



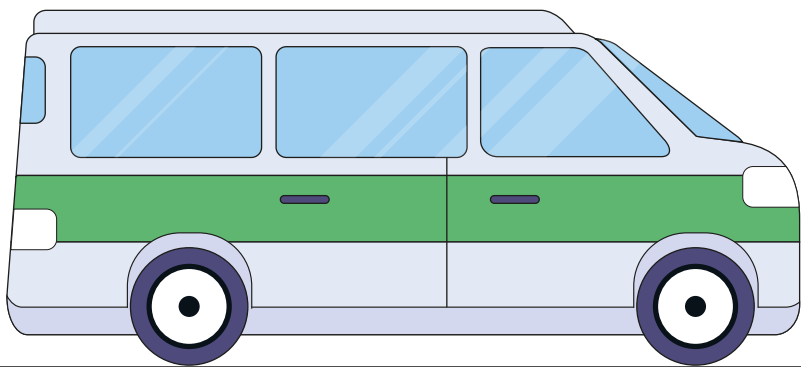
# Électrifier sa flotte de bus

BONNES PRATIQUES POUR UNE TRANSITION RÉUSSIE



**Avere**

FRANCE



Juin 2026

**Directeur de publication**  
Clément Molizon  
**Rédaction**  
Brune Lethier

**Conception graphique & illustrations**

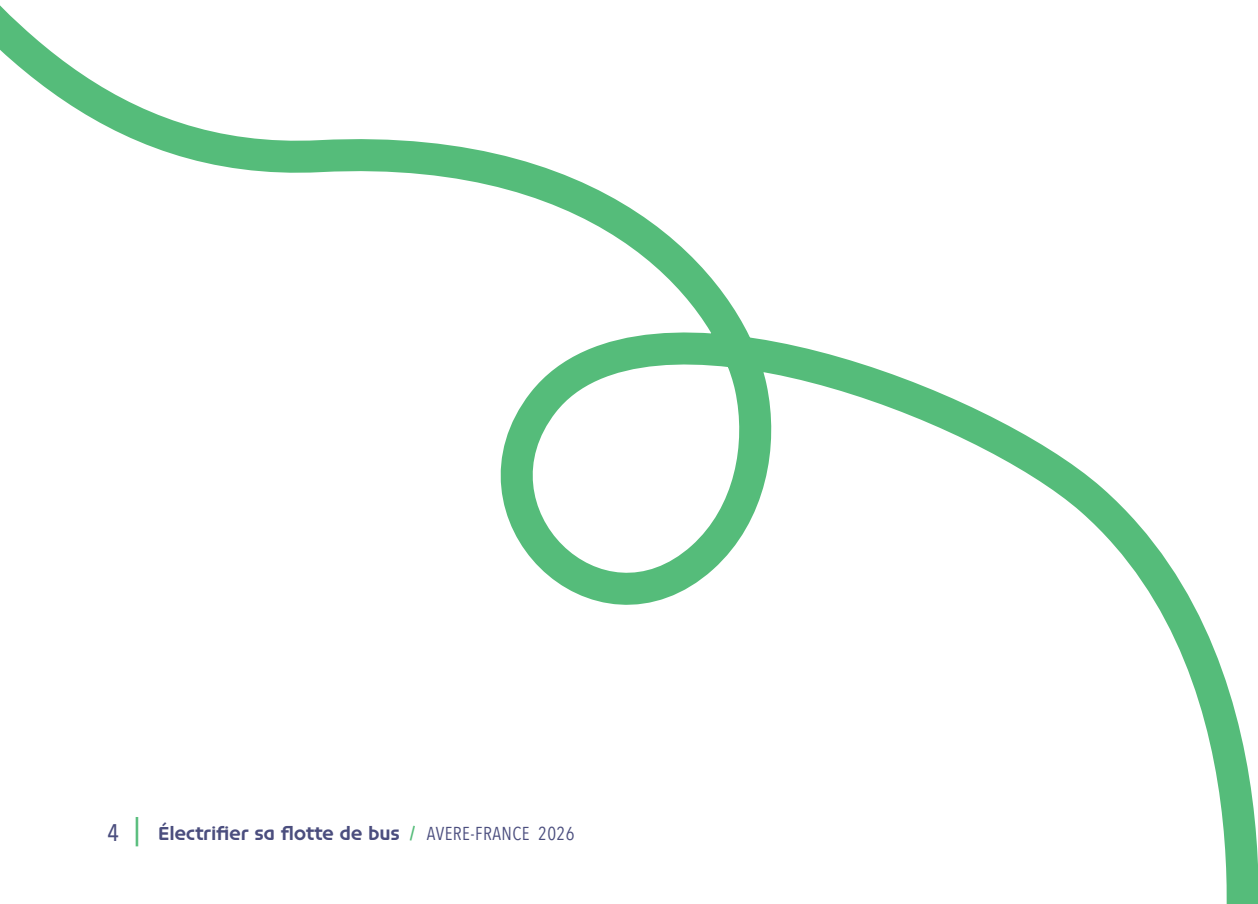
 Patte Blanche



## REMERCIEMENTS

L'Avere-France, qui représente en France l'écosystème de la mobilité électrique, vous propose une nouvelle version de son guide bus électrique, après une première publication en 2022. L'association remercie ses adhérents, et en particulier **Yélé Consulting** pour sa contribution qui aura permis d'enrichir et d'actualiser ce document.





# Édito

**E**n quelques années, le bus électrique s'est imposé comme l'un des leviers les plus concrets et les plus efficaces à disposition des territoires pour agir en faveur de la transition énergétique. En France, le bus a été pionnier dans l'adoption de l'électrique. Ce n'est pas un hasard : les collectivités et autorités organisatrices de mobilité (AOM) ont très tôt perçu le potentiel de l'électrification. Si la voiture particulière reste le premier mode de déplacement domicile-travail, les transports en commun, et le bus en première ligne, représentent le deuxième pilier de la mobilité des Français. Électrifier, c'est agir là où l'impact est immédiat.

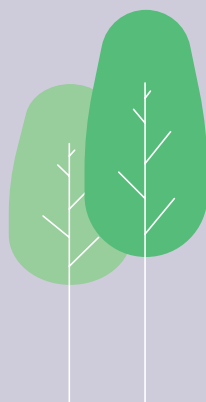
Sur le plan environnemental, le bus électrique réduit significativement les émissions de gaz à effet de serre et de particules fines, et améliore par conséquent la qualité de l'air dans les zones urbaines denses.

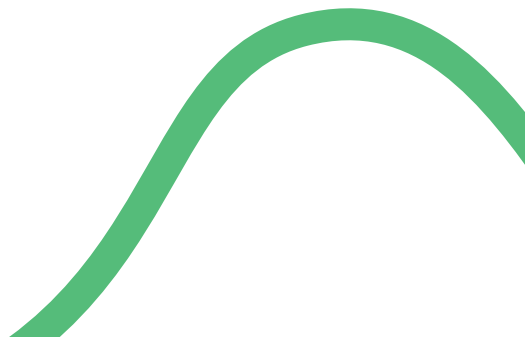
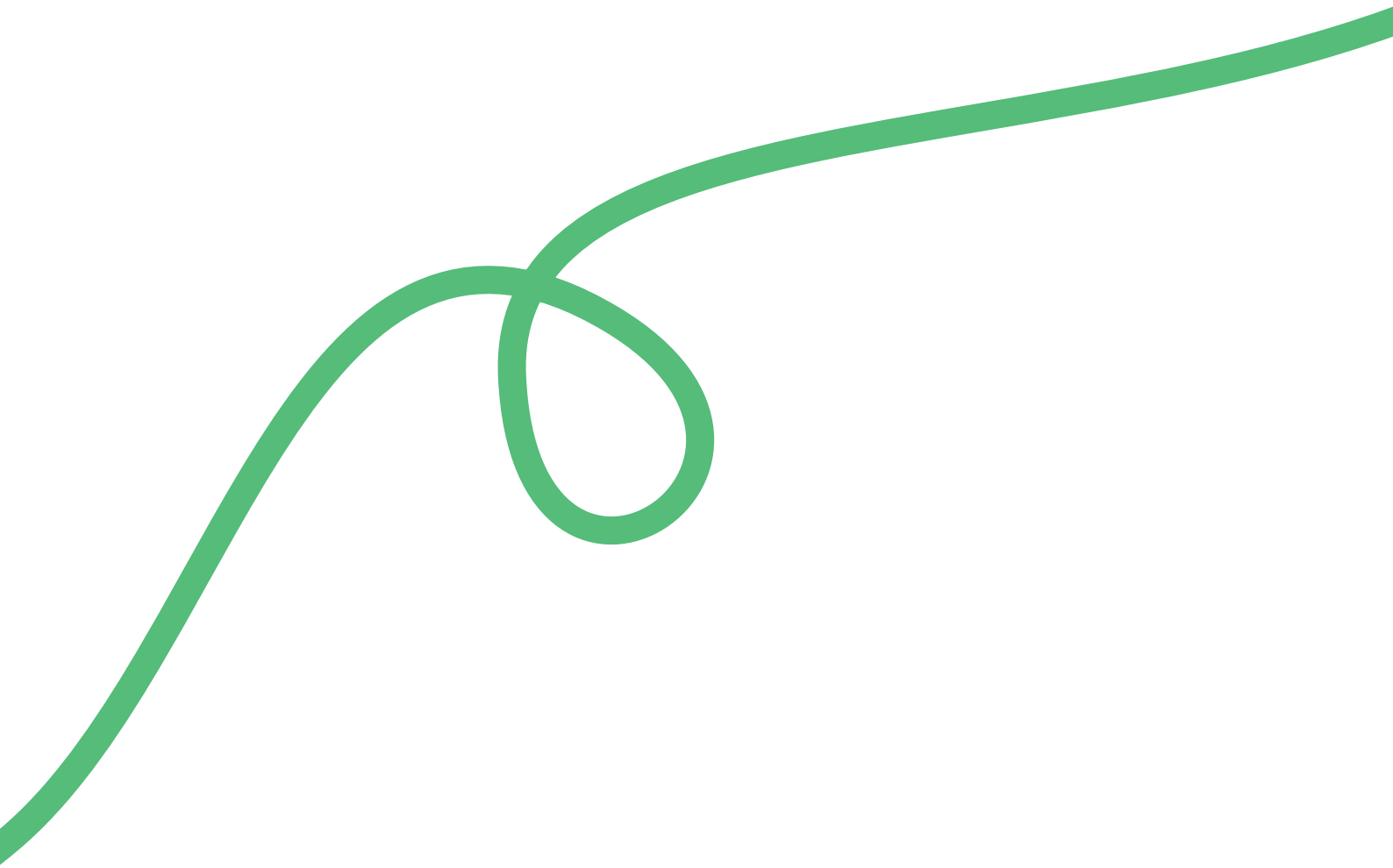
Plus silencieux, il améliore le confort des voyageurs et offre aux conductrices et conducteurs de meilleures conditions de travail.

En parallèle, l'atteinte des objectifs européens de réduction des émissions impose d'accélérer le développement des transports collectifs. L'électrification des bus est dans ce cadre un accélérateur incontournable.

C'est dans cet esprit que l'Avere-France publie cette nouvelle édition de son guide bus électrique : donner aux acteurs du transport et des territoires les clés pour réussir leur électrification, avec méthode et surtout ambition !

**Antoine HERTEMAN**  
*Président de l'Avere-France*





# Sommaire

<b>1</b>	<b>LE CADRE RÉGLEMENTAIRE, PREMIER LEVIER DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE</b>	<b>10</b>
1.	<b>LA RÉGLEMENTATION EUROPÉENNE</b>	<b>11</b>
•	Règlement CO <sub>2</sub> pour les véhicules lourds et bus	12
•	Sécurité et réglementation des batteries	12
2.	<b>LA RÉGLEMENTATION FRANÇAISE</b>	<b>14</b>
•	Principaux textes applicables aux bus publics	14
<b>2</b>	<b>LE BUS ÉLECTRIQUE, SA TECHNOLOGIE, SES AVANTAGES : OÙ EN SOMMES-NOUS ?</b>	<b>16</b>
1.	<b>LES TECHNOLOGIES DE PROPULSION ÉLECTRIQUE</b>	<b>18</b>
•	Le bus à batterie	18
•	Les technologies ERS - Electric Road System	18
•	Le bus à pile à combustible hydrogène	19
•	Le rétrofit des bus thermiques	19
2.	<b>LES TECHNOLOGIES DE RECHARGE DISPONIBLES</b>	<b>20</b>
•	Recharge au dépôt	20
•	Recharge d'opportunité en ligne	21
•	Smart charging et gestion énergétique	21
3.	<b>LES AVANTAGES DE LA TECHNOLOGIE ÉLECTRIQUE</b>	<b>22</b>
•	La technologie électrique, zéro émission à l'échappement	22
•	Avantages pour la santé publique et le cadre de vie	24
•	Une offre européenne et internationale capable de répondre à tous les besoins	24
<b>3</b>	<b>COMMENT RÉUSSIR L'ÉLECTRIFICATION DE SA FLOTTE DE BUS ?</b>	<b>26</b>
•	Étape 1 : Penser votre projet	27
•	Étape 2 : Dimensionner votre projet	29
•	Étape 3 : Élaborer les aspects techniques	31
•	Étape 4 : Financer votre projet	32
•	Étape 5 : Réussir la phase de déploiement, l'exploitation et l'entretien	34

# Introduction



**L**e renouvellement des flottes d'autobus entre dans une nouvelle phase à compter de 2025. Les cadres réglementaires européens et nationaux imposent désormais une part croissante d'autobus neufs répondant à des exigences strictes de très faibles émissions. L'Union européenne fixe des objectifs contraignants pour les véhicules lourds et les autobus, avec des réductions progressives des émissions de CO<sub>2</sub> sur la décennie et des exigences fortes sur les autobus urbains neufs, ce qui reconfigure les politiques d'achat, les schémas d'exploitation et la planification territoriale.

