



Electrifier les véhicules de transport en commun

Un défi multidimensionnel

Analyse et recommandations

Juin 2020

Résumé

Le souci de limiter l'impact des transports routiers sur la santé humaine et l'environnement est aujourd'hui largement partagé et conduit de nombreux acteurs à promouvoir l'électrification des véhicules motorisés. Dans ce contexte, l'accent est souvent mis sur les véhicules privés.

Partant du constat que les transports en commun ont un rôle central à jouer dans un système de mobilité soutenable, Inter-Environnement Wallonie a mené une étude bibliographique relative au transfert technologique vers des véhicules de transport en commun par route à émissions faibles ou nulles.

Après un rappel des technologies en concurrence, IEW présente quelques points d'attention dégagés sur base de l'analyse de projets d'électrification entrepris par différents opérateurs de transports en commun.

Sont ensuite présentés quelques éléments de la législation européenne et des recommandations de

la Commission en matière de promotion de véhicules propres, de marchés publics, d'incitants financiers et d'aides d'Etat.

C'est sur base de ces éléments qu'Inter-Environnement Wallonie formule une série de recommandations structurées en cinq axes :

- développer une stratégie à long terme,
- favoriser la filière tout électrique,
- adopter une approche holistique,
- soutenir les villes, communes et collectivités,
- développer des aides et incitants ciblés.



Table des matières

| | |
|--|----|
| Résumé exécutif | 3 |
| Introduction..... | 5 |
| De quels véhicules est-il question ? | 7 |
| Du bus à faibles émissions au bus soutenable..... | 8 |
| Les motorisations en concurrence | 9 |
| 1. Les motorisations thermiques | 10 |
| 2. Les motorisations électriques..... | 11 |
| 3. Les bus hybrides..... | 14 |
| Retours d'expériences et points d'attention | 15 |
| 1. Une approche systémique est indispensable..... | 15 |
| 2. La stratégie de recharge des BEB et hybrides | 15 |
| 3. La consommation énergétique | 16 |
| 4. Coût total d'utilisation (TCO) | 17 |
| 5. Les conditions climatiques extrêmes | 20 |
| 6. Le retrofit électrique | 21 |
| Le cadre européen : pouvoirs publics, marchés et aides d'Etat..... | 22 |
| 1. Promotion de véhicules « propres » | 22 |
| 2. Marchés publics et activités de transport | 23 |
| 3. Lignes directrices relatives aux incitants financiers pour les véhicules « propres »..... | 24 |
| 4. Lignes directrices relatives aux aides d'Etat à la protection de l'environnement | 24 |
| Conclusions et recommandations | 26 |
| 1. Développer une stratégie à long terme | 26 |
| 2. Favoriser la filière tout électrique..... | 27 |
| 3. Adopter une approche holistique | 27 |
| 4. Développer des aides et incitants ciblés..... | 28 |
| 5. Soutenir les villes, communes et collectivités..... | 29 |
| Liste des acronymes | 30 |
| Bibliographie | 31 |



Résumé exécutif

Le souci de limiter l'impact des transports routiers sur la santé humaine et l'environnement est aujourd'hui largement partagé et conduit de nombreux acteurs à promouvoir l'électrification des véhicules motorisés. Dans ce contexte, l'accent est souvent mis sur les véhicules privés.

Partant du constat que les transports en commun ont un rôle central à jouer dans un système de mobilité soutenable, Inter-Environnement Wallonie a mené une étude bibliographique relative au transfert technologique vers des véhicules de transport en commun par route à émissions faibles ou nulles.

Après un rappel des technologies en concurrence, IEW présente quelques points d'attention dégagés sur base de l'analyse de projets d'électrification entrepris par différents opérateurs de transports en commun. Sont ensuite présentés quelques éléments de la législation européenne et des recommandations de la Commission en matière de promotion de véhicules propres, de marchés publics, d'incitants financiers et d'aides d'Etat.

C'est sur base de ces éléments qu'Inter-Environnement Wallonie formule une série de recommandations structurées en cinq axes :

- développer une stratégie à long terme

il est en effet indispensable de savoir quels services on veut développer dans le futur afin de pouvoir définir une stratégie d'électrification adaptée, avec des objectifs intermédiaires. Pour que le matériel acheté aujourd'hui puisse s'inscrire dans le schéma d'exploitation de demain ;

- favoriser la filière tout électrique

les bus à batteries, technique à privilégier dans la mesure du possible, sont à recommander absolument pour les véhicules les plus modestes ; les trolleybus à batteries constituent une solution pertinente pour les grandes agglomérations ; les bus à hydrogène (à pile à combustible) sont à envisager pour les lignes express ; les bus hybrides rechargeables sont à réserver aux services interurbains et ruraux ne pouvant être actuellement assurés par une des autres filières ;

- adopter une approche holistique

l'électrification est nécessaire mais n'est pas suffisante ; elle ne fait sens que si l'entièreté du cycle de vie des véhicules et de l'énergie qu'ils consomment est prise en compte ; de plus, les projets d'électrification devraient idéalement être développés en considérant les potentielles synergies avec d'autres services en lien avec l'énergie et le transport ;

- développer des aides et incitants ciblés

l'électrification des transports en commun par route fait triplement sens : renfort de leur attrait (et donc du transfert modal en leur faveur), amélioration des performances environnementales de cet élément central d'un système de transports soutenable et « porte d'entrée » pour des technologies moins aisées à appliquer à de plus petits véhicules ; IEW recommande dès lors aux pouvoirs publics de cibler les aides et incitants à l'électrification vers les véhicules de transport en commun plutôt que vers les véhicules privés ;



- soutenir les villes, communes et collectivités

il apparaît raisonnable de collectiviser et partager l'expertise (technique, juridique et financière) nécessaire pour réaliser une électrification optimale des véhicules de transport en commun au sein de l'administration régionale (SPW MI, AOT¹), laquelle aurait dès lors un rôle de soutien et d'aide aux villes, communes et collectivités dans leurs projets d'électrification des véhicules de transport en commun.

¹ Service Public de Wallonie Mobilité et Infrastructures, Autorité organisatrice du Transport



Introduction

Face au défi climatique, les sociétés humaines n'ont d'autre choix que de se « décarboner » totalement d'ici une trentaine d'années. La dynamique doit être enclenchée sans délai : « *In model pathways with no or limited overshoot of 1.5°C, global net anthropogenic CO₂ emissions decline by about 45% from 2010 levels by 2030* »². Cette condition *sine qua non* de survie concerne bien évidemment tous les secteurs d'activités - donc aussi les transports.

Réduire la pollution atmosphérique qu'induisent ces derniers constitue un deuxième défi de taille pour ce secteur d'activités. Les polluants atmosphériques générés par le trafic routier nuisent, d'une part, à la végétation et aux écosystèmes et, d'autre part, à la santé humaine. Cancers des poumons, maladies cardiovasculaires, aggravation des maladies pulmonaires obstructives chroniques, autres impacts sur le système respiratoire, le système nerveux central et le système reproductif sont associés à l'inhalation de particules fines. Les oxydes d'azote induisent, quant à eux, des irritations des muqueuses oculaires et respiratoires ainsi que des impacts sur le foie, la rate et le sang (action toxique au niveau des plaquettes) – ils participent par ailleurs à la formation de particules fines. Les autres polluants induits par le trafic routier (dont les composés organiques volatils, le monoxyde de carbone et l'ozone) produisent également leur lot d'effets indésirables.

Pour relever ces défis, les experts s'entendent sur la nécessité de développer une approche globale incluant trois axes stratégiques et connue sous l'acronyme ASI (avoid-shift-improve)³ :

1. une très forte réduction de la demande ;
2. un transfert modal massif de la voiture vers les transports en commun et les modes actifs (marche, vélo et micromobilité) ;
3. un transfert technologique vers des véhicules « zéro émissions » (à l'échappement).

C'est à l'application du troisième axe stratégique aux transports en commun par route qu'est dédiée la présente note, avec pour objectifs de :

- dresser un état des lieux des solutions techniques disponibles et en développement pour les véhicules concernés, dans une optique de réponse aux deux défis précités ;
- présenter, dans les grandes lignes, les orientations politiques définies et proposées par les autorités européennes ;
- partager quelques recommandations avec les acteurs concernés (autorités, opérateurs de transport et autres parties prenantes) aux niveaux local et régional.

