu nombreux, mais elle peut 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).

d. Formation

La réglementation fixée par le décret 2010-1118 du 22 décembre 2010²¹ 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
	C : consignation électrique R : intervention	X : opérations particulières liées aux métiers		
	E : essai ou expertise			Essai Expertise auto

Fig : les symboles d'habilitation électrique²²

²¹ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000022845983/>

²² 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 important 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 2020²³, la France comptait 642 autobus électriques en exploitation, avec des flottes importantes en Ile-de-France, Amiens, Nantes, Bayonne et Aix-en-Provence.

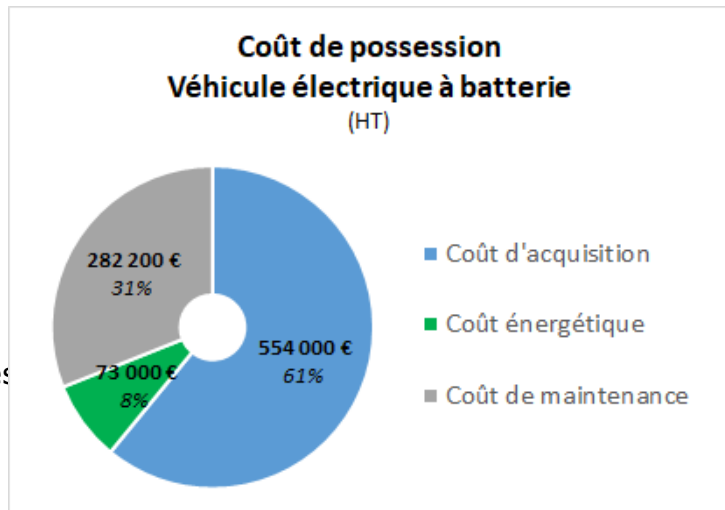
La RATP a inscrit dans son plan Bus 2025 la transformation de son parc d'autobus vers un mix électrique et gaz. En juillet 2021, Ile-de-France Mobilités (IDFM) et la RATP ont annoncé avoir signé une série d'accords-cadres pour la fourniture de 451 autobus électriques.

²³Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/69-000-autocars-en-circulation-au-1er-janvier-2020>

g. Coûts de possession d'un véhicule de 12m

Véhicule électrique à batterie 12m, options comprises

- Coût moyen d'acquisition :
 - 554 000 € HT
- Coût énergétique :
 - 73 000 € HT
- Coût moyen de maintenance préventive :
 - 282 200 € HT, y compris renouvellement de batteries
- **Coût de possession total :**
 - **909 200 € HT**
soit 1,52 €/km



Sur une durée de 15 ans, les coûts d'un véhicule à batterie sont, en moyenne, 25% plus élevés que ceux d'un Euro VI thermique.


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 (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 II.5.a., le prix de l'électricité pourrait poursuivre une tendance à la hausse dans les années à venir.

- **Prix de l'énergie (2022)** : 0,10 €/kWh (HT), 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.

- **Coût moyen d'acquisition :**

- Trolleybus IMC : 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.

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.

IMPORTANT : pour cette étude comparative, le coût moyen d'acquisition 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.

- **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 II.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, trois réseaux français exploitent des trolleybus : Lyon, St-Etienne et Limoges.

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.

