

Le bus : première conquête de l'électromobilité

Revue de la compétitivité et du déploiement du bus électrique en Europe à horizon 2025



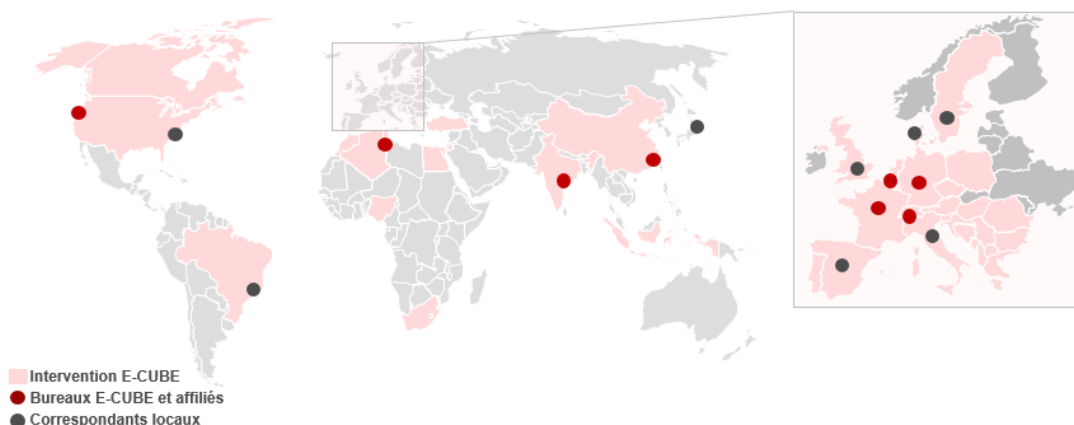
E-CUBE Strategy Consultants est un cabinet de conseil de Direction Générale exclusivement dédié aux enjeux énergétiques et environnementaux. Nous combinons les atouts de proximité, réactivité et flexibilité d'une petite équipe avec le plus haut niveau d'excellence et d'expérience d'une équipe internationale

Nos trois domaines d'expertise :

- **Energie et Environnement** : Accompagner les énergéticiens (électriciens et gaziers, compagnies pétrolières, acteurs des filières Energies Renouvelables) dans l'anticipation et la prise en compte de l'évolution de leur environnement marché, réglementaire, concurrentiel et technologique
- **Mobilité** : Accompagner les acteurs de l'automobile, du ferroviaire, du transport aérien, du shipping et de la logistique dans le cadre de leurs projets stratégiques (Corporate, M&A), réglementaires et opérationnels
- **Infrastructures** : Conduire des projets de stratégie de croissance ou d'amélioration de la performance pour des gestionnaires et opérateurs d'infrastructures

E-CUBE Strategy Consultants accompagne ses clients sur des problématiques globales à partir de ses bureaux et affiliés, ainsi que de ses correspondants locaux.

Pour plus d'informations, veuillez visiter www.e-cube.com



Paris (France)
 E CUBE Strategy Consultants
 350, rue Saint Honoré
 75001 Paris

San Francisco (USA)
 Menlo Energy Economics
 1925 Nero Ct
 Walnut Creek, CA 94598

Brussels (Belgium)
 E CUBE Strategy Consultants
 Rue des Champs 64 bte 14
 B-1040 Bruxelles

Tunis (Tunisia)
 International Energy Consulting
 4 rue Bir Essaboa, Cité Ennasr 2
 2037 - Ariana - Tunis

Lausanne (Switzerland)
 E CUBE Strategy Consultants
 20 rue du Docteur César Roux
 1005 Lausanne VD

Chennai (India)
 E CUBE Strategy Consultants
 Plot 64, 2nd link street, Nehru Nagar
 O.M. Road, Thiruvanniyur, Chennai

Munchen (Germany)
 Bozem | consulting associates | munich
 Kunstmann Straße 5
 80997 Munchen

Hong Kong (China)
 E CUBE Strategy Consultants
 Unit 1305, Tower II, Metroplaza
 223 Hing Fong Road, Hong Kong

New York - Sao Paulo - Londres - Madrid - Copenhagen - Milan - Stockholm - Tokyo

Le bus : première conquête de l'électromobilité

Revue de la compétitivité et du déploiement du bus électrique en Europe à horizon 2025

Résumé

Composé de ~26 000 véhicules, le parc français de bus urbains, roule aujourd'hui quasi intégralement au diesel et au GNV (respectivement 83% et 14% du parc). Alors que les flottes se font de plus en plus propres avec le développement de la motorisation hybride diesel-électrique ou du biogaz carburant, un mouvement majeur vers l'électromobilité semble aujourd'hui voir le jour en Europe : le déploiement de bus standards 100% électriques¹.

En 2014, la RATP a dévoilé son plan « Bus2025 » visant à atteindre un parc composé à 80% de bus électriques en 2025. Opérateur de la plus grande flotte européenne de bus urbains, la décision de la régie a lancé la filière européenne du bus électrique. Depuis, de nombreuses autres villes françaises et européennes annoncent le déploiement de l'électrique sur leurs réseaux, que ce soit des projets de ligne spécifique ou des objectifs globaux de renouvellement de leur flotte.

Au-delà de l'adaptabilité de la motorisation électrique au bus urbain, dont le parcours et l'autonomie requise sont connus à l'avance, trois facteurs peuvent expliquer cet engouement pour le bus électrique : les progrès technologiques et la réduction des coûts des batteries, la volonté politique de certaines villes de verdir radicalement leurs transports publics, et enfin une réglementation des émissions de plus en plus stricte : en France, la Loi de Transition Energétique et sur la Croissance Verte (LTECV) impose un minimum de 50% des renouvellements des flottes avec des motorisations à faibles émissions à partir de 2020, puis de 100% à partir de 2025.