Soulignons d'emblée que l'électrification des transports en commun par route⁴ fait triplement sens : d'abord, elle participe à renforcer leur attrait et donc à accélérer le transfert modal en leur faveur, ensuite, elle améliore les performances environnementales d'un mode de transport appelé à jouer un rôle majeur dans un système de transports soutenable et, enfin, elle constitue une « porte d'entrée » pour des

² IPCC. 2018. Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels*

³ UITP. 2018. *Electric mobility & development – An engagement paper from the World bank and the international association of public transport*, p. 62

⁴ En termes d'électrification du réseau ferroviaire, la Belgique se classe deuxième en Europe, derrière le Grand-Duché de Luxembourg, ce qui explique l'excellente performance environnementale du transport ferroviaire belge.



technologies dont l'application à de plus petits véhicules est (économiquement ou techniquement) moins aisée.

Le défi du renouvellement des flottes est immense et d'actualité : en Europe, 45 % des bus en circulation sont de norme Euro III ou antérieure⁵. Néanmoins, le marché est en mutation rapide. Ainsi, le nombre de bus électriques « rechargeables » (soit les bus à batteries, les bus à pile à combustible et les bus hybrides rechargeables) achetés en Union européenne en 2019 a augmenté de 170 % par rapport à 2018, passant de 594 à 1.607 unités, ce qui représente 4 % du marché des véhicules neufs. Les bus hybrides non rechargeables représentent quant à eux 4,8 % du marché⁶. La situation est sensiblement la même aux USA : selon l'American Public Transportation Association (APTA), les bus à batteries y représentaient 5 % du marché en 2018⁷.

Par ailleurs, la crise sanitaire COVID-19 a impacté le secteur des transports publics avec une intensité jamais vue. C'est tout l'écosystème du secteur qui doit se battre pour survivre à la crise et regagner la confiance des utilisateurs⁸. Dans cette perspective, tant l'UITP⁹ que d'autres acteurs¹⁰ soulignent la nécessité de dégager des fonds européens et des outils de financements spécifiques pour faciliter la migration vers des systèmes de transports en commun à émissions faibles ou nulles.

⁵ Pourbaix J. 2019. *Deployment of electric buses in Europe*. UITP

⁶ ACEA. 21/04/2020. *Fuel types of new buses: diesel 85%, hybrid 4.8%, electric 4%, alternative fuels 6.2% share in 2019 – Press release*

⁷ APTA. 2019. *Public Transit Leading in Transition to Clean Technology*. Policy brief, p. 12

⁸ UITP. 20/04/2020. *Progressive resumption of services and survival of urban public transport and local mobility services in Europe* – Open letter

⁹ Union international du transport public : <https://www.uitp.org/>

¹⁰ Notamment Euro Cities, Energy Cities, l'European Public Health Alliance (EPHA), ...: voir le courrier commun adressé à la Commission européenne le 22/05/2020 :

https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_05_EU_recovery_package_urban_mobility_letter.pdf



De quels véhicules est-il question ?

La première image qui vient à l'esprit lorsqu'on évoque le transport en commun par route est celle d'un bus de grande capacité. La réalité du terrain est plus complexe et les solutions à mettre en place sont multiples :

- à l'heure actuelle, en-dehors des lignes régionales opérées par l'OTW ou ses sous-traitants, des services novateurs ont été développés, dont certains utilisent des véhicules de petite capacité : Proxibus et Telbus utilisent en général des midibus, Flexitec des minibus¹¹ ou des voitures¹² ; le déploiement de ces services complémentaires par rapport aux lignes régulières devrait se poursuivre, dans une logique de rationalisation et de redéploiement de l'offre de transports en commun ;
- les communes possèdent également leurs flottes et leurs services (taxis sociaux, transport PMR...), utilisant souvent des véhicules de petite capacité (midibus, minibus et voitures) ;
- il en est de même pour les collectivités (structures privées ou dépendant de la Fédération Wallonie-Bruxelles).

Dans une logique de déploiement de l'offre de transports en commun, il conviendrait de multiplier les services de transport public flexible, notamment ceux destinés au « rabattement » vers les lignes régulières de bus, de tram, de métro ou de train. Les services de ce type impliquent l'utilisation de véhicules de capacité limitée.

Il sera question, dans cette note, de tous les véhicules « lourds »¹³ de transport en commun par route : minibus, midibus, autobus simple et articulés et trolleybus, à l'exception des véhicules se déplaçant sur rails.

¹¹ Bien qu'il n'existe pas de définition officielle, il est généralement admis qu'un minibus a une longueur de 5 à 8 mètres et une capacité d'une vingtaine de personnes environ, un midibus une longueur de 8 à 11 mètres et une capacité de 20 à 40 personnes.

¹² Une voiture (catégorie M1) comporte, outre le siège du conducteur, 8 places assises maximum

¹³ Soit des véhicules des catégories M2 et M3 telles que définies à l'article 4 et à l'annexe I du règlement (UE) 2018/858



Du bus à faibles émissions au bus soutenable

Au Royaume-Uni, en 2015, le LowCVP¹⁴ a proposé une définition du « bus à faibles émissions » (LEB pour Low Emission Bus) intégrant le double objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'amélioration de la qualité de l'air. Un LEB est un bus dont les émissions de gaz à effet de serre sont réduites d'au moins 15 % par rapport à un bus diesel Euro V et qui répond à la norme Euro VI pour les autres émissions.¹⁵ Pour être complet, il conviendrait également d'intégrer les émissions sonores et les émissions polluantes non réglementées.¹⁶

Cette approche ne permet cependant pas de quantifier la « soutenabilité » des véhicules. Il faut pour ce faire mener une réflexion sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule et de l'énergie qu'il consomme. En effet :

- les émissions liées à l'utilisation d'un véhicule, aussi appelée émissions « du réservoir aux roues » (ou TTW pour *tank to wheel*), ne rendent pas compte de l'impact de la totalité de la chaîne énergétique : il convient de prendre également en compte les émissions « du puits au réservoir » (ou WTT - *well to tank*) ; cette manière de faire est indispensable dès lors que l'on tente de chiffrer l'impact environnemental de technologies caractérisées par l'importance des émissions WTT (gaz naturel, agrocarburants, hydrogène, électricité) ;
- les nouvelles technologies peuvent requérir des matières premières (telles que le cobalt et le lithium pour les batteries des véhicules électriques) dont l'exploitation à grande échelle peut induire de fortes incidences sociales et environnementales ; on ne saurait prétendre à la soutenabilité sans intégrer dans l'analyse les potentiels impacts sociaux et environnementaux de ces nouvelles chaînes d'approvisionnement.

Le bus « soutenable » - ou du moins « le plus soutenable à un instant T » - est donc celui qui offre les meilleures performances énergétiques et dont les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques sont les plus faibles sur l'ensemble du cycle de vie tout en minimisant les impacts environnementaux et sociaux associés à l'extraction de matières premières et au recyclage.

Par ailleurs, un point d'attention particulier (mentionné ici mais non abordé dans la suite du document) dont il est très rarement fait mention dans la littérature est le niveau de pollution à l'intérieur du bus. Le projet ExTraCar mené par l'ISSeP a montré que la concentration en particules fines de type « black carbon » mesurée sur divers trajets dans l'agglomération liégeoise est plus élevée dans un bus que dans une voiture effectuant le même parcours au même moment.¹⁷ Aux Etats-Unis, différentes études ont mené au constat alarmant suivant : les taux de pollution à l'intérieur de bus scolaires sont supérieurs aux taux mesurés dans les voitures qui les précèdent dans le trafic¹⁸. Cette réalité ne peut être occultée et devrait amener à porter une attention particulière aux performances des systèmes de ventilation des véhicules de transport en commun.