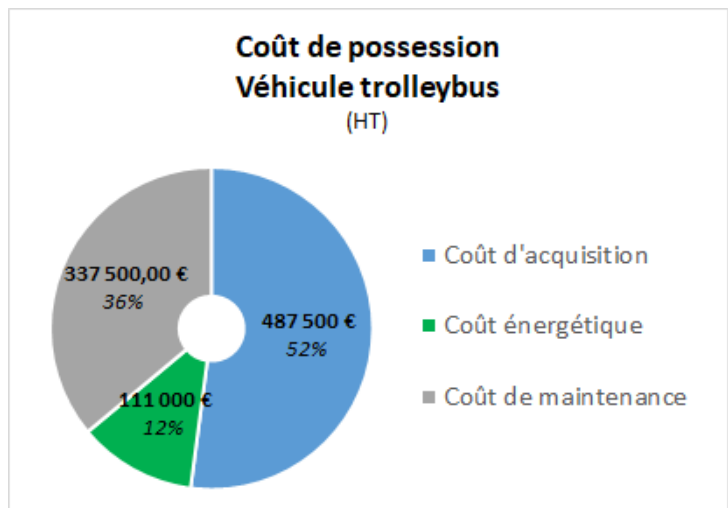
Depuis février 2021, Saint-Étienne Métropole fait également rouler des trolleybus IMC. Les véhicules font 12m de longueur et peuvent embarquer 94 passagers (dont 22 places sont assises). Au total, 22 trolleybus ont été commandés.

Plus récemment, la métropole du Grand Nancy projette de faire l'acquisition d'une vingtaine de trolleybus IMC articulés de 24m en remplacement de son tramway TVR sur la ligne Tempo1.

g. Coûts de possession d'un véhicule de 12m

Trolleybus 12m, options comprises

- Coût moyen d'acquisition :
 - 487 500 € HT
- Coût énergétique :
 - 111 000 € HT
- Coût moyen de maintenance préventive :
 - 337 500 € HT
- **Coût de possession total :**
 - **936 000 € HT**
soit 1,56 €/km



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 15 ans et 600 000 kms (hors coûts de rénovation à mi-vie).

7. Véhicules 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 » 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 ou d'énergies renouvelables (soleil, vent, eau, etc.). 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 décarboné²⁴.

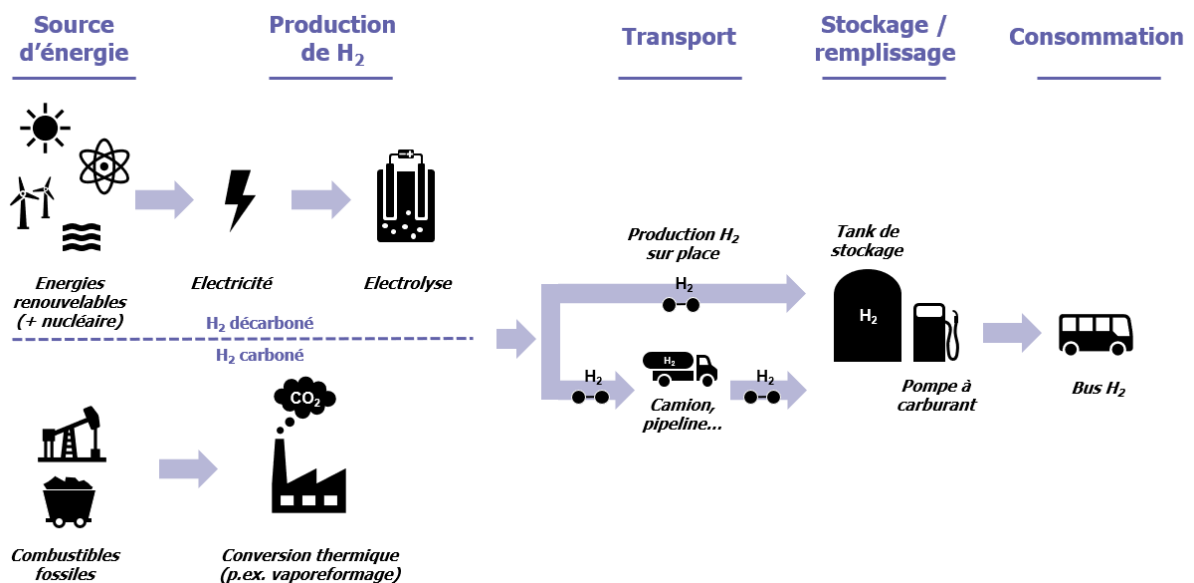


Fig : Chaîne de production de l'hydrogène

²⁴ <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-developpement-lhydrogene-decarbore-en-france>

Le prix de l'H₂ 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.

