

NOVEMBRE 2021



LIVRE BLANC

Comment
décarboner
les bus en
France ?



A propos de Trans-Missions

Trans-Missions, filiale de la société allemande KCW, conseille les pouvoirs publics pour **développer une offre de mobilité durable, efficace et adaptée aux besoins des voyageurs.**

Totalement **indépendante des transporteurs, des constructeurs de matériel roulant et des groupes financiers**, notre offre de conseil est tournée exclusivement vers les besoins des Autorités organisatrices : Trans-Missions a ainsi fait le choix de proposer son expertise uniquement aux pouvoirs publics. Ce positionnement nous permet d'éviter les conflits d'intérêt et de conseiller stratégiquement nos clients dans leurs stratégies de mobilité, en identifiant les marges de manœuvre existantes, à la fois financières et opérationnelles.

Trans-Missions propose en particulier l'accompagnement des Autorités Organisatrices dans leur renouvellement de contrat d'exploitation (DSP, marché public, SPL...)

Riche de sa diversité, **notre équipe est pluridisciplinaire, internationale et passionnée par les sujets de mobilité durable.** Composée de juristes, économistes, ingénieurs et géographes, notre équipe propose des solutions conciliant les enjeux politiques, économiques, juridiques et techniques. Elle apporte ainsi la **garantie d'une réponse globale et de qualité adaptée aux besoins des autorités organisatrices**, en particulier pour des projets complexes faisant intervenir plusieurs partenaires publics et privés.

Vos contacts



Arnaud LEGER

Directeur et co-gérant de Trans-Missions

leger@trans-missions.eu

07 49 66 25 75



Lucile Ramackers

Consultante senior

ramackers@trans-missions.eu

06 79 19 09 51



SOMMAIRE

La problématique	4
1. Un enjeu écologique	4
2. Une évolution législative	5
Les solutions techniques	7
1. Une recommandation en faveur des bus zéro émission	7
2. La comparaison des solutions zéro émission	7
Les enjeux écologiques et d'efficacité énergétique	8
1. Rappel du fonctionnement d'un bus à hydrogène	8
2. L'efficacité énergétique des véhicules zéro émission	9
3. Conclusion sur les aspects énergétiques et environnementaux	11
Les coûts	12
1. La comparaison avec le diesel	12
2. La rentabilité économique	12
Les perspectives	14

La problématique

1. Un enjeu écologique

Le transport est le secteur qui contribue le plus aux émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) en France, avec une part de 31 % en 2019.

Depuis 1990, les GES des transports ont augmenté de 9 %. Elles sont stables depuis 2008, mais l'amélioration de la performance environnementale des véhicules ne compense pas l'augmentation de la circulation.

97 % des émissions de GES induites par les transports sont constituées de CO2 provenant de la combustion de carburants. Par ailleurs, les transports routiers contribuent à la quasi-totalité (94 %) des émissions du secteur des transports, réparties en 54 % pour les véhicules particuliers, 24 % pour les poids lourds (y compris les bus et cars) et 20 % pour les véhicules utilitaires légers.

L'importance du secteur des transports dans la production des GES a donc conduit à construire un nouveau cadre législatif.

