



**Guide de la benne à ordures ménagères
électrique à hydrogène**
Pour la transition des flottes de collectivités

Avril 2023



Sommaire



[P. 03](#)

Préambule

[P. 04](#)

Introduction

[P. 05](#)

1 - Les cas d'usages pertinents pour la BOM électrique à hydrogène

[P. 07](#)

2 - Caractéristiques des BOM électriques à hydrogène

[P. 10](#)

3 - Présentation de l'offre de BOM électriques à hydrogène

[P. 14](#)

4 - Modèle économique associé

[P. 17](#)

5 - Cas d'études de collectivités ayant déployé des BOM électriques à hydrogène

[P. 23](#)

Conclusion

[P. 24](#)

Fiches pratiques sur la réglementation applicable à l'hydrogène

[P. 25](#)

A propos de France Hydrogène Mobilité

[P. 26](#)

Remerciements



Préambule

Objectif de ce document

L'objectif du présent document est de nourrir **la réflexion des collectivités** souhaitant s'engager ou travaillant déjà sur la thématique de la benne à ordures ménagères (BOM) électrique à hydrogène. Ce document vise à présenter de manière synthétique :

- Les **usages** pour lesquels la BOM électrique à hydrogène s'avère particulièrement pertinente ;
- Les **principales caractéristiques techniques, opérationnelles et environnementales** de la solution électrique à hydrogène ;
- L'**offre de véhicules** disponible et en cours de développement ;
- Le **modèle économique** associé ;
- La **dynamique actuelle des déploiements et projets en France et en Europe**, ainsi que les premiers retours d'expérience ;
- Les **principales réglementations** à considérer pour déployer des BOM électriques à hydrogène.

Ce guide synthétique a été rédigé par Element Energy, pour et avec le support du groupe de travail dédié aux camions électriques à hydrogène, au sein du groupe France Hydrogène Mobilité, volet mobilité de France Hydrogène. Ce document est basé sur des entretiens avec des acteurs spécialisés dans le domaine de la collecte des déchets (syndicats de collecte, exploitants de BOM, collectivités, etc.), les premiers retours d'expérience de projets pionniers, français et européens. Il a de plus bénéficié du support d'acteurs clés et de précurseurs de la filière hydrogène française, qui ont apporté leurs contributions et ainsi aidé à enrichir le présent document.



© GCK

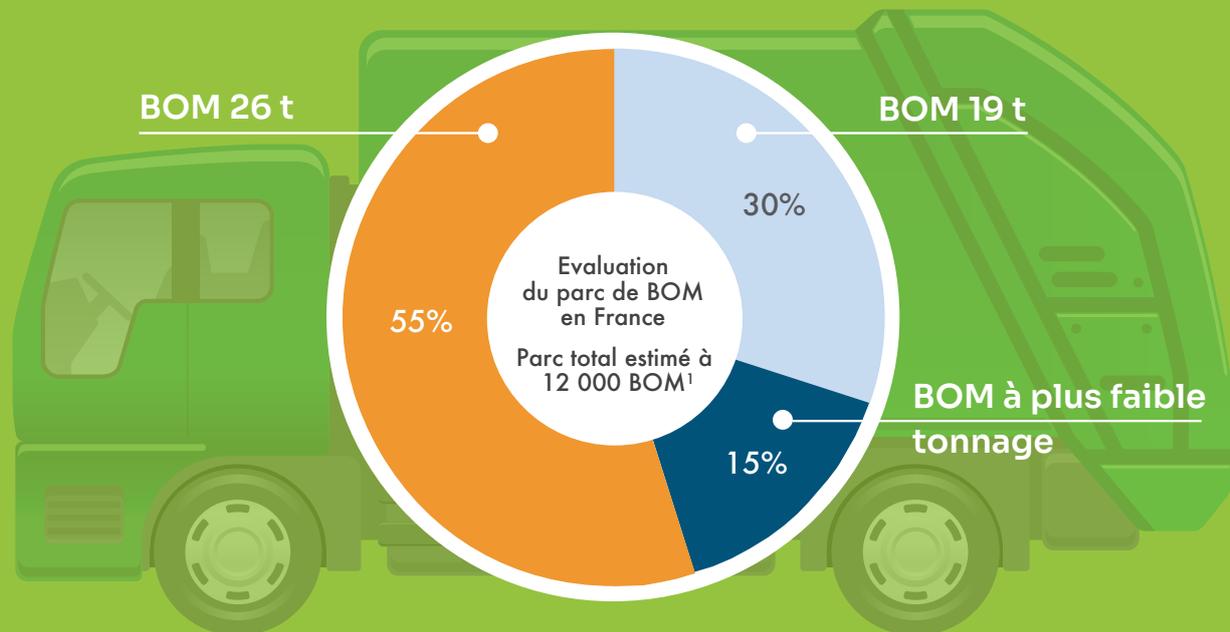
Introduction

Le marché des bennes à ordures ménagères (BOM) en France comprend encore des véhicules diesel en majorité, mais la conversion à des alternatives plus propres s'est accélérée ces dernières années.

- Le parc français est estimé à 12 000 BOM, principalement des véhicules au poids total autorisé en charge (PTAC) de 26 t, mais également des 19 t et plus faibles tonnages.
- Dans la plupart des cas, un constructeur de camions (Renault, Iveco, MAN, DAF, Mercedes-Benz, Volvo, etc.) fournit le châssis du véhicule, et le reste de l'équipement spécifique à la collecte des déchets est ajouté par un carrossier, comme SEMAT, TERBERG MATEC France ou FAUN par exemple.
- Ces dernières années, le GNV (gaz naturel pour véhicule) a constitué la principale alternative au diesel déployée, avec plus de 2 400 BOM GNV en opération en août 2022¹.
- On note également le déploiement de quelques dizaines de BOM électriques à batterie, de marque PVI notamment (groupe Renault).
- Enfin, plus récemment, on note un intérêt croissant pour les BOM électriques à hydrogène, dont le premier modèle a été livré en France, à la Communauté de Communes de Touraine Vallée de l'Indre en 2022.

Figure 1 - Parc de BOM en France,

Source : Parc évalué sur la base d'entretiens réalisés avec des syndicats de collecte, collecteurs et constructeurs de BOM, et en s'appuyant sur les immatriculations de BOM en 2020 d'après SDES, RSVERO



Compte tenu des politiques environnementales de plus en plus strictes, la transition énergétique de ces véhicules devrait s'accélérer dans les prochaines années. La solution électrique à hydrogène a un rôle à jouer dans ce nouveau mix énergétique pour la benne à ordures ménagères.

¹ - <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/vehicules-gnv-en-circulation-en-france-1/>

1

LES CAS D'USAGES PERTINENTS POUR LA BOM ÉLECTRIQUE À HYDROGÈNE

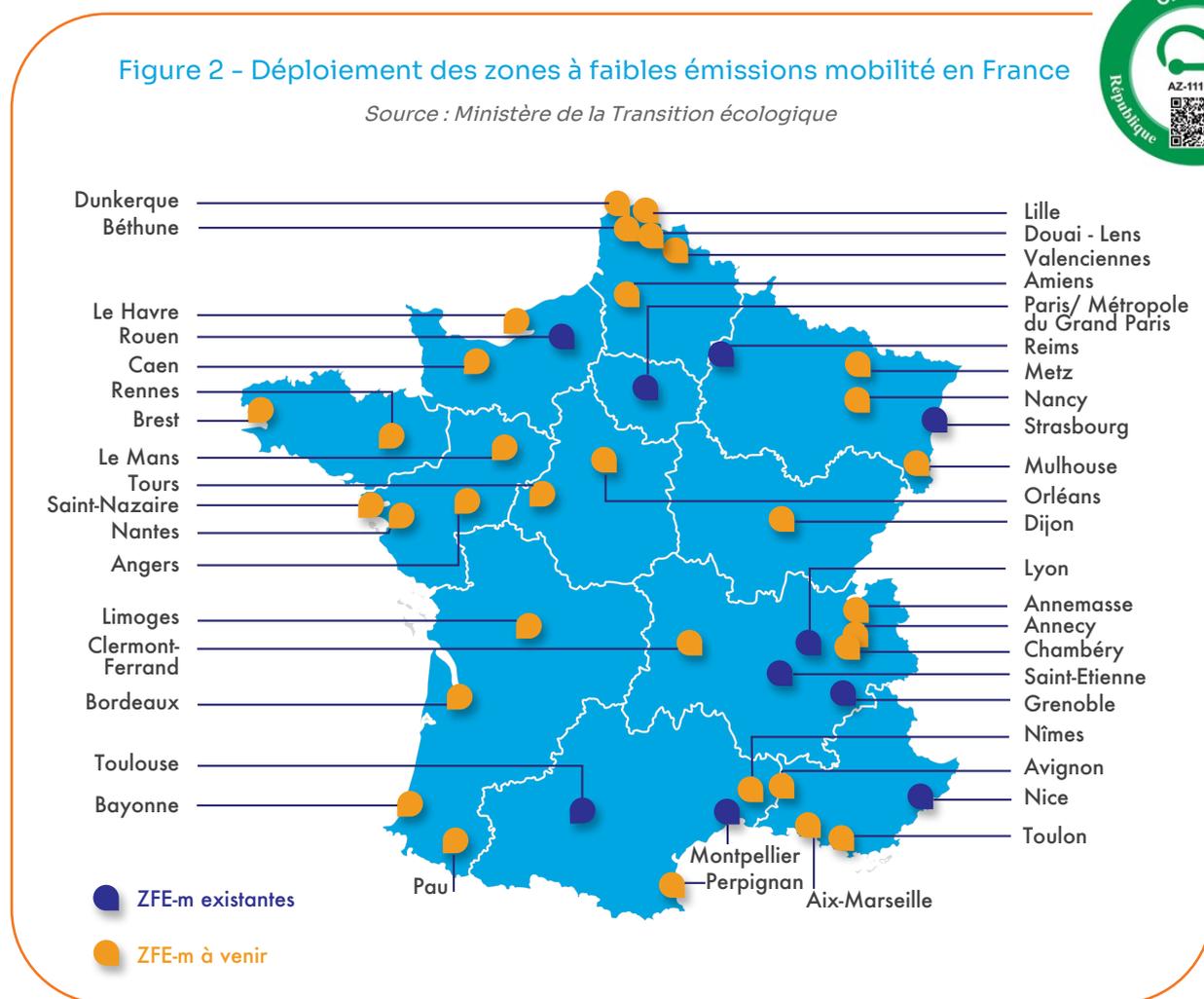
Dans les 43 zones à faibles émissions mobilité (ZFE-m) existantes ou se mettant en place en France, les véhicules routiers sont soumis à des restrictions de circulation : la transition vers des alternatives à faibles ou zéro émissions doit s'accélérer.