Dans ce contexte, la filière électrique apparaît aujourd'hui comme la technologie la plus mature et la plus opérationnelle pour satisfaire les objectifs de « zéro émission à l'usage ». Les bus électriques à batteries, complétés selon certains cas d'usage par des véhicules à pile à combustible, offrent des solutions déjà éprouvées pour l'exploitation urbaine avec zéro émission locale, une réduction notable du bruit et une amélioration de l'expérience passager. Portée par une offre industrielle européenne désormais large et par une électricité de plus en plus décarbonée, l'électrification permet en outre de s'appuyer sur une énergie souvent produite localement, à la différence des carburants fossiles importés.

Les collectivités territoriales jouent un rôle central dans cette transformation. En tant qu'autorités organisatrices de la mobilité, elles définissent les besoins, la stratégie d'achat, les priorités de desserte et pilotent les dispositifs financiers et réglementaires locaux. Leur action est déterminante, depuis la définition des cahiers des charges jusqu'à la mobilisation des financements (fonds nationaux, fonds européens, partenariats) et l'adaptation de l'espace public pour accueillir les infrastructures de recharge, en coordination avec les gestionnaires de réseaux. La réussite de la transition énergétique des bus doit ainsi devenir un critère structurant du pilotage territorial des mobilités.

Sur le plan des immatriculations, la dynamique de marché est déjà engagée. En Europe, la part des bus électriques dans les immatriculations annuelles progresse rapidement et témoigne d'un basculement en cours vers les technologies zéro-émission, même si des écarts importants persistent entre États membres. En 2024, la moitié des bus urbains immatriculés en Europe étaient à zéro émission, tandis qu'en France ils ne représentaient que 35 %. En 2025, la France a largement accéléré la tendance avec 49,3 % des immatriculations en électrique, soit 591 véhicules électriques sur les 1198 immatriculés.

L'un des enjeux techniques et opérationnels majeurs réside dans la recharge. Le déploiement d'infrastructures adaptées - au dépôt, en voirie ou au terminus -, le dimensionnement des puissances, la gestion intelligente des profils de charge et l'intégration au réseau électrique conditionnent la fiabilité des services et les coûts d'exploitation. Sans stratégie de recharge robuste, les bénéfices attendus en matière de disponibilité, de performance environnementale et de maîtrise des coûts ne peuvent être pleinement atteints.

Du point de vue environnemental, les analyses de cycle de vie confirment que les bus électriques présentent des avantages nets en émissions de gaz à effet de serre, surtout lorsque l'électricité est faiblement carbonée. Les études récentes montrent une réduction significative des émissions sur l'ensemble du cycle de vie par rapport aux autobus diesel, ainsi qu'un bénéfice sanitaire immédiat lié à la suppression des émissions locales de particules et d'oxydes d'azote dans les zones denses. Les autres options (gaz, hydrogène) peuvent présenter un intérêt dans certains contextes, mais restent aujourd'hui souvent moins favorables en bilan global lorsque l'on tient compte de la source d'énergie et des pertes associées.

Ce guide fournit aux décideurs publics, autorités organisatrices, exploitants de réseaux et partenaires industriels les repères nécessaires pour planifier et mettre en œuvre des trajectoires de décarbonation cohérentes. Il présente le panorama réglementaire et ses échéances, une synthèse technique des technologies disponibles et de leurs impacts en cycle de vie, des éléments concrets sur le dimensionnement et l'exploitation des infrastructures de recharge, ainsi que des retours d'expérience d'acteurs ayant déjà engagé la transition vers la mobilité électrique. En 2025, la France a rattrapé la dynamique d'électrification de ses voisins comme le Royaume-Uni ou l'Espagne : on constate notamment un regain de mobilisation des AOM.

En définitive, si la réglementation fixe le cap, l'électrification des bus - appuyée par une stratégie de recharge robuste, des politiques publiques claires et un pilotage territorial engagé - constitue aujourd'hui la voie la plus opérationnelle pour atteindre les objectifs climatiques et améliorer la qualité de l'air et de vie dans les villes. Ce guide se veut un outil opérationnel pour traduire ces ambitions en réalisations concrètes sur le terrain.



## DU POINT DE VUE DES AOM

**Pour les AOM, cette introduction se traduit par plusieurs implications immédiates :**

- **Intégrer** les nouvelles exigences européennes et nationales dans les stratégies de renouvellement de flotte, en planifiant dès maintenant l'atteinte des seuils de bus zéro émission ;
- **Structurer** une feuille de route territoriale d'électrification des bus, articulant choix technologiques, calendrier de conversion et priorisation des lignes ;
- **Anticiper** les besoins en infrastructures de recharge (dépôts, terminus, voirie), en lien étroit avec les gestionnaires de réseaux et les services d'urbanisme ;

- **Mobiliser** et combiner les différentes sources de financement (État, Europe, contrats d'exploitation, partenariats) pour sécuriser les investissements nécessaires ;
- **Mettre en place** un suivi des indicateurs environnementaux et sanitaires (émissions, qualité de l'air, bruit) pour objectiver les bénéfices de la transition et ajuster les choix.

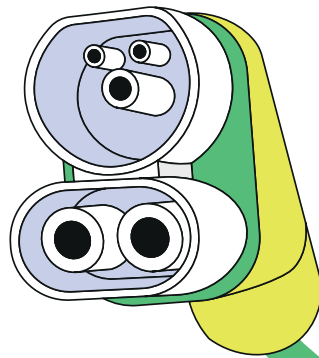
**Ce guide se veut un outil opérationnel pour traduire ces ambitions en réalisations concrètes sur le terrain.**

# 1



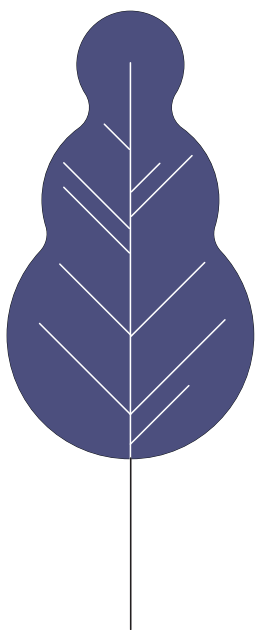
## LE CADRE RÉGLEMENTAIRE, PREMIER LEVIER DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE





# 1. LA RÉGLEMENTATION EUROPÉENNE

**L**e Pacte vert pour l'Europe fixe l'objectif de neutralité carbone en 2050 et une réduction d'au moins 55 % des émissions de gaz à effet de serre en 2030 par rapport à 1990, avec une baisse spécifique de 90 % des émissions du transport à l'horizon 2050. Il est décliné dans le paquet législatif Fit for 55 et dans la stratégie européenne pour une mobilité durable et intelligente, qui met l'accent sur le développement des transports publics décarbonés, le durcissement des normes de CO<sub>2</sub> et l'investissement dans les infrastructures de recharge.



# Règlement CO<sub>2</sub> pour les véhicules lourds et bus

Le règlement (UE) 2019/1242, modifié par le règlement (UE) 2024/1610, encadre les émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules lourds, dont les autobus et autocars. Il introduit une définition des véhicules à zéro émission (ZEV) - bus 100 % électriques à batterie, à pile à combustible ou fonctionnant à l'hydrogène - pour les bus urbains neufs et les véhicules lourds interurbains.

*Au-delà de la sécurité, la réglementation européenne invite à penser la batterie non plus comme un élément figé mais comme une variable d'ajustement. Une infrastructure de recharge dynamique (ERS) ou de recharge rapide statique en cours d'exploitation (biberonnage aux terminus ou aux arrêts stratégiques) permet en effet de réduire significativement la capacité*

*de la batterie embarquée. Une batterie plus petite, c'est moins de matériaux critiques, un véhicule plus léger et une empreinte carbone à la fabrication moindre. Ce levier s'inscrit pleinement dans les objectifs du Pacte vert, qui vise une réduction des émissions non seulement à l'usage mais sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule.*

Le cadre réglementaire européen ne se limite pas à encadrer la sécurité des batteries : il intègre également une logique de réduction de l'empreinte carbone dès la conception des véhicules. Le règlement CO<sub>2</sub> et le Pacte vert encouragent en ce sens une approche cycle de vie, dans laquelle la réduction de la taille des batteries embarquées – rendue possible par des infrastructures de recharge performantes (recharge

d'opportunité, ERS) – constitue un levier à part entière pour diminuer la consommation de matériaux critiques, le poids des véhicules et leur impact environnemental global. Cette dimension est appelée à se renforcer dans les prochaines révisions réglementaires, notamment dans le cadre du règlement européen sur les batteries (UE 2023/1542).

Ces objectifs structurent progressivement l'offre des constructeurs et signifient, pour les bus urbains, une sortie quasi complète des motorisations thermiques neuves d'ici 2035. Pour les AOM, cela implique que les choix technologiques réalisés dès aujourd'hui doivent être compatibles avec cette trajectoire, sous peine de verrouiller des actifs qui deviendront rapidement non conformes ou pénalisants.

## Principaux objectifs du règlement CO<sub>2</sub> pour les bus et cars

CATÉGORIE DE VÉHICULE	OBJECTIF 2025	OBJECTIF 2030	OBJECTIF 2035	OBJECTIF 2040
<b>Bus urbains (nouveaux)</b>	Phase de transition / préparation	90% de ZEV parmi les neufs	100% de ZEV parmi les neufs	N/A
<b>Cars / bus interurbains (tous)</b>	-15% d'émissions (réf. 2019-2020)	-45%	-65%	-90%

## Sécurité et réglementation des batteries

Les bus électriques embarquent des systèmes de stockage d'énergie (REESS) composés de cellules et modules gérés par un Battery Management System (BMS), qui assure la sécurité (surveillance température, tension, état de charge), la performance et la durabilité (équilibre, protection contre sur/sous-charge) ainsi que la communication avec le véhicule.

La norme UNECE R100 révision 3 renforce le cadre de sécurité des batteries de traction des véhicules électriques, avec une série de tests obligatoires (vibrations, chocs thermiques et mécaniques, résistance au feu, protection contre les courts-circuits, surcharges et décharges excessives, maîtrise de la propagation thermique). Cette exigence accrue vise à sécuriser l'usage intensif des bus électriques dans des conditions d'exploitation variées.

### Protocole et normes de charge

Les bus électriques s'inscrivent dans un écosystème de recharge normalisé, où plusieurs standards jouent un rôle clé pour la sécurité, l'interopérabilité et la gestion de flotte.