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 électrolyseurs²⁵.

- **Prix de l'énergie (2022) :**

- 9 €/kg (HT, y compris aides de l'ADEME, hypothèse novembre 2022), 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 de 10 à 14 €/kg (HT, y compris aides de l'ADEME), selon la puissance installée.

- **Tendance** : à la baisse ↘

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 : Safran Businova

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).

²⁵ Etude de la demande potentielle d'hydrogène renouvelable et/ou bas carbone en France à 2030, AFHYPAC 2020

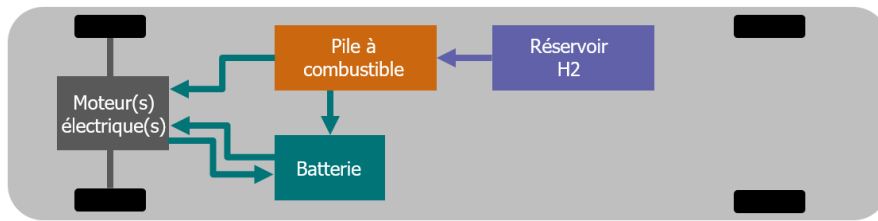


Fig : Full H₂

- 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.

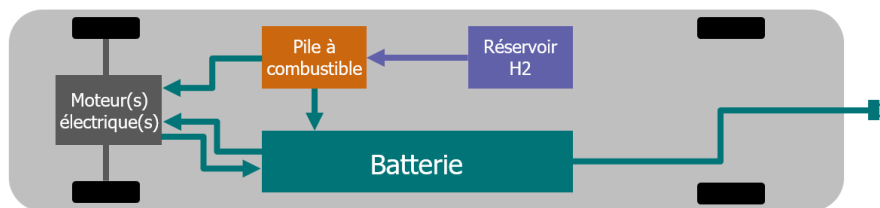


Fig : Range extender

- **Coût moyen d'acquisition :**

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

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
- 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. ²⁶

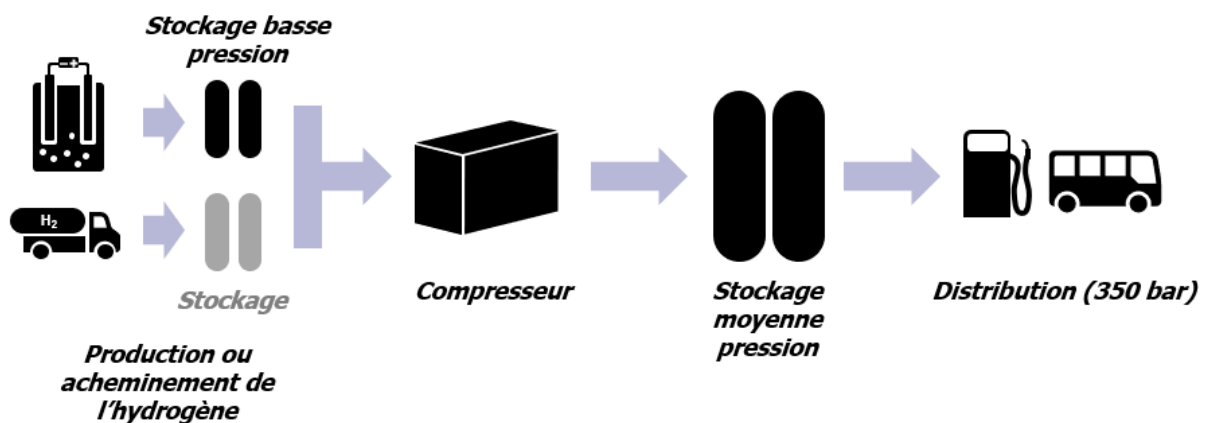


Fig : Infrastructures de distribution de l'hydrogène

²⁶ 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

- **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, réglementation 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 II.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 considéré 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/km²⁷ 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

Selon les chiffres UTP du 1^{er} janvier 2020²⁸, les véhicules à hydrogène représentent 0,05% du parc d'autobus standard en France.