Les contraintes sont spécifiées sur une zone et une période donnée (ou de façon permanente), et se basent sur les vignettes Crit'Air, définissant le niveau d'émissions des véhicules. La Loi Climat & Résilience prévoit de rendre obligatoires les ZFE-m dans les agglomérations de plus de 150 000 habitants (à l'exclusion des DOM) d'ici le 31 décembre 2024, soit plus de 40 territoires visés en France, présentés sur la carte ci-dessous².

Il existe aujourd'hui selon les collectivités des dérogations locales pouvant exempter les Véhicules Automoteur Spécialisés (VASP) de la législation des Zones à Faibles Emissions mobilité (ZFE-m) lorsqu'ils assurent le service public. Les BOM appartiennent à cette catégorie de véhicules. Cependant, en pratique, la volonté politique des métropoles mettant en place des ZFE se traduit souvent par le déploiement de véhicules faibles émissions malgré l'absence de contraintes législatives. De plus, cette dérogation est généralement temporaire : à terme, les BOM devraient être concernées par les ZFE-m dans la plupart des métropoles.

Figure 2 - Déploiement des zones à faibles émissions mobilité en France

Source : Ministère de la Transition écologique



² - Lutte contre la pollution de l'air - Zones à faibles émissions mobilité (ZFE-m) : 11 métropoles concernées en 2022 | Service-public.fr

Dans ces ZFE, et dans les territoires souhaitant accélérer le verdissement de leurs flottes, les BOM électriques à hydrogène peuvent répondre à la fois aux enjeux environnementaux et aux contraintes opérationnelles des tournées. Les BOM électriques à batterie peuvent assurer le service dans de nombreux cas, mais l'hydrogène peut être particulièrement pertinent pour certains usages :



Kilométrage de tournée élevé

Dans le cas d'un kilométrage de tournée élevé, ne pouvant être assuré par une BOM électrique à batterie – supérieur à 80-90 km ou à 100-120 km selon les véhicules et les conditions d'exploitation. Ce cas est plus fréquent en dehors des grandes agglomérations, dans les zones rurales, et notamment dans les territoires vastes à faible densité d'habitants.



Collecte en double poste avec faible durée inter-poste

Dans le cas des collectes effectuées en double-poste (2 tournées par jour) avec faible durée inter-poste, l'hydrogène est pertinent car il permet une recharge rapide entre les 2 postes.



Territoire vallonné

Dans les territoires vallonnés ou montagneux, y compris en zone urbaine, où la topographie du terrain entraîne une surconsommation de carburant.



Tournée à fort haut-le-pied

NB : Le haut-le-pied désigne une portion du trajet effectuée par le véhicule sans arrêt pour la collecte (entre le dépôt et la zone de collecte, ou la zone de collecte et le site de déchargement par exemple)

Sur les tournées à fort haut-le-pied sur route, les BOM hydrogène peuvent être pertinentes. En effet, à l'opposé de ce qui est observé pour les véhicules thermiques, les véhicules électriques à batterie consomment peu en zone urbaine, mais beaucoup plus sur route, à plus haute vitesse de circulation, en haut-le-pied. L'autonomie de l'électrique à batterie est donc réduite dans ces cas de figure.





Autres cas dans lesquels l'électrique à hydrogène peut être particulièrement pertinent :

- Dans les territoires connaissant des hivers particulièrement froids : une température extérieure de -5 °C à 0 °C entraîne une surconsommation des véhicules électriques à batterie équipés de préconditionneurs de l'ordre de 10 % (surconsommation de 30 % sans préconditionneur). Doublée d'une réduction de l'autonomie en fin de vie de la batterie, cette surconsommation pourrait rendre insuffisante l'autonomie de la BOM en période hivernale.
- Dans le cas des BOM 19 t pour lesquelles l'offre batterie ne permettrait pas un bon compromis entre une capacité de batterie embarquée assurant

une autonomie suffisante et un faible empattement pour permettre la circulation en centre-ville.

- Dans le cas où l'offre batterie ne permettrait pas un bon compromis entre capacité de batterie embarquée assurant une autonomie suffisante versus charge utile disponible.
- Lorsque le dépôt ne permet pas une puissance de raccordement électrique suffisante pour assurer la recharge des véhicules électriques à batterie.

Les cas d'usages présentés ci-dessus visent à donner des orientations, mais sont à mettre en perspective avec le cas spécifique de chaque territoire, sur la base des caractéristiques des BOM électriques à hydrogène décrites plus précisément dans les sections suivantes.

2

CARACTÉRISTIQUES DES BOM ÉLECTRIQUES À HYDROGÈNE

La BOM électrique à hydrogène est une solution aux multiples avantages : environnementaux, opérationnels, et s'inscrivant au sens large dans la dynamique de transition énergétique.

Sur le plan opérationnel :

- Les bennes à ordures ménagères électriques à hydrogène offrent des **autonomies de 150 à 400 km**, en fonction de la quantité d'hydrogène embarqué et de la typologie de la tournée.
- La **durée d'avitaillement** en hydrogène pour le véhicule, également dépendante de la capacité du réservoir et de la pression de stockage, est de l'ordre **de 10 à 20 minutes**.
- Une BOM électrique à hydrogène **réduit considérablement les nuisances sonores du véhicule et les vibrations** dans la cabine chauffeur par rapport à une BOM thermique.

Sur le plan environnemental :

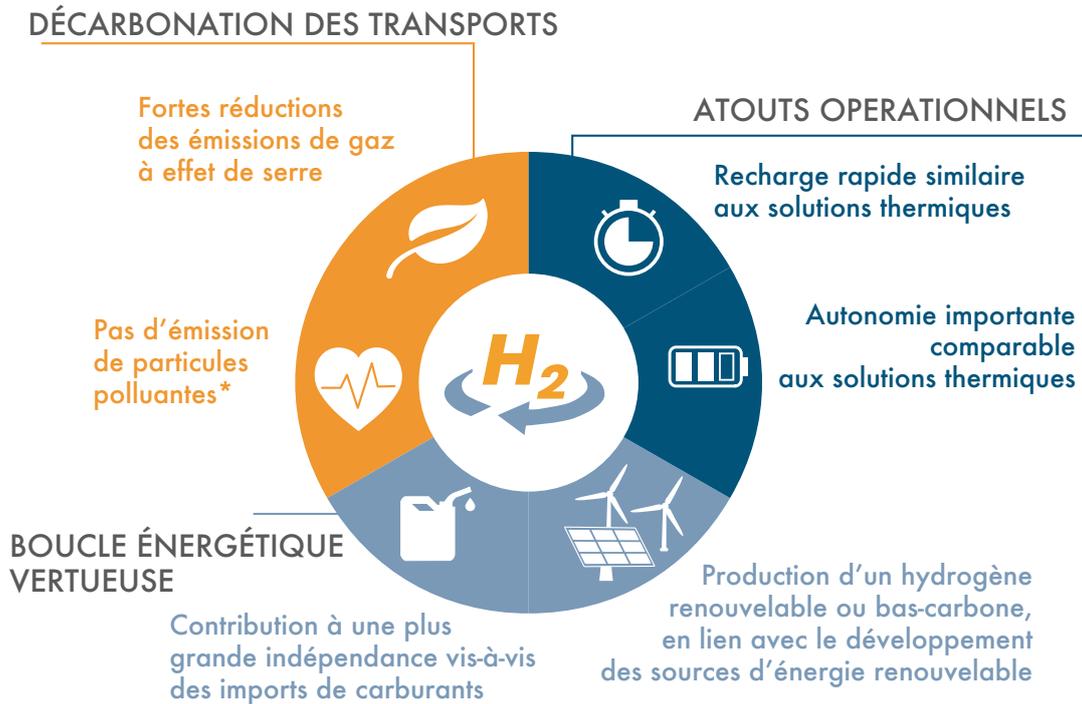
Les BOM électriques à hydrogène présentent un potentiel de **fortes réductions des émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques** à l'échappement (voir détails dans la suite du document).

Sur le plan du mix énergétique :

Le développement d'écosystèmes hydrogène sur les territoires peut être pensé en **synergie avec le déploiement de sources de production d'électricité renouvelable**, et contribuer à une plus grande **indépendance vis-à-vis des imports** de carburants.

Figure 3 - Principaux atouts de la solution électrique à hydrogène

Source : France Hydrogène Mobilité³

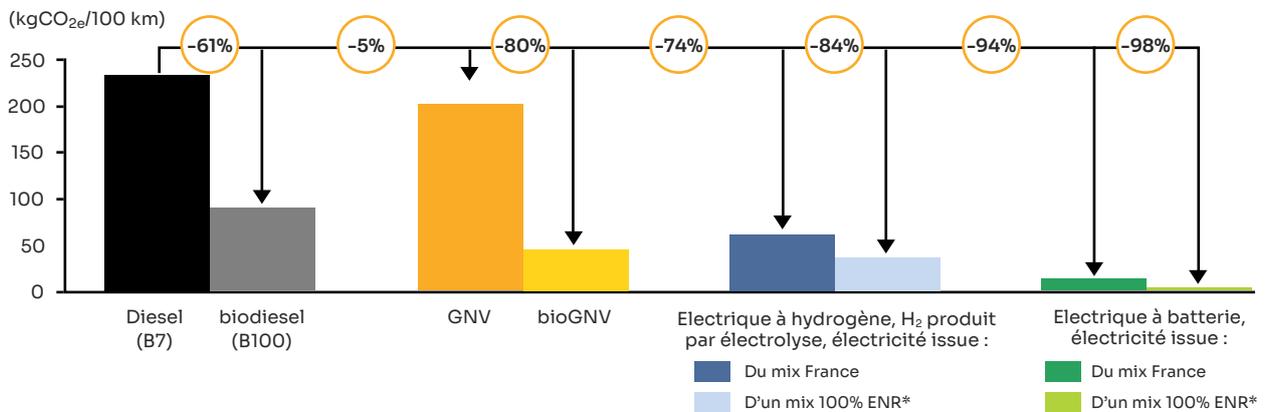


*Hors phénomène d'abrasion des pneumatiques et d'usure des plaquettes de frein

En particulier, les BOM électriques à batterie et à hydrogène ainsi que les véhicules utilisant des biocarburants ont le potentiel de réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre du puits à la roue⁴. Comme le montre la figure ci-dessous, selon le mode de production de l'hydrogène, les émissions de GES du puits à la roue peuvent être réduites de 84 % pour une BOM électrique à hydrogène par rapport à l'équivalent diesel (pour une consommation donnée, présentée dans le tableau des hypothèses ci-dessous).