## Principaux protocoles et normes de charge utiles pour les bus électriques

PROTOCOLE / NORME	USAGE PRINCIPAL	FONCTIONS CLÉS	INTÉRÊT POUR LES BUS ÉLECTRIQUES
<b>ISO/IEC 15118</b>	Communication véhicule-borne	Identification automatique, paiement intégré, smart charging, communication bidirectionnelle	Optimise et automatise la recharge de la flotte
<b>OCPP</b>	Communication borne-système de gestion	Supervision à distance, gestion des transactions, mises à jour logicielles	Gestion centralisée multi-marques des bornes
<b>DIN SPEC 70121 / 70122</b>	Recharge rapide DC	Spécification de la communication DC, tests de conformité	Standardise la recharge rapide pour véhicules lourds
<b>CCS (IEC 61851/62196)</b>	Recharge rapide en courant continu	Standardisation connectique et sécurité, préconditionnement (VDV 261), intégration SI (VDV 463)	Solution robuste de recharge rapide au dépôt/en voirie
<b>OppCharge</b>	Recharge par pantographe	Recharge 150-600 kW en quelques minutes, pantographe descendant, communication Wi-Fi	Adaptée à la recharge d'opportunité aux arrêts/terminus

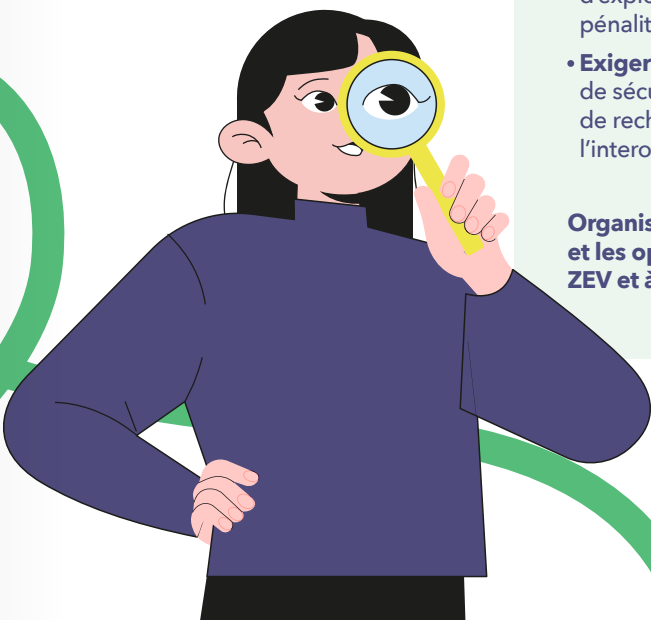
Ces standards, combinés, permettent aux AOM et exploitants de ne pas se retrouver captifs d'une technologie propriétaire, de mutualiser les infrastructures et d'intégrer progressivement des fonctions avancées (smart charging, V2X, gestion optimisée des puissances).

### DU POINT DE VUE DES AOM

**Pour les AOM, la réglementation européenne implique dès à présent plusieurs décisions structurantes :**

- **Planifier** le renouvellement de flotte en cohérence avec l'obligation de 90 % de bus urbains neufs à zéro émission en 2030 et 100 % en 2035, en évitant tout nouvel investissement qui ne serait pas compatible avec cette trajectoire ;
- **Intégrer** explicitement ces jalons 2030-2035 dans les contrats d'exploitation et DSP (durée des contrats, clauses de renouvellement, pénalités ou incitations liées au verdissement) ;
- **Exiger** dans les marchés et cahiers des charges le respect des normes de sécurité batterie (UNECE R100, BMS) et des principaux standards de recharge (ISO/IEC 15118, OCPP, CCS, OppCharge) pour garantir l'interopérabilité et éviter l'enfermement propriétaire.

**Organiser un dialogue précoce avec les constructeurs et les opérateurs pour sécuriser l'accès à une offre compatible ZEV et à des solutions de recharge standardisées.**



# 2. LA RÉGLEMENTATION FRANÇAISE

**L**a France décline les objectifs européens à travers plusieurs textes qui fixent le cadre de la transition énergétique et du verdissement des flottes d'autobus et autocars.

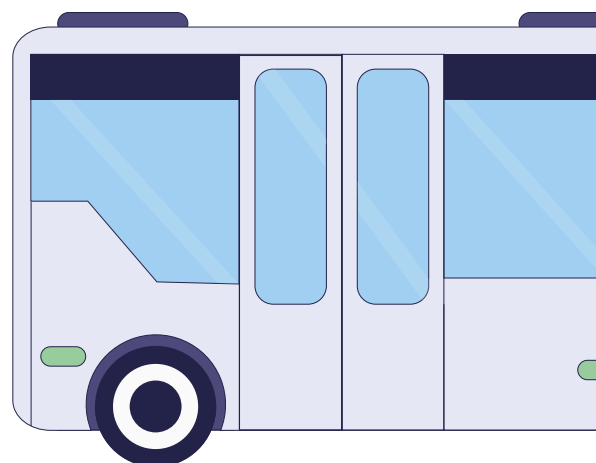
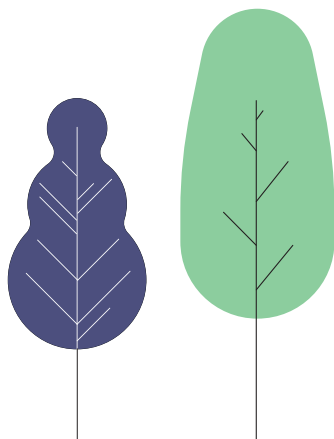
La LTECV fixe les grandes cibles climatiques et énergétiques, tandis que la LOM, la PPE/SDMP, la directive « véhicules propres » et les ZFE-m précisent les obligations concrètes pour les autorités organisatrices



## Principaux textes applicables aux bus publics

### Repères clés de la réglementation française pour les bus

TEXTE / DISPOSITIF	USAGE PRINCIPAL	IMPACTS CLÉS POUR LES BUS / AOM
<b>LTECV (2015)</b>	Cadre général transition énergie-climat	Verdissement des flottes publiques, objectifs IRVE 2030
<b>LOM (2019)</b>	Mobilités du quotidien, verdissement des flottes	Quotas VFE/VTFE lors des renouvellements, transparence
<b>PPE / SDMP 3</b>	Programmation énergétique, mobilité propre	Cible : 90 % des nouveaux bus électriques en 2030
<b>Directive « véhicules propres » (UE 2019/1161) - transposition</b>	Quotas VFE/VTFE dans marchés publics et concessions	50 % puis 100 % de bus/autocars faibles émissions, part VTFE pour bus
<b>ZFE-m + loi Climat et Résilience</b>	Zones à faibles émissions mobilité	Restrictions de circulation pour les bus les plus polluants
<b>Réglementation dépôts / ICPE (arrêté 3 août 2018)</b>	Sécurité des ateliers de charge et dépôts électriques	Distances, protection incendie, seuils de puissance, procédures ICPE





La LTECV fixe les objectifs nationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre (-40 % en 2030, division par quatre en 2050), de baisse de la consommation d'énergie finale (-50 % en 2050) et de hausse de la part des énergies renouvelables, en introduisant notamment des obligations de verdissement des parcs publics et un objectif de déploiement de bornes de recharge d'ici 2030.

La LOM complète ce cadre en imposant aux acteurs publics et à certaines entreprises d'intégrer une proportion minimale de véhicules à faibles et très faibles émissions dans leurs renouvellements de flotte, avec des exigences renforcées dans les grandes agglomérations. Elle prévoit également une obligation de publication annuelle, avant le 30 septembre, de la part de bus et autocars à faibles émissions renouvelés l'année précédente, via [data.gouv.fr](http://data.gouv.fr).

La SDMP 3, annexée à la PPE, oriente la décarbonation du transport en fixant comme repère que 90 % des nouveaux autobus devront être électriques en 2030, tout en encourageant le report modal vers les transports collectifs. Elle prévoit des mesures de soutien (financement du renouvellement de flottes, aides aux infrastructures de recharge), dont certaines restent encore à concrétiser pleinement.

La directive « véhicules propres » transposée dans le Code de l'environnement impose des quotas minimaux de VFE et VTFE pour les marchés publics et contrats de concession de transport public. Pour les parcs de plus de 20 autobus/ autocars, elle prévoit que 50 % des véhicules renouvelés soient à faibles émissions jusqu'en 2024, puis 100 % à partir de 2025, avec au moins la moitié de ces proportions constituée d'autobus à très faibles émissions dans les zones les plus denses.

Les ZFE-m, instaurées ou renforcées dans les grandes agglomérations, limitent ou interdisent la circulation des véhicules les plus émetteurs en fonction de leur vignette Crit'Air. Pour les bus, cela se traduit par un calendrier de sortie accélérée des motorisations les plus polluantes sur les principales lignes urbaines, sous la responsabilité des collectivités et EPCI concernés.

Enfin, la réglementation applicable aux dépôts et ateliers de charge de bus électriques, via la nomenclature ICPE et l'arrêté du 3 août 2018, impose des distances d'isolement, des dispositifs de détection incendie, des obligations de supervision et des seuils de puissance au-delà desquels des procédures spécifiques (déclaration, enregistrement, autorisation) sont requises. Ces contraintes doivent être intégrées dès la phase de conception des nouveaux dépôts ou de transformation de dépôts existants.

## DU POINT DE VUE DES AOM

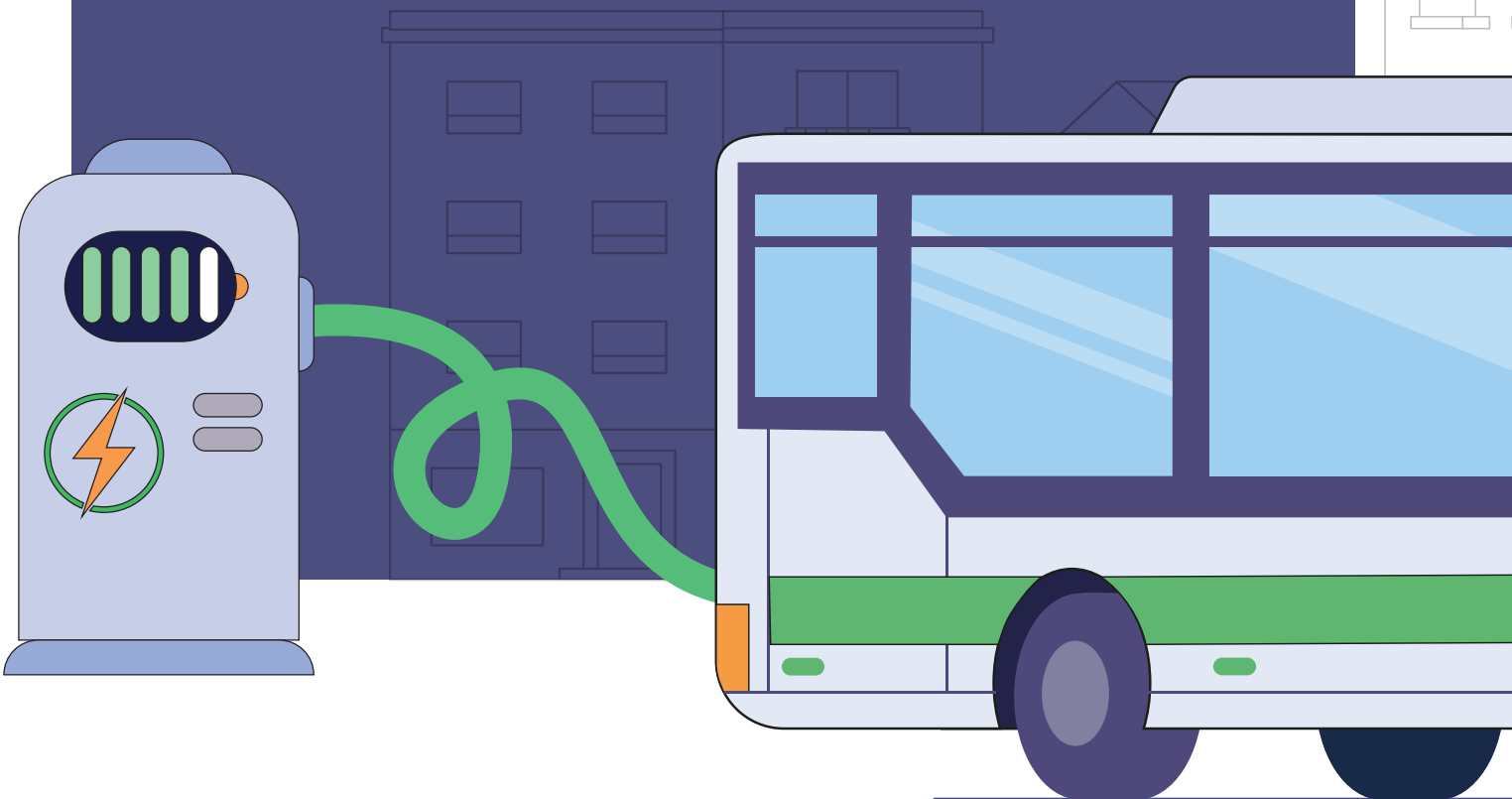
### Les AOM doivent principalement :



- **Mettre** en cohérence leurs plans de mobilité, contrats d'exploitation et stratégies d'investissement avec les jalons européens (2030-2035) et nationaux (LTECV, LOM, SDMP, directive « véhicules propres ») ;
- **Intégrer** les quotas VFE/VTFE et les obligations de reporting dans la rédaction des marchés publics et DSP, en prévoyant des mécanismes de suivi et de sanction si les objectifs ne sont pas atteints ;
- **Anticiper** les effets des ZFE-m sur les lignes urbaines les plus exposées et prioriser l'électrification de ces lignes pour éviter les ruptures de service ou les dérogations coûteuses ;
- **Prendre** en compte les contraintes ICPE et de sécurité dès la recherche de sites et les études de faisabilité pour les dépôts électriques, en associant les services techniques, le GRD et les assureurs.