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.

De nombreux réseaux se tournent aujourd'hui vers l'hydrogène (Auxerre, Le Mans, etc.) portés par les appels à projets écosystèmes territoriaux hydrogène de l'Etat.

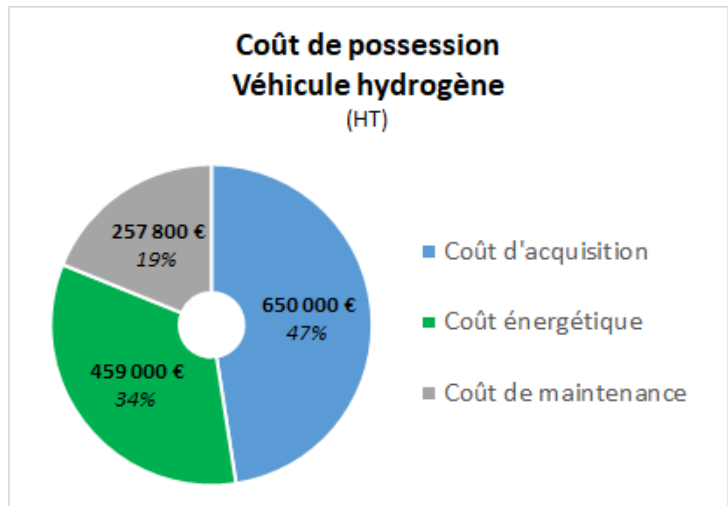
²⁷ Source : <https://www.ademe.fr/panorama-evaluation-differentes-filieres-dautobus-urbains>

²⁸ Source : Le parc des véhicules urbains des services urbains au 1^{er} janvier 2020, UTP

g. Coûts de possession d'un véhicule de 12m

Véhicule électrique à hydrogène 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, les coûts véhicule à hydrogène sont, en moyenne, près de 188 % plus élevés que ceux d'un Euro VI thermique.

III. Synthèse comparative des différentes motorisations

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 subventions liées à l'achat de véhicules, non prises en compte dans cette étude, peuvent également influencer sur l'attractivité de certaines technologies.



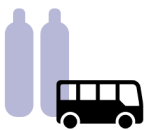
Diesel

- Le **diesel**, bien que condamné à moyen terme du fait de ses émissions polluantes, reste la technologie la mieux maîtrisée, et l'une des plus performantes économiquement. Parce qu'il est financièrement plus abordable, et qu'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 IV ou antérieurs représentent encore un peu plus de 30% du parc d'autobus français début 2020.



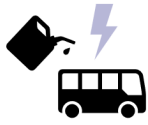
Carburants alternatif.

- Les **biocarburants** constituent une alternative de transition qui reste aujourd'hui un marché de niche (autour de 1,2 % 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)

- L'augmentation récente du coût de l'énergie **GNV/BioGNV** entraîne une augmentation significative du coût global de possession du véhicule, celui-ci dépassant largement celui du diesel Euro VI. 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 plus difficile aujourd'hui avec la fin annoncée des véhicules thermiques. Le GNV diminue les émissions d'oxyde d'azote mais les émissions de particules fines (PM) restent proches du diesel. 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.



Hybride diesel /
électrique

- La filière **hybride** constitue une alternative de transition au diesel Euro VI. Le « full hybride » présente un coût global de possession inférieur à un diesel Euro VI, les économies de consommation de gazole venant compenser le coût d'achat plus élevé. En dehors de quelques adaptations sur l'atelier, il ne nécessite pas d'infrastructures supplémentaires. La technologie hybride permet de réduire de façon sensible les émissions de polluants et les gaz à effet de serre.