¹⁴ Partenariat véhicules bas carbone: <https://www.lowcvp.org.uk/>

¹⁵ LowCVP. 2016. *The Journey of the Green Bus*

¹⁶ Ricardo, 2013, Air Quality Emissions Impacts of Low CO₂ Technology for Buses

¹⁷ ISSeP, 2016, Exposition de sujets durant leur activité transport : Résultats projet ExTraCar

¹⁸ Miller A. et al. 2018. *Electric Buses - Clean Transportation for Healthier Neighborhoods and Cleaner Air*, p. 9



Les motorisations en concurrence

Les véhicules de transport en commun par route « sur pneus »¹⁹ utilisés durant les dernières décennies sont principalement de deux types :

- les véhicules à motorisation thermique (principalement diesel, mais aussi gaz naturel), qui forment la grande majorité du parc actuel ; ce type de motorisation, largement éprouvée, allie souplesse, robustesse et facilité d'approvisionnement en énergie ;
- les véhicules sur pneus à motorisation électrique alimentés par fils (caténares), soit les trolleybus - utilisés en milieu urbain sur des distances relativement limitées ; leur grande sobriété énergétique et l'absence de stockage d'énergie à bord les rendent particulièrement attractifs dans une optique de réduction de la consommation d'énergie et de matière première ; toutefois, le prix et la lourdeur des infrastructures à mettre en place, l'impact visuel de celles-ci et la difficulté (voire l'impossibilité) de s'écarter d'itinéraires précis en limitent fortement l'utilisation.

Au cours des deux dernières décennies, marquées par la recherche de solutions plus respectueuses de l'environnement et de la santé humaine, on a vu se développer de nombreuses solutions alternatives que l'on peut regrouper en trois grandes familles :

- celles basées sur la motorisation thermique et concernant le type de carburant (nous n'aborderons pas ici les technologies développées pour améliorer le bilan énergétique ou sanitaire des moteurs diesel) ;
- celles basées sur la motorisation électrique, se différenciant notamment par les modalités d'alimentation : par caténaire ou avec stockage à bord, que ce soit sous forme électrochimique (batteries) ou gazeuse (hydrogène) ; dans ce dernier cas, une pile à combustible permet de générer l'électricité à bord ;
- celles de type « hybride », alliant le thermique à l'électrique.

Selon Bloomberg, 67 % de la flotte de bus mondiale sera électrique en 2040, le solde étant constitué de bus diesel et à pile à combustible, ces deux technologies étant préférées là où l'installation d'infrastructures de recharge est compliquée, dans les régions caractérisées par des températures extrêmes et à proximité de sites de production d'hydrogène. Bloomberg s'attend à ce que les bus à piles à combustibles représentent 6,5 % du marché des bus neufs en 2040²⁰.

Il convient ici de souligner que, pour diminuer la consommation énergétique d'un véhicule, une approche évidente est d'en diminuer la masse (le poids en langage courant), et ce quels que soient son gabarit et sa motorisation. Cet aspect reste assez peu documenté dans la littérature scientifique, quoiqu'il y soit couramment fait référence au défi de la maîtrise de la masse pour la filière « bus électriques à batteries » : on peut estimer à environ 3 tonnes la masse de batteries nécessaires pour assurer une autonomie de 200 à 250 km en conditions réelles.²¹

¹⁹ Par opposition aux véhicules se déplaçant sur rail

²⁰ Bloomberg NEF. 2020. *Electric vehicle outlook 2020 – Executive summary*

²¹ Voir par exemple Grütter J. 2015. *Real World Performance of Hybrid and Electric Buses*, p. 31



1. Les motorisations thermiques

Les carburants de substitution au diesel sont le gaz naturel, l'agrodiesel et le biométhane.

Utilisé sous forme comprimée dans les bus (GNC pour gaz naturel comprimé – ou CNG pour l'acronyme anglais), le gaz naturel est un carburant fossile. Si les émissions du réservoir à la roue (TTW) sont réduites avec le gaz naturel, la prise en compte des émissions du puits au réservoir (WTT) inversent la tendance. Le passage du diesel au gaz naturel n'est dès lors pas intéressant d'un point de vue climatique. De plus, les gains en termes de polluants locaux (particules fines et oxydes d'azote) semblent plus limités que ce qui est généralement revendiqué par le secteur gazier : « *For the road transport sector, the use of fossil-based natural gas does not generate net environmental benefits, primarily because in most cases there are no reductions in WTW greenhouse gas emissions and any reductions in air pollutant emissions are very limited.* »²² Ou encore : « *While they can offer reduced nitrogen oxide emissions, natural gas buses may emit more greenhouse gas emissions than their diesel equivalents, largely due to low fuel economy.* »²³

L'impact climatique de l'agrodiesel de première génération²⁴ (particulièrement celui issu d'huile de palme, qui représente 30 % de la consommation européenne) est supérieur à celui du diesel fossile²⁵, ce qui lui enlève toute pertinence d'un point de vue climatique. Par ailleurs, les impacts sociaux et environnementaux de cette filière dans les pays du Sud sont désastreux²⁶. Les agrocarburants utilisés en Belgique sont malheureusement presque uniquement de première génération²⁷.

Les agrocarburants de seconde génération²⁸ présentent un bien meilleur bilan environnemental, qu'il s'agisse d'agrodiesel ou de biométhane (ou biogaz). La production d'agrodiesel de seconde génération se fait principalement à partir d'huile de cuisine usagée ou de graisse animale (déchets d'équarrissage). Le biométhane est produit par méthanisation de résidus agricoles ou de déchets. Le bilan environnemental sur l'entièreté du cycle de vie est meilleur pour le biométhane que pour l'agrodiesel. **Dès lors, seul le biométhane semble susceptible de constituer un carburant de substitution durable pour les moteurs thermiques.** Cependant, dans un souci de durabilité au sens large, il convient de développer une analyse globale des demandes potentielles pour la biomasse afin d'en prioriser les utilisations. Ainsi, dans une optique de réduction de l'utilisation d'intrants chimiques dans l'agriculture, la consommation de biomasse pour la fertilisation est amenée à croître significativement. **Les volumes de biométhane potentiellement disponibles ne sont donc pas compatibles avec une application de cette solution à large échelle au secteur des transports.**

²² Ricardo. 2016. *The role of natural gas and biomethane in the transport sector*

²³ Miller A. et al. 2018. *Electric Buses - Clean Transportation for Healthier Neighborhoods and Cleaner Air*, p. 10

²⁴ C'est-à-dire fabriqué à partir de produits agricole généralement destinés à l'alimentation humaine ou animale

²⁵ <https://www.iew.be/agrodiesel-le-remede-empire-l-etat-du-malade/>

²⁶ OXFAM. 2016. *Agrocarburants: comment l'Europe réchauffe la planète* (https://oi-files-d8-prod.s3.eu-west-2.amazonaws.com/s3fs-public/bp-burning-land-climate-eu-bioenergy-261016-fr_o.pdf)

²⁷ BBL, CNCD-11.11.11, FIAN Belgique, Greenpeace Belgique, IEW, Oxfam Belgique. 2019. *Pas de nourriture dans nos voitures – Evaluation de la politique belge d'incorporation d'agrocarburants* <https://www.cncd.be/IMG/pdf/rapport-pas-de-nourriture-dans-nos-voitures-rapport-sept-2019-web.pdf>

²⁸ C'est-à-dire fabriqué à partir de produits agricoles non destinés à l'alimentation humaine ou animale ou à partir de résidus ou déchets.



2. Les motorisations électriques

Les bus dont la motorisation est entièrement électrique sont soit équipés de stockage d'énergie à bord (bus à batteries – BEB – et bus à hydrogène ou à pile à combustible), soit alimentés en continu par caténaires (trolleybus). Quelle que soit la technologie utilisée, ces bus requièrent tous des infrastructures spécifiques, qu'il s'agisse de stations de recharge (électricité ou hydrogène) ou de caténaires. Un passage en revue de tous les transporteurs utilisant des bus électriques, de tous les fabricants et de tous les fournisseurs en Europe a été réalisé en 2017 dans le cadre du projet ZeEUS.²⁹

Les bus à batteries

L'autonomie des BEB est évidemment fonction de la taille des batteries ainsi que de la ou des technique(s) et de la stratégie de recharge. Celle-ci peut se faire soit par conduction (branchement direct (plug-in) ou contact de type pantographe), soit par induction. Elle peut avoir lieu au dépôt, en extrémité de parcours ou à certains arrêts spécifiques équipés à cette fin. Il s'agit souvent, dans ces deux derniers cas, de chargement rapide à haute puissance : on parle de « flash charging » ou de « opportunity charging ».

Jusqu'à 45 % du prix d'un BEB avec recharge durant la nuit au dépôt vient des batteries. Lesquelles affectent aussi négativement le poids du véhicule et sa capacité (nombre de passagers). On trouve de très bons rapports d'évaluation d'expériences, incluant des relevés des différents coûts d'exploitation et des différents problèmes techniques encourus, tels cette étude d'avril 2020 du département des transports de l'administration étasunienne sur une année d'exploitation de bus électriques à Long Beach (Californie)³⁰.