# 2.

## LE BUS ÉLECTRIQUE, SA TECHNOLOGIE, SES AVANTAGES : OÙ EN SOMMES-NOUS ?





**A**u-delà des objectifs réglementaires, l'électrification des réseaux de bus repose sur des choix technologiques concrets et sur une bonne compréhension des performances réelles des solutions disponibles. Les autorités organisatrices doivent arbitrer entre plusieurs architectures de véhicules (batterie, hydrogène, éventuellement routes électrifiées), des modes de recharge variés et des modèles économiques qui se jugent sur l'ensemble du cycle de vie.

Cette partie présente les principales technologies de propulsion électrique aujourd'hui disponibles pour les bus, les options de recharge associées et les avantages environnementaux, opérationnels et économiques qui en découlent. Elle vise à donner aux AOM des repères pour comparer les solutions et construire une stratégie d'électrification adaptée aux caractéristiques de leur territoire.



# 1. LES TECHNOLOGIES DE PROPULSION ÉLECTRIQUE

**L**es réseaux de bus peuvent aujourd'hui s'appuyer sur plusieurs technologies de propulsion électrique, plus ou moins matures et adaptées à des contextes d'exploitation différents. La plus répandue reste le bus électrique à batterie, complétée par des solutions de routes électriques (ERS) et par le bus à pile à combustible hydrogène sur certains segments.

## Le bus à batterie

Le bus à batterie stocke l'énergie dans des packs de batteries embarqués qui alimentent un moteur électrique, sans émission locale de CO<sub>2</sub> ni de polluants. Le dimensionnement du pack tient compte du poids du véhicule, de la capacité passagers et des besoins d'autonomie, avec des densités d'énergie actuelles de l'ordre de 150-200 Wh/kg permettant de couvrir la plupart des besoins urbains en conditions normales.

La durée de vie des batteries se situe généralement entre 8 et 15 ans selon les technologies et les conditions d'exploitation, avec une capacité résiduelle

d'environ 80 % en fin de première vie. Cette capacité résiduelle ouvre la voie à des usages en « première vie bis » (bus affectés à des lignes moins exigeantes) puis en seconde vie stationnaire (stockage d'énergie associé au photovoltaïque ou au réseau).

Aujourd'hui, environ 85 % de la masse d'une batterie est valorisée en recyclage, avec jusqu'à 95 % de récupération pour certains métaux, via des filières spécialisées en France. Ces perspectives de seconde vie et de recyclage contribuent à améliorer le bilan environnemental global du bus électrique à batterie.

## Les technologies ERS – Electric Road System

Les systèmes de route électrifiée (ERS) permettent d'alimenter les bus en énergie directement depuis l'infrastructure, limitant la taille des batteries embarquées. Trois options principales existent : alimentation par caténaire/pantographe, rail au sol et induction.

L'alimentation par caténaire aérienne ou pantographe s'inscrit dans la continuité du trolleybus, avec une alimentation continue via une ligne aérienne. Le bus peut éventuellement disposer d'une petite batterie pour s'affranchir du tracé sur certains tronçons. Cette solution est adaptée aux lignes à très forte fréquence, par exemple des BHNS.

L'alimentation par rail au sol repose sur un rail conducteur intégré à la chaussée, qui alimente le véhicule via un collecteur placé sous le bus. Le système détecte les véhicules autorisés et n'alimente que sous leur passage, ce qui limite les risques pour les autres usagers.

L'alimentation par induction utilise des bobines sous la chaussée et un récepteur embarqué, sans contact physique. Elle réduit la maintenance mais reste encore peu déployée au-delà de quelques démonstrateurs.

Ces technologies restent aujourd'hui marginales par rapport au bus à batterie, mais elles peuvent présenter un intérêt pour des corridors intensifs où la limitation de la masse batterie est un enjeu fort.



# Le bus à pile à combustible hydrogène

Le bus à hydrogène est un bus électrique dont l'énergie est produite à bord dans une pile à combustible (PAC), qui combine l'hydrogène stocké dans des réservoirs avec l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité, sans combustion. Une petite batterie tampon complète le dispositif pour gérer les appels de puissance et la récupération d'énergie au freinage.

Cette technologie offre des autonomies élevées (souvent supérieures à 250-300 km) et des temps de ravitaillement de l'ordre de quelques minutes, ce qui permet une exploitation relativement similaire à celle des bus thermiques. La sécurité est encadrée par les procédures d'homologation et les normes européennes, les constructeurs assurant la conception et la maintenance des systèmes spécifiques hydrogène.



## DU POINT DE VUE DES AOM

Pour les AOM, les choix de technologies de propulsion impliquent de :

- **Définir** des cas d'usage clairs (lignes longues/courtes, topographie, fréquence, ZFE) pour déterminer où le bus à batterie est suffisant et où l'hydrogène ou des solutions type ERS peuvent se justifier ;
- **Limiter** le nombre de technologies en parallèle pour éviter une complexité excessive en maintenance, stock de pièces, formation des équipes et organisation des dépôts ;
- **Anticiper** la seconde vie et le recyclage des batteries dans les contrats (responsabilités, reprise, valorisation), afin de sécuriser le bilan environnemental et les coûts de fin de vie ;
- **N'envisager** le retrofit que comme un outil ciblé (véhicules à forte valeur d'aménagement, parcs homogènes, contraintes d'approvisionnement en bus neufs), en s'appuyant sur une analyse TCO détaillée et une expertise d'homologation.

# Le retrofit des bus thermiques

Le retrofit consiste à transformer un bus thermique existant en bus électrique, en remplaçant le groupe motopropulseur diesel ou GNV par une chaîne de traction électrique à batterie ou à hydrogène. Depuis l'arrêté du 13 mars 2020, cette opération est encadrée en France et autorisée pour des véhicules de plus de 5 ans, sous réserve du respect de conditions techniques et d'homologation spécifiques.

Le principe est de conserver le châssis, la carrosserie et les aménagements du véhicule (accès PMR, portes, équipements intérieurs), tout en remplaçant moteur, réservoirs de carburant et organes associés par un moteur électrique, un pack batterie ou une pile à combustible et les systèmes auxiliaires correspondants. Cette approche peut être particulièrement intéressante pour des véhicules ayant fait l'objet d'aménagements coûteux (BHNS, design spécifique, équipements particuliers) ou dont la structure reste en bon état.

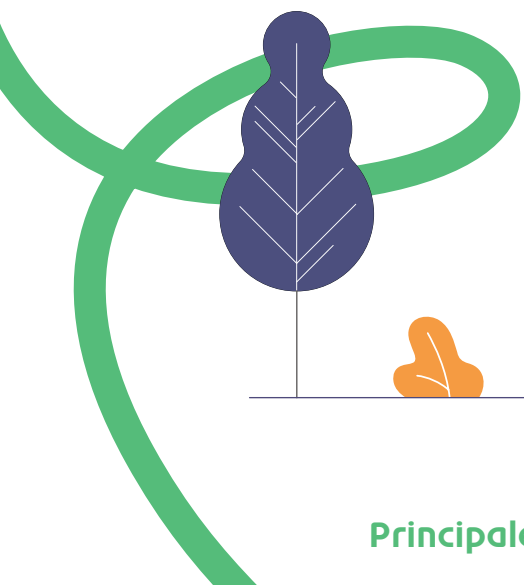
D'un point de vue environnemental, le retrofit permet de prolonger la durée de vie de véhicules existants tout en réduisant fortement leurs émissions d'exploitation, ce qui limite la production de déchets et la consommation de ressources liée à la fabrication de bus neufs. Il contribue ainsi à une logique d'économie circulaire, en combinant réduction des émissions, optimisation de l'usage de la ressource véhicule et valorisation industrielle locale.

Sur le plan économique, le retrofit peut apparaître coûteux à l'unité, mais il peut devenir compétitif dans certains cas : séries limitées de bus spécifiques, marchés où les délais d'approvisionnement en véhicules neufs sont longs, ou encore lorsqu'une solution de retrofit est proposée à l'échelle d'un parc homogène permettant des économies d'échelle. Il nécessite toutefois une analyse fine du coût total de possession (TCO) et des conditions de garantie et de maintenance.

# 2. LES TECHNOLOGIES DE RECHARGE DISPONIBLES



**L**a conception de la recharge conditionne directement la performance du service, les coûts d'exploitation et le calendrier de déploiement. Les AOM doivent choisir un mix de solutions (dépôt, voirie, terminus) adapté à leurs lignes, aux temps de stationnement disponibles et aux capacités de raccordement électrique.



## Recharge au dépôt

La recharge au dépôt consiste à recharger les bus principalement en dehors des heures de service, généralement la nuit ou pendant de longues plages d'immobilisation. Elle repose aujourd'hui majoritairement sur des bornes DC, en architecture « tout-en-un » ou distribuée.

- **Bornes AC (mode 3) :** l'énergie est fournie en courant alternatif par la borne, et la conversion AC/DC est assurée par un chargeur embarqué dans le véhicule. Les puissances usuelles (7-22 kW, jusqu'à 43 kW) restent adaptées à des véhicules légers ou à des minibus, mais sont rarement suffisantes pour des bus urbains de grande capacité exploités intensivement.
- **Bornes DC (mode 4) :** la conversion AC/DC est réalisée dans la borne qui délivre du courant continu directement à la batterie, avec des puissances pouvant atteindre plusieurs centaines de kW. Cette solution est devenue la référence pour les bus électriques, car elle permet des recharges plus rapides et une meilleure maîtrise de la puissance appelée.

Deux grandes architectures sont possibles au dépôt :

- **Architecture « tout-en-un » :** chaque borne intègre sa propre conversion AC/DC. Elle délivre typiquement entre 50 et 400 kW, avec des modules (30, 50, 60 kW) qui peuvent être assemblés pour augmenter la puissance. L'avantage réside dans la simplicité de déploiement et l'autonomie de chaque point de charge, mais la mutualisation de la puissance entre bornes est limitée et l'encombrement au sol peut être plus important.
- **Architecture DC distribuée :** la conversion AC/DC est centralisée dans une ou plusieurs armoires de conversion, qui alimentent des « satellites » de charge dépourvus de conversion. La puissance installée (100 kW à 1 MW, voire plus) est mutualisée entre les bus, ce qui permet d'optimiser la puissance appelée, de réduire l'encombrement au sol au niveau des places de stationnement et de faciliter l'extension ultérieure du dépôt.

### Principales architectures de recharge au dépôt

ARCHITECTURE	PRINCIPE	PUISSANCE TYPIQUE	AVANTAGES POUR UN DÉPÔT DE BUS	POINTS DE VIGILANCE
AC (mode 3)	Conversion embarquée dans le bus	7-22 kW (jusqu'à 43 kW)	Coût réduit, installation simple	Puissance trop faible pour la plupart des bus
DC « tout-en-un »	Conversion AC/DC dans chaque borne	50-400 kW par borne	Déploiement simple, solution éprouvée	Mutualisation limitée, encombrement
DC distribuée	Conversion centralisée, satellites DC	100 kW-1 MW mutualisés	Optimisation de la puissance, flexibilité, évolutivité	Dimensionnement initial à soigner

Le choix entre ces architectures dépend de la taille du dépôt, de la diversité des lignes, de la puissance disponible et de la stratégie de croissance du réseau.

# Recharge d'opportunité en ligne

La recharge d'opportunité permet de recharger les bus pendant l'exploitation, à certains arrêts stratégiques ou aux terminus, afin de réduire la taille des batteries embarquées et/ou d'augmenter la disponibilité des véhicules sur les lignes les plus sollicitées. Elle repose principalement sur des pantographes haute puissance.

- Pantographes ascendants (montés sur le bus) : le bus lève un pantographe pour se connecter à une interface située en hauteur sur une infrastructure fixe.
- Pantographes descendants (type OppCharge) : le pantographe est installé sur le portique ou le mât de recharge et vient se poser sur des rails situés sur le toit du bus.

Les puissances typiques vont de 150 à 600 kW, permettant de récupérer en quelques minutes une énergie suffisante pour plusieurs dizaines de kilomètres, en particulier sur des lignes radiales ou des BHNS. Ces systèmes sont totalement automatisés et intégrés aux systèmes de gestion de flotte.