En 2020, la demande française en bus électriques pourrait atteindre 800 véhicules annuellement, soit près de la moitié des renouvellements annuels de bus. C'est en Ile-de-France que la demande serait la plus forte, portée par la volonté politique du STIF (au moins 70% des véhicules achetés). A l'échelle de l'Europe, c'est un marché de ~2 600 bus par an en 2020 qui pourrait se développer, sous l'impulsion d'autres villes majeures comme Londres ou Amsterdam. Il est à noter que l'Europe ne sera pas le marché « *early adopter* ». **Déjà 80 000 bus électriques circulaient en Chine en 2014.**

La demande européenne se divisera en deux grands types de bus électriques : les bus à recharge lente la nuit au dépôt, et les bus à recharge rapide en journée aux arrêts (« biberonnage ») ou aux terminus. Ces modes de fonctionnement font appel à des technologies de batteries et de recharge bien différentes : grosses batteries « d'énergie » dans le premier cas, petites batteries « de puissance » ou supercondensateurs dans le deuxième avec mise en place de technologies de recharge automatisées le long de la ligne de bus. Une segmentation de ces technologies par densité urbaine est attendue, la recharge lente étant plus adaptée aux « hypercentres » urbains et la recharge rapide à des lignes de type BHNS² s'étendant sur de plus longues distances. Paris et Londres semblent d'ailleurs avoir opté pour de la recharge lente tandis que des projets de biberonnage sur certaines lignes BHNS spécifiques sont en cours à Amiens, Nantes ou Bayonne.

1- Dans l'ensemble du document, le terme de « bus électrique » fait référence au bus à motorisation 100% électrique et exclut donc les bus hybrides.

2- Les bus à haut niveau de service (Bus Rapid Transit en anglais) sont des bus circulant au moins partiellement en site propre et avec une vitesse et une fréquence plus élevées que la moyenne. Il s'agit souvent de bus articulés.

Les bus électriques sont aujourd'hui principalement proposés par des constructeurs précurseurs de taille moyenne comme Solaris, Irizar ou VDL **ainsi que par les acteurs spécialistes de la mobilité électrique** comme le groupe Bolloré, initialement fabricant de batteries, qui transforment le paysage de l'offre de bus urbain. Les grands acteurs chinois, forts de leur expérience sur leur marché domestique, essaient également de prendre position en Europe via des partenariats avec des constructeurs locaux. Bien qu'en retard par rapport à ces précédents acteurs, les grands constructeurs européens (Volvo, Iveco, Daimler...) engagent eux aussi la transition vers l'électrique, ce qui devrait permettre de subvenir à la demande attendue d'ici 2020.

Sur sa durée de vie, malgré un coût de l'énergie trois fois moindre, **un bus électrique reste aujourd'hui 15% à 25% plus cher qu'un bus diesel**, surcoût principalement dû au besoin en batteries ou en infrastructures de recharge qui double les investissements initiaux nécessaires.

Cependant, la motorisation électrique possède un bilan environnemental extrêmement favorable : 6 fois moins émettrice de CO₂ sur son cycle de vie que les motorisations thermiques, elle n'émet aucun polluant sur son parcours et limite également la pollution sonore. La monétisation de ces bénéfices environnementaux égalise le TCO (*Total Cost of Ownership*) du bus électrique avec celui du diesel Euro V – EEV, et la différence restante avec le diesel Euro VI est faible : si la volonté politique actuelle de réduire l'impact du transport urbain sur l'environnement persiste, ces calculs de coût permettent d'envisager un déploiement conséquent du bus électrique au sein des flottes européennes dans les prochaines années.

Propriété intellectuelle et limites de responsabilité :

- Cette étude est publiée par, et reste sous © 2016 Copyright d'E-CUBE Strategy Consultants SAS, 350 rue St Honoré, 75001 Paris, France (ci-après dénommé « E-CUBE Strategy Consultants »)
- Une diffusion est autorisée sous réserve que le contenu diffusé soit accompagné des présentes mentions et du Copyright d'E-CUBE Strategy Consultants
- Cette étude repose en partie sur des informations publiques, diffusées par la(es) société(s) concernée(s) ou par des tiers. Ces informations n'ont pas été vérifiées ni auditées de manière indépendante par E-CUBE Strategy Consultants
- Les éléments économiques et financiers présentés dans ce document intègrent les conditions économiques, monétaires, de marché ou autres prévalant en mai 2016 et ne préjugent pas des ajustements nécessaires si ces conditions venaient à se modifier
- Sans mention contraire, E-CUBE Strategy Consultants n'a aucune obligation de mise à jour de ce document

1. La demande croissante pour le bus électrique est poussée par les progrès technologiques, la réglementation et la volonté politique de quelques villes pionnières : elle pourrait atteindre ~800 bus par an en France à partir de 2020 et jusqu'à 3 fois plus en Europe

En France, les bus urbains sont opérés soit par des régies soit par des entreprises privées (Transdev, Keolis) via des délégations de service public. Composé de ~26 000 bus dont ~1 800 sont renouvelés chaque année, le parc de véhicules français est aujourd'hui détenu à 87% par les collectivités via leurs autorités organisatrices des transports. Bien que l'hybride diesel-électrique et le biogaz se développent, le parc est aujourd'hui largement dominé par les motorisations diesel et GNV (respectivement 83% et 14% du parc).