Les performances environnementales WTW (du puits à la roue) des bus électriques sont fort intéressantes, tant pour les polluants locaux que pour les gaz à effet de serre, y compris dans un pays comme la Chine où l'intensité carbone du mix énergétique est élevée : « *GHG well-to-tank emission reductions for electric buses in Zhengzhou are between 0% and 25% compared to hybrid units, and between 30% and 45% compared to conventional fossil units. This reduction is achieved although electricity generation relies heavily on coal.* »³¹

Cependant, dans une perspective environnementale, il convient de garder à l'esprit deux faiblesses majeures des bus tout électriques dans l'état actuel de la technologie : (1) la masse de batteries à embarquer pour assurer une autonomie « raisonnable » (ou des performances équivalentes à celles d'un bus diesel) est fort importante et (2) les impacts environnementaux et sociaux associés au cycle de vie des batteries sont loin d'être négligeables : « *the effects of battery production are significant for global warming, carcinogens, ozone depletion, and eco-toxicity.* »³²

Néanmoins, dans l'optique d'une décarbonation des transports en commun par route inscrite dans une stratégie « ASI », les bus électriques à batteries constituent aujourd'hui la principale solution technique à privilégier.

En particulier, les BEB constituent le premier choix pour les véhicules de dimensions modestes (minibus et midibus). Ceci est d'autant plus vrai si l'autonomie à assurer et le temps d'utilisation journalier demeurent modestes, comme dans le cas de certains transports scolaires. La recharge des batteries peut alors se faire à faible puissance pendant la nuit, voire pendant les heures de la journée durant lesquelles les véhicules ne

²⁹ ZeEUS. 2017. *eBUS Report #2 – An updated overview of electric buses in Europe*

³⁰ Eudy L., Jeffers M. 2020. *Zero-Emission Bus Evaluation Results: Long Beach Transit Battery Electric Buses*. FTA Report No. 0163 Federal Transit Administration

³¹ Grütter J. 2015. *Op. cit.*, p. 33

³² Cooney G. et al, 2013, *Life Cycle Assessment of Diesel and Electric Public Transportation Buses*



sont pas utilisés. Il est également envisageable d'optimiser la stratégie de recharge pour stocker de l'électricité dans les batteries et la restituer durant les pics de consommation du réseau (approche VTG pour « vehicle to grid »).

Les bus à pile à combustible

Les bus à hydrogène (ou FCEB pour fuel cell electric buses) sont des bus électriques dont toute l'énergie consommée est fournie par la pile à combustible, alimentée en hydrogène à partir d'un réservoir embarqué. Des systèmes de stockage de l'électricité générée (batteries/supercondensateurs) délivrent l'énergie nécessaire lors des pics de consommation (accélération, côtes). Cette technologie permet, du fait de la grande densité énergétique de l'hydrogène, d'atteindre une autonomie de plusieurs centaines de kilomètres, associée à une grande aisance de recharge (temps de recharge de l'ordre de quelques minutes). **Ces deux caractéristiques autorisent une exploitation similaire à celle des bus diesel, notamment sur les parcours interurbains.**

Deux autres éléments demeurent défavorables aux bus à hydrogène.

- D'abord le prix d'achat : aux USA, en 2018, le prix moyen d'un FCEB commandé « récemment » était estimé à 1,2 millions de dollars³³. Dans un « discussion paper » réalisé pour le partenariat public-privé « Fuel cells and hydrogen joint undertaking »³⁴, le consultant Element Energy estime que, dans l'hypothèse d'un marché « de masse » de bus à hydrogène (soit une ou quelques centaines de bus par constructeur et par an), cette technologie pourrait encore s'avérer 15 à 20% plus chère que la motorisation diesel (en TCO)³⁵.
- Ensuite, le rendement énergétique « du puits à la roue » et l'empreinte écologique liée à la fabrication de l'hydrogène. Celui-ci est encore majoritairement issu de gaz naturel et de charbon. Sur base des travaux du centre de recherches conjoint de la Commission européenne, LowCVP estimait en 2019 que les émissions de CO₂ « du puits au réservoir » étaient de 316 g/kWh pour l'électricité (avec le mix de production britannique), compris entre 32 et 854 g/kWh pour l'hydrogène produit à base d'hydrocarbures et compris entre 15 et 1.777 g/kWh pour l'hydrogène produit par voie d'électrolyse³⁶. Ainsi, cette filière ne peut être considérée comme « propre » que dans la mesure où la filière de production de l'hydrogène l'est elle-même. C'est pourquoi on préférera une approche intégrée incluant les capacités de production d'hydrogène « vert » (électrolyse et énergies renouvelables). Quant au rendement énergétique du puits à la roue, T&E a calculé (dans l'hypothèse d'une électricité renouvelable) que celui-ci s'élève à 77 % pour un camion électrique à batteries contre 33 % pour un camion à pile à combustible (avec filière électrolyse)³⁷.

Ces réserves relatives au prix d'achat et à l'efficacité énergétique de la filière hydrogène, pour fondées qu'elles soient, n'enlèvent rien aux avantages spécifiques de cette filière, qui continue à se développer. Selon le relevé effectué par le Fuel cells and hydrogen joint undertaking en mai 2019, les bus à hydrogène en exploitation dans 13 villes européennes totalisaient, depuis leurs mises en service respectives, 8,4 millions de kilomètres roulés.

³³ Eudy L., Post M. 2018. *Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Current Status 2018*. National Renewable Energy Laboratory, p. vii

³⁴ Qui a dédié un site aux bus à pile à combustible: <https://www.fuelcellbuses.eu/>

³⁵ Element Energy. 2017. *Commercialisation of hydrogen fuel cell buses - Discussion paper*, p. 6

³⁶ <https://www.lowcvp.org.uk/Hubs/leb/TestingandAccreditation/WTTFactors.htm> - la valeur basse de la fourchette relative à l'électrolyse est associée à l'utilisation d'électricité éolienne dans le processus d'électrolyse, la valeur haute à l'utilisation d'électricité issue de centrales à charbon

³⁷ T&E. 2020. *Recharge EU trucks: time to act! - A roadmap for electric truck charging infrastructure deployment*, p. 37



Les trolleybus

C'est le 14 juillet 2009, à Gand, qu'a été réalisé le dernier parcours en trolleybus en Belgique³⁸. Ces véhicules électriques (presque) sans stockage de l'énergie à bord n'ont cependant pas disparu partout : l'UITP estime que, tous continents confondus, ils sont présents dans environ 370 villes, avec environ 40.000 véhicules en service³⁹.

Deux fils conducteurs (caténaires ou « lignes aériennes de contact » - LAC) fournissent l'électricité au trolleybus : un deuxième fil est nécessaire pour prévoir le retour du courant (mise à la terre) qui ne peut pas se faire par le contact roue-rail comme dans un tram ou train. Classiquement, les trolleybus sont équipés d'un petit générateur diesel qui leur permet de parcourir de petites distances en autonomie. **Grande sobriété énergétique et absence de stockage d'énergie à bord rendent ces véhicules particulièrement attractifs dans une optique de réduction de la consommation d'énergie et de matières premières.**

Afin de pouvoir s'affranchir des contraintes associées à l'alimentation par caténaires, certains constructeurs ont développé des trolleybus à batteries⁴⁰, ce qui permet de leur assurer une certaine autonomie. Ainsi, le Van Hool Exquicity est un véhicule bi-articulé de 24 m de long pouvant accueillir 180 passagers équipé d'une batterie de 26 kWh lui permettant de parcourir 7 km en autonomie.⁴¹ L'automatisation de la levée et du retrait des perches qui collectent l'électricité sur les caténaires est la deuxième innovation qui a motivé le retour du trolleybus ces dernières années. **Batteries et perches automatiques permettent en effet de franchir des sections perturbées par des travaux, de se passer d'aiguillages aux carrefours des différentes lignes, de connecter deux sections équipées de caténaires...**

A Lublin (PL), la société communale de transport exploite 70 trolleybus à batteries. En 2016, une évaluation était publiée au terme de dix années d'expériences⁴². Il en ressortait notamment que :

- la consommation énergétique moyenne d'un trolleybus (18 m) à batteries est comprise entre 1,32 et 1,8 kWh/km.
- l'adjonction de batteries additionnelles permet de s'affranchir de la dépendance aux caténaires sans nécessiter de fortes capacités de stockage : des batteries de 34 à 38 kWh permettent de couvrir 10 à 20 km (en coupant l'air conditionné et le chauffage).