Figure 4 - Valeurs moyennées des émissions d'équivalent dioxyde de carbone du puits à la roue rapportées aux 100 kilomètres parcourus par BOM, pour différentes alternatives énergétiques

Source : ADEME⁵



*Le « mix 100 % EnR » désigne un mix entre électricité d'origine éolienne à 63 %, solaire à 17 %, hydraulique à 13 %, et thermique à 7 %, proportions permettant de techniquement satisfaire la demande française, d'après le Rapport « Un mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations », ADEME, 2015.

³-France Hydrogène Mobilité, (2022). Livre Blanc sur le camion électrique à hydrogène.

⁴-Les émissions dites « du puits à la roue » comptabilisent l'extraction ou la production du carburant, son transport, sa distribution, et son utilisation dans le véhicule, « à l'échappement ».

⁵-Sources : Facteurs d'émissions issus de la base carbone ADEME et de l'Analyse du cycle de vie relative à l'hydrogène de l'ADEME, 2020.

Hypothèses de consommation	(bio) Diesel	(bio) GNV	Electrique batterie	Electrique hydrogène
Consommation de la BOM	75 L / 100 km	75 kg / 100 km	220 kWh / 100 km	17 kg / 100 km

Les BOM électriques à batterie et à hydrogène suppriment également les émissions de polluants atmosphériques (hors phénomène d'abrasion des pneumatiques et d'usure des plaquettes de frein⁶), contrairement aux véhicules utilisant des biocarburants, qui les réduisent mais ne les suppriment pas.

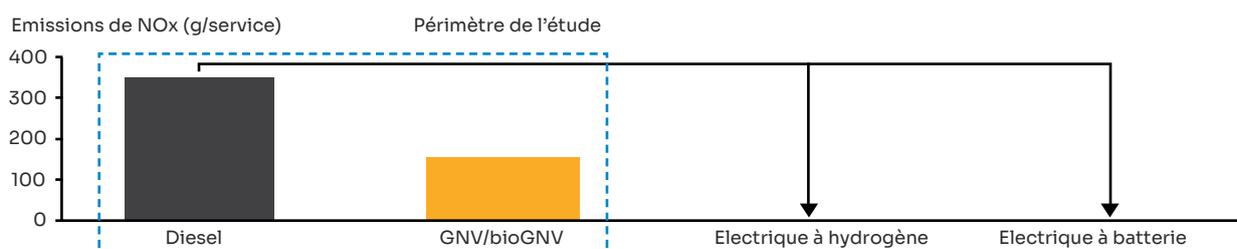
Il existe relativement peu d'études mesurant les émissions de polluants atmosphériques spécifiquement à l'échappement de BOM. D'après les études réalisées sur tous types de véhicules confondus, le GNV permet une réduction des émissions de dioxydes d'azote (NOx), d'un facteur variable en fonction des conditions de circulation. A titre d'exemple, une étude publiée par le réseau AMORCE, soutenue par l'ADEME⁷ montre une réduction d'un facteur 2 à 3 des émissions de NOx d'une BOM GNV par rapport à une BOM Diesel, comme le montre le graphe ci-dessous.

Ce graphe n'a pas vocation à représenter l'ensemble des BOM circulant en France, mais est présenté comme cas pratique, à titre indicatif. D'après cette étude, les BOM GNV réduisent les émissions de particules fines de manière très significative, les rendant difficilement mesurables.

Il reste cependant une incertitude quant aux émissions de particules ultrafines des BOM GNV, difficiles à mesurer. En particulier, une étude menée par Airparif sur les autobus souligne que les émissions de PN (particules de diamètres compris entre 23 nm et 2,5 µm) des bus Euro VI GNC « sont plus élevées, dans des conditions de circulation proches, que celles de leurs homologues diesel, tout en restant dans la gamme d'émissions »⁸.

Figure 5 - Comparaison des émissions d'oxydes d'azote (NOx) entre des BOM Euro V diesel et GNV par service (durée de travail d'un équipage de collecte)

Source : Airparif



Compte tenu des caractéristiques environnementales particulièrement intéressantes des BOM électriques à hydrogène, et de leurs caractéristiques opérationnelles complémentaires à celles de l'électrique à batterie, les constructeurs développent une offre hydrogène.

6-On estime que les véhicules électriques (à batterie ou à hydrogène) divisent d'un facteur 100 à 1000 les émissions de polluants atmosphériques.

7-AMORCE, (2017). Recueil des bonnes pratiques de collecte, Réf. AMORCE DT84.

8-Airparif, (2021). Mesure des émissions des bus en conditions réelles d'exploitation : comparaisons et facteurs d'influence.

3 PRÉSENTATION DE L'OFFRE DE BOM ÉLECTRIQUES À HYDROGÈNE

Des constructeurs et carrossiers se positionnent sur le développement de BOM électriques à hydrogène en France. En particulier, SEMAT (groupe ZOELLER) a livré un premier véhicule en France à l'été 2021, pour mise à disposition de la Communauté de communes Touraine Vallée de l'Indre en 2022.

L'offre du constructeur est présentée sur la fiche ci-dessous :

Figure 6 - Présentation de l'offre MEGAPAC XL H₂, du constructeur SEMAT

Source : SEMAT⁹

CAPACITÉ ÉLECTRIQUE

- > Capacité de la batterie : 85 kWh/112kWh
- > Distance : 40 km de trajet en mode électrique seul.
- > Temps de charge : 40 min (charge rapide) ; 5 à 8h (charge lente)

12 CONFIGURATIONS DISPONIBLES

- > 1 pile à combustible et 1 groupe de réservoirs
- > 3 piles à combustible et 4 groupes de réservoirs
- > Autonomie : jusqu'à 300 km (selon utilisation)

GESTION DE L'ÉNERGIE ET DATA MANAGEMENT

- > Collecte et traitement des données paramétrables à la demande (pressions, position de l'éjecteur, niveau de chargement des batteries, niveau d'hydrogène dans les réservoirs, etc.)
- > Mise en place de capteurs et transmission par buscan.



Pour une collecte de déchets propre et silencieuse

De conception modulaire, notre châssis est spécialement conçu pour les véhicules de collecte des déchets. Entièrement électrique, il dispose d'un prolongateur d'autonomie à hydrogène.

LES PILES À COMBUSTIBLE : une puissance pour chaque type d'utilisation

MODULE DE 30 KW POUR LA PILE À COMBUSTIBLE

Circulation en ville, maintient les piles à un niveau élevé d'état de charge (SoC)

MODULE DE 60 KW POUR LA PILE À COMBUSTIBLE

Déplacements péri-urbains, des vitesses plus élevées sur de plus longues périodes de temps

MODULE DE 90 KW POUR LA PILE À COMBUSTIBLE

Autoroutes, vitesse constante de 80 km/h sur une plus longue période de temps



EN 2022 :

Livraison de la première benne de collecte de déchets à hydrogène en France à la Communauté de Communes Touraine Vallée de l'Indre

Nos événements

3 nouveaux véhicules en service en 2023

- à St-Gilles-Croix-de-Vie
- à Challans

Des constructeurs français se positionnent également sur le rétrofit de BOM en version électrique à hydrogène – c'est-à-dire la conversion d'une BOM thermique en BOM électrique à hydrogène, en remplaçant la chaîne de traction thermique par une chaîne de traction électrique à hydrogène.

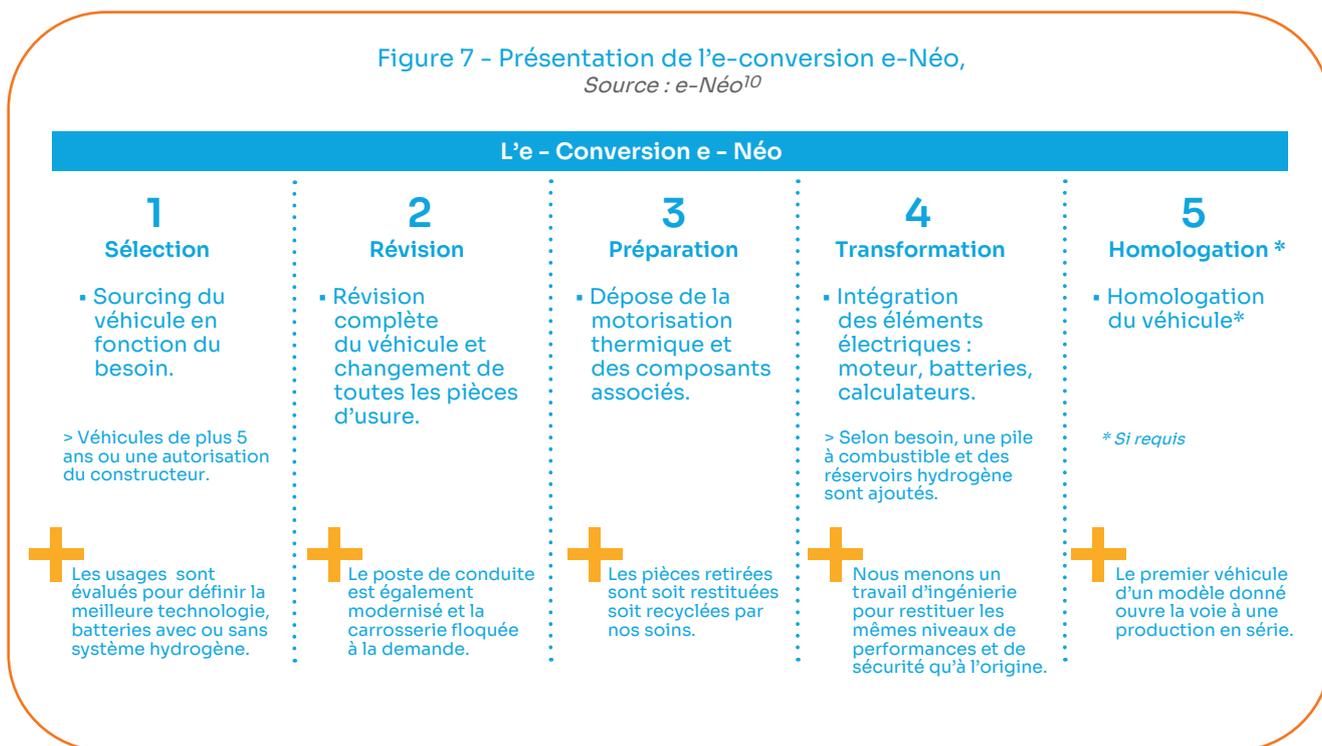
▪ En particulier, e-Néo développe une offre de rétrofit sur la base des carrosseries développées par SEMAT, en 19 t. L'enjeu de proposer une deuxième vie à des poids lourds BOM passe par la capacité à adapter