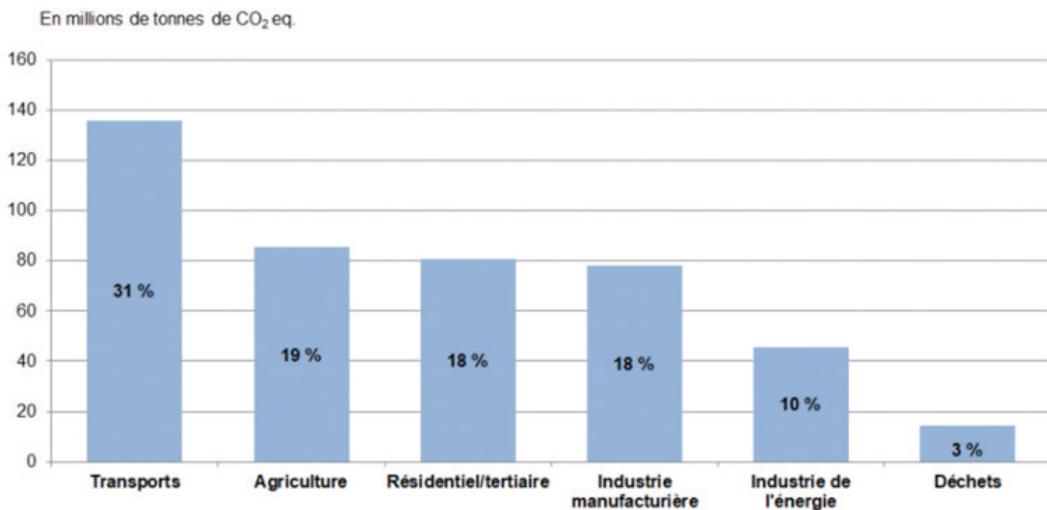


Figure 1 - Répartition sectorielle des émissions de gaz à effet de serre en France en 2019 (source : Citepa)

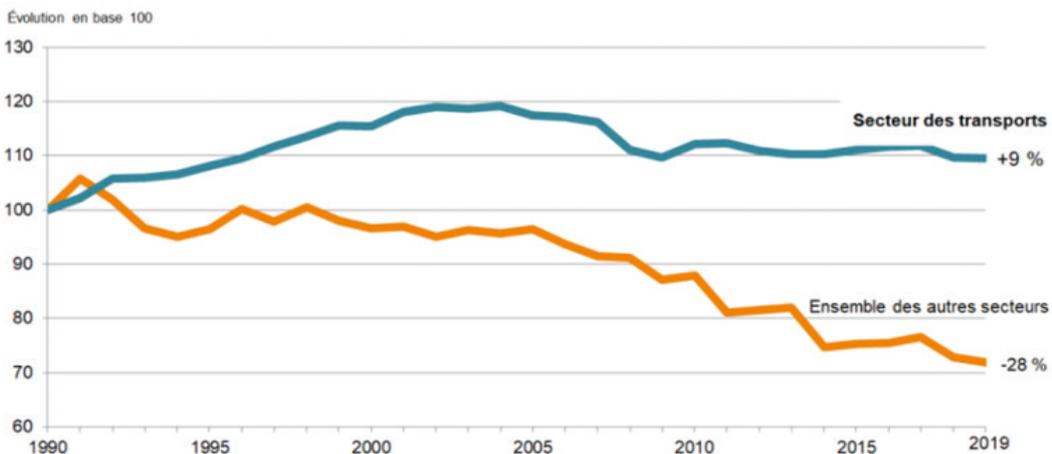


Figure 2 - Evolution des émissions de GES du secteur des transports en France

2. Une évolution législative

La réglementation concernant les bus et autocars s'articule en France autour de :

- La **Loi de transition énergétique pour la croissance verte (2015)**, qui prévoit :
 - ▶ La réduction des émissions de gaz ayant un impact sur l'atmosphère de 40 % par rapport à 1990 en 2030 et division par 4 à partir de 2050.
 - ▶ L'obligation de renouvellement des flottes publiques par une proportion minimale de véhicules à faibles émissions.
- Suivie de son **Décret d'application (2017)**, intégrant :
 - ▶ La définition des bus/autocars à faibles émissions
 - ▶ Le renouvellement d'au-moins 50% du parc entre 2020 et 2025 par des véhicules à faibles émissions et 100% à partir du 1^{er} janvier 2025
 - ▶ Les exigences selon la situation géographique (agglomération de + de 250 000 habitants ou moins, couvertes par un PPA ou non)
 - Pour les grandes agglomérations : seuls les véhicules électriques (gaz sous certaines conditions) sont acceptés.
 - Pour petites agglomérations : les bus Diesel EURO VI ou avec bio-carburants peuvent être acceptés.
- Et enfin de la **Directive européenne « Véhicules Propres » de 2019**, qui définit et différencie les véhicules propres et les véhicules zéro émission, à savoir :

Véhicule propre

Véhicule qui utilise des **carburants alternatifs** (électricité, hydrogène, biocarburants, carburants synthétiques et paraffiniques, biométhane, GNV, GNL, GPL) et **contribue** ainsi au moins **partiellement à la réduction des émissions de CO2**