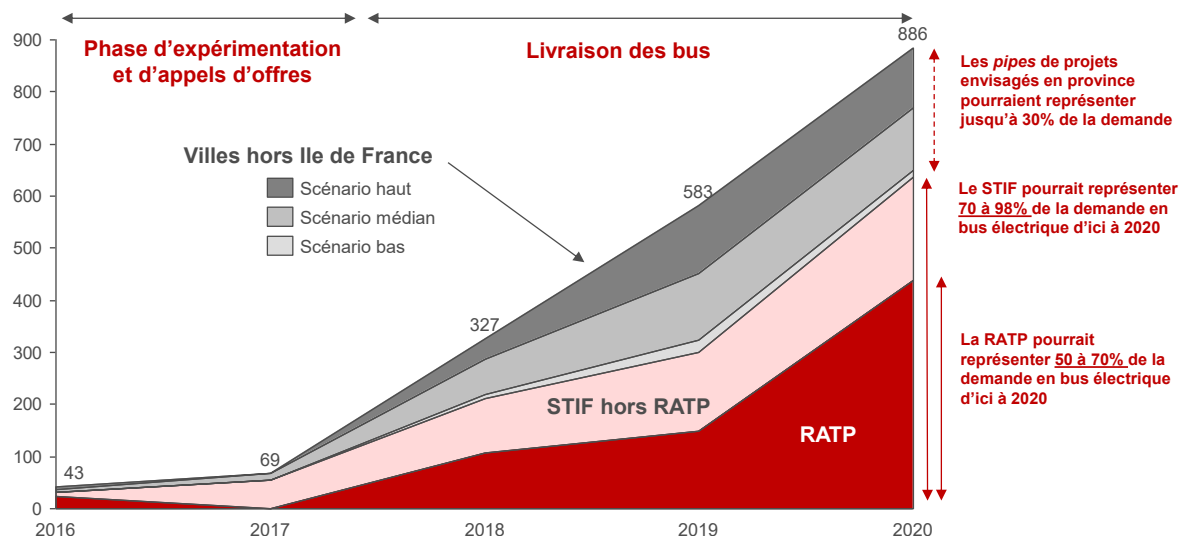
Jusqu'à présent, le bus électrique n'était développé que sur le segment des mini ou midibus en Europe, le prix et les performances des batteries ne permettant pas, jusqu'à présent, au bus électrique standard (12 mètres) d'être une alternative viable. En France, il existe plus d'une **centaine de mini ou midibus⁴ électriques** circulant actuellement, le plus souvent sous forme de navette sur de courtes lignes de centre-ville.

Le bus électrique pourrait rapidement gagner du terrain d'ici 2025 : grâce aux **progrès dans le domaine des batteries et des infrastructures**

de recharge, des solutions techniques « zéro émissions » apparaissent et séduisent les collectivités, de plus en plus attachées à **verdir leurs systèmes de transport urbain** pour répondre aux attentes de leurs habitants. Par ailleurs, au-delà de l'image positive du bus électrique, les villes et opérateurs sont contraints d'engager une **transition requise par les pouvoirs publics** : en France, la LTECV définit un pourcentage minimum de 50% de bus « à faibles émissions » dans toute acquisition ou tout renouvellement à partir de 2020 et de 100% à partir de 2025. Le décret précisant les motorisations acceptées comme « à faibles émissions » est actuellement en discussion.

Après le lancement d'appels d'offres prévus sur 2016-2017 pour une à deux lignes spécifiques dans de nombreuses villes, des livraisons significatives de bus électriques sont envisagées à partir de 2018 et pourraient atteindre **800 bus par an en 2020**, soit près de la **moitié des renouvellements annuels de bus**. La demande en bus électrique pourrait ensuite se stabiliser entre 800 et 1300 bus par an sur la période 2021-2025.

Illustration 1 : demande annuelle en autobus électriques sur 2016-2025 pour les principales villes françaises [nombre de bus livrés annuellement]



Sources : revue de presse, entretiens, analyse E-CUBE Strategy Consultants

4- On distingue plusieurs catégories de bus urbains : les mini et midibus (de longueur inférieure à 12 mètres), les bus standards de 12 mètres, et les bus articulés (longueur supérieure à 12 mètres avec plusieurs parties rigides pouvant pivoter les uns par rapport aux autres).

La majeure partie de cette demande proviendra de la RATP : le plus grand opérateur de bus européen (avec ~4500 véhicules), a lancé en 2014 son plan « **Bus2025** », qui fixe un objectif de 80% de la flotte en motorisation électrique et 20% au biogaz à horizon 2025, avec des paliers progressifs sur 2015-2020 (notamment 15% d'électrique en 2020). L'opérateur teste les modèles de différents constructeurs et a déjà retenu le BlueBus 12m de Bolloré pour un test « grandeur nature » sur l'ensemble des 23 bus de la ligne 341, en cours de livraison. Les appels d'offres significatifs devraient être lancés en 2017 et les premières livraisons massives de bus électriques sont prévues pour 2019. La demande de la RATP sera principalement composée de bus standards de 12 m avec **une recharge lente** des batteries au dépôt.

Cette transition dans le parc parisien relève de la volonté politique du **STIF**, autorité organisatrice des transports en Ile-de-France, qui s'y applique également sur le parc des acteurs autres que la RATP (Transdev, Keolis...) : en supposant l'intégralité des renouvellements en électrique, le marché hors RATP représenterait ainsi jusqu'à 200 nouveaux véhicules par an.

Plusieurs villes hors Ile de France rejoignent aussi le mouvement et peuvent être réparties selon deux catégories :

1. Les **grandes villes** qui expérimentent déjà différents véhicules et envisagent la motorisation électrique dans le renouvellement de leur flotte : Lyon, Marseille, Nice, Grenoble. A priori, cette demande porterait plutôt sur des bus standards de 12m avec une recharge lente au dépôt.

2. Des **villes de taille moyenne** qui lancent ou prévoient de lancer des appels d'offres sur des lignes spécifiques, souvent des **lignes à haut niveau de service (BHNS)**⁵ : Nantes, Rennes, Amiens, Bayonne, Chartres. Ces lignes devraient plutôt utiliser des technologies de recharge rapide, aux arrêts ou aux terminus.
3. Enfin, quelques grandes villes françaises se sont tournées, parfois depuis plusieurs années, vers le **gaz (GNV)** ou le **biogaz (bioGNV)** pour leurs bus urbains et ne présentent donc pas de potentiel remarquable pour le bus électrique d'ici 2025 : Lille, Strasbourg, Montpellier, Toulouse et Bordeaux.