La recharge d'opportunité nécessite cependant des investissements d'infrastructure en voirie (portiques, génie civil, raccordements) et une coordination étroite avec les gestionnaires d'espace public. Elle est particulièrement pertinente sur quelques lignes structurantes à fort trafic, mais ne se justifie pas nécessairement sur l'ensemble du réseau.

## Smart charging et gestion énergétique

Quel que soit le mix de recharge retenu, l'optimisation de la charge via des systèmes de smart charging devient un enjeu croissant. Ces systèmes ajustent la puissance délivrée aux bus en fonction de différents paramètres : tarifs d'électricité, contraintes du réseau, priorités d'exploitation, état de charge des véhicules.

### Le smart charging permet :

- De lisser les appels de puissance pour réduire les coûts de raccordement et d'abonnement ;
- D'éviter les pointes de puissance simultanées lors de la mise en charge de plusieurs bus ;
- D'anticiper les besoins de charge en fonction des horaires de départ prévus, en priorisant certains véhicules.

À plus long terme, les technologies de type V2X (Vehicle-to-Grid, Vehicle-to-Building) pourraient permettre de réinjecter ponctuellement de l'énergie dans le réseau ou dans les bâtiments, transformant les flottes de bus en ressources flexibles pour le système électrique. Ces usages restent encore émergents mais doivent être anticipés dans la conception des infrastructures et dans le choix des standards de communication.

### DU POINT DE VUE DES AOM

#### Pour la recharge, les principales décisions à prendre côté AOM sont :

- **Choisir** une stratégie de recharge à l'échelle du réseau (dépôt seul, dépôt + opportunité, éventuellement ERS) en fonction des lignes, des temps de stationnement et des contraintes de puissance disponible ;
- **Trancher** entre architectures « tout-en-un » et DC distribuée au dépôt, en intégrant dès le début les perspectives d'extension de la flotte et les coûts de raccordement.
- **Cibler** la recharge d'opportunité sur quelques lignes structurantes (BHNS, lignes radiales très chargées), plutôt que d'en faire un standard généralisé, pour maîtriser les coûts d'infrastructures en voirie ;
- **Intégrer** des fonctions de smart charging dans les projets dès la phase de conception, pour limiter les pointes de puissance et optimiser la facture d'électricité, avec une interface claire entre AOM, exploitant et gestionnaire de réseau ;
- **Prévoir**, dans les appels d'offres, la compatibilité avec les évolutions futures (V2X, flexibilités locales) via les bons standards de communication et une architecture ouverte, sans en faire un prérequis bloquant à court terme.

# 3. LES AVANTAGES DE LA TECHNOLOGIE ÉLECTRIQUE

## La technologie électrique, zéro émission à l'échappement

Le premier avantage du bus électrique est sa capacité à ne rejeter aucune émission locale :

zéro NOx, zéro particule fine, zéro CO<sub>2</sub> à l'échappement. Dans les zones urbaines denses, où la pollution atmosphérique est concentrée et où les bus circulent au plus près des piétons et des riverains, ce bénéfice est immédiat et tangible. En Île-de-France, la modernisation du parc de bus entre 2014 et 2020 a permis de diviser par environ trois certaines émissions polluantes (NOx, particules) imputables aux bus, selon

une étude Airparif de 2021 menée en conditions réelles.

Sur l'ensemble du cycle de vie, le bilan est également favorable. Malgré un impact plus élevé lors de la phase de fabrication – en particulier pour les batteries ou les piles à combustible – ce « surcoût carbone initial » est amorti au fil des kilomètres d'exploitation. En France, grâce à un mix électrique faiblement carboné (environ 59,9 gCO<sub>2</sub>eq/kWh en 2020), les émissions totales d'un bus électrique s'élèvent à environ

0,088 kgCO<sub>2</sub>eq/km du puits à la roue, contre 1,2 à 1,5 kg/km pour un bus diesel et 1,3 à 1,4 kg/km pour un bus GNV. Sur la durée de vie complète du véhicule, les émissions totales d'un bus électrique restent de l'ordre de 3 à 4 fois plus faibles que celles d'un bus thermique.

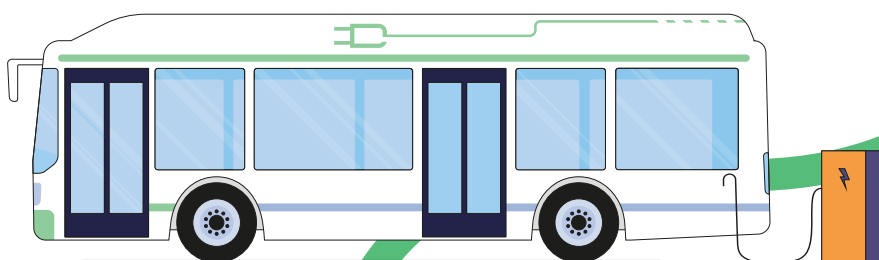
Le tableau suivant, issu de l'étude comparative des motorisations d'autobus de la Centrale d'achat du transport public (CATP, 2024), illustre ces écarts entre technologies :

### Comparatif des émissions et du bruit par motorisation (source : étude CATP 2024)

MOTORISATION	ÉMISSIONS À L'ÉCHAPPEMENT	ÉMISSIONS DU PUIITS À LA ROUE	BRUIT MOYEN (VÉHICULE ROULANT)
Électrique	0 kgCO <sub>2</sub> eq/km	0,088 kg/km <sup>1</sup>	65 à 72,2 dB(A)
Trolley	0 kgCO <sub>2</sub> eq/km	0,115 à 0,165 kg/km <sup>1</sup>	75 dB(A)
Hydrogène	0 kgCO <sub>2</sub> eq/km	0,330 kg/km <sup>2</sup>	65 à 72,2 dB(A)
Diesel	1,011-1,138 kg/km	1,212-1,497 kg/km	72 à 77 dB(A)
B100	1,011-1,138 kg/km	-60% vs gazole	72 à 77 dB(A)
GNV	1,043-1,206 kg/km	1,282-1,400 kg/km	73 à 76 dB(A)
Bio GNV	1,043-1,206 kg/km	0,263-0,288 kg/km	73 à 76 dB(A)

### SOUVERAINETÉ ÉNERGÉTIQUE ET EFFICACITÉ NATIONALE

L'électrification des bus s'inscrit dans une logique de réduction de la dépendance énergétique aux carburants fossiles importés. En s'appuyant sur une électricité majoritairement produite sur le territoire national (nucléaire, hydraulique, renouvelables), les AOM renforcent la maîtrise de leur empreinte environnementale et s'affranchissent partiellement de la volatilité des prix des carburants fossiles, soumis aux aléas géopolitiques et aux marchés internationaux.



1. Sur la base du mix électrique français 2020 (59,9 gCO<sub>2</sub>eq/kWh) –

2. Pour une production par électrolyse avec mix France

## LE TCO : UN CALCUL QUI PLAIDE POUR L'ÉLECTRIQUE SUR LA DURÉE

Le coût total de possession (TCO) permet de comparer les technologies non pas sur leur seul prix d'achat, mais sur l'ensemble des dépenses engagées pendant la durée de vie du véhicule : acquisition, infrastructure, énergie et maintenance. C'est l'outil de référence pour objectiver les choix d'investissement auprès des élus et des services financiers.

Deux scénarios ont été retenus pour refléter la diversité des pratiques de gestion de flotte :

- **Scénario 1 - 15 ans, sans remplacement de batterie :** correspond aux flottes renouvelées à mi-vie ou aux bus dont la batterie tient sur toute la durée d'exploitation, ce qui est de plus en plus fréquent avec les nouvelles générations de cellules.

- **Scénario 2 - 20 ans, avec remplacement de batterie à l'année 13 :** correspond à une exploitation longue durée intégrant le coût de remplacement du pack batterie (80 000 €), hypothèse prudente pour les AOM souhaitant maximiser la durée de vie de leurs actifs.

Dans les deux cas, le kilométrage annuel retenu est de **65 000 km**, valeur de référence représentative d'un bus urbain en exploitation intensive.

### TCO comparatif par motorisation à 65 000 km/an (€/km)<sup>3</sup>

MOTORISATION	15 ANS	20 ANS
Électrique	<b>0,97 - sans remplacement batterie</b>	<b>0,89 - avec remplacement batterie (an 13)</b>
GNV	1,10	1,01
BioGNV	1,15	1,06
Diesel	1,18	1,10
B100	1,25	1,16
XTL/HVO	1,28	1,19
Hydrogène	<b>1,94</b>	<b>1,75</b>

#### Deux enseignements majeurs ressortent de ce tableau :

- Le bus électrique est la motorisation la plus compétitive dans les deux scénarios. À 65 000 km/an, son TCO est inférieur de 13 à 19 % à celui du diesel selon l'horizon retenu, y compris en intégrant le coût de remplacement de la batterie à l'année 13.
- L'avantage de l'électrique se creuse avec la durée. Passer de 15 à 20 ans fait baisser son TCO de 0,97 à 0,89 €/km, les

économies cumulées sur l'énergie et la maintenance continuant de s'accumuler après remboursement du CAPEX initial.

Le TCO du bus électrique reste néanmoins sensible au kilométrage annuel. En dessous de 55 000 km/an, l'écart avec les motorisations thermiques se réduit progressivement, le surcoût à l'acquisition étant moins rapidement amorti. Les AOM exploitant des lignes peu kilométrées ont donc intérêt à analyser ce paramètre ligne par ligne avant de généraliser les

conclusions du TCO à l'ensemble de leur réseau.

Enfin, les aides publiques disponibles, CEE TRA-EQ-128 (20 000 à 85 600 € selon le type de véhicule et la taille de l'agglomération) et autres aides locales ou européennes, permettent de réduire encore le CAPEX initial et donc d'améliorer mécaniquement le TCO de l'électrique. Ces dispositifs étant temporaires, les AOM ont intérêt à les mobiliser dès maintenant.

3. Hypothèses retenues : kilométrage annuel de référence 65 000 km. Bus électrique (source : Forsee Power, 2026) : coût d'acquisition 460 000 € options de base incluses, infrastructure initiale 40 000 €, consommation 1,05 kWh/km, prix de l'électricité 0,197 €/kWh, coût de maintenance 0,22 €/km ; remplacement de batterie 80 000 € à l'année 13 pour le scénario 20 ans uniquement. Autres motorisations (source : étude CATP 2024) : bus diesel acquisition 293 400 €, gazole 1,833 €/L (mars 2026), maintenance 0,28 €/km ; bus GNV acquisition 310 000 €, GNV 0,160 €/L (indice CNR janvier 2026), maintenance 0,35 €/km ; bus hydrogène acquisition 650 000 €, maintenance 0,43 €/km. Taux d'actualisation et inflation non appliqués.

# Avantages pour la santé publique et le cadre de vie

Les bénéfices du bus électrique dépassent la seule question des émissions de CO<sub>2</sub> pour englober des enjeux de santé publique au sens large.

- **Qualité de l'air :** La suppression des émissions locales de NOx et de particules fines contribue directement à réduire les maladies respiratoires, cardiovasculaires et autres pathologies liées à la pollution atmosphérique, particulièrement prégnantes dans les zones urbaines denses. Pour la qualité de l'air, le passage à l'électrique représente un levier majeur d'amélioration de la santé publique dans les villes.

- **Bruit :** Les bus électriques génèrent moins de nuisances sonores que leurs équivalents thermiques, comme le montre le tableau CATP (65-72,2 dB(A) pour l'électrique contre 72-77 dB(A) pour le diesel). En France, selon l'ARS Auvergne-Rhône-Alpes, environ 7 millions de personnes sont exposées à des niveaux de bruit excédant 65 dB(A) en conditions diurnes, dont les trois quarts sont riverains d'infrastructures de transports terrestres. L'ARS souligne que « l'exposition au bruit des transports a des effets nuisibles sur la santé physique, psychosociale et sur la qualité de vie de la

population », avec des impacts documentés sur le sommeil, les maladies cardiovasculaires et l'apprentissage scolaire.

- **Confort des conducteurs :** L'adoption de bus électriques améliore également les conditions de travail des conducteurs, au-delà du simple renouvellement du parc : réduction des nuisances sonores en cabine, diminution des vibrations et des chocs ressentis, atmosphère de travail moins bruyante. Ces éléments contribuent à la qualité de vie au travail et peuvent jouer un rôle dans l'attractivité des métiers de conduite.

## Une offre européenne et internationale capable de répondre à tous les besoins

L'offre de bus électriques disponible sur le marché est aujourd'hui particulièrement large et mature. Les AOM peuvent s'appuyer sur une concurrence réelle entre constructeurs pour lancer des appels d'offres compétitifs, dans le respect

des règles des marchés publics. Les technologies disponibles couvrent l'ensemble des besoins : bus 100 % batterie, bus à hydrogène, recharge au dépôt, en bout de ligne ou en recharge d'opportunité en ligne.