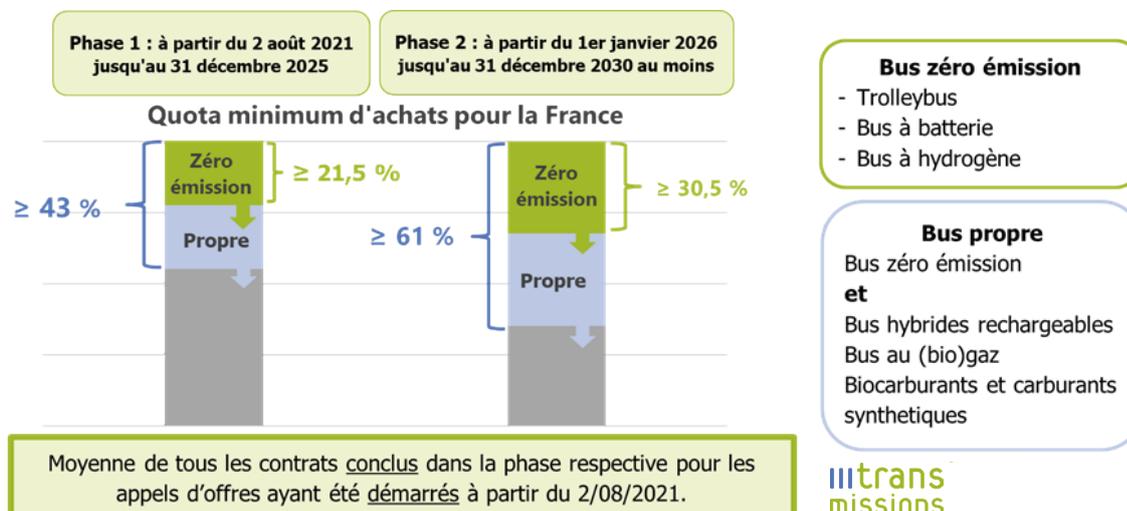
- ⇒ Véhicules à émission nulle
- ⇒ Bus au gaz, Bus à carburants synthétiques
- ⇒ Bus hybrides rechargeables

Véhicule zéro émission

Véhicule alimenté par des carburants alternatifs **sans moteur à combustion interne** (ou avec un moteur dont les émissions sont inférieures au seuil de 1 g de CO2/kWh)

- ⇒ Uniquement les bus à batterie, les trolleybus et les bus à hydrogène

Cette directive fixe également des quotas minimums d'achat de véhicules pour la France, en 2 phases : jusqu'à fin 2025, puis de 2026 à 2030.



Dans ce cadre, les Autorités Organisatrices vont devoir faire évoluer leur parc de bus en faveur de véhicules propres, voire zéro émission.

Comment transformer cette obligation en opportunité pour un territoire et réaliser le bon investissement ?

1. Une recommandation en faveur des bus zéro émission

Nous concentrons notre analyse sur les **bus zéro émission**, à savoir les bus électriques à batterie, les trolleybus et les bus à hydrogène. En effet, bien que le (bio-)gaz, les biocarburants et les carburants synthétiques soient présent dans de nombreuses villes en France car ce sont des **solutions intéressantes économiquement** pour respecter le critère « Véhicule propre » de la directive européenne, elles **interrogent du point de vue de la transition énergétique**, car :

- Leurs **bénéfices par rapport aux normes EURO VI Diesel sont faibles** en termes d'émissions
- La compatibilité du gaz naturel, et du GtL (Gas-to-Liquid) avec les **engagements de réduction des émissions de CO2** et la neutralité carbone n'est pas démontrée et **l'influence du prix du carbone** sur la compétitivité des bus au gaz risque d'être élevée

- **Les ressources en biomasse « durable »** sont limitées. Et selon les objectifs de la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte, le biogaz ne dépassera pas **10% du gaz disponible** dans le réseau avant 2030
- Enfin, le biogaz, produit à partir de la fermentation de matières organiques, est nécessaire pour d'autres secteurs pour lesquels il y a moins d'alternatives disponibles (problématique similaire pour l'hydrogène).