A Cagliari (IT), 6 trolleybus à batterie ont été testés entre mars 2016 et septembre 2017. La fiabilité est excellente, comparable à celle du matériel déjà exploité, qu'il s'agisse de trolleybus ou de bus diesel. La consommation d'énergie est fortement réduite par rapport à celle de ces deux catégories de véhicules.⁴³

Les trolleybus à batteries constituent sans nul doute une excellente solution pour les lignes urbaines à fort trafic. On trouve de très nombreuses informations (retours d'expériences, projets pilotes, analyses des coûts) sur le site de l'association trolley:motion⁴⁴.

³⁸ Walckiers J. 2017. *Trolleybus, mobilité d'une autre époque?* Inter-Environnement Wallonie - <https://www.iew.be/trolleybus-mobilite-d-une-autre-epoque/>

³⁹ UITP. 2014. *Trolleybus : back in focus* – News [en ligne] : <https://www.uitp.org/trolleybus-back-focus>

⁴⁰ Aussi appelés "dual-mode trolleybuse" ou "hybrid trolleybuses"

⁴¹ <https://www.sustainable-bus.com/trolley-and-tramway/genoa-tests-the-24-meter-battery-trolleybus/>

⁴² Holyszko P., Filipek P. Z. 2016. *Estimation of the running costs of autonomous energy sources in trolleybuses*

⁴³ ZeEUS. 2017. *eBUS Report #2 – An updated overview of electric buses in Europe*, p. 64 - - ZeEUS. 2018. *Demonstrations*, p. 6-7

⁴⁴ <https://www.trolleymotion.eu/>



3. Les bus hybrides

Les bus hybrides (il ne sera ici question que d'hybrides diesel/électrique, mais d'autres combinaisons sont possibles) constituent en quelque sorte une solution transitoire entre le bus diesel et le bus électrique à batteries. En Europe (et particulièrement en Belgique), cette technologie est nettement plus présente que les BEB.

Deux schémas de motorisation existent, comme pour les voitures. Lorsque le moteur thermique entraîne un alternateur qui produit l'énergie nécessaire au fonctionnement du moteur électrique (lequel est donc le seul qui joue à proprement parler un rôle moteur), on parle d'hybride série. Lorsque les deux moteurs peuvent, l'un ou l'autre ou l'un et l'autre, entraîner l'essieu, on parle d'hybride parallèle⁴⁵.

Les bus hybrides simples ou « légers » (smooth hybrids) ne peuvent être rechargés sur le réseau : c'est lors de la récupération d'énergie au freinage ou dans les descentes que les batteries, de taille modeste, sont rechargées. Les bus hybrides « plug-in », dotés de batteries de plus grande capacité, peuvent en outre être rechargés sur le réseau.

L'autonomie en mode électrique des hybrides rechargeables dépend évidemment, tout comme celle des BEB, de la taille des batteries, de la stratégie de recharge, mais aussi des caractéristiques d'utilisation. Le basculement d'un mode de propulsion à l'autre peut, sur les bus modernes, être préprogrammé en fonction de divers paramètres : poids, parcours, chauffage, air conditionné...⁴⁶

Les coûts d'achat et d'entretien demeurent plus élevés que ceux d'un bus diesel. Dans une étude publiée fin 2018, l'ADEME portait un regard assez critique sur cette filière. Tout en reconnaissant les gains en énergie et en émissions (CO₂ et polluants atmosphériques), l'ADEME soulignait que, pour les hybrides non rechargeables, « *les gains de consommation ne compensent pas les surcoûts d'achat et de maintenance* »⁴⁷ Quant aux hybrides rechargeables, l'ADEME considérait qu'une comparaison avec les bus à batteries tournait à l'avantage de ceux-ci⁴⁸. C'étaient aussi les conclusions d'une revue réalisée en 2016 par la McMaster University (Ontario, Canada)⁴⁹. **Solution transitoire qui faisait tout à fait sens il y a quelques années, l'hybridation ne devrait plus être réservée aujourd'hui qu'à des services qui ne peuvent être assurés avec des bus électriques, que ceux-ci soient des BEB, des trolleybus (à batteries) ou des FCEV.**

⁴⁵ Courbe P. 2010. *Véhicules électriques ? Changer de mobilité, pas de voiture !* Namur : Inter-Environnement Wallonie

⁴⁶ UITP. 2018. *Electric mobility & development – An engagement paper from the World bank and the international association of public transport*, p. 29

⁴⁷ ADEME, Bénita D., AJBD, Fayolle D. 2018. *Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains*, p. 53

⁴⁸ ADEME. 2018. *Op. cit.*, p. 58

⁴⁹ Moataz M. et al. 2016. *Electric Buses: A Review of Alternative Powertrains*



Retours d'expériences et points d'attention

1. Une approche systémique est indispensable

La mise en service de bus à motorisation électrique est une tâche qui demande un important travail amont, impliquant une réflexion en profondeur incluant les aspects suivants : longueur des trajets, topographie, stratégie de recharge, localisation des points de charge, modification des opérations, augmentation du nombre de véhicules, mise à niveau du réseau électrique, besoins en sous-stations électriques...⁵⁰

Aux Pays-Bas, la société EVConsult propose **un modèle « en trois couches » pour développer un réseau de recharge soutenable**, croisant les réflexions relatives à (1) la demande de transport, (2) le développement territorial et (3) le réseau électrique. Ceci pour déterminer le meilleur consensus en termes de configuration de recharge, points de recharge potentiels, impact sur les réseaux, coûts et faisabilité.⁵¹

Première couche : développer des scénarii de recharge

- définition des itinéraires présents et futurs
- analyse de scénarii de recharge (nuit et opportunity charging – voir ci-dessous)
- définition d'une combinaison de bus, batteries et chargeurs

Deuxième couche : aménagements urbains

- disponibilité dans l'espace public
- itinéraires des bus
- aspects paysagers
- nombre d'opérateurs de transport
- adaptabilité - possibilités d'extension

Troisième couche : connexion au réseau

- capacités actuelles du réseau et capacités requises pour le rechargement
- besoins attendus dans le futur (en relation avec le développement territorial)
- localisations possibles des points de charge

Le temps d'installation des infrastructures de recharge ne doit surtout pas être sous-estimé. Les délais peuvent ainsi se cumuler : demande de permis, extension de lignes, installation de sous-stations électriques... A Varsovie (dans le cadre du projet ZeEUS), on a estimé ce temps à 1,5 an minimum⁵².

2. La stratégie de recharge des BEB et hybrides

Un des grands défis de la motorisation électrique consiste à offrir une solution équivalente à celle des bus diesel, c'est-à-dire un service avec le même horaire, les mêmes temps de pause, le même nombre de bus et de conducteurs et la même capacité (places passagers).

⁵⁰ Wright T. 2018. *First pure electric double deck buses on streets of London*

⁵¹ Fabius B. 2018. *Planning for EV fleet rollout: Experiences from the Netherlands*

⁵² ZeEUS. 2018. *Demonstrations - Brochure*, p. 19



L'autonomie et la disponibilité des BEB sont évidemment fonction de la taille des batteries ainsi que de la ou des technique(s) et de la stratégie de recharge. Celle-ci peut se faire soit par conduction (branchement direct (plug-in) ou contact de type pantographe), soit par induction. Elle peut avoir lieu au dépôt, en extrémité de parcours ou à certains arrêts spécifiques équipés à cette fin. Il s'agit souvent, dans ces deux derniers cas, de chargement rapide à haute puissance : on parle de « flash charging » ou de « opportunity charging », technique qui a pour principaux désavantages la nécessité de disposer d'un réseau adapté (ou de le renforcer) et le prix des infrastructures, et pour avantages :

- un lissage de la demande de courant tout au long de l'utilisation du véhicule (par opposition avec la recharge nocturne) ;
- une augmentation de la durée de disponibilité du matériel roulant ;
- une connexion automatisée (système de type pantographe).⁵³

Quelles que soient la technique et la localisation des stations de recharge, les retours d'expérience font tous mention de trois points d'attention majeurs :

- la distance au réseau électrique ;
- sa compatibilité avec la consommation envisagée et son éventuelle mise à niveau ;
- les permis d'urbanismes pour les stations électriques.