Les tableaux ci-contre recensent les principaux constructeurs présents sur le marché français et européen, en distinguant les bus électriques à batterie et les bus à hydrogène.

### DU POINT DE VUE DES AOM

#### Pour les AOM, les enseignements de cette section impliquent :

- **Utiliser** les analyses TCO comme base de dialogue avec les élus et les services financiers pour justifier le surcoût à l'achat des bus électriques par rapport au diesel, en valorisant les économies de maintenance et d'énergie sur la durée de vie ;
- **Intégrer** les bénéfices sanitaires (qualité de l'air, bruit, santé des conducteurs) dans les argumentaires politiques et les bilans socio-économiques des projets, en s'appuyant sur les données locales disponibles (Airparif, ARS, ADEME) ;
- **Profiter** de la diversité de l'offre industrielle européenne pour construire des appels d'offres réellement compétitifs, en évitant les spécifications trop restrictives qui limiteraient la mise en concurrence ;
- **Anticiper** la fin progressive des aides publiques dans les plans de financement pluriannuels, en sécurisant dès maintenant les dossiers de subvention et en prévoyant des trajectoires financières réalistes pour les années où les dispositifs de soutien seront réduits ou supprimés ;
- **Veiller** à ce que les TCO soient calculés sur des hypothèses cohérentes et actualisées, en distinguant les coûts certains (achat, infrastructure) des coûts variables (énergie, maintenance) et des hypothèses prospectives (évolution des prix, fiscalité).

## Principaux constructeurs de bus électriques français et européens disponibles sur le marché

CONSTRUCTEUR	ORIGINE	PRÉSENCE SUR LE MARCHÉ FR/EU	OBSERVATIONS
<b>IVECO Bus - Heuliez</b>	France / Italie	Oui	Constructeur historique français, gamme électrique GX337E
<b>Volvo Buses</b>	Suède	Oui	Gamme 7900 Electric, références importantes en Europe
<b>MAN Truck &amp; Bus</b>	Allemagne	Oui	Gamme Lion's City E, acteur majeur
<b>HCI - Karsan</b>	Turquie	Oui	Gamme électrique variée, présence croissante en Europe
<b>Irizar</b>	Espagne	Oui	Gamme i.e electric, références nombreuses en France
<b>Mercedes-Benz / EvoBus</b>	Allemagne	Oui	Gamme eCitaro, acteur majeur du marché européen
<b>Solaris Bus &amp; Coach</b>	Pologne	Oui	Leader européen du bus électrique, gamme Urbino Electric
<b>HESS</b>	Suisse	Oui	Spécialiste des bus articulés et trolleybus électriques
<b>Bolloré</b>	France	Partielle	Présence historique sur le marché français, activité réduite
<b>Otokar</b>	Turquie	Oui	Gamme électrique en développement, présence sur marché EU
<b>SAFRA</b>	France	Oui	Constructeur français, gamme Urbanys électrique et hydrogène
<b>Ebusco</b>	Pays-Bas	Oui	Gamme légère composite, présence significative en France
<b>VDL Bus &amp; Coach</b>	Pays-Bas	Oui	Gamme Citea Electric, acteur historique du marché européen
<b>CaetanoBus</b>	Portugal	Oui	Bus électrique et hydrogène, partenariat Toyota
<b>MCV</b>	Égypte / UK	Oui	Carrossier proposant des versions électriques sur châssis divers
<b>Bozankaya</b>	Turquie	Oui	Gamme électrique en développement, présence sur marché EU
<b>Rampini</b>	Italie	Oui	Spécialiste des minibus électriques urbains
<b>Omnicar</b>	Danemark	Oui	Minibus électriques, niche urbaine et périurbaine
<b>Van Hool</b>	Belgique	Partielle	Constructeur en redressement judiciaire depuis 2024, reprise partielle des actifs par VDL ; l'avenir de la gamme électrique reste à confirmer

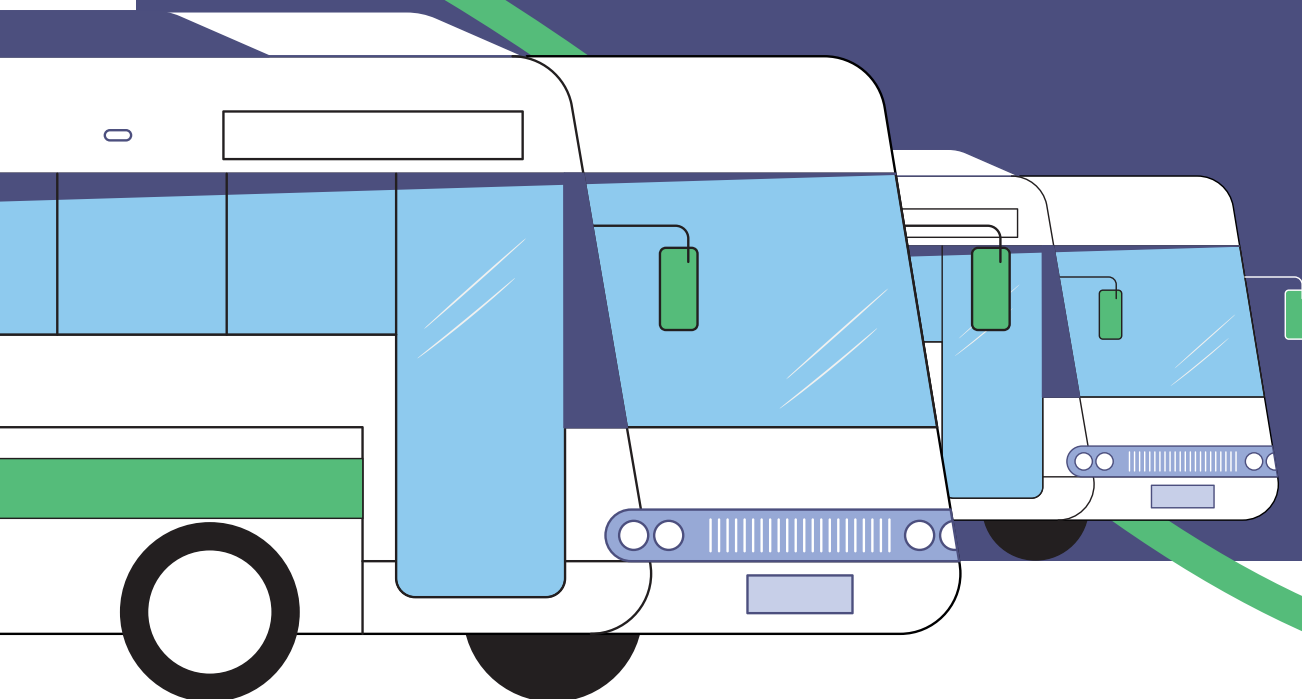
## Bus à hydrogène – constructeurs français et européens présents ou référencés sur le marché français

CONSTRUCTEUR	PAYS
<b>IVECO Bus - Heuliez</b>	France / Italie
<b>SAFRA</b>	France
<b>Solaris - Urbino</b>	Pologne
<b>Wrightbus</b>	Irlande du Nord / Royaume-Uni
<b>Rampini</b>	Italie
<b>Nesobus</b>	France
<b>Mercedes-Benz</b>	Allemagne
<b>HCI - Karsan</b>	Turquie
<b>Otokar</b>	Turquie
<b>CaetanoBus</b>	Portugal
<b>MCV</b>	Égypte / Royaume-Uni

Sur le segment des constructeurs asiatiques, la Chine concentre le plus grand nombre de fabricants et de volumes à l'échelle mondiale (BYD, Yutong, King Long, Higer, Zhongtong, Ankai, Foton, Sunlong, etc.). Si plusieurs d'entre eux sont présents sur le marché européen, les règles des marchés publics, les exigences de contenu local et les récents débats sur les droits de douane européens encadrent leur accès au marché français.

# 3.

## COMMENT RÉUSSIR L'ÉLECTRIFICATION DE SA FLOTTE DE BUS ?



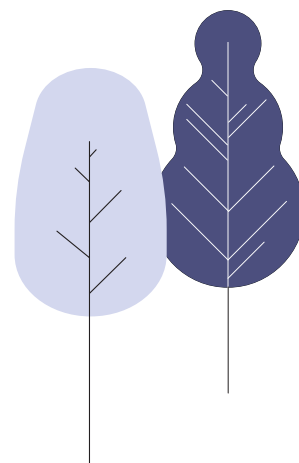
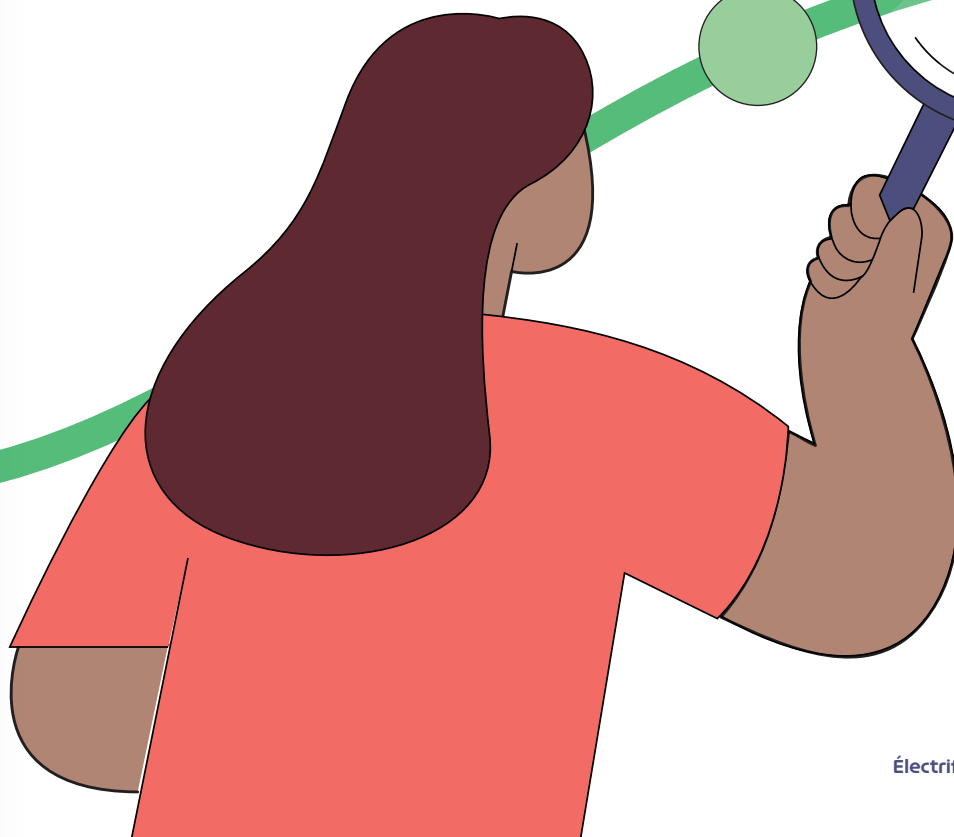
# ÉTAPE 1 : PENSER VOTRE PROJET

## Pourquoi électrifier sa flotte ?

Avant d'engager toute démarche technique ou financière, il est utile de clarifier les motivations et objectifs qui sous-tendent le projet. Plusieurs raisons peuvent se combiner :

- Respecter les obligations réglementaires : ZFE-m, quotas de véhicules à faibles et très faibles émissions, obligations de reporting issues de la LOM et de la directive « véhicules propres » ;
- Réduire l'impact environnemental et sanitaire : amélioration de la qualité de l'air, réduction des émissions de GES, diminution des nuisances sonores pour les riverains ;
- Améliorer le service : confort des conducteurs et des passagers, image du réseau, attractivité de l'offre de transport ;
- Maîtriser les coûts à long terme : stabilité du coût de l'énergie, réduction des charges de maintenance, optimisation du TCO sur la durée de vie des véhicules ;
- Répondre aux attentes des élus et des usagers : engagement climatique territorial, cohérence avec les plans locaux de mobilité durable (PDM, PCAET).

Ces motivations ne sont pas exclusives les unes des autres. Les clarifier dès le départ permet de hiérarchiser les priorités, de choisir les bons indicateurs de suivi et de construire un argumentaire solide auprès des élus et des partenaires financiers.