2. La comparaison des solutions zéro émission

Chaque situation est à étudier au cas par cas pour définir la meilleure option. Parmi les technologies de bus zéro émission, voici une synthèse des critères techniques permettant une première grille de lecture :

Critères	Electrique (dépôt)	Electrique (terminus)	Trolleybus	Hydrogène
Autonomie	150 à 200 km 250 km à moyen terme avec l'évolution des batteries	Illimitée	Illimitée	300 à 350 km
Durée de recharge	Charge lente au dépôt (plusieurs heures)	Charge rapide au terminus (plusieurs minutes)	Recharge en ligne	10-15 min au dépôt
Infrastructure spécifique	Non	Oui Alimentation au sol ou par pantographe aux terminus	Oui Electrification de 30 à 70% du parcours pour la recharge des batteries	Oui Stations-service à hydrogène
Véhicules	Très Probable pour pallier la faible autonomie des bus et lisser la recharge	Probable pour intégrer les temps de recharge aux terminus supérieurs aux battements	Non	Non
Particularité	Optimal pour les services courts	Souvent l'option la plus économique	Intéressant sur les axes fréquentés et technologie mature	Soutien politique fort, mais marché restreint

Les enjeux écologiques et d'efficacité énergétique

1. Rappel du fonctionnement d'un bus à hydrogène

1.1 L'approvisionnement en hydrogène



La production d'hydrogène sur site, qui implique l'installation d'une unité de production d'hydrogène (électrolyse), avec compression sur site.



La livraison d'hydrogène, qui implique le transport par remorque d'hydrogène comprimé ou d'hydrogène liquide à évaporer au poste de ravitaillement. En fonction de la pression de livraison, un compresseur sur site peut ne pas être nécessaire. Cet hydrogène peut être un résidu industriel (hydrogène fatal)

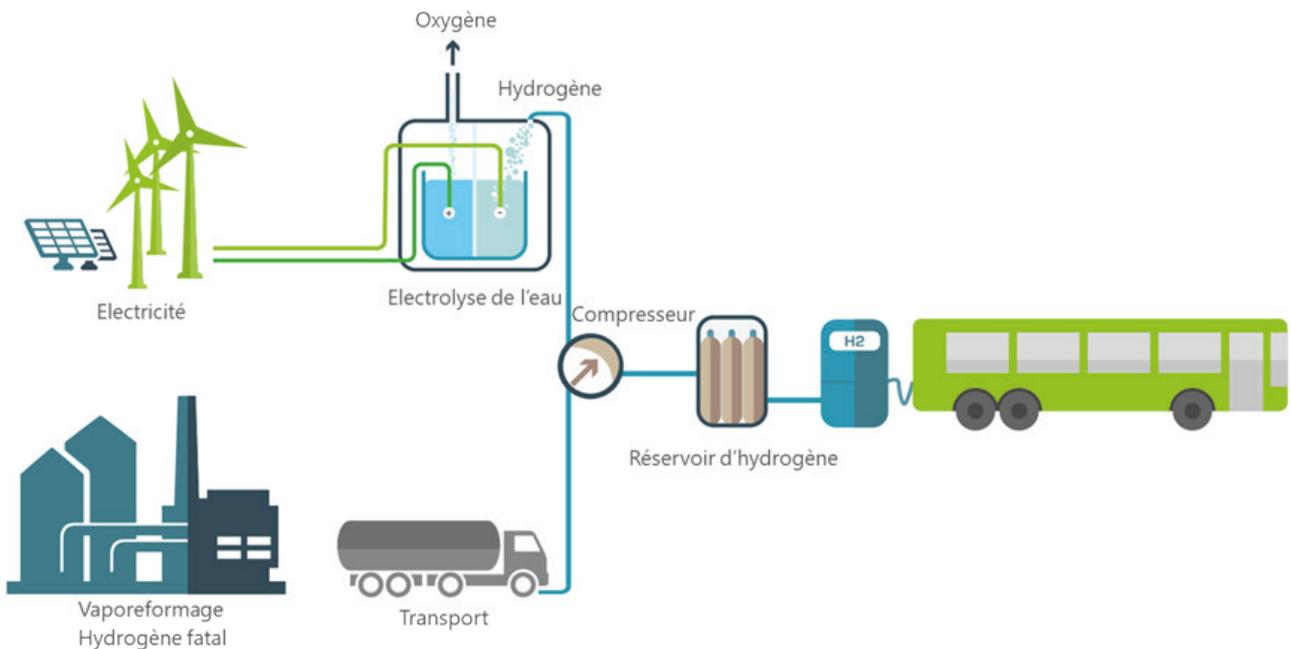


Figure 3 - Modes d'approvisionnement de l'hydrogène (source : programme CHIC – Clean Hydrogen in European Cities)