Par ailleurs, pour les services réguliers dans les zones à fort trafic, l'opportunity charging (aux terminaux de la ligne) pose un défi en heures de pointe, quand les temps de pause sont réduits pour cause d'embouteillages : faut-il alors sacrifier la batterie (charge incomplète, risque de décharge profonde) ou sacrifier l'horaire ? Genève (CH) et Nantes (FR) ont opté pour le flash-charging : une recharge en 400-600 kW durant les temps de montée/descente de passagers à certains arrêts équipés à cette fin. Ceci requiert des batteries capables de supporter une charge rapide ; des batteries LTO (lithium titane oxyde) à Nantes et Genève. Cela demande aussi des pantographes opérant rapidement et de manière automatique.⁵⁴

A San Francisco (USA), une flotte de 4 BEB a été testée en 2017. La stratégie de recharge incluait une charge nocturne complétée par une (des) charge(s) par induction en journée, dans une station prévue à cet effet. La disponibilité des bus, faible durant les 4 premiers mois, a ensuite grimpé à 84,7 % durant les 8 derniers mois (contre 85,5 % pour les bus diesel de référence). La consommation énergétique est limitée, avec 2,84 kWh/mille (1,54 kWh/km) contre 7,40 kWh/mile (4,6 kWh/km) pour les bus diesel. Les coûts de maintenance sont réduits de 13 % par rapport aux bus diesel. Le document synthétisant les résultats de l'expérience offre une annexe fort intéressante dans laquelle sont détaillés tous les coûts de maintenance (tableau comparatif BEB – diesel)⁵⁵.

3. La consommation énergétique

En 2013, à Leeds (UK), la société Arriva a mis en service 12 bus hybrides parallèles (technologie Volvo). La consommation énergétique est réduite d'environ 20 % par rapport à celle de bus diesel de même capacité opérant sur les mêmes trajets. Toutefois, les coûts d'achat sont plus élevés (20 %) de même que les coûts d'entretien (sous-traités à Volvo). De plus, une incertitude demeure sur le coût des batteries

⁵³ Volvo. 2018. *Electric buses and opportunity charging*

⁵⁴ ABB. 28/10/2019. *The electric bus – range is a matter of perspective*. [En ligne] <https://new.abb.com/news/detail/40849/the-electric-bus-range-is-a-matter-of-perspective>

⁵⁵ Eudy L., Jeffers M. 2018. *Zero-Emission Bus Evaluation Results: County Connection Battery Electric Buses*



(potentiellement 40 à 50 kponds tous les 4 à 5 ans). Dès lors, Arriva ne compte pas augmenter le nombre de bus hybrides, même si ceux-ci donnent toute satisfaction au niveau opérationnel.⁵⁶

A Birmingham, la société National Express Bus qui exploite 18 bus hybrides parallèles Volvo B5LH double étage depuis 2012 a, elle, enregistré une consommation réduite de 30 % par rapport à la référence diesel, sans dérive des performances. *A contrario*, la même société a expérimenté une baisse de la performance énergétique de bus hybrides Alexander Denis E400H (hybrides légers) : de 20 %, la réduction de consommation par rapport à la référence diesel est passée à 11 % en 5 ans, ceci étant imputable à une détérioration des performances des batteries.⁵⁷

A Londres, avec une flotte de bus à batteries BYD/ADL, l'opérateur Metroline a mesuré une consommation énergétique de l'ordre de respectivement 1,5 et 2,1 kWh/mile (soit ,09 et 1,3 kWh/km) pour les bus simple et double étage⁵⁸.

La ville de Cluj-Napoca (Roumanie) a mis en service 41 bus à batteries Solaris 12E avec deux technologies de batteries différentes (LiFePO₄ et NMC). Les bus électriques n'ont pas été affectés à des itinéraires particuliers, mais en fonction des besoins du moment. Les émissions moyennes de référence en milieu urbain avec des bus thermiques Euro III étaient de 1.259 gCO₂/km et 12,08 gNO_x/km. En tenant compte des émissions WTT (génération d'électricité), les réductions d'émissions (calculées sur les 530.944 km roulés par la flotte de 41 bus électriques) sont de : 298,5 gCO₂/km et 1,49 gNO_x/km. En matière de consommation énergétique, le bilan est de 0,96 kWh/km « à la roue » dont il faut déduire 0,38 kWh/km (générés par le système de freinage régénératif), donc une consommation nette de 0,58 kWh/km. On n'observe pas de différences significatives en termes de performances des deux types de batteries⁵⁹.

La société Nottingham Community Transport, dont la flotte est exclusivement constituée de bus à batteries (58), a fait l'expérience, avec ses 45 midibus Optare Solo (31 places assises, 12 debout), d'une consommation d'un kWh (prélevé sur le réseau) par kilomètre.⁶⁰

On pourrait multiplier les retours d'expérience à l'envi. Cela ne ferait que confirmer les ordres de grandeur : au-delà des divergences (inévitables vu la diversité du matériel et des conditions d'utilisation), on peut retenir trois ordres de grandeur : 10 à 15 % d'économies d'énergies pour les bus hybrides légers, 30 à 50 % pour les hybrides rechargeables et 50 à 80 % pour les bus électriques à batteries.

4. Coût total d'utilisation (TCO)

La société National Express Bus, sur base de ses expériences d'utilisation de bus hybrides à Birmingham, Dundee et Wolverhampton, attire l'attention sur les coûts cachés associés à l'entretien et au remplacement de certaines pièces. S'additionnant à un coût d'achat plus élevés, ces coûts conduisent à un TCO supérieur à celui de la référence diesel⁶¹.

Selon le consultant Grütter, qui réalisait en 2015 pour l'Administration suisse une étude des performances en conditions réelles des bus électriques et hybrides, le temps de retour sur investissements d'un bus hybride pouvait, en 2015, être estimé à 5-6 ans pour autant que le prix du diesel soit supérieur à 1,1 \$US/litre

⁵⁶ Croxford J. 2017. *Hybrid buses in Leeds*

⁵⁷ Astbury D. 2017. *Hybrid buses in Birmingham*

⁵⁸ Wright T. 2018. *First pure electric double deck buses on streets of London – LEB workshop*

⁵⁹ Varga B. O. 2020. *Direct and Indirect Environmental Aspects of an Electric Bus Fleet Under Service*

⁶⁰ Nottingham. 2017. *Electric bus Factsheet*

⁶¹ Astbury D. 2017. *Op. cit.*

et que le kilométrage annuel soit de 60.000 km au moins.⁶² Pour les bus électriques, le coût par kilomètre roulé était 30 à 40 % plus élevé que celui des bus « classiques » à motorisation diesel.⁶³

T&E introduit une idée intéressante : celle d'inclure, dans le calcul du TCO, les coûts externes associés aux différentes filières et technologie. La **figure 1** illustre les résultats de cette approche pour une distance journalière de 250 km, un TCO calculé sur 8 ans et des prix moyens de l'énergie en Europe. Sans tenir compte des coûts externes, le TCO du bus diesel est de 0,94 €/km contre 1,0/km pour le bus électrique (deux configurations). En incluant les coûts externes (pollution atmosphérique et changements climatiques), le TCO du bus diesel passe à 1,12 €/km contre 1,04 €/km pour un bus électrique avec opportunity charging et 1,05 €/km pour un bus électrique avec recharge nocturne. Cette approche pourrait être utilisée pour les marchés publics, dans la mesure où elle est compatible avec le droit européen.⁶⁴