La dynamique observée en France est aussi visible dans d'autres pays européens comme le **Royaume-Uni**, l'**Allemagne** et le **Benelux**, où de nombreuses expérimentations sont en cours. On estime que la demande en bus électriques pourrait atteindre **~2 600 bus par an en Europe à partir de 2020**, comparée à un renouvellement global de l'ordre de 14 000 bus par an. Plusieurs villes se démarquent avec des plans de déploiement ambitieux :

- **Londres** a commandé 51 bus électriques en 2015 au partenariat formé par BYD et Alexander Dennis et prévoit de convertir l'ensemble de ses 300 bus simple étage du centre-ville à l'électrique d'ici 2020.
- **Amsterdam** et **Eindhoven** ont toutes deux commandé une quarantaine de bus électriques en 2015 et souhaitent convertir l'intégralité de leurs flottes à l'électrique respectivement pour 2025 et 2020.
- **Hambourg** n'achètera que des bus zéro émission à partir de 2020 et **Cologne** prévoit une flotte 100% propre à horizon 2030.

5- Les bus à haut niveau de service (Bus Rapid Transit en anglais) sont des bus circulant au moins partiellement en site propre et avec une vitesse et une fréquence plus élevées que la moyenne. Il s'agit souvent de bus articulés.

2. Différentes technologies de bus électrique coexistent et pourraient à terme segmenter le marché selon la typologie urbaine locale et les besoins d'exploitation

Deux grandes technologies de bus 100% électriques coexistent aujourd'hui en Europe :

1. la **recharge lente** ou « **overnight charging** » : le bus est alimenté par sa batterie toute la journée et se recharge la nuit, au dépôt, pendant 4 à 6 heures ;
2. la **recharge rapide** ou « **opportunity charging** » : le bus se recharge à plusieurs reprises au cours de la journée. Deux sous-catégories se distinguent : la recharge **aux arrêts** ou « **biberonnage** », pendant le transit des passagers (quelques dizaines de secondes), et la recharge **aux terminus** en bout de ligne (quelques minutes).

La technologie à recharge lente requiert des batteries capables de stocker suffisamment d'énergie pour faire circuler le bus toute la journée, ce qui augmente son poids mais aussi sa liberté de parcours. La recharge s'effectue au dépôt de bus via de simples bornes ; toutefois, ces dépôts peuvent contenir plus d'une centaine de bus, ce qui crée d'importants appels au réseau pendant la nuit.

A l'opposé, la technologie à biberonnage va au-delà du simple véhicule électrique : elle intègre une **infrastructure de recharge** le long de la ligne au niveau des arrêts. Les batteries embarquées sont de faible taille et se rechargent rapidement pendant la descente des

passagers afin de propulser le bus d'un arrêt à l'autre. Les stations de recharge se situent à chaque arrêt, voire le plus souvent tous les trois à quatre arrêts, et font appel à des **technologies automatisées** pour éviter toute intervention humaine lors du transit des passagers. La recharge se fait le plus souvent par **conduction** au niveau du toit du bus : un pantographe ou bras mécanique est intégré à la station ou au bus et permet une recharge à plusieurs centaines de kW. A un stade plus expérimental, la recharge par **induction** se développe également avec la mise en place de dalles souterraines émettrices d'un champ électromagnétique au niveau de l'emplacement de stationnement du bus. A noter que pour ne pas créer de pics de demande sur le réseau, les stations sont souvent elles-mêmes équipées de batteries ou supercondensateurs. C'est le cas des systèmes **WATT** et **TOSA** développés respectivement à l'aéroport de Nice et à Genève depuis quelques années.

A ces deux modes de fonctionnement correspondent des technologies de batteries différentes : si la recharge la nuit au dépôt privilégie les batteries à **forte densité énergétique** (de plus de ~100 kWh/kg), le biberonnage en stations requiert des batteries tolérant les recharges ultra rapides et donc à **haute puissance spécifique**. La chimie **lithium-ion** se montre adaptable aux deux catégories mais sous des formes différentes :

Illustration 2 : les deux grandes familles de technologies de recharge de bus électriques

	Recharge lente	Recharge rapide (arrêts ou terminus)
Durée de recharge	Au dépôt : de 4 à 6 heures	<ul style="list-style-type: none"> Aux arrêts : dizaines de secondes Aux terminus : quelques minutes
Taille des batteries	De ~240 kWh à ~375 kWh	De ~50 à ~120 kWh
Technologies de batteries	Li-ion : NMC, LFP Li-Metal Polymère : LMP (Bolloré) Sodium-Nickel (Irizar)	Li-ion : LTO (Lithium Titanate) Supercondensateurs
Technologies de recharge	Pas de système de recharge particulier	<div> <div> Conduction  </div> <div> Induction  </div> </div>
Constructeurs de bus		
Villes potentielles	Paris, Marseille, Londres, villes chinoises	Amiens, Nantes, Rennes, Bayonne, Eindhoven, Stockholm, Göteborg

« NMC » (Nickel Manganese Cobalt) et « LFP » (Lithium Fer Phosphate, très utilisée en Chine) pour les batteries « d'énergie », et « LTO » (Lithium Titanate) pour les batteries « de puissance ». Les bus à biberonnage peuvent aussi faire appel à des **supercondensateurs**, dispositifs de stockage pouvant se charger et se décharger plus rapidement que des batteries.