les équipements pour atteindre des performances équivalentes aux modèles thermiques. Pour atteindre cet objectif, et proposer des véhicules adaptés, robustes et fiables, e-Néo s'associe à la société SEMAT. Les poids lourds (base Renault) proposés à la transformation par e-Néo seront : les 12 t en électrique à batterie, et les 19 t en électrique à batterie ou à hydrogène (700 bar). E-Néo souhaite lancer la production début 2024 (une fois les premiers de série homologués). Le principe de l'e-conversion proposée par e-Néo est présenté ci-après.

⁹SEMAT – contacts : Christophe BIGRE : cbigre@semat.com / contact@semat.com

Figure 7 - Présentation de l'e-conversion e-Néo,

Source : e-Néo¹⁰



▪ GCK développe également une offre de retrofit sur des bases Renault Trucks (D WIDE) en 19 et 26 t. La fiche produit, la grille tarifaire indicative, et le calendrier de développement de GCK sont présentés ci-dessous. Les BOM hydrogène GCK devraient être disponibles sur le marché français à partir de mi-2024.

Figure 8 - Présentation de l'offre de BOM H₂ en retrofit, du constructeur GCK

Source : GCK¹¹

Moteur électrique

- Puissance Nom. / Max. : 180 / 210 kW
- Couple Max. : 1100 N.m
- Tension Nom. / Max. : 700 / 830 V
- Plage de vitesse : 0-8 000 tr/mn
- Rendement minimum : 95%
- Conception : compact & léger
- (Poids : 130 kg, diam. : 380 mm, l g : 430 mm)
- Contrôleur Moteur forte puissance intégrée

Pile à combustible

- Puissance Nom./Max. : 55 / 75 kW
- Durée de vie : 12'000 h

Grille tarifaire* - BOM (Renault D Wide)

- 1 unité : 295 k€
- De 2 à 5 unités : 285 k€ / véhicule
- De 6 à 10 unités : 275 k€ / véhicule
- De 11 à 20 unités : 265 k€ / véhicule
- + de 20 unités : 250 k€ / véhicule
- NB : les véhicules seront fournis par le client.
- *Grille donnée à titre indicatif, sujette à possibles évolutions.



Déc. 2022

Juin 2023

Juin 2024

Finalisation du dimensionnement du contenu énergétique du véhicule (kgH₂ et autonomie)

Etudes d'intégration et prototypage (S1 2023)

Développement et homologation

Disponibilité des véhicules mi-2024

D'autres constructeurs et intégrateurs européens et internationaux se positionnent également sur la BOM électrique à hydrogène, mènent des tests dans le cadre de projets de déploiements pilotes et développent leur offre pour le marché européen, notamment E-Trucks, Hyzon/Geesinknorba, dont les véhicules sont décrits pages suivantes.

10 - E-Néo – contact : Jérémy CANTIN : jeremy.cantin@eneo-ve.fr

11 - GCK – contacts : Vincent LALLEMAND : vl@gck.co / Rémi BERGER : remi.berger@gck.co



© E-trucks Europe

- Typologie : véhicule électrique à batterie à prolongateur d'autonomie hydrogène
- PTAC : de 26 t à 29 t
- Autonomie : jusqu'à 400 km (dépendant de la quantité d'hydrogène embarquée)
- Puissance du moteur : de 150 à 210 kW
- Couple moteur : 2000 Nm
- Capacité de la batterie : de 136 à 160 kWh
- Puissance de la pile à combustible : de 30 à 45 kW
- Capacité du réservoir hydrogène : de 15 à 30 kgH₂
- Pression du réservoir hydrogène : 350 bar

Note : Ce véhicule est notamment en cours de tests dans le cadre de projets pilotes européens (REVIVE et HECTOR).¹²



© Hyzon

- Typologie : véhicule à pile à combustible
- Autonomie : 250 km*
- Puissance du moteur : 250 kW*
- Puissance de la pile à combustible : 45 kW*
- Capacité de la batterie : de 140 kWh*
- Capacité du réservoir hydrogène : 15 kgH₂*
- Pression du réservoir hydrogène : 350 bar* ou 700 bar

Note : Hyzon, fournisseur de véhicules électriques à hydrogène, a annoncé en décembre 2021 la signature d'un accord avec l'entreprise néerlandaise Geesinknorba pour devenir son fournisseur exclusif de camions à zéro émission. Au moins 300 camions devraient être fournis par Hyzon au cours de ce contrat de trois ans¹³.

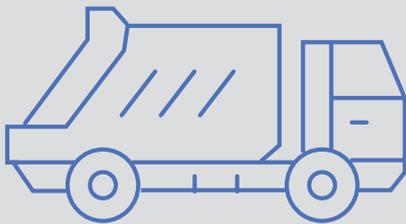
* Cas spécifique du véhicule livré à la ville d'Aberdeen¹⁴.

12-Sources : E-TRUCKS EUROPE: 2 hydrogen-electric hybrid garbage trucks (LIFE 'N GRAB HY!) - h2-Share (fuelcelltrucks.eu) ; Archief Etrucks - Etrucks Europe (e-truckseurope.com)

13-Sources : Geesinknorba & Hyzon Motors join to deliver Hydrogen-Powered RCVs | Geesinknorba ; Geesinknorba presents hydrogen RCV on Tecma | Geesinknorba ; Hyzon Motors | - Hyzon Motors |

14-Aberdeen hosts UK's first hydrogen-powered refuse collection truck: Allison and Hyzon involved (sustainabletruckvan.com)

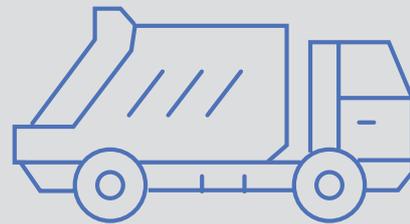
D'autres offres sont en cours de développement, sans indication à ce stade sur leur disponibilité future sur le marché français, notamment H₂X et ULEMCo, dont les travaux en cours sont décrits ci-dessous.



▪ Typologie : véhicule à pile à combustible

*Note : **H₂X Global Ltd**, le principal fabricant australien de véhicules à pile à hydrogène, a annoncé en 2022 la signature d'un accord avec **RENOVA**, l'une des principales entreprises de gestion des déchets municipaux de Suède pour la fourniture de camions et de véhicules légers à piles à combustible.*

*L'accord ouvre la voie à l'expansion des activités de **H₂X Global** en Scandinavie pour le développement et la production de véhicules électriques à hydrogène.¹⁵*



▪ Typologie : véhicule thermique
(dual fuel H₂ - diesel)

*Note : **ULEMCo** travaille sur un système permettant de mélanger l'hydrogène au diesel directement dans un moteur conventionnel, alimenté par des réservoirs de gaz embarqués. Cette technologie peut être appliquée à n'importe quel moteur, et n'importe quel véhicule peut être alimenté en hydrogène en fonction de l'espace disponible à bord pour le stockage de l'hydrogène.¹⁶*

15-Source : H2X To Supply Hydrogen Fuel Cell Vehicles To Fuel Cell (fuelcellsworks.com)