1.2 Le bus à hydrogène

Le bus à hydrogène, ou à pile à combustible, est un **type de bus électrique**. En effet, le bus à hydrogène partage de nombreux composants avec les bus électriques à batterie, comme un moteur électrique et l'électronique associée. Toutefois, au lieu de stocker l'énergie dans de grosses batteries, ce bus utilise l'hydrogène comme carburant. Les piles à combustible consomment de l'hydrogène et de l'oxygène pour produire de l'électricité par un processus électrochimique, émettant également de la vapeur d'eau et de la chaleur.

Ainsi, selon son mode de production, **l'hydrogène sert d'intermédiaire pour faire rouler un bus à l'électricité**.

En effet, le processus se décompose ainsi :

- une première étape consistant à utiliser de l'électricité pour produire l'hydrogène par électrolyse et le comprimer
- et une deuxième étape par combustion de l'hydrogène dans une pile à combustible pour produire de l'électricité et alimenter le moteur électrique du bus.

S'il n'y a donc pas de différences en termes d'émission de Gaz à Effet de Serre entre les bus électriques à batterie, les trolleybus et les bus à hydrogène lorsqu'ils circulent, la particularité du processus de production de l'énergie de traction du bus à hydrogène entraîne des conséquences sur son efficacité énergétique.



Figure 4 – Composants d'un bus à hydrogène (source : programme CHIC – Clean Hydrogen in European Cities)

2. L'efficacité énergétique des véhicules zéro émission

Afin de pouvoir juger de l'efficacité énergétique des différentes motorisations et sources d'énergie, il est nécessaire de déterminer la **part de l'énergie initiale qui est réellement consacrée à mettre le véhicule en mouvement**.

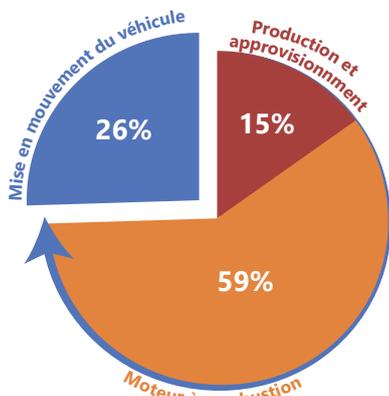
Dans les graphiques ci-dessous, le moteur diesel qui sert de référence, perd tout d'abord 15% du diesel dans la production et l'approvisionnement, puis le moteur en lui-même ne consacre que 30% du carburant à la traction du véhicule. Ainsi, seuls 26% de l'énergie initiale du diesel sont utilisées à mettre le véhicule en mouvement.

On constate donc qu'entre les trois solutions de véhicules zéro émission, le bus à hydrogène est celui dont le processus a le plus de pertes dans les étapes qui lui sont spécifiques et a une efficacité énergétique réelle égale à celle du moteur diesel.

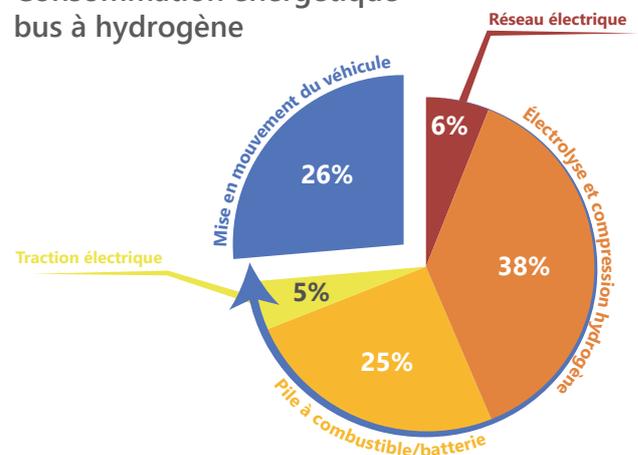
En revanche, le trolleybus est la solution qui présente la meilleure efficacité globale, suivie de près par le bus à batterie.