La recharge rapide du bus peut également se faire uniquement aux terminus, cette solution se positionnant alors à mi-chemin entre la recharge lente au dépôt et le pur biberonnage. Bien que les frontières entre ces trois solutions techniques soient aujourd'hui loin d'être figées, les constructeurs testant toujours de nouvelles combinaisons et adaptant la technologie à la ligne de bus considérée, on peut s'attendre à terme à une **segmentation de ces technologies selon la typologie urbaine locale** :

- L'**hypercentre** urbain est favorable aux bus à recharge lente : les coûts de déploiement d'une infrastructure de recharge y sont élevés et les travaux complexes, notamment s'ils sont nécessaires en dehors des terminus. Les distances journalières parcourues par les bus sont moindres, leur permettant de fonctionner en autonomie toute la journée ;

- Le biberonnage est adapté aux lignes de bus plus longues s'étendant sur des **zones urbaines ou périurbaines** où le bâti est moins dense, en particulier les **lignes BHNS** : les bus circulant déjà en site propre, les infrastructures de recharge s'y intègrent sans difficulté. C'est également la solution la plus pertinente pour les bus articulés car elle permet de réduire la taille des batteries (qui autrement serait démesurée) ;
- Pour les bus qui parcourent de grandes distances (plus de 200-300 km par jour), la solution 100% électrique nécessite des investissements coûteux dans des batteries ou des infrastructures de recharge plus importantes. Son intérêt est alors réduit face aux technologies diesel, GNV ou hydrogène, d'autant plus que la réduction des polluants locaux y est considérée moins cruciale.

Au-delà de cette catégorisation générale par densité urbaine, le choix des opérateurs se fera selon les **spécifications précises** de la ligne considérée (longueur totale, longueur entre arrêts, position des terminus, durée des arrêts, durée quotidienne d'exploitation...). La technologie devra être compatible avec les **contraintes opérationnelles d'exploitation** de la ligne.

3. L'apparition de nouveaux acteurs précurseurs ou spécialisés dans la motorisation électrique transforme le paysage de l'offre de bus urbains. Avec la transition plus lente des constructeurs majeurs, l'offre ne devrait pas être un facteur limitant à moyen terme

Le marché européen du bus urbain est aujourd'hui dominé par quelques constructeurs principaux : en France, 90% des bus achetés en 2015 étaient des marques Iveco, Mercedes (groupe Daimler), Heuliez (groupe Iveco) et MAN. Le développement de la motorisation électrique et l'arrivée de nouveaux acteurs spécialisés pourraient cependant modifier ce paysage en profondeur.

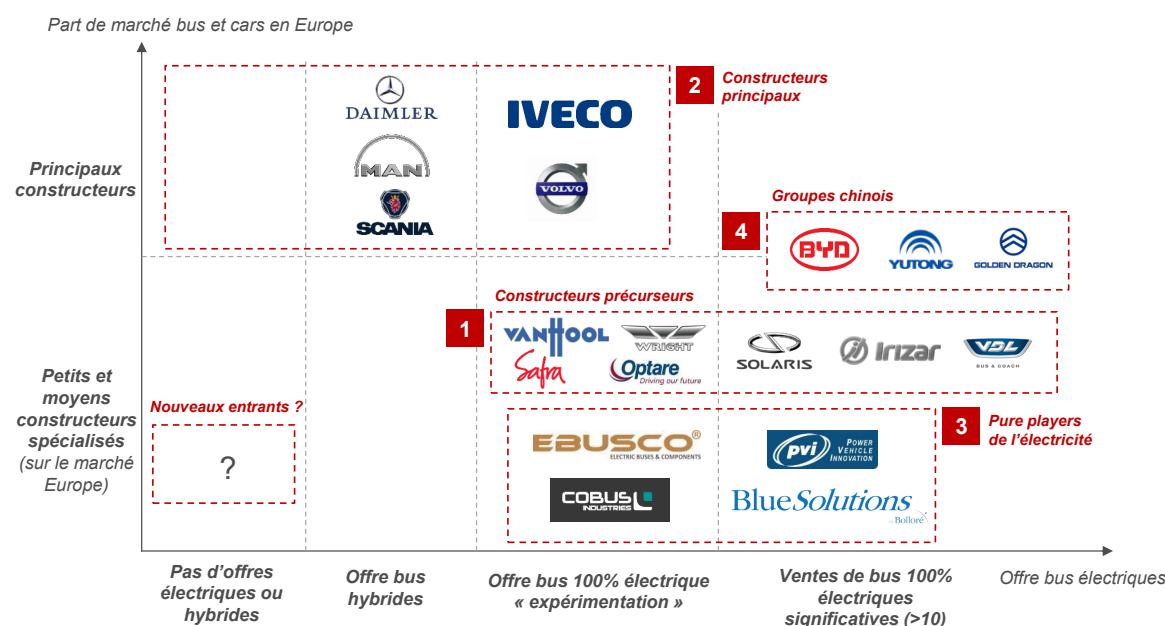
L'arène concurrentielle des constructeurs de bus électriques peut se segmenter en 4 grandes catégories d'acteurs :

1. **Les constructeurs « précurseurs »** regroupent des acteurs de taille moyenne s'étant lancés tôt sur le segment du bus électrique dans une stratégie de

différenciation. Ces constructeurs externalisent en général la motorisation de leurs véhicules et bénéficient ainsi d'une agilité suffisante pour se lancer sur ce nouveau marché. Les quantités produites par ces acteurs ne sont plus négligeables : une dizaine d'unités du bus à recharge lente i2e du constructeur espagnol **Irizar** circulent aujourd'hui à Marseille, Saint-Sébastien et Barcelone, tandis que des constructeurs comme **Solaris** (Pologne) et **VDL** (Pays-Bas) prévoient des livraisons de dizaines de véhicules électriques en 2016.

2. **Les constructeurs majeurs, intégrant historiquement l'expertise de la motorisation**, ont supporté d'importants coûts de passage à la norme Euro 6 pour les

Illustration 3 : panorama à date des constructeurs de bus électriques sur le marché européen



motorisations diesels et attendent un développement plus significatif du marché du bus électrique pour y investir massivement. Avec quelques années de retard par rapport aux précurseurs, ils préparent cependant tous la transition vers l'électrique, notamment sous l'impulsion des futurs appels d'offres de la RATP. Ainsi, le **groupe Iveco** est en cours d'expérimentation et pourrait produire de 200 à 300 bus électriques par an d'ici 2020 via sa marque Heuliez Bus. **Volvo** possède déjà une offre commerciale à recharge en terminus et prévoit une production en série dès 2017. Les constructeurs allemands **Daimler** et **MAN** sont aujourd'hui moins engagés mais devraient proposer une offre de série à partir de 2018.