# Quelles ressources mobiliser ?

- Un chef de projet dédié, chargé de coordonner les différentes parties prenantes, de suivre le planning et de gérer les interfaces entre les volets techniques, financiers et contractuels ;
- Les équipes techniques (exploitation, maintenance, infrastructures) pour définir les besoins opérationnels, contribuer au dimensionnement et préparer la transition des pratiques de maintenance ;
- Les services administratifs et financiers pour le suivi budgétaire, la mobilisation des subventions, la rédaction des marchés publics et la gestion des contrats ;
- Un recours à l'externalisation adapté à la taille de la structure : assistance à maîtrise d'ouvrage (AMO), bureau d'études, cabinet juridique spécialisé.

## Associer les acteurs externes dès le départ

L'un des enseignements majeurs des projets déjà réalisés est la nécessité d'associer très tôt les acteurs externes, bien avant la rédaction des cahiers des charges. Les principaux partenaires à contacter dès la phase amont sont :

- Les constructeurs de bus : accompagnement dans le choix des véhicules, dimensionnement des batteries, calcul de l'autonomie selon les lignes ;
- Les fabricants de bornes : accompagnement dans la réponse aux appels d'offre publics et privés ;
- Les installateurs et opérateurs d'infrastructures de recharge : dimensionnement, installation, supervision, accompagnement à la mise en service ;
- Les constructeurs de bornes de recharge électrique : partie maintenance, expérience utilisateur, notion de souveraineté intimement liée au taux de disponibilité ;
- Le propriétaire du site (si locataire) : accord préalable aux travaux, prescriptions spécifiques, éventuels permis de construire ou autorisations administratives ;
- Les assureurs : à associer très tôt pour sécuriser la couverture du dépôt, anticiper les exigences techniques liées aux batteries et aux installations de charge ;
- Le gestionnaire de réseau de distribution (GRD) : intégrer en amont les besoins en puissance et les contraintes de raccordement, dont les échéances peuvent impacter le calendrier des projets de grande puissance ;
- Le fournisseur d'énergie : négocier les tarifs, adapter l'abonnement à la hausse de consommation prévisible, explorer les offres d'électricité verte.

**Point de vigilance :** il n'est pas nécessaire de connaître tous ses besoins techniques dès le départ. Consulter ces acteurs tôt dans le processus permet au contraire d'affiner les besoins et d'anticiper les contraintes techniques, financières et administratives avant qu'elles ne deviennent des obstacles.

### DU POINT DE VUE DES AOM

- **Formaliser** dès le départ une feuille de route interne précisant les objectifs, le calendrier cible, les ressources allouées et les indicateurs de suivi, pour donner de la visibilité aux équipes et aux partenaires ;
- **Ne pas sous-estimer** le besoin de pilotage interne : les projets d'électrification mobilisent durablement des ressources humaines et organisationnelles, souvent au-delà de ce qui est anticipé ;
- **Initier** le dialogue avec le GRD dès les premières réflexions afin d'intégrer les délais de raccordement dans la planification globale du projet ;
- **Anticiper** les implications contractuelles : durée des DSP, clauses de renouvellement, partage des risques liés aux batteries et aux infrastructures.

### EN PRATIQUE - CHECKLIST ÉTAPE 1



- ✓ Les motivations et objectifs du projet sont-ils clarifiés et partagés avec les élus ?
- ✓ Un chef de projet a-t-il été identifié ?
- ✓ Les ressources internes disponibles ont-elles été cartographiées ?
- ✓ Un premier contact a-t-il été pris avec les constructeurs, les installateurs, le GRD, l'assureur et le fournisseur d'énergie ?

# ÉTAPE 2 : DIMENSIONNER VOTRE PROJET

**L'objectif de cette étape est de définir les besoins réels de la flotte et d'anticiper les infrastructures nécessaires pour éviter surcoûts et retards lors du déploiement.**

## Définir ses besoins

La conversion peut être progressive, au fil des renouvellements de bus, ou totale sur un périmètre donné. Dans tous les cas, il est recommandé d'élaborer dès le départ un plan global d'acquisition et de déploiement, afin d'anticiper

l'implantation des bornes, les besoins en raccordement électrique et l'évolution future de la flotte.

Les critères clés à analyser pour chaque ligne ou groupe de lignes sont les suivants :

CRITÈRE	ÉLÉMENTS À ANALYSER
Trajets	Itinéraires, distances parcourues, topographie, conditions météorologiques
Utilisation	Fréquence des rotations, taux d'occupation, amplitude horaire
Stationnement	Temps disponibles au dépôt, inter-services, terminus
Perspectives	Évolution des flux passagers, nouvelles lignes, politiques de mobilité

## Dimensionner l'infrastructure de recharge

Le dimensionnement des infrastructures de recharge détermine la puissance requise, le nombre de points de charge et le mode de recharge adapté (lente, rapide, pantographe). Les éléments clés à intégrer dans le calcul sont :

- La consommation énergétique des véhicules (y compris chauffage et climatisation selon les saisons).
- La capacité utile des batteries et leur état de charge en fin de service.
- Les fenêtres de recharge disponibles au dépôt (nuit, inter-services, terminus).
- La puissance maximale admissible par les véhicules.
- La puissance disponible sur le site et les capacités de raccordement au réseau.

**Point de vigilance :** Le raccordement au réseau électrique nécessite une anticipation suffisante, notamment en fonction de la zone et de la puissance demandée. Il est recommandé d'engager les échanges avec le GRD dès le lancement du projet, indépendamment de la validation des choix techniques.



# Anticiper l'évolution future

Un projet d'électrification bien dimensionné doit intégrer dès l'origine une marge de croissance, afin d'éviter de redimensionner les infrastructures à chaque extension de flotte :

- Travailler sur des scénarios d'exploitation réalistes (actuel et hypothèses de croissance à 5 et 10 ans).
- Prévoir des fourreaux, tranchées techniques et réservations pour de futures bornes supplémentaires ou un stockage d'énergie complémentaire.
- Intégrer des solutions flexibles : smart charging, mutualisation des bornes, mix recharge dépôt et recharge en ligne.

## Focus – Station hydrogène

Dans le cas d'une stratégie incluant des bus à hydrogène, le dimensionnement de l'approvisionnement et de la distribution d'hydrogène constitue un enjeu spécifique. Plusieurs schémas sont possibles :

- Station dédiée avec production sur place : à réserver aux flottes de plus de 50 bus (environ 1 t/jour).
- Station dédiée avec apport d'H<sub>2</sub> vert externe : possible dès 10 bus (environ 200 kg/jour).
- Station partagée : idéale pour répartir le risque financier avec d'autres acteurs (collectivités, entreprises, stations publiques), selon les opportunités locales.
- France Hydrogène, en partenariat avec la FNCCR, a publié en juin 2024 un guide en 10 étapes pour le déploiement de stations hydrogène dans les territoires, couvrant les phases de faisabilité, d'avant-projet, d'autorisation et de mise en exploitation.

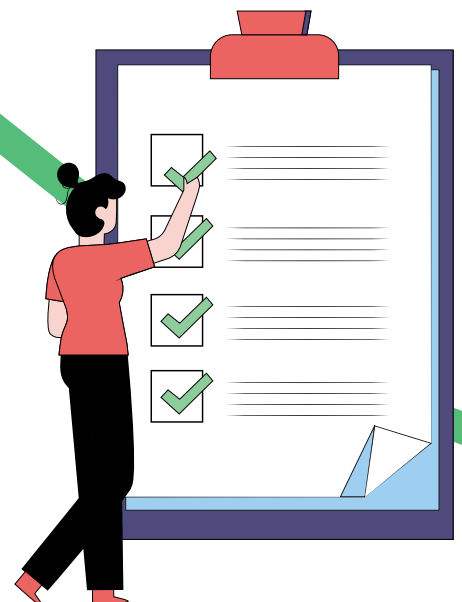
### DU POINT DE VUE DES AOM

- **Réaliser** une analyse ligne par ligne avant de définir le mix technologique et le dimensionnement des infrastructures, pour éviter le surdimensionnement coûteux ou au contraire les insuffisances de puissance ;
- **Intégrer** le dimensionnement des infrastructures dans les documents de planification (PDM, schéma directeur des dépôts) pour sécuriser le foncier et les raccordements sur le long terme ;
- **Prévoir** explicitement dans les marchés publics et DSP les obligations de dimensionnement et d'évolutivité des infrastructures, en évitant de laisser cette responsabilité entièrement à l'exploitant sans cadrage préalable ;
- **Anticiper** les délais de raccordement dans les calendriers de renouvellement de flotte : un bus commandé sans infrastructure raccordée est un bus qui ne peut pas circuler.

### EN PRATIQUE - CHECKLIST ÉTAPE 2



- ✓ Les itinéraires et consommations énergétiques par ligne ont-ils été cartographiés ?
- ✓ Les fenêtres de recharge disponibles au dépôt ont-elles été identifiées ?
- ✓ La puissance maximale disponible sur le site est-elle connue ?
- ✓ Le GRD a-t-il été contacté suffisamment en amont du projet pour anticiper le raccordement ?
- ✓ Une marge d'évolution future de la flotte a-t-elle été intégrée dans le dimensionnement ?



# ÉTAPE 3 : ÉLABORER LES ASPECTS TECHNIQUES

**L**a rédaction du cahier des charges techniques est une étape déterminante pour la réussite du projet. Elle traduit les besoins de l'exploitant, les contraintes du site et les

prescriptions réglementaires applicables, avant toute consultation des prestataires. On distingue deux volets principaux : le génie civil et le génie électrique.

## Génie civil

Le volet génie civil définit les spécifications techniques liées à l'aménagement du site et à l'implantation des équipements. Il doit être établi sur la base d'une analyse de sol et d'un diagnostic d'infrastructure réalisés par un bureau d'études spécialisé.

**Les points essentiels à intégrer sont :**

- Typologie du sol et structure de la voirie : nature des couches (terre végétale, grave-bitume, enrobé chaud), portance, perméabilité ;
- Résistance et capacité portante : les bus électriques sont souvent plus lourds que leurs équivalents diesel

du fait des batteries embarquées ; les voiries et aires de stationnement doivent être dimensionnées en conséquence, en anticipant une augmentation future des flux ;

- Gestion des eaux et réseaux enterrés : vérification préalable de la présence d'eaux souterraines et de réseaux existants avant tout terrassement ;
- Protection des équipements : mise en œuvre de dispositifs physiques (bordures, butées, plots de protection) pour sécuriser les bornes et armoires électriques contre les chocs ;

- Évolutivité du site : prévoir des fourreaux, tranchées techniques et réservations pour de futures extensions (bornes supplémentaires, stockage d'énergie), idéalement raccordées dès la conception au tableau général basse tension (TGBT).

Références utiles : CEREMA (2023), Guide technique pour l'aménagement des dépôts de bus électriques ; NF P 98-332 (résistance des chaussées) ; ADEME (2022), Retour d'expérience sur l'électrification des dépôts de transport collectif.

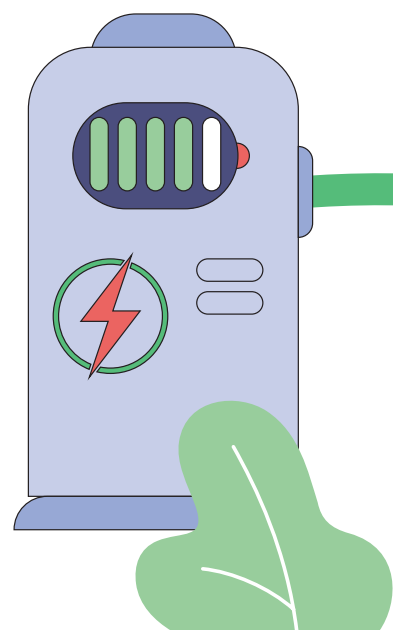
## Génie électrique

Le volet génie électrique précise l'architecture de l'installation électrique, les besoins énergétiques et les caractéristiques des bornes à installer.

**Analyse du besoin électrique :**

- Évaluer la puissance totale requise selon le nombre de bus et leur profil de recharge (nocturne lente ou rapide en opportunité) ;

- Identifier les travaux d'adaptation au réseau nécessaires (création, renforcement, extension de réseaux, raccordement d'un nouveau poste de transformation HTA/BT voire des travaux nécessaires au poste source selon la puissance demandée) ;
- Consulter le GRD (Enedis ou gestionnaire local) dès la phase d'étude pour définir le point de raccordement et la capacité disponible sur le site.