16-Source : Hydrogen Dual Fuel - Hydrogen Solutions for Transport | ULEMCo Ltd

4

MODÈLE ÉCONOMIQUE ASSOCIÉ

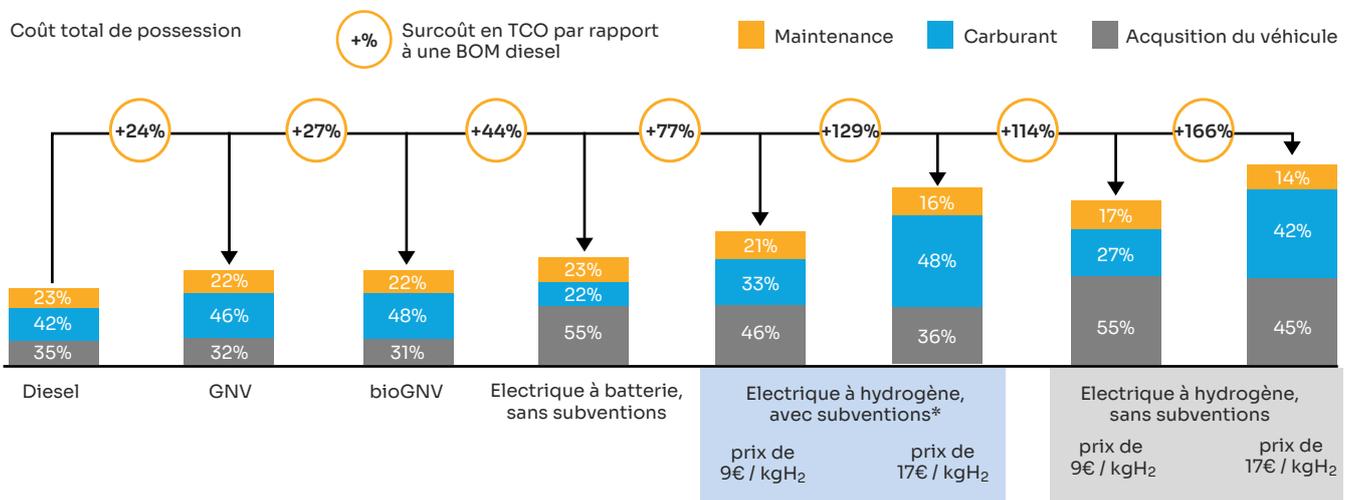
La BOM électrique à hydrogène présente aujourd'hui un surcoût par rapport à l'équivalent diesel. La figure ci-dessous présente un modèle comparatif simplifié de coût total de possession (TCO, total cost of ownership) pour une BOM de 26 t, parcourant 25 000 km par an, d'une durée de vie estimée à 8 ans. Le surcoût par rapport au diesel en TCO (hors rémunération du conducteur) des solutions électriques à hydrogène varie entre +77 % et +166 % en fonction des subventions et du prix de l'hydrogène considérés. Il est important de noter que ce surcoût est en réalité beaucoup plus limité si l'on prend en compte l'ensemble des postes de coûts (conducteurs notamment), comme détaillé dans la suite du document.

Cependant, plusieurs leviers devraient conduire à une réduction de ce surcoût dans la décennie, en particulier :

- Le passage à l'échelle de la production des véhicules, et notamment la production en série, qui devrait permettre une réduction du prix d'achat du véhicule ;
- Le développement et la généralisation d'une maîtrise de la maintenance des systèmes hydrogène pour la mobilité, permettant de réduire les coûts de maintenance ;
- Le passage à l'échelle des infrastructures de production et de distribution de l'hydrogène, permettant une réduction du prix de l'hydrogène à la pompe.

Figure 9 - Comparatif du coût total de possession (modèle simplifié) d'une BOM 26 t, sur la base d'une durée de vie de 8 ans et d'un kilométrage de 25 000 km/an

Sources : voir hypothèses dans le tableau ci-dessous



* Subvention de 40 % du surcoût du CAPEX du véhicule par rapport à l'équivalent Diesel, sur la base du seuil maximum d'aides d'Etat pour une grande entreprise qui s'appliquait jusqu'en 2022, mais qui pourrait être dépassé dès 2023 dans le cadre des nouveaux appels à projets ADEME notamment.

Il est important de noter que les bennes à ordures ménagères sont des véhicules à forte consommation en carburant. Par conséquent, leur TCO est particulièrement sensible au prix du carburant à la pompe, en forte évolution sur la période 2021-

2022. Il a été choisi dans ce modèle simplifié d'utiliser les hypothèses du prix des carburants reflétant la situation de la crise énergétique à l'automne 2022. Ces prix sont fortement évolutifs, en particulier ceux du gaz naturel et de l'électricité.

Tableau 1 - Principales hypothèses utilisées dans le modèle de TCO simplifié

Principales hypothèses	Diesel	GNV	BioGNV	Electrique batterie	Electrique hydrogène
Prix d'achat (châssis + équipement)	185 000 €HT	205 000 €HT	205 000 €HT	460 000 €HT	670 000 €HT
Prix carburant	1,45 €HT/L (~1,90 €TTC/L)	2,00 €HT/kg	2,10 €HT/kg	0,38 €HT/kWh	9 à 17 €HT/kg
Frais de maintenance mensuels	1 250 €/mois	1 500 €/mois	1 500 €/mois	1 800 €/mois	2 000 €/mois
Consommation	75 L/100 km	75 kg/100 km	75 kg/100 km	220 kWh/100 km	17 kg/100 km



Principales sources des hypothèses :

- Estimations des prix d'achat des BOM et du coût de la maintenance sur la base d'entretiens avec des exploitants de BOM.
- Prix de l'électricité sur la base des prévisions 2023 de la CRE. Références de prix de l'électricité pour les PME et les collectivités territoriales – CRE.
- Prix du GNV sur la base d'un prix du gaz de 150 €/MWh en septembre 2022, et d'une densité énergétique de 13,3 kWh/kg¹⁸.
- Fourchette basse du prix de l'hydrogène sur la base des préconisations de l'ADEME dans l'appel à projets Ecosystèmes territoriaux hydrogène 2021, fourchette haute correspondant aux observations actuelles sur certains projets européens de mobilité impactés par l'augmentation des prix de l'électricité dans le cadre de la crise énergétique.
- Prix du gazole sur la base d'un prix moyen de 1,90 €TTC/L en France en novembre 2022, issu du site : CARBU.COM - Evolution des prix moyens des carburants en France.

Si le surcoût en TCO est aujourd'hui conséquent, l'impact global relatif sur le coût de la collecte et du traitement des déchets est relativement plus faible. En effet, au TCO du véhicule, il faut ajouter le coût de rémunération du personnel de collecte, et de la prestation de services pour obtenir le coût total de collecte des déchets, auquel s'ajoutent ensuite le traitement et les coûts annexes (structure, communication, etc.). Le surcoût peut ensuite être répercuté sur la taxe d'enlèvement des ordures ménagères, payée par les contribuables, d'un coût moyen de 122 €HT/hab.¹⁷

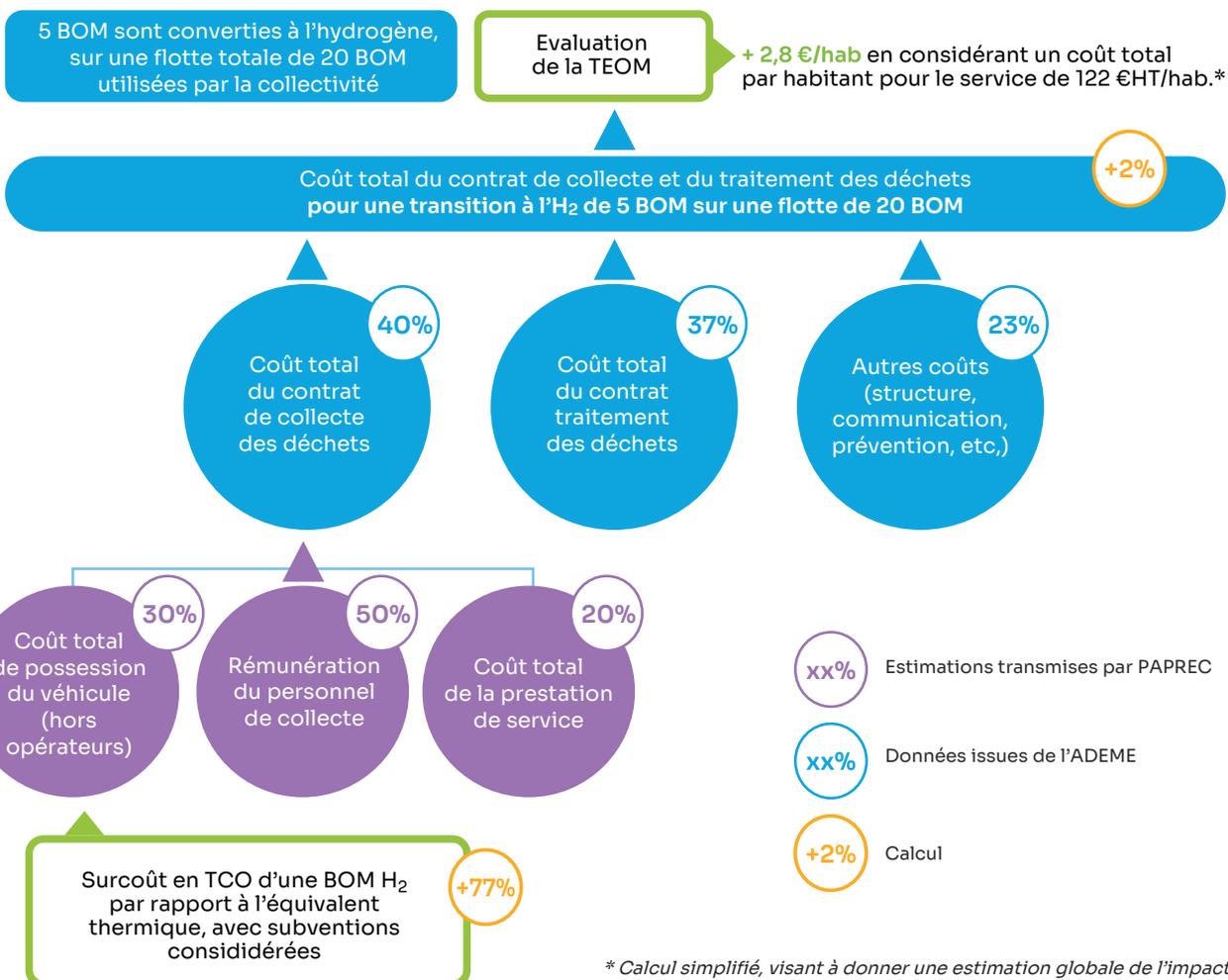
Le graphe ci-après vise à présenter l'impact économique de la transition à l'hydrogène d'une partie

d'une flotte de BOM, pour un cas d'usage spécifique : on considère la conversion à l'hydrogène de 5 BOM, sur une flotte totale de 20 BOM d'une collectivité. En prenant un cas de figure dans lequel les BOM hydrogène seraient subventionnées en CAPEX à hauteur de 40 % de leur surcoût par rapport au diesel, et seraient avitaillées par de l'hydrogène à un prix à la pompe de 9 €/kg, le surcoût en TCO du véhicule est de 77 % par rapport au diesel (voir hypothèses TCO ci-dessus). Dans cet exemple, l'impact de la transition à l'hydrogène sur le coût total de la collecte et du traitement et un surcoût de 2 %, susceptible d'être financé par une augmentation de la TEOM de 2,80 €/hab.