3. Les « **pure players** » du bus électrique sont historiquement actifs soit sur la motorisation électrique (comme **PVI**, leader du marché français des mini/midibus) soit sur les batteries et comptent se faire une place sur le marché du bus urbain, afin de trouver des débouchés à leurs technologies. L'exemple français le plus emblématique de cette dernière catégorie est le **groupe Bolloré** et sa filiale **BlueSolutions**. Développant depuis 2001 une technologie de batterie unique, le **Lithium Metal Polymère**, l'entreprise s'est lancée dans la voiture individuelle avec son concept de

Bluecar avant de se diversifier dans le bus électrique avec la signature en 2008 d'un partenariat avec le carrossier Gruau pour la fabrication des « Microbus ». Depuis, Blue Solutions a développé une unité de construction de bus sur son usine de batteries d'Ergué Gabéric en Bretagne : l'entreprise y produit son mini Bluebus, mais aussi un « Bluetram » (technologie à biberonnage) depuis 2015 et un Bluebus de 12 mètres depuis début 2016, avec un objectif à terme de 200 véhicules par an. Plus de 10 villes françaises ont commandé des mini Bluebus, la RATP a choisi le Bluebus grand format pour la fourniture de ses 23 premiers bus électriques standards à recharge lente, et Rennes a aussi retenu Bluebus pour son « partenariat d'innovation » visant à développer des bus standards puis articulés 100% électriques sur son réseau.

4. Les **groupes chinois** possèdent une avance considérable sur les constructeurs européens grâce à la dynamique de leur marché domestique : en 2014, il y avait 80 000 bus électriques en Chine et une production de **~30 000 véhicules par an**, en croissance de 160% par rapport à 2013. Les trois premiers constructeurs cherchent à prendre position en Europe via une stratégie des partenariats avec des acteurs européens :

- **BYD**, fabricant de batteries lithium-ion LFP (lithium ferrophosphate), a créé en 2015 une *Joint Venture* avec le constructeur anglais **Alexander Dennis** pour construire 200 bus électriques par an en Europe.
- Le groupe **Yutong** s'est associé à l'entreprise alsacienne **Dietrich Carebus Group (DCG)** pour réaliser l'assemblage final de ses bus électriques et les distribuer sur le marché européen.
- **Golden Dragon** met en place un partenariat de construction avec le *pure player* néerlandais **Ebusco**.

Beaucoup d'acteurs se positionnent ainsi sur ce nouveau marché ; les annonces des différents constructeurs quant à l'augmentation de leur capacité de production laissent présager que **l'offre sera suffisante** pour couvrir la demande européenne de plusieurs centaines d'unités par an à court et moyen terme, et que le bus électrique pourrait redistribuer les cartes des acteurs du bus européen.

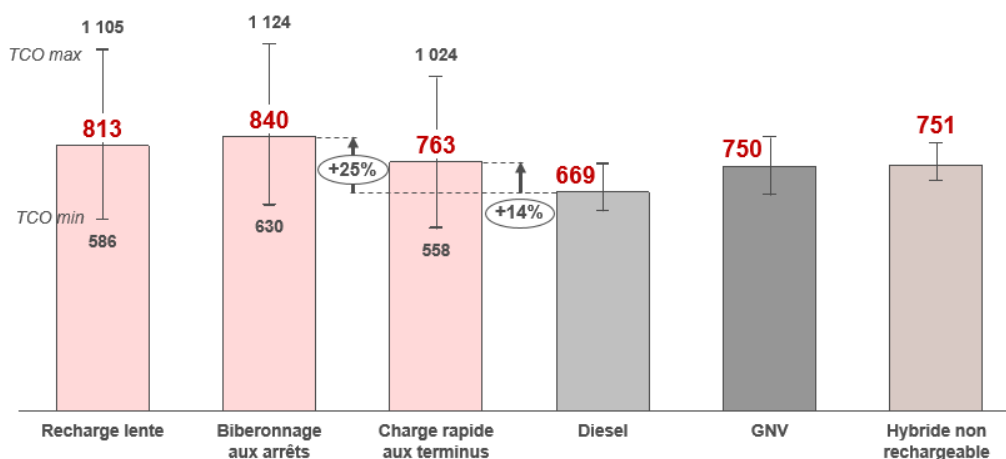
4. Malgré des coûts de combustible 3 fois moindres, les différentes technologies de bus électriques sont encore de 15% à 25% plus chères que le bus diesel en TCO, et l'écart ne sera probablement pas totalement comblé d'ici 2025

Pour une ville ou un opérateur de transport, les coûts des différentes motorisations de bus urbains sont à comparer sur l'ensemble de leur cycle de vie. Ces acteurs ont recours à une comparaison par le biais du **Total Cost of Ownership (TCO)**. Pour un bus standard de 12 mètres circulant 50 000 km par an (correspondant à un milieu urbain) avec un taux d'actualisation de 5% et une durée de vie de 15 ans, le TCO du bus électrique se situe entre 760 et 840 k€ selon la technologie envisagée, soit **15-25% de plus que le TCO du**

bus diesel et 0-10% de plus que le bus GNV et le bus hybride non rechargeable.