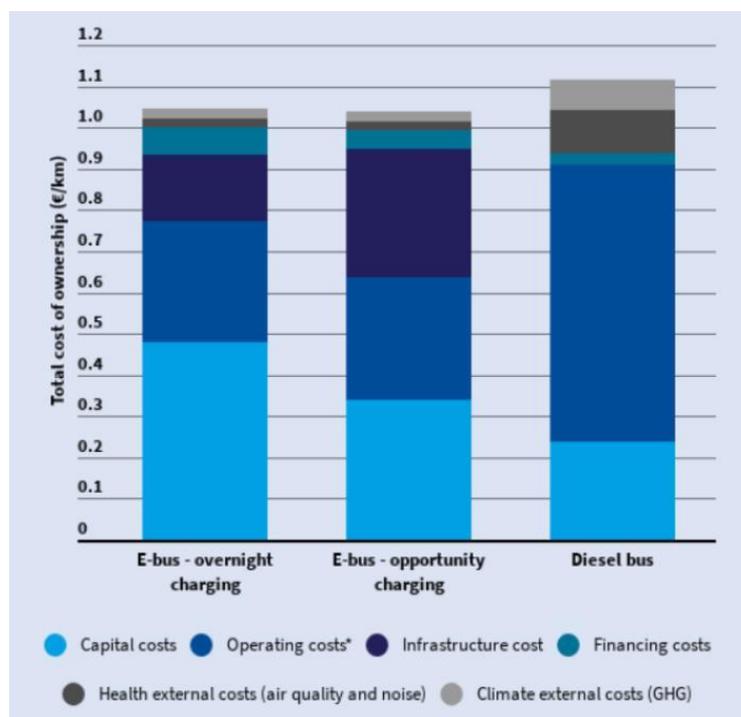


Figure 1 : comparaison du TCO d'un bus électrique (recharge pendant la nuit ou opportunity charging) et d'un bus diesel en incluant les coûts externes (santé et climat). Hypothèses : TCO calculé sur 8 ans, 250 km roulés par jour, prix moyens de l'énergie en Europe. Source : T&E et CE Delft

Dans une étude menée en 2017 par la Carnegie Mellon University, les auteurs arrivaient à une conclusion un peu différente, le TCO du bus électrique demeurant supérieur à celui du bus diesel, externalités comprises. Ce n'est que dans l'hypothèse d'un financement externe représentant 80 % du prix d'achat du bus que le TCO du bus électrique devenait franchement concurrentiel (**figure 2**). La plupart des projets d'électrification de flottes de bus n'ayant pu voir le jour que grâce à des subsides publics, cette hypothèse est loin d'être fantaisiste et est compatible, en cas de mise en concurrence, avec les lignes directrices relatives aux aides d'Etat à la protection de l'environnement publiées par la Commission européenne en 2014.

⁶² Grütter J. 2015. *Real World Performance of Hybrid and Electric Buses*, p. 31

⁶³ Grütter J. 2015. *Op cit.*, p. 39

⁶⁴ T&E. 2008. *Electric buses arrive on time*, p.4

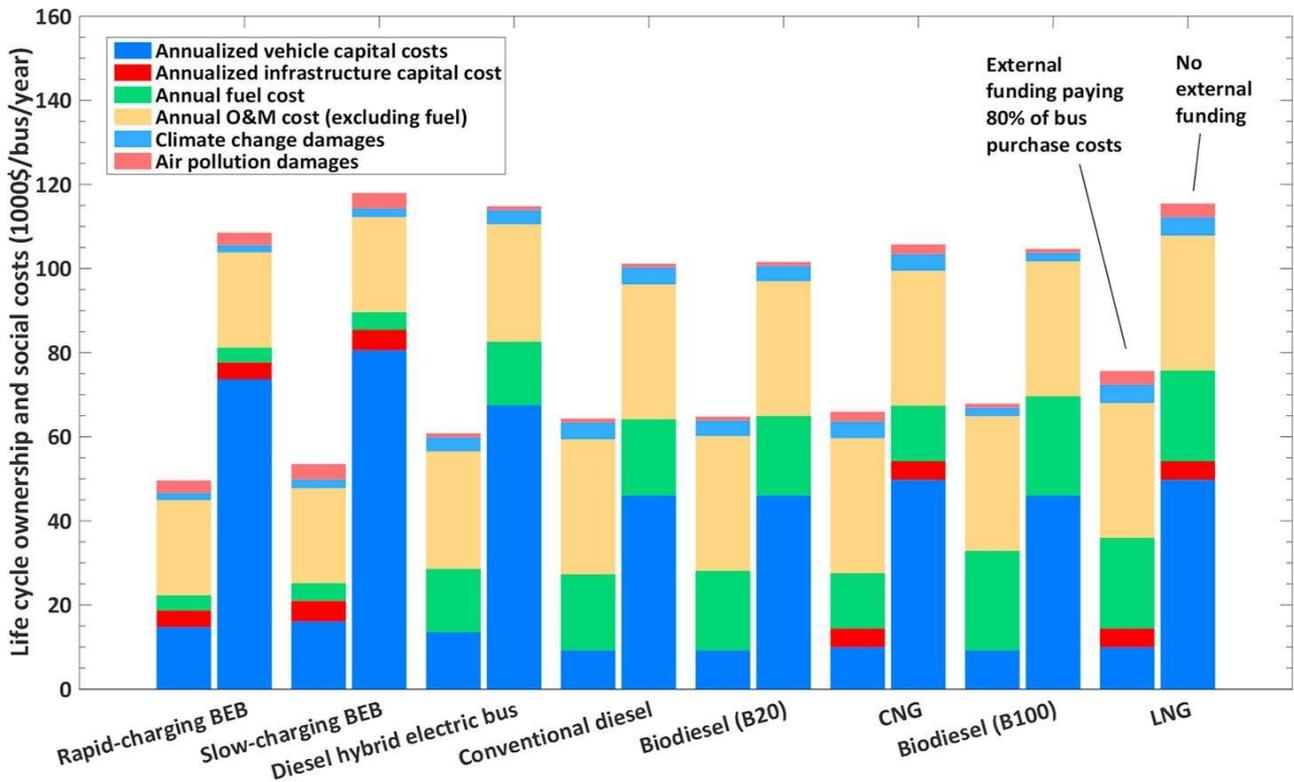


Figure 2 : TCO de différentes motorisations de bus, en milliers de dollars par an, en incluant les coûts externes et sous deux hypothèses différentes : avec et sans financement externe pour l'achat du bus.

Source : Carnegie Mellon University⁶⁵

Notons enfin que, pour aider les opérateurs de transport à faire face aux prix d'achat élevés, certains constructeurs proposent des formules de leasing sur base d'un principe simple (figure 3) : une somme équivalente au prix du véhicule diesel équivalent est versée à la livraison du bus électrique, suivie de versements échelonnés de telle sorte que l'opérateur puisse dégager une marge bénéficiaire chaque année. Ceci n'est évidemment possible que dans l'hypothèse d'un TCO avantageux pour le bus électrique.

Tout ce qui précède plaide pour une analyse aussi fine que possible du TCO en amont de toute décision d'investissement.

⁶⁵ Tong F. et al. 2017. *Life cycle ownership cost and environmental externality of alternative fuel options for transit buses*



Figure 3 : principe de la formule de leasing du bus électriques proposée par la firme Proterra.

Source : <https://www.proterra.com/vehicles/catalyst-electric-bus/financing/>

5. Les conditions climatiques extrêmes

Les expériences en conditions climatiques extrêmes sont fort contrastées. Les niveaux de satisfaction enregistrés semblent dépendre fortement du matériel. Ainsi, aux USA⁶⁶ :

- Chicago (Illinois) a testé à partir de 2014 deux bus électriques, sans rencontrer de souci avec les conditions climatiques extrêmes (températures très basses) ; il convient toutefois de noter que, en raison des températures hivernales fort basses, un soin particulier avait été apporté, en amont, à l'optimisation des batteries et auxiliaires ;
- King County (Washington) teste des bus électriques (11 BEB et 174 trolleybus) depuis 2016, sans soucis par rapport aux conditions climatiques : les problèmes de batteries (durée de vie et autonomie) semblent indépendants de celles-ci ;
- au Massachusetts, des expériences ont été menées en 2015 dans trois districts scolaires, sans soucis d'autonomie ni par rapport aux températures hivernales (jusque -18°C) ;
- par contre, Albuquerque (Nouveau Mexique) a eu une expérience négative de la motorisation électrique (18 bus électriques BYD), soldée par le retour au diesel ; au rang des (très nombreux) soucis évoqués : la durée de vie des batteries, l'autonomie et la sensibilité aux très fortes chaleurs.

A Bonn, 6 Bozankaya Sileo S12 full electric avec recharge nocturne ont été testés entre avril 2016 et mars 2018. La fiabilité et l'autonomie doivent être améliorées, particulièrement en présence de faibles températures⁶⁷.

On ne saurait donc que conseiller avec insistance aux opérateurs voulant acquérir du matériel électrique de se documenter autant que faire se peut pour pouvoir évaluer les potentiels et limites de différents matériels en conditions réelles. A ce titre, les documents synthétisant et comparant les résultats d'expériences en conditions réelles offrent une excellente porte d'entrée, par exemple ADEME (2018), Eudy L. & Jeffers M. (2018), Grütter J. (2015), Horrox J. & Casale M. (2019), ZeEUS (2017).