17-Référentiel national des coûts du SPGD France métropolitaine données 2018 (ademe.fr)

18-<https://www.cnr.fr/espaces/13/indicateurs/88>

Figure 10 - Exemple d'un cas d'usage : Evaluation de l'impact moyen sur la TEOM de la transition à l'hydrogène de 5 véhicules sur une flotte de 20 BOM, en considérant un prix de l'H₂ à la pompe de 9 €/kg et une subvention à l'achat de 40 % du surcoût en CAPEX par rapport au diesel équivalent



* Calcul simplifié, visant à donner une estimation globale de l'impact de la transition à l'H₂ de 5 BOM sur un parc de 20 BOM assurant la collecte des OMR sur la TEOM, en considérant que l'ensemble du surcoût est financé par la TEOM.

Malgré ce surcoût, inhérent à toute technologie nouvelle, de nombreux projets de déploiement de BOM électriques à hydrogène se développent en France et en Europe.

5

CAS D'ÉTUDES DE COLLECTIVITÉS AYANT DÉPLOYÉ DES BOM ÉLECTRIQUES À HYDROGÈNE

En Europe, deux principaux projets pilotes prévoient le déploiement de BOM électriques à hydrogène : REVIVE et HECTOR.

Dans le cadre du projet REVIVE, 15 BOM H₂ doivent être livrées sur 8 sites par le constructeur E-Trucks.



REVIVE 

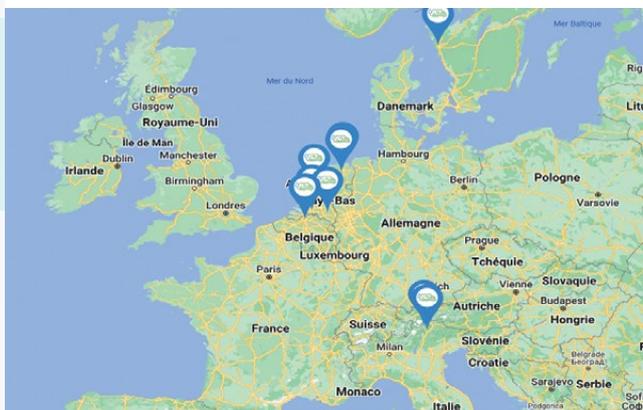


Figure 11 - Source : Home - Revive (h2revive.eu)*

15 BOM délivrées par E-Trucks doivent être déployées sur 8 sites en Europe dans le cadre du projet REVIVE (Refuse Vehicle Innovation and Validation in Europe). Financé par l'Union européenne, ce consortium vise à favoriser le développement de l'hydrogène pour les activités de collecte d'ordures ménagères.

Le projet permettra de réaliser des progrès techniques substantiels en intégrant les systèmes de piles à combustible de trois grands fournisseurs et en développant des stratégies efficaces pour répondre aux cycles de travail très exigeants des bennes à ordures.

Amsterdam, Breda, Groningen, Noordenveld, Helmond (Pays-Bas), Antwerp (Belgique), Bolzano/Merano (Italie) et Gothembourg (Suède) serviront de territoires d'expérimentation.



Co-funded by
the European Union

* Ce projet a reçu un financement du Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (désormais Clean Hydrogen Partnership) dans le cadre de la convention de subvention n° 779589. Le Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking bénéficie du soutien du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, d'Hydrogen Europe et d'Hydrogen Europe Research.

Dans le cadre du projet HECTOR, 7 BOM H₂ doivent être livrées par plusieurs constructeurs. La 1^{ère} BOM H₂ française a été livrée à la collectivité de Touraine Vallée de l'Indre en 2021.

Interreg 
North-West Europe

HECTOR
European Regional Development Fund

Figure 12 - La première BOM H₂ française livrée en Indre et Loire



Dans le cadre du programme HECTOR – programme financé par le fonds ERDF (European Regional Development Fund) – 7 BOM hydrogène doivent être déployées sur 7 sites : Aberdeen, Groningen, Arnhem, Duisbourg, Herten, Sorigny (CC Touraine Vallée de l'Indre), Bruxelles. Le Projet HECTOR prévoit le déploiement d'une flotte de bennes à ordures ménagères hydrogène, avec pour objectif de proposer un retour d'expérience accessible à toutes les collectivités souhaitant acquérir ce type de véhicules innovants¹⁹.

Le projet réunit les constructeurs et intégrateurs E-Trucks, Geesinknorba/Holthausen, FAUN et SEMAT.

Un « Manuel pratique pour préparer le déploiement de BOM H₂ » a été publié en 2022, et partage des bonnes pratiques et conseils après ces déploiements pionniers (Pre-Operations Preparation Manual).

Dans le cadre du projet HECTOR décrit ci-dessus, la Communauté de communes Touraine Vallée de l'Indre a reçu le premier exemplaire de benne à ordures ménagères (BOM) électrique à hydrogène de France. La remise des clés a eu lieu le 2 juillet 2021 à La Rochelle dans les locaux de SEMAT, fournisseur du véhicule.

Le **prix d'achat du véhicule** en 2021 s'élevait à **685 000 € HT²⁰**, et a été subventionné à hauteur de 60 % par l'European Regional Development Fund. Les coûts prévisionnels de fonctionnement sont les suivants pour ce projet :

- Maintenance annuelle : **25 000 €/an**
- **Achat d'hydrogène** (pour un estimatif à 9€/kg) : **38 220 €/an**

La collectivité Touraine Vallée de l'Indre est propriétaire de la BOM H₂, qui est exploitée par l'entreprise COVED, titulaire du marché de collecte des ordures ménagères de la CCTV.

La collectivité et l'exploitant de cette première BOM H₂ déployée en France ont partagé de premiers retours d'expérience suite à la livraison du véhicule • éléments partagés par Aurélie MICHEL (Touraine Vallée de l'Indre) et Keltoum KOUADRI (COVED) en novembre 2022 :

¹⁹-HECTOR - Hydrogen waste collection vehicles in North West Europe | Interreg NWE (nweurope.eu)

²⁰-Capenergies : <https://www.capenergies.fr/>

- Lors de la **phase de sélection du constructeur de BOM hydrogène**, il est important d'inclure des éléments spécifiques dans le cahier des charges :



Préciser au maximum la description de la tournée dans le cahier des charges : afin de s'assurer que le véhicule hydrogène sera parfaitement adapté aux tournées, il est conseillé de préciser le plus possible le cahier des charges, en donnant un maximum de détails sur le type de bacs soulevés, la topographie du terrain, le kilométrage, etc.



Travailler avec l'opérateur de la station pour préciser le cahier des charges : si la collectivité n'a pas la charge de l'exploitation de la station d'avitaillement, il est important de s'assurer auprès de l'opérateur des capacités techniques à inclure dans le cahier des charges pour assurer une compatibilité entre le véhicule et la station.



La gestion de la **maintenance** est un important point de vigilance. Des phases de négociations sont conseillées afin de pouvoir échanger avec chaque constructeur et rendre contractuels tous les points liés à la maintenance, et notamment :

- **S'assurer que la maintenance peut être effectuée localement** : Il est indispensable de s'assurer que des personnes pouvant assurer la maintenance de la chaîne hydrogène seront présentes localement, et que le matériel ne doit pas retourner dans le pays d'origine du constructeur pour être réparé. Si des travaux doivent être réalisés sur les véhicules, il est important qu'un garage local dispose d'un atelier équipé et aux normes pour cette technologie.
- **Contractualiser les coûts de maintenance au maximum** : Il est important d'anticiper le plus possible les coûts de maintenance et de contractualiser les prestations associées : qu'est-il prévu en cas de changements éventuels d'éléments importants du véhicule (comme la pile à combustible par exemple) ? quels sont les coûts associés ?
- **Demander au constructeur de mettre à disposition un véhicule relais** en cas d'immobilisation prolongée.

- Il est important **d'anticiper au plus tôt** dès le positionnement sur la technologie hydrogène certains éléments :



Il est important de prévoir comment les véhicules seront alimentés en carburant bien avant la livraison, et notamment :

- **Anticiper le délai de construction de la station d'avitaillement** : les délais à prévoir sont de l'ordre de 2 ans (dans le cadre du projet en question) de la planification à la mise en service. Il faut s'assurer que la mise en service de la station coïncidera avec la livraison des BOM.
- **Anticiper la disponibilité de la station d'avitaillement** : si la collectivité n'a pas la charge de l'exploitation de la station d'avitaillement, il est important de s'assurer auprès de l'opérateur du taux de disponibilité et du taux d'utilisation de la station (si 80 % des capacités de la station sont déjà allouées à d'autres utilisateurs, il peut s'agir d'un point bloquant).
- **Anticiper la pression à laquelle le véhicule fera le plein** : la pression de ravitaillement peut être de 350 ou 700 bar en fonction des modèles proposés par les constructeurs.
- **Réfléchir au type de contrat envisagé pour le ravitaillement en carburant** et le prix par kilogramme d'hydrogène associé.



Anticiper la mise aux normes du dépôt : si les véhicules sont stockés au dépôt dans un local fermé, il est important de s'assurer qu'il est bien aux normes (normes analogues à ce qui est demandé pour les véhicules GNV moyennant certains points spécifiques à l'H₂).



Prévoir une formation pour l'ensemble des conducteurs qui prendront en charge le véhicule : en plus d'une formation poussée à l'écoconduite, une formation du constructeur du véhicule hydrogène de l'ordre d'une semaine est nécessaire pour lever toutes les interrogations des conducteurs. Un deuxième passage du formateur deux semaines à un mois après le début des opérations est également recommandé pour répondre aux dernières questions des conducteurs.

Comment s'est déroulée la formation des personnels ?