La différence de TCO entre le bus électrique à recharge lente et le bus diesel s'explique par le **surcoût du bus électrique à l'achat**, lui-même principalement dû au besoin **en batteries**. Le véhicule hors batterie (châssis, moteur) est également plus cher que pour un bus diesel car plus lourd et produit aujourd'hui en plus petites séries. Pour la technologie de recharge lente, le surcoût induit par l'infrastructure de recharge est relativement faible. Peu de retours

Illustration 4 : TCO des bus selon la motorisation sous des hypothèses moyennes [k€ actualisés à 5%]



Principales hypothèses :

- Prix des véhicules à l'achat : diesel 240 k€, GNV 270 k€ et hybride 360 k€
- Prix de l'électricité : 0,08-0,12€/kWh
- Fourchettes d'incertitude des TCO diesel et hybride liées uniquement au prix du diesel : de 0,8 à 1,3€/L HT, -avec une hypothèse moyenne à 1€/L HT
- Fourchette d'incertitude du TCO GNV liée uniquement au prix du gaz : de 0,5 à 0,9 €/Nm³, avec une hypothèse moyenne à 0,7€/Nm³
- Pas de valeur résiduelle pour le bus électrique ou la batterie en fin de vie (marché secondaire inexistant) ; 15% pour les autres motorisations

d'expérience sont disponibles sur la nature des opérations de maintenance des bus électriques ; en première approche, leur coût est supposé égal à celui du bus diesel, avec une forte incertitude (+/- 40%). Enfin, **les économies de coût de l'énergie sont significatives** (0,16 €/km pour le bus électrique contre 0,56 €/km pour le bus diesel à 1€/L⁶, en France) mais ne permettent pas encore de compenser le surcoût du véhicule électrique à l'achat. **Avec un prix du diesel 30% plus cher (1,30€/L), le TCO du bus diesel devient comparable à celui du bus électrique.**

Le bus électrique à recharge lente présente ainsi un TCO supérieur de 22% à celui du bus diesel. Les gisements de réduction de coûts résident principalement dans le **prix des batteries**, qui pourrait chuter de 30% d'ici 2020⁷. Sous cette hypothèse et sans prendre en compte de réduction post-2020 sur le coût de la batterie de remplacement⁸, le TCO pourrait diminuer à **757 k€ en 2020**, soit un surcoût restant de **13%** par rapport au diesel – surcoût qui pourrait perdurer à court et moyen terme, à moins que les coûts des véhicules hors batteries ou les coûts de maintenance deviennent plus faibles pour les bus électriques.

Bien que la technologie à recharge rapide en terminus affiche un TCO relativement plus faible que la recharge lente et le biberonnage aux arrêts, **la différence de TCO est peu significative**

par rapport aux incertitudes de coûts existant sur les batteries et les infrastructures de recharge.

Si les coûts du véhicule hors batterie et de l'entretien représentent plus de la moitié du TCO et sont *a priori* indépendants de la technologie retenue, la différenciation entre les 3 technologies s'opère sur les **batteries et l'infrastructure de recharge** : le bus à recharge lente embarque de gros volumes de batteries mais ne nécessite pas d'infrastructure de recharge spécialisée, contrairement au bus à biberonnage aux arrêts. La solution de recharge rapide aux terminus fait figure « d'entre deux » avec des batteries de taille moyenne et des temps de recharge de quelques minutes. Chaque ligne de bus possédant ses caractéristiques propres (longueur totale, longueur entre arrêts, distance au point de dépôt, temps d'arrêt en terminus, zones traversées...), le dimensionnement des véhicules et des infrastructures de recharge devra être individualisé pour optimiser les coûts, quelle que soit la technologie retenue.

En conclusion, le coût total de possession du bus électrique est encore plus élevé que celui du bus diesel. Ce surcoût pourrait toutefois être rapidement compensé par une baisse du prix des batteries et des infrastructures de recharge cumulée à une hausse du prix du diesel.

5. Cependant, mis en regard des importantes externalités positives engendrées (changement climatique, pollution locale de l'air et pollution sonore), ce surcoût n'empêchera pas un déploiement « conséquent » du bus électrique en Europe d'ici 2025

Hormis les émissions de CO₂ dont le coût est aujourd'hui partiellement « internalisé » via la taxe carbone sur les carburants liquides ou le marché européen du carbone, les **bénéfices environnementaux de la motorisation électrique** par rapport aux motorisations thermiques ne sont pas pris en compte dans le calcul du TCO. Or ceux-ci jouent un rôle majeur dans le choix des collectivités et des opérateurs.

Comme pour une voiture électrique, les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'un bus électrique se répartissent entre :

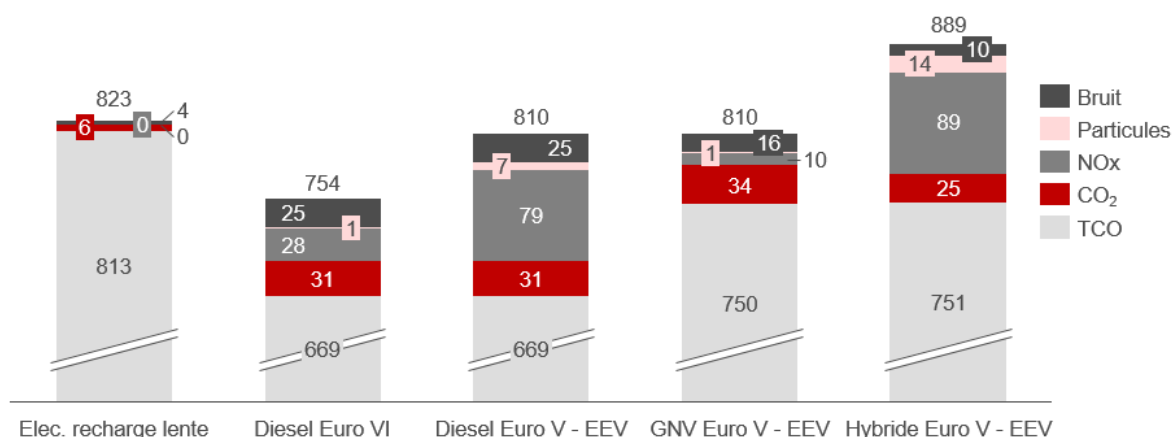
- La fabrication du véhicule et des batteries : la seule fabrication d'une batterie de 340 kWh (bus à recharge lente) et son remplacement à demi-vie du bus émet ~90 tonnes de CO₂eq ;

6- Somme de la moyenne des prix HTT du diesel à la pompe sur 2010-2016 et de la TICPE 2016 réduite pour les transporteurs (39,19€/hL).