## Caractéristiques des bornes

PARAMÈTRE	ÉLÉMENTS À PRÉCISER DANS LE CCTP
Type de montage	Murale (VL), sur socle (PL), ou encastrée au sol <sup>1</sup>
Type de courant	AC (chargeur embarqué) ou DC (conversion dans la borne)
Puissance unitaire	Selon profil de recharge et fenêtres disponibles
Tension de sortie	DC 500V (VUL/utilitaires) ou DC 600-800V (bus et poids lourds)
Connectique	CCS Type 2 (norme EN 62196-3) pour la recharge manuelle, standard européen de référence. Pantographe OppCharge pour la recharge d'opportunité automatisée. <sup>2</sup>
Interopérabilité	Compatibilité OCPP 1.6 ou 2.0.1, ISO/IEC 15118

# ÉTAPE 4 : FINANCER VOTRE PROJET

## Aides/dispositifs fiscaux à l'acquisition de véhicules

Plusieurs dispositifs sont mobilisables pour réduire le surcoût à l'achat des bus électriques par rapport aux équivalents thermiques.

- **Suramortissement fiscal**

Dispositif fiscal permettant d'amortir fiscalement un surcoût lié à l'électrification (part additionnelle verte ou carbone). Il permet de réduire l'assiette fiscale de

l'investissement et constitue un levier complémentaire aux subventions directes.

- **Certificats d'économies d'énergie (CEE) - fiche TRA-EQ-128**

Fiche CEE spécifique aux autobus électriques et rétrofit, permettant d'obtenir une subvention via le mécanisme des certificats d'économies d'énergie, calculée

en fonction des économies d'énergie réalisées par rapport à un véhicule thermique de référence. Pour 2026, la fiche est bonifiée (coefficient multiplicateur x4), ce qui augmente significativement la valeur monétaire délivrée aux bénéficiaires.

- **Solutions de financement sur mesure - Vehicle-as-a-Service / E-Mobility-as-a-Service**

Modèles de location opérationnelle, crédit-bail ou leasing intégrant le coût des batteries, de la maintenance et du remplacement en fin de garantie. Ils permettent d'externaliser les risques liés à la dépréciation des batteries ou à la durée de vie des systèmes énergétiques. Ces dispositifs sont proposés par certains constructeurs, opérateurs financiers ou plateformes mobilité durable.

### Montants indicatifs CEE TRA-EQ-128 (2026)

TRA-EQ-128	AIDE
<b>Autobus rétrofit</b>	43 000€ - 49 230€
<b>Autobus standard</b>	65 820€ - 75 220€
<b>Autobus grande capacité</b>	92 150€ - 105 310€
<b>Pour une agglomération &gt; 250 000 habitants</b>	
<b>Autobus rétrofit</b>	21 540€ - 24 610€
<b>Autobus standard</b>	32 910€ - 37 610€
<b>Autobus grande capacité</b>	46 070€ - 52 660€

1. Les systèmes d'alimentation encastrés suppriment l'emprise au sol des bornes et les risques liés aux câbles traînants, fluidifiant la circulation des bus et le nettoyage des zones techniques. Particulièrement adaptés aux dépôts contraints en espace.

2. Si le CCS Type 2 reste le standard de référence pour la recharge manuelle au dépôt, les systèmes de connexion automatique conductrice (bras robotisés, connecteurs auto-guidés, systèmes encastrés à connexion automatique) représentent une évolution en cours de déploiement pour l'exploitation intensive.

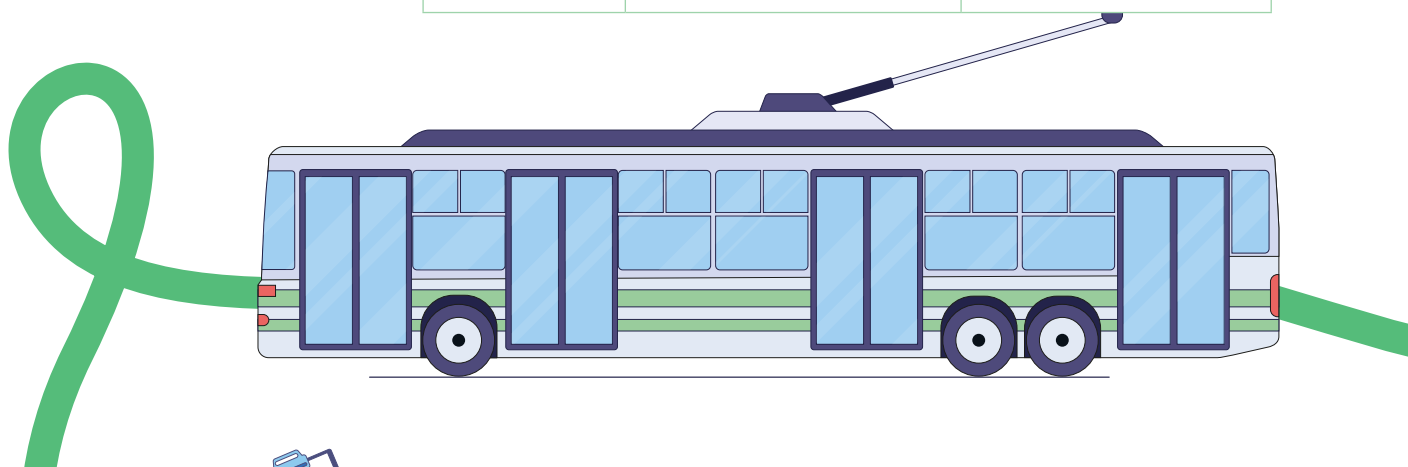
## Financement des infrastructures de recharge

Pour les stations de recharge associées aux bus électriques (dépôts ou lignes), plusieurs options ou combinaisons sont possibles :

### Point de vigilance :

les aides publiques disponibles aujourd'hui sont des dispositifs d'amorçage temporaires. Elles sont vouées à diminuer puis à disparaître dans les prochaines années, à mesure que la compétitivité des technologies électriques s'améliore. Il est donc dans l'intérêt des AOM d'anticiper les investissements tant que les conditions financières restent favorables, et d'intégrer dans leurs plans financiers pluriannuels des trajectoires réalistes pour les années où ces dispositifs seront réduits ou supprimés.

MODE DE FINANCEMENT	DESCRIPTION	USAGE RECOMMANDÉ
<b>Opérateur d'infrastructure</b>	L'investisseur ou fournisseur d'infrastructure prend en charge une part ou la totalité de l'investissement, en échange d'un contrat de service ou d'accès à l'usage.	Dépôts importants, lignes structurantes, projets nécessitant des puissances élevées où l'investissement initial est significatif.
<b>Crédit-bail / leasing</b>	Location financière de la borne ou station de recharge, avec amortissement sur durée.	Structures souhaitant limiter l'investissement initial ou tester une solution avant engagement définitif. Adapté aux AOM de taille moyenne.
<b>Appels à projets territoriaux et nationaux</b>	Cofinancement dans le cadre d'appels à projets régionaux ou nationaux (ADEME, Banque des Territoires, fonds européens FEDER/MIE) ou de conventions d'occupation avec les collectivités propriétaires des sites.	Projets structurants à dimension territoriale, notamment dans les territoires ruraux ou périurbains où les coûts de raccordement sont élevés.



### EN PRATIQUE - CHECKLIST ÉTAPE 4



- ✓ Les dispositifs CEE (TRA-EQ-128) ont-ils été intégrés dans le plan de financement ?
- ✓ Les options de leasing ou Vehicle-as-a-Service ont-elles été comparées à l'achat direct ?
- ✓ Les sources de financement européen disponibles ont-elles été identifiées ?
- ✓ Le calendrier de dépôt des dossiers de subvention a-t-il été intégré au planning projet ?

### DU POINT DE VUE DES AOM

- **Construire** un plan de financement pluriannuel combinant les différentes sources disponibles (CEE, fonds européens, leasing) plutôt que de s'appuyer sur un seul dispositif, pour sécuriser la trajectoire financière même en cas de modification des règles d'éligibilité ;
- **Intégrer** systématiquement les aides dans le calcul du TCO pour objectiver la comparaison entre technologies et justifier les choix d'investissement auprès des élus et des services financiers ;
- **Anticiper** la fin progressive des dispositifs de soutien dans les plans pluriannuels d'investissement, en ne dimensionnant pas les projets futurs sur l'hypothèse que les niveaux d'aide actuels seront maintenus ;
- **Veiller** aux délais de traitement des dossiers de subvention, qui peuvent être longs, et les synchroniser avec les calendriers d'acquisition et de déploiement.

# ÉTAPE 5 : RÉUSSIR LA PHASE DE DÉPLOIEMENT, L'EXPLOITATION ET L'ENTRETIEN

## La phase de déploiement

Une fois le cadre du projet défini, la phase de déploiement consiste à mettre en œuvre concrètement les décisions prises lors des étapes précédentes :

- **Achat et commande des véhicules** selon le nombre et les caractéristiques définis à l'étape 2. Les délais de livraison des bus électriques peuvent être significatifs (souvent 12 à 18 mois), et doivent être anticipés dans le planning global ;
- **Achat et commande des bornes** selon la typologie, le dimensionnement et le type de recharge choisis ;
- **Lancement des travaux** de génie civil et électrique, dont la durée et l'invasivité dépendent de l'état du dépôt existant et de l'ampleur des modifications nécessaires ;
- **Formation des équipes**, étape souvent sous-estimée mais déterminante pour la réussite de la transition. La bonne maîtrise des véhicules électriques, des infrastructures de recharge et des procédures de sécurité conditionne directement la disponibilité des bus, la durée de vie des batteries et l'atteinte d'un TCO optimal.

## Exploitation et gestion des aléas

- Pour l'exploitation quotidienne et la gestion des aléas, les contrats avec les constructeurs de bus et les opérateurs de bornes de recharge prévoient des niveaux de service garantis (disponibilité, délais d'intervention, assistance technique). Le dépannage doit intervenir rapidement pour garantir la continuité du service.
- Les dépôts de bus électriques peuvent également être équipés de panneaux photovoltaïques ou de petites éoliennes, avec un système d'autoconsommation permettant de couvrir une partie des besoins en énergie du site et de réduire la facture électrique globale.



# Fin de vie des véhicules et des batteries

La gestion de fin de vie des bus électriques et de leurs batteries constitue un enjeu croissant, à la fois environnemental et industriel :

- En fin de première vie dans un bus (8 à 15 ans selon les technologies), la batterie dispose encore d'environ 80% de ses capacités. Le bus peut être réaffecté à une ligne moins exigeante en autonomie (première vie bis), prolongeant ainsi sa durée d'usage utile ;
- Les batteries en fin de première vie peuvent ensuite être orientées vers des usages de stockage stationnaire (couplage photovoltaïque, effacement de pointe réseau), constituant une seconde vie à forte valeur économique et environnementale ;

- En fin de seconde vie, les batteries sont collectées et recyclées. Aujourd'hui, 85% de la masse d'une batterie est valorisée en recyclage, avec jusqu'à 95% de récupération pour certains métaux critiques, via des filières spécialisées (SNAM, Veolia, Blue Solutions, etc.).

La massification des flottes électriques constitue un enjeu de souveraineté industrielle européen : les matériaux composant les batteries (lithium, cobalt, nickel, manganèse) ne sont pas produits en Europe, et la maîtrise d'une économie circulaire sur ces matériaux est une priorité stratégique. Les filières de recyclage et de seconde vie émergent et se structurent progressivement, mais nécessitent un gisement suffisant pour se déployer à grande échelle.



## EN PRATIQUE - CHECKLIST ÉTAPE 5



- ✓ Les délais de livraison des bus ont-ils été intégrés dans le planning global ?
- ✓ Un plan de formation des équipes (conducteurs, maintenance, supervision) a-t-il été élaboré ?
- ✓ Les contrats de maintenance et de supervision des bornes prévoient-ils des niveaux de service adaptés à l'exploitation ?
- ✓ Les options de seconde vie et de recyclage des batteries ont-elles été intégrées dans les contrats avec les constructeurs ?
- ✓ Des réservations pour l'installation de panneaux photovoltaïques ou de stockage ont-elles été prévues sur le site ?

## DU POINT DE VUE DES AOM

- **Intégrer** la formation des équipes comme un investissement à part entière dans le budget du projet, au même titre que les véhicules et les infrastructures : un conducteur ou un agent de maintenance bien formé contribue directement à la durée de vie des batteries et à la disponibilité des bus ;
- **Anticiper** les contrats de fin de vie des batteries dès l'achat des véhicules, en négociant avec les constructeurs les conditions de reprise, de seconde vie et de recyclage, pour éviter de se retrouver sans solution à l'échéance ;
- **Envisager** l'installation de panneaux photovoltaïques sur les dépôts comme un levier complémentaire de réduction des coûts énergétiques, en cohérence avec les objectifs de transition énergétique du territoire ;
- **Mettre en place** des indicateurs de suivi opérationnels (disponibilité des bus, consommation énergétique, coûts de maintenance, émissions évitées) pour documenter les bénéfices de la transition et ajuster les choix en cours d'exploitation.





**Avere**

FRANCE