Sur le plan du véhicule :

Une formation a été prévue par le constructeur SEMAT : une personne a été mobilisée pendant une semaine, afin de former un groupe de conducteurs identifiés par Touraine Vallée de l'Indre pour utiliser la BOM hydrogène. Les conducteurs ont été sélectionnés sur la base de leur aptitude à l'écoconduite, du soin apporté au matériel et de leur sensibilité aux alternatives au thermique. Trois conducteurs ont été sélectionnés (afin d'anticiper les congés d'été notamment). Ils ont reçu une formation complémentaire plus poussée sur l'écoconduite, puis ont été formés par le formateur SEMAT sur la semaine du démarrage de la BOM. Cette semaine a permis de lever les doutes et certaines craintes des conducteurs.

Les principales réticences des conducteurs étaient :

- Tomber en panne sur la route (par manque d'autonomie) ;
- Ne pas être capable de gérer le gabarit du véhicule ;
- Créer un danger pour les piétons qui n'entendent pas le véhicule (qui est silencieux).

La formation a permis de rassurer les conducteurs sur ces points. Le formateur est revenu 15 jours après le début des opérations, afin de répondre aux questions additionnelles après la prise en main du véhicule.

La gestion de la maintenance du véhicule est laissée au constructeur.

Sur le plan de la station :

Une formation pour réaliser la recharge du véhicule à la station a été réalisée avec l'ensemble des acteurs (constructeurs du véhicule et de la station).

Comment a été accueillie la BOM électrique à hydrogène ?

Les conducteurs et équipiers de collecte sont extrêmement satisfaits du véhicule :

- Le conducteur se sent plus en sécurité, car il entend l'environnement extérieur, et peut donc réagir plus efficacement au comportement des autres usagers de la chaussée ;
- Les équipiers se sentent plus en sécurité, car ils ne respirent plus de polluants émis au pot d'échappement ;
- Le conducteur n'est plus soumis aux vibrations du moteur (qui entraînent des conséquences sur la santé à terme), ni aux nuisances sonores ;
- D'une manière générale, en fin de tournée, l'équipe est moins fatiguée et moins tendue. L'équipe est fière de participer à un projet pionnier ;
- Si initialement la collectivité craignait de ne pas trouver de volontaire souhaitant conduire le véhicule, il s'avère finalement qu'un grand nombre de personnes est intéressé.

A ce stade, la collectivité n'a pas mené d'enquête auprès des habitants. En revanche, plusieurs riverains ont appelé la collectivité pour indiquer que le service de collecte n'était pas passé : la BOM avait bien effectué sa tournée, ils ne l'avaient tout simplement pas entendue.

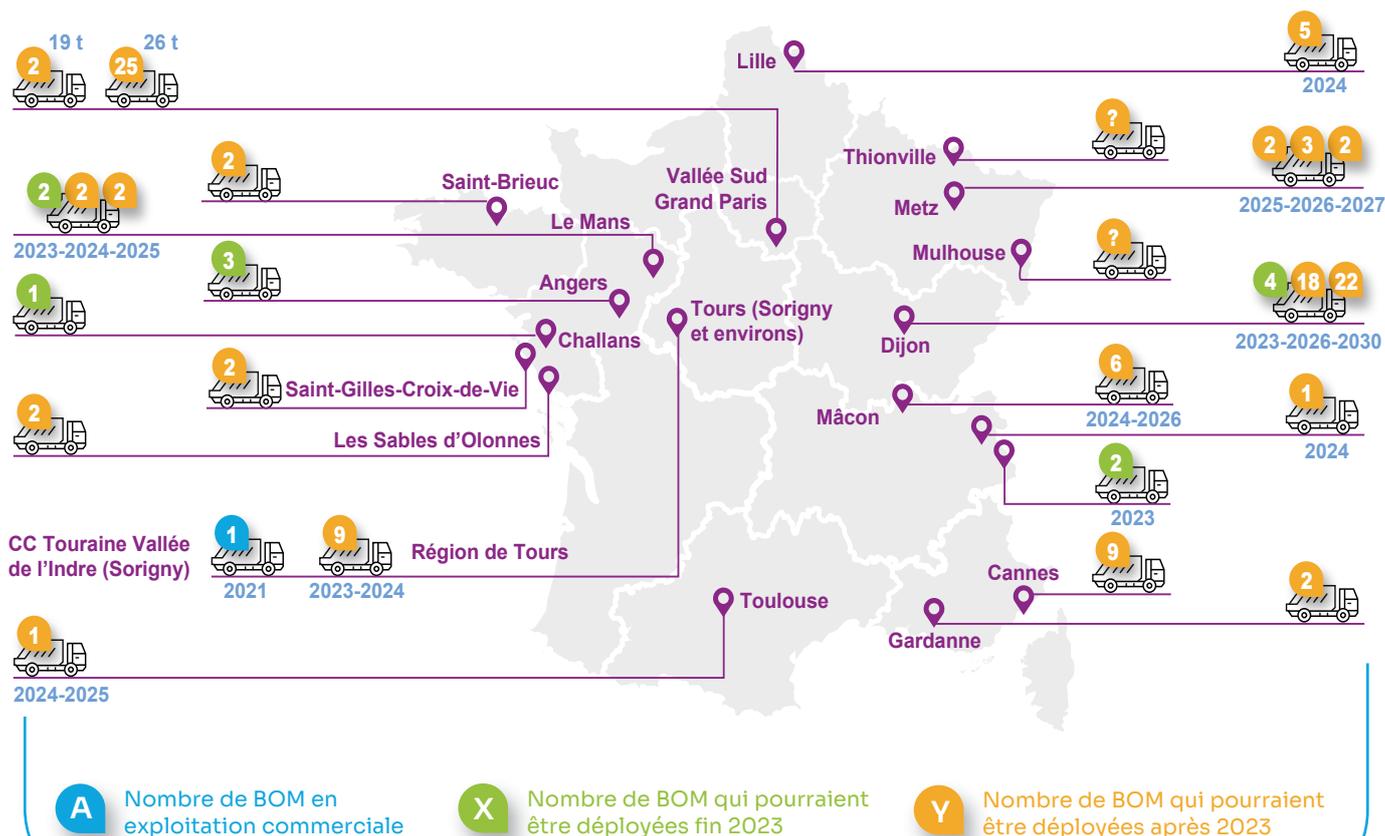
Suite à cette première expérience, 9 BOM électriques à hydrogène sont attendues entre 2023 et 2024 dans la Métropole de Tours.

En France, de nombreux autres territoires considèrent le déploiement de BOM électriques à hydrogène dans les prochaines années. Comme le montre la carte ci-dessous, les collectivités françaises planifient d'ores et déjà le déploiement de près de 150 BOM électriques à hydrogène dans les prochaines années.

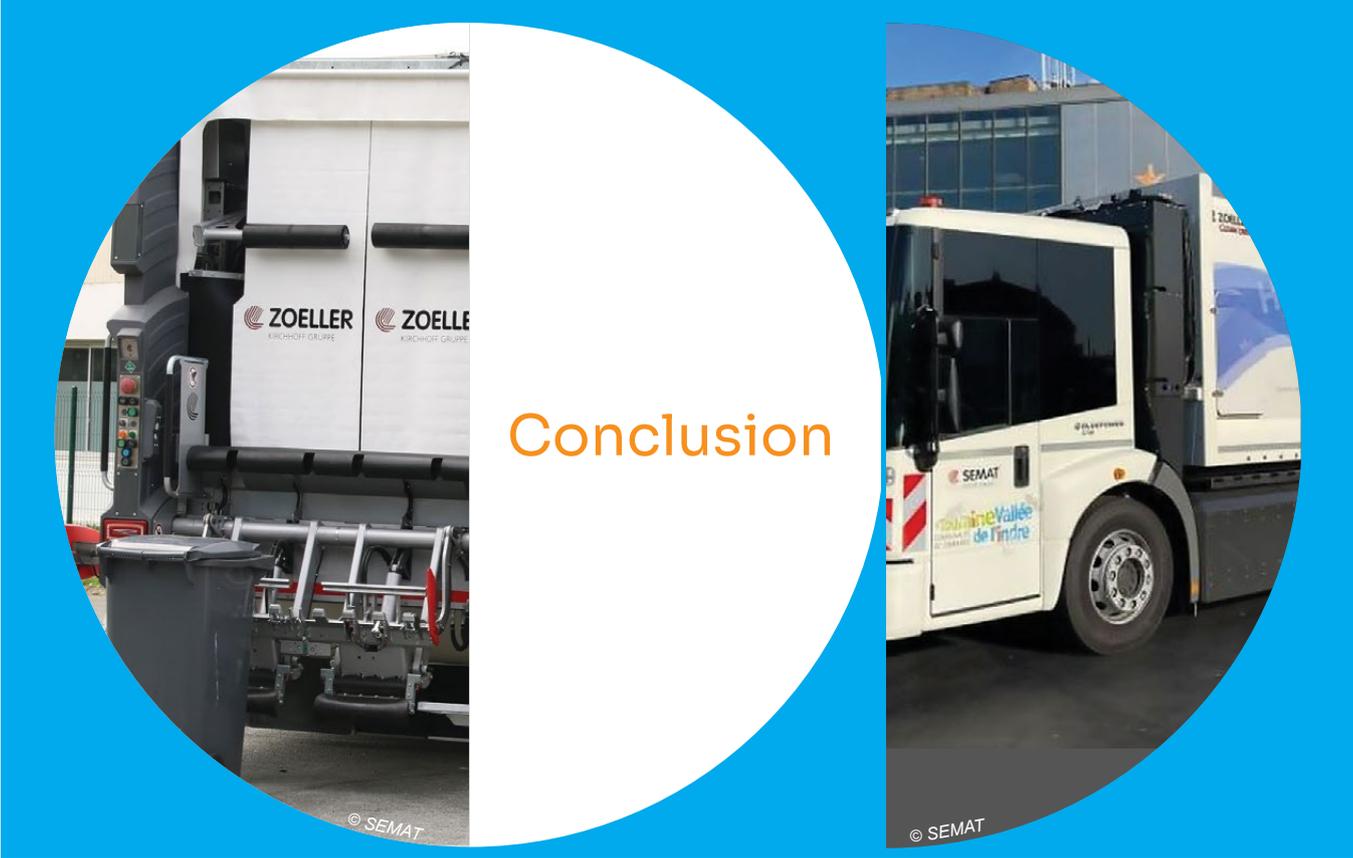
Figure 13 – Carte des déploiements de BOM H₂ à venir en France, Référence de la carte : Element Energy pour France Hydrogène Mobilité²¹.