7- Entretien avec des fabricants de batteries

8- Hypothèse d'atteinte d'une asymptote pour la baisse du prix des batteries

Illustration 5 : TCO des bus selon la motorisation sous des hypothèses moyennes avec prise en compte du coût des externalités [k€ actualisés à 5%]



Principales hypothèses :

- Contenu CO₂ de l'électricité française : 40 gCO₂/kWh (moyenne RTE sur 2015)
- Emissions de CO₂ liées à la fabrication des batteries : 131 kgCO_{2eq}/kWh (valeur ADEME de ~3t pour une batterie de 24 kWh)
- Emissions de CO₂ des carburants fossiles (amont + combustion) : 3,17 kgCO_{2eq}/L pour le diesel ; 2,26 kgCO_{2eq}/Nm³ pour le GNV (base carbone ADEME)
- Emissions de NOx et de particules mesurées par l'ADEME sur le cycle « ADEME/RATP » (milieu urbain embouteillé, vitesse moyenne de 10,78 km/h) :
 - NOx : 4,17 g/km pour le diesel Euro VI ; 11,68 g/km pour le diesel Euro V ; 1,5 g/km pour le GNV Euro V ; 13,15 g/km pour l'hybride Euro V
 - Particules : 0,01 g/km pour le diesel Euro VI ; 0,06 g/km pour le diesel Euro V ; 0,01 g/km pour le GNV Euro V ; 0,13 g/km pour l'hybride Euro V
- Valeur de la tonne de CO₂ basée sur l'objectif de la loi de transition énergétique pour 2020 : 56€/t. Dans les calculs, on soustrait à cette valeur de 56€/t le prix de la tonne de CO₂ déjà internalisé : 22€/t pour le diesel et le GNV (composante carbone de la TICPE 2016) et 6€/t pour l'électricité (prix 2016 sur le marché européen)
- Coût sociétal des émissions de NOx et de particules : 13€/mg et 212€/mg (valeurs du Handbook on External Costs of Transport de la Commission Européenne)
- Coût sociétal du bruit émis par un bus standard circulant de jour en milieu urbain : 7,6c€/km (Handbook on External Costs of Transport).
- Hypothèses de réduction du bruit par rapport à ce bus standard : diesel Euro V - VI : -2dB ; GNV : -4dB ; hybride : -6dB ; électrique -10dB

Sources : ADEME, RTE, Civitas, Commission Européenne, IVECO, COMPETT, Siemens, analyses E-CUBE Strategy Consultants

- La production de l'électricité utilisée pour recharger le véhicule pendant sa durée de vie : ces émissions dépendent du mix électrique du pays d'utilisation et s'élèvent à ~60 tonnes en France pour le bus à recharge lente considéré dans l'étude.

Les émissions de GES du bus électrique sont ainsi principalement concentrées dans la phase de construction et restent **5 à 7 fois inférieures** à celles des motorisations thermiques. En circulation, le bus électrique n'émet **aucun polluant** et est particulièrement **silencieux** avec une réduction du bruit allant jusqu'à 12 dB par rapport à un bus diesel standard⁹.

La monétisation de ces externalités environnementales positives permet au bus électrique de **gagner en compétitivité** par rapport aux autres motorisations : en ajoutant

le coût des externalités au TCO calculé précédemment, le bus électrique à recharge lente devient moins cher que le bus hybride et aussi coûteux que le bus GNV et le bus diesel Euro V – EEV¹⁰; le bus diesel Euro VI reste lui **10% moins cher**¹¹.

En plus de l'impact des émissions de GES sur le changement climatique est pris en compte l'impact sur la santé humaine des substances les plus nocives, les oxydes d'azote **NOx** (NO et NO₂) et les **particules fines**. Les véhicules considérés sur l'illustration 5 ont vu leurs émissions de polluants mesurées par l'ADEME sur le cycle « ADEME/RATP », cycle correspondant à une circulation urbaine embouteillée (vitesse moyenne de ~11 km/h seulement) et induisant donc des émissions importantes. Ces conditions semblent particulièrement inadaptées au bus hybride

9- COMPETT : « noise from electric vehicles – a literature survey », avril 2013.

10- EEV : *enhanced environmentally friendly vehicle* : norme européenne à caractère facultatif et correspondant à des seuils d'émissions équivalents à ceux de l'Euro V ou légèrement plus stricts.

11- Approximation d'un coût équivalent entre le diesel Euro V et Euro VI

dont les émissions dépassent celles de son équivalent diesel ; en revanche, la motorisation au gaz et les dispositifs de traitement mis en place sur le bus diesel Euro VI permettent de limiter ces émissions.

Enfin, le bruit émis par les bus urbains a également un coût sociétal, lié d'une part à la gêne ressentie par les citoyens et d'autre part à l'impact sur la santé que peut avoir une exposition prolongée à de forts niveaux sonores. Le bus électrique ne peut empêcher les bruits de roulement mais son moteur plus silencieux permet de limiter ce coût.

Bien qu'insuffisamment monétisés pour permettre de compenser intégralement l'écart de TCO avec le bus diesel Euro VI, les forts atouts environnementaux du bus électrique devraient lui assurer une **place de choix à moyen terme** dans le renouvellement des flottes de bus urbains.

A propos des auteurs

Etienne Jan (consultant) et **Cyprien Pélissou** (élève de l'option Machines et Energie à l'Ecole Mines ParisTech) sous la supervision d'**Alexandre Bouchet** (cofondateur et directeur associé) au sein du bureau parisien d'E-CUBE Strategy Consultants

Pour plus d'information sur cette étude, vous pouvez les contacter par e-mail à etienne.jan@e-cube.com



www.e-cube.com

© Copyright 2016 E-CUBE Strategy Consultants

Toute reproduction, sans l'autorisation de l'auteur, est interdite