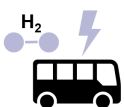
Electrique à batterie

- La filière des **véhicules électriques à batterie** a connu un développement important ces dernières années à la fois d'un point de vue technique et au niveau de son industrialisation. Pour autant, les coûts restent élevés : le coût global de possession du véhicule est supérieur de 25% à celui d'un diesel Euro VI. 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.



Trolleybus

- 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... 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

- Avec la mise en place de la stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné fin 2020, la filière **hydrogène** décarboné nourrit l'espoir de connaître un changement d'échelle radical. Stimulée par les appels à projets « écosystèmes territoriaux hydrogène » portés par l'ADEME, la filière pourrait s'industrialiser et atteindre son horizon de maturité technologique d'ici quelques années. Néanmoins sans baisse significative des coûts de fabrication des véhicules et de la production de H₂ décarboné, la compétitivité de la mobilité hydrogène par rapport aux autres motorisations ne sera pas au rendez-vous.

Fig : Tableau comparatif des différentes motorisations

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	1,33 €/l	727 000 € HT soit 1,21€ HT/km	Mature	Cuves / pompes existantes	Atelier existant	-	NOx : 0,06-0,34 g/kWh CO : 0,04-0,12 g/kWh PM : 0,0023-0,0046 g/kWh	Sortie de véhicule : 0,973-1,203 kg/km Puits à la roue : 1,212-1,497 kg/km	72 à 77 dB(A)
Carburants alternatifs	B100	15 ans	1,33 €/l	761 000 € HT soit 1,27€ HT/km	Début / Expérimental	Réutilisation possible des cuves	Atelier existant	-	Comparaison avec gazole NOx : jusqu'à +20% CO : jusqu'à -50% PM : NC	Sortie de véhicule : pas d'écart significatif (vs gazole) Puits à la roue : -60%	72 à 77 dB(A)
	XtL (HVO)	15 ans	1,53 €/l	779 400 € HT soit 1,30€ HT/km	Début / Expérimental			-	Comparaison avec gazole NOx : jusqu'à -9% CO : jusqu'à -24% PM : jusqu'à -33%	Sortie de véhicule : légère baisse (vs gazole) Puits à la roue : -50 à -75%	
GNV	GNV	15 ans	1,77 €/kg	881 700 € HT soit 1,47€ HT/km	Mature	Charge lente : 100 véh : 2,5-3,5 MC	Adaptation gaz : 60-100k€/travée	Qualification GNV (3 niveaux)	NOx : 0,09-0,19 g/kWh CO : 0,05-0,24 g/kWh PM : 0,0002-0,0058 g/kWh	Sortie de véhicule : 1,043-1,140 kg/km Puits à la roue : 1,282-1,400 kg/km	72 à 77 dB(A)
	BioGNV	15 ans	2,00 €/kg	943 500 € HT soit 1,57€ HT/km	Mature	Charge rapide : 15 véh : 1,2-1,8MC				Sortie de véhicule : 1,043-1,140 kg/km Puits à la roue : 0,263-0,288 kg/km	
Hybride	Mild hybride - Dies/Elec	15 ans	1,33 €/l	685 300 € HT soit 1,14€ HT/km	Intermédiaire	Cuves / pompes existantes	Adaptation électricité : 20-50k€/travée	Habilitation électrique	NOx : 0,06-0,34 g/kWh CO : 0,04-0,12 g/kWh PM : 0,0023-0,0046 g/kWh	Sortie de véhicule : 0,906 kg/km Puits à la roue : 1,128 kg/km	72 à 77 dB(A)
	Full hybride - Dies/Elec	15 ans	1,33 €/l	706 300 € HT soit 1,18€ HT/km	Intermédiaire			Habilitation électrique	NOx : 0,28 g/kWh CO : 0,02 g/kWh PM : 0,0025 g/kWh	Sortie de véhicule : 0,766 kg/km Puits à la roue : 0,954 kg/km	
Electrique à batteries	Recharge lente	15 ans	0,10 €/kWh	909 200 € HT soit 1,52€ 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 (2)	Trolleybus IMC	15 ans	0,10 €/kWh	936 000 € HT soit 1,56€ 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 (3)	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)

En gras, les modifications apportées au tableau de synthèse de l'étude initiale.