Total projets hydrogène : 142 = 1 + 12 + 117 + 12
 Total (en exploitation + déploiement attendus d'ici fin 2023 + déploiements envisagés publics post-2024 + déploiements envisagés confidentiels)

D'après les annonces des collectivités et porteurs de projets en France, plus de 140 BOM H₂ pourraient être déployées dans les prochaines années



²¹Cette carte s'appuie sur les annonces publiques des collectivités et porteurs de projets en France. Au total des annonces publiques, sont ajoutés les déploiements additionnels envisagés encore confidentiels à ce stade.



Conclusion

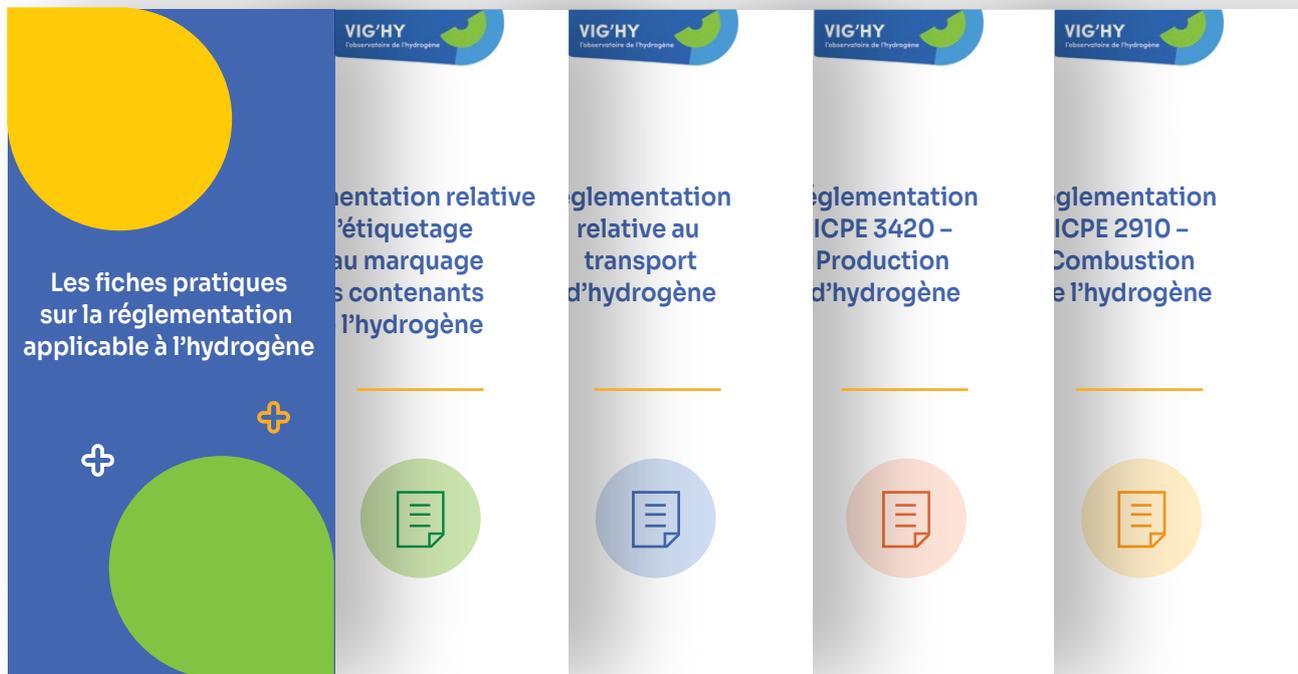
La solution électrique à hydrogène présente de multiples avantages environnementaux et opérationnels pour la transition des flottes de BOM. Plusieurs freins au déploiement de cette alternative nouvelle sont encore à lever, mais des développements sont en cours pour favoriser l'atteinte de la maturité de cette technologie :

- L'offre constructeur est encore limitée mais **plusieurs modèles de BOM électriques à hydrogène devraient être commercialisés prochainement**. On note en particulier un fort positionnement de SEMAT sur le marché français. En parallèle, de nouveaux entrants comme **GCK** et **e-Néo** développent une offre de retrofit en France, favorisant le développement de filières industrielles au niveau régional.
- La **fiabilité et la durabilité** des véhicules sont en passe d'être éprouvées, dans le cadre de **projets pilotes**, qui sont en cours au niveau européen (HECTOR et REVIVE), et permettent de recueillir de nombreuses données relatives aux performances des véhicules et retours d'expérience.
- Le **développement du SAV et des offres de maintenance** constitue l'un des principaux défis et objectifs identifiés par les constructeurs : la maîtrise de la maintenance de cette technologie nouvelle est favorisée par les retours d'expérience des premiers projets en France et en Europe.
- Le **maillage du territoire en stations de distribution hydrogène est en construction**, avec plusieurs dizaines

de stations déjà en opération sur le territoire, et un développement d'écosystèmes territoriaux favorisant un avitaillement commun entre les flottes de bus et de BOM converties à l'hydrogène. Ce réseau devrait croître considérablement d'ici 2030, date à laquelle les objectifs définis par la réglementation AFIR (Alternative Fuels Infrastructure Regulation, en français règlement sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs) devront être atteints en France.

- Même si le coût des premières unités déployées est élevé, l'impact sur le coût total de la collecte et du traitement des déchets, et donc sur la taxe d'enlèvement des ordures ménagères, est en réalité faible. Par ailleurs, il peut être réduit par des financements via des appels à projets nationaux et européens, notamment l'AAP Ecosystèmes territoriaux hydrogène de l'ADEME, qui est reconduit en 2023. De plus, le passage à l'échelle de la production de véhicules comme de stations devrait permettre des économies d'échelle significatives, favorisant une réduction des prix d'achat du véhicule et du carburant.
- Les BOM hydrogène sont soumises à une réglementation²² proche de ce qui est observé pour les BOM GNV (ATEX). Les incertitudes sur la mise aux normes des dépôts et des ateliers sont progressivement levées.

²²France Hydrogène met à disposition des porteurs de projets sur son Observatoire - Vig'Hy, 12 fiches pratiques sur la réglementation applicable à l'hydrogène.



En ligne sur Vig'Hy, l'Observatoire de l'hydrogène

-  [Réglementation relative à l'étiquetage et au marquage des contenants de l'hydrogène](#)
-  [Réglementation relative au transport d'hydrogène](#)
-  [Réglementation relative au transport d'hydrogène par canalisation](#)
-  [Réglementation ICPE 3420 - Production d'hydrogène](#)
-  [Réglementation ICPE 2910 - Combustion de l'hydrogène](#)
-  [Réglementation ICPE 4715 - Stockage d'hydrogène](#)
-  [Réglementation ICPE 4715 - Chariots élévateurs](#)
-  [Réglementation ICPE 1416 - Distribution d'hydrogène](#)
-  [Procédure d'homologation des véhicules hydrogène en France et en Europe](#)
-  [Réglementation relative aux équipements sous pression](#)
-  [Application du code de l'environnement et du code de l'urbanisme aux projets hydrogène](#)
-  [Réglementation ATEX](#)

A propos de France Hydrogène Mobilité

France Hydrogène Mobilité est le groupe dédié à la mobilité des acteurs de la filière hydrogène au sein de France Hydrogène. Il réunit des énergéticiens, des fabricants d'électrolyseurs, de stations de distribution, des constructeurs automobiles, des fabricants de composants comme les piles à combustible et les réservoirs, des fonds d'investissement, des porteurs de projet, des cabinets de conseil ainsi que des institutionnels et instituts de recherche. L'objectif du groupe est notamment de permettre à ses membres de travailler en intelligence collective, d'identifier les verrous que peuvent rencontrer les acteurs dans le développement de projets et de contribuer à les lever. France Hydrogène Mobilité est un lieu de partage et de synthèse d'informations, et ses travaux bénéficient à l'ensemble de la filière.



Avec le support de : **elementenergy**
an ERM Group company

Remerciements

Nous tenons en particulier à remercier pour leur participation à des entretiens dédiés ayant permis d'argumenter, d'informer, et de compléter la rédaction de ce document :

- **Pierre ALLAIN**, Directeur Innovation collecte OM & DI, PAPREC ;
- **Valentin BALOCHE**, Chargé de mission collecte des déchets, Correspondant FAMAD, FNADE ;
- **Rémi BERGER**, Responsable Innovation, GCK ;
- **Christophe BIGRE**, Directeur Développement Produits Stratégiques, SEMAT ;
- **Jérémy CANTIN**, CEO, e-Néo ;
- **Pascal ERMEL**, Associé, AtmoTrack ;
- **Hubert GRANGÉ**, Directeur Technique, SUEZ ;
- **Keftoum KOUADRI**, Responsable d'agence, COVED ;
- **Vincent LALLEMAND**, Directeur Général délégué, GCK ;
- **Aurélie MICHEL**, Chargée de mission Transition Ecologique & Hydrogène, Touraine Vallée de l'Indre.

Enfin, un grand merci pour le suivi de l'ensemble de la réalisation de ce document aux membres du groupe de travail dédié au camion électrique à hydrogène, au sein du groupe France Hydrogène Mobilité, et notamment ses coordinateurs Valérie BOUILLON-DELPORTE, Directrice Ecosystème Hydrogène chez Michelin et 1^{ère} Vice-présidente de France Hydrogène, Patrick DILLY, Directeur Développement H₂ Mobilité France chez Air Liquide*, et Nenad NIKOLIĆ, Responsable du Développement Commercial chez McPhy.

* à la date de rédaction

Contacts

Ce document est rédigé par l'équipe Element Energy d'ERM France, pour et avec le support du groupe de travail dédié au camion électrique à hydrogène, au sein du groupe France Hydrogène Mobilité. Pour plus d'informations, n'hésitez pas à contacter :

Elise Ravoire

elise.ravoire@erm.com

+33 (0)1 86 47 78 07

Aurélie Deshons

aurelie.deshons@erm.com

+33 (0)1 86 47 77 83

elementenergy
an ERM Group company