	Moteur diesel	Electrique à batterie	Trolleybus	Hydrogène
Efficacité globale	26%	67%	74%	26%

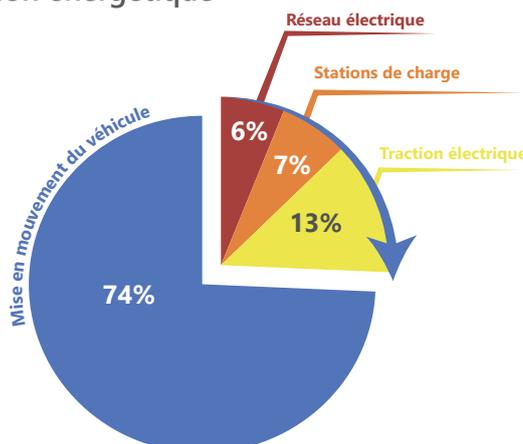
Consommation énergétique moteur diesel



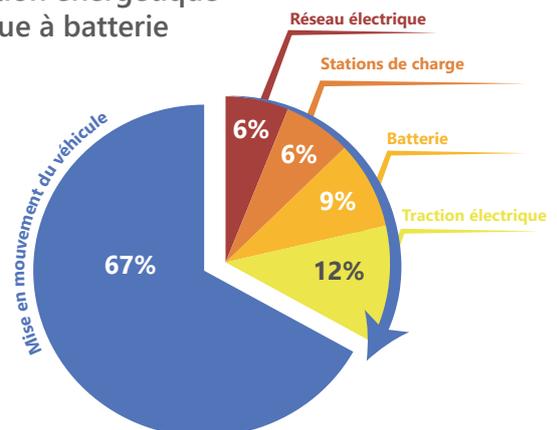
Consommation énergétique bus à hydrogène



Consommation énergétique trolleybus



Consommation énergétique bus électrique à batterie



3. Conclusion sur les aspects énergétiques et environnementaux

Tout d'abord, la motorisation électrique présente l'avantage évident d'être sans émissions locales, c'est-à-dire :

- Pas de polluants (NOx, particules fines)
- Aucune émission locale de gaz à effet de serre

Elle offre en plus une réduction du bruit, qui contribue à améliorer sensiblement l'environnement des riverain·es.

Par ailleurs, son bilan carbone global est positif par rapport aux bus diesel si l'énergie primaire utilisée est bien décarbonée. En effet, malgré des émissions plus élevées pour la production des véhicules propres, ces dernières sont largement compensées par l'absence d'émission pendant leur fonctionnement.

Enfin, le bilan énergétique est à différencier entre les trois options. En effet, les bus à batterie sont environ 2,5 à 3 fois plus efficaces que les bus hydrogène (et diesel).

1. La comparaison avec le diesel

Tout choix devant pouvoir être financé et assumé par la collectivité concernée, le dernier critère d'analyse est bien évidemment le montant financier associé.

Les coûts liés à ces solutions se décomposent en coûts d'investissements et de fonctionnement :

- **Investissements** : à réaliser pour la mise en service de la solution retenue, ils couvrent l'achat de véhicules ainsi que les travaux d'infrastructures nécessaires (adaptation du dépôt, station de recharge spécifique, travaux linéaires éventuels).
- **Fonctionnement** : cela correspond aux dépenses engagées au cours de l'exploitation, à savoir l'énergie de traction consommée et l'entretien.

En comparaison avec les bus diesel actuels, **tous les bus zéro émission impliquent des coûts d'investissements plus élevés.**

En revanche, les **bus électriques à batterie et les trolleybus devraient permettre des**

économies de fonctionnement à service constant, contrairement au bus à hydrogène.

2. La rentabilité économique

Par ailleurs, **la rentabilité économique de la solution choisie** dépend des conditions d'utilisation, qui peuvent ou non engendrer des coûts d'exploitation supplémentaires.

Par exemple, les surcoûts d'infrastructure liés au trolleybus sont moindres par rapport au diesel si la fréquence proposée est élevée.

En revanche, les bus électriques à batterie et les bus à hydrogène engendrent des surcoûts proportionnellement plus importants si l'offre augmente.

Il est ainsi nécessaire de réaliser une **analyse au cas par cas** pour définir la solution la plus adaptée aux besoins.