(1) le % d'augmentation du coût d'achat d'énergie a été calculé à partir de la moyenne des 3 indices de juillet à septembre 2022 (CNR gazole professionnel TRV, CNR carburant GNV, INSEE 010534769 électricité vendue aux entreprises), appliqué aux coûts ayant servis d'hypothèse (sept 2021) lors de l'étude comparative sur les différentes motorisation des autobus, publiée en février 2022.

(2) 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.

(3) Le coût moyen d'acquisition a été actualisé tenant compte de nouvelles données recueillies par la CATP. Le coût d'achat de l'énergie a été actualisé pour tenir compte des réalités observées.

IV. 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 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 expérimentations 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

Émanation des collectivités territoriales, la CATP les accompagne dans la transition énergétique de leur parc de bus. A ce titre, elle reste attentive à l'ensemble des critères et des conditions dans lesquels elles vont opérer leurs choix en matière de transition énergétique, dans le contexte particulier de leur territoire.

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 font le choix d'imposer dans l'urgence de nouvelles normes aux collectivités territoriales.

Les collectivités territoriales, conscientes des enjeux et animées par un devoir d'exemplarité, 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. 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 en place et que les coûts d'achat et d'usage très élevés de ces véhicules ne sont pas accompagnés par l'Etat.

La CATP considère donc que cette accélération des exigences en matière de renouvellement des parcs va à contretemps de la logique d'attente de maturité d'une filière comme l'hydrogène, qui doit encore passer en phase d'industrialisation avant d'arriver massivement sur le marché. Par ailleurs, parmi les critères d'évaluation de chaque type d'énergie, la CATP déplore qu'à ce jour, une étude filière par filière sur les impacts connexes n'ait pas été réalisée : augmentation du prix des denrées alimentaires et déforestation concernant les agrocarburants, utilisation des terres rares et impact sur la santé des populations des zones minières pour la fabrication des batteries, etc.

Enfin, dans une logique d'urgence climatique et d'exemplarité, les arguments sont nombreux en faveur d'un renouvellement complet des véhicules les plus anciens impactant massivement sur les émissions par des diesels peu polluants de toute dernière génération.

Or, le choix a été fait d'encourager des acquisitions au coup par coup, qui vont aboutir à un saupoudrage de quelques véhicules expérimentaux au milieu de parc où pourront demeurer des véhicules aux normes obsolètes. **Les collectivités n'ont malheureusement pas été entendues et vont devoir procéder à des renouvellements par à-coups, en choisissant une technologie de motorisation par défaut.**

Marc DELAYER

Administrateur d'AGIR Transport, délégué à la Centrale d'Achat du Transport Public

Annexe

1. Règlementations et outils

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

Que sont les PPA ?

Les Plans de Protection de l'Atmosphère (PPA) sont introduits par la loi 96-1236 sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie (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 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 de zones de circulation restreinte (ZFE-m) ;
- 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.).

Focus sur la Loi pour la Transition Énergétique 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 (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 : - 37,5 % d'émissions de CO₂ d'ici 2030 et l'interdiction de la vente de voitures utilisant des énergies fossiles carbonées d'ici 2040.

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 élus n'ont pas fait ressortir des priorités ou attentes spécifiques territorialisées.

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

Contexte	Il existe plusieurs projets sur le territoire et actions déjà engagées : <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
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
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

<https://www.catp.fr>

01 53 68 04 21

contact@catp.fr

8, villa de Lourcine
75014 PARIS