Poste de coûts	Electrique (dépôt)	Electrique (terminus)	Trolleybus	Hydrogène
Véhicules	x2 – x2,3 coût bus diesel Bus électrique 12m : 450-600k€	x2 – x2,3 coût bus diesel Bus électrique 12m : 450-600k€	x2 – x2,3 coût bus diesel Bus électrique 12m : 450-600k€	x2,3 – x2,5 coût bus diesel Bus hydrogène 12m : 600-700k€
Infrastructure	35-50k€ par chargeur 50kW 90k€ par chargeur 150kW + adaptations au dépôt	500k€ par chargeur haute-puissance (450kW) + adaptations au dépôt	1 – 1,5 M€ par km d'infrastructure + adaptations au dépôt (sécurité incendie uniquement)	5 M€ pour une station de recharge pour 50 bus + adaptations au dépôt notamment éventuelles installations de production d'hydrogène
Énergie	Économies par rapport au bus diesel (coûts énergie inférieurs)	Économies par rapport au bus diesel (coûts énergie inférieurs)	Économies par rapport au bus diesel (coûts énergie inférieurs)	Plus cher. Parité avec bus diesel à partir de 5€/kgH2 Auj. : 9€/kgH2
Entretien	Besoins d'entretien a priori moindres , mais nouveaux besoins : infrastructure, SI, etc...	Besoins d'entretien a priori moindres , mais nouveaux besoins : infrastructure, SI, etc...	Besoins d'entretien a priori moindres , mais nouveaux besoins : infrastructure, SI, etc...	+ 10-20% d'entretien par rapport au diesel

Enfin, des **subventions** sont disponibles pour aider à l'installation des infrastructures (coûts de raccordement électrique partiellement pris en charge selon le cadre de la LOM par exemple) ou à l'achat des véhicules (Bonus écologique, Banque Européenne d'Investissement, NéoT) et ainsi **réduire les surcoûts d'investissements** par rapport aux véhicules thermiques.

Les perspectives

Cette transition vers les bus zéro émission entraîne de nombreux changements pour les Autorités Organisatrices.

Ils sont tout d'abord **positifs**, puisque ces bus permettent de **réduire la pollution** (gaz à effet de serre, bruit, etc.) et sont **bien perçus par les voyageurs-euses** (silencieux, propres et modernes).

En revanche, ils sont **plus chers** que le diesel, avec une augmentation d'environ 20 à 60% par bus-km, tout en nécessitant des **investissements plus élevés**, dont les amortissements sont plus longs que les contrats classiques (environ 15 ans), ce qui oblige à **bien réfléchir au financement**.

Par ailleurs, plusieurs années sont nécessaires pour mettre en place ces solutions (études de faisabilité, construction de nouvelles infrastructures, adaptation des réseaux d'énergie), d'autant plus qu'elles impliquent plus d'acteurs et de coordination, donc il est **indispensable de bien anticiper cette transition** pour l'intégrer dans les contrats d'exploitation.

On note également qu'en dehors du trolleybus qui est largement éprouvé, en particulier pour les bus de grande capacité, ces technologies présentent **un peu plus de risques** par manque d'expérience à long terme. Sans remettre en cause leur intérêt et les bénéfices pour l'environnement, cet aspect invitera à un peu de vigilance.

Enfin, dans une logique de décarbonation efficace techniquement, écologiquement et financièrement, **l'énergie électrique est à privilégier**, notamment par rapport à l'hydrogène et davantage encore par rapport au gaz, quelle que soit son origine.

Pour conclure, le déploiement de bus zéro émission nécessite une **étude approfondie** afin de choisir la **bonne technologie** et définir **la solution adaptée à chaque territoire**. Les investissements à prévoir étant plus longs et conséquents, c'est en effet une condition pour transformer cette nouvelle obligation en opportunité et surtout en réussite.

Dans cette perspective, Trans-Missions est bien entendu disponible pour vous conseiller sur la formule adaptée à votre cas et vous permettre d'améliorer l'environnement de votre territoire.

Crédits

©Trans-Missions

Rédaction : Lucile RAMACKERS - Trans-Missions / Pieter VERSLYPE - Trans-Missions

Expertise technique : Fabien LAURENT - KCW

Directeur de publication : Arnaud LÉGER - Trans-Missions

Design et mise en page : Ivan TOQUET - Trans-Missions

Date de publication : Novembre 2021



Trans-Missions



@Trans_Missions