⁶⁶ Horrox J., Casale M. 2019. *Electric buses in America*

⁶⁷ ZeEUS. 2018. *eBus Report #2 - An updated overview of electric buses in Europe*, p. 47 - ZeEUS. 2018. *Demonstrations*, p. 4-5



6. Le retrofit électrique

Le prix d'achat d'un bus à électrique peut s'avérer rédhibitoire. Une solution permet de contourner le problème : le retrofit, consistant à transformer un bus diesel existant en bus électrique à batteries. A quelques exceptions près, cette solution en est encore au stade de projets pilotes mais semble néanmoins appelée à se développer dans les prochaines années. Des acteurs économiques proposent cette solution aux USA (p. ex. la société ebus⁶⁸), au Canada (p. ex. le groupe elexicon⁶⁹), au Royaume-Uni (p. ex. la société MAGTEC⁷⁰), en Allemagne (p. ex. la société e-trofit⁷¹ ou le consortium I see electric buses⁷²), etc.

⁶⁸ <https://www.ebus.com/>

⁶⁹ <https://elexicongroup.com/our-services/bus-conversions-to-ev/>

⁷⁰ <http://www.magtec-evbus.com/projectreboot>

⁷¹ <https://www.e-trofit.com/en/>

⁷² <https://www.i-see-busses.de>



Le cadre européen : pouvoirs publics, marchés et aides d'Etat

Sans aucune prétention à l'exhaustivité, les paragraphes suivants présentent quelques éléments de la législation européenne et des recommandations de la Commission en matière de promotion de véhicules propres, de marchés publics, d'incitants financiers et d'aides d'Etat.

1. Promotion de véhicules « propres »

La directive (UE) 2019/1161⁷³ « *oblige les États membres à veiller à ce que les pouvoirs adjudicateurs et les entités adjudicatrices tiennent compte, lors de l'obtention par voie de marchés publics de certains véhicules de transport routier, des incidences énergétiques et environnementales qu'ont ces véhicules tout au long de leur cycle de vie, y compris la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ et de certains polluants, afin de promouvoir et de stimuler le marché des véhicules propres et économes en énergie et d'augmenter la contribution du secteur des transports aux politiques menées par l'Union dans les domaines de l'environnement, du climat et de l'énergie* » (article 1).

Les notions de pouvoirs adjudicateurs et d'entités adjudicatrices sont définies aux articles 3 et 4 de la directive 2014/25/UE (voir ci-dessous).

Au sens de la directive, et en se limitant au transport de personnes, un « véhicule propre » est :

- un véhicule M1 ou M2 dont les émissions de CO₂ sont inférieures ou égales à 50 g/km et les émissions de polluants atmosphériques égales à 80 % maximum des limites applicables (jusqu'au 31 décembre 2025) ou dont les émissions de CO₂ sont nulles (à partir du 1^{er} janvier 2026) ;
- un véhicule M3 utilisant un des « carburants » alternatifs suivants : électricité, hydrogène, certains biocarburants, carburants de synthèse et carburants paraffiniques, GNC, GNL, biométhane, LPG.⁷⁴

Le champ d'application de la directive est précisé à l'article 3 : il s'agit des marchés publics dans le cadre de (1) contrats d'achat, de prise en crédit-bail, de location ou de location-vente de véhicules de transport routier par des pouvoirs adjudicateurs ou des entités adjudicatrices soumis aux directives 2014/24/UE et 2014/25, (2) contrats de services publics et (3) certains contrats de services (détaillés à l'annexe I de la directive), dont les services spécialisés de transport routier de passagers et le transport non régulier de passagers.

En ce qui concerne les véhicules M3, la directive ne s'applique qu'à ceux comportant des zones pour les passagers debout (article 3, renvoi à au règlement (CE) N° 661/2009), donc pas aux autocars.

⁷³ Directive (UE) 2019/1161 du Parlement européen et du Conseil du 20 juin 2019 modifiant la directive 2009/33/CE relative à la promotion de véhicules de transport routier propres et économes en énergie

⁷⁴ Liste complète à l'article 2 de la directive 2014/94/UE



Les objectifs en matière de marchés publics sont spécifiés à l'article 5 et à l'annexe I. Pour la Belgique :

- 38,5% des véhicules légers (M1 et M2) devront être « propres » (du 02/08/2021 au 31/12/2030) ;
- 45% des véhicules lourds (M3) devront être propres du 02/08/2021 au 31/12/2025 et 65% du 01/01/2026 au 31/12/2030.

Même si la directive abroge l'article 7 de la directive 2009/33/CE relatif à l'analyse du cycle de vie et ne fait plus référence, à l'article 5, à l'entière du cycle de vie, il est spécifié à l'alinéa 7 de ce dernier que : « *Les États membres peuvent imposer ou autoriser leurs pouvoirs adjudicateurs ou entités adjudicatrices à imposer des objectifs nationaux plus ambitieux ou des exigences plus strictes que ceux visés dans l'annexe* ». Les raisons de cette disposition sont développées aux considérants 20 et 23 :

- Considérant (20) : « *Les véhicules à émission nulle à l'échappement laissent également une empreinte environnementale en raison des émissions provenant de la chaîne d'approvisionnement en carburant, de la phase d'extraction au réservoir, ainsi qu'en raison du processus de fabrication de leurs composants et de leur niveau de recyclage [...]* »
- Considérant (23) : « *Les transports publics ne contribuent que faiblement aux émissions du secteur des transports. Afin de promouvoir davantage la décarbonation des transports, d'améliorer la qualité de l'air et de maintenir des conditions de concurrence équitables entre les différents opérateurs, les États membres peuvent, dans le respect du droit de l'Union, décider d'imposer des exigences similaires également aux opérateurs privés et aux services ne relevant pas du champ d'application de la présente directive, tels que les sociétés de taxi, de location de voitures et de covoiturage.* »

IEW recommande aux différentes autorités publiques, qu'elles entrent ou non dans le champ d'application de cette directive, d'en considérer les objectifs (parts de véhicules « propres » dans les marchés publics) comme des seuils minima, d'adopter des objectifs plus ambitieux et des exigences plus strictes, notamment en prenant en compte le cycle de vie des véhicules et de l'énergie qu'ils consomment.

2. Marchés publics et activités de transport

Deux directives balisent les règles applicables aux procédures de passation de marchés par des entités adjudicatrices en ce qui concerne les marchés publics et concours : les directives 2014/24/UE et 2014/25/UE. La seconde est spécifique à certains secteurs, dont celui des transports. Elle ne concerne que les marchés et concours dépassant certains seuils (définis en son article 15) :

- 414.000 euros pour les marchés de fournitures et de services et pour les concours,
- 5.186.000 euros pour les marchés de travaux,
- 1.000.000 euros pour les marchés de services sociaux et d'autres services spécifiques.

La directive 2014/25/UE⁷⁵ définit, en ses articles 3 et 4, les notions de pouvoir adjudicateur et d'entité adjudicatrice. Ainsi, les pouvoirs adjudicateurs sont « *l'État, les autorités régionales ou locales, les organismes de droit public ou les associations formées par une ou plusieurs de ces autorités ou par un ou plusieurs de ces organismes de droit public.* » Les entités adjudicatrices sont soit des pouvoirs

⁷⁵ Directive 2014/25/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 relative à la passation de marchés par des entités opérant dans les secteurs de l'eau, de l'énergie, des transports et des services postaux et abrogeant la directive 2004/17/CE



adjudicateurs, soit des entreprises publiques actives dans certains secteurs (dont celui des transports), soit d'autres entités actives dans ces secteurs et bénéficiant de droits spéciaux ou exclusifs octroyés par une autorité compétente d'un État membre.

Enfin, la directive « *s'applique aux activités visant la mise à disposition ou l'exploitation de réseaux destinés à fournir un service au public dans le domaine du transport par chemin de fer, systèmes automatiques, tramway, trolleybus, autobus ou câble.*

En ce qui concerne les services de transport, il est considéré qu'un réseau existe lorsque le service est fourni dans les conditions déterminées par une autorité compétente d'un État membre, telles que les conditions relatives aux itinéraires à suivre, à la capacité de transport disponible ou à la fréquence du service. » (article 11)

3. Lignes directrices relatives aux incitants financiers pour les véhicules « propres »

Un document de travail de la Commission européenne détaille les lignes directrices à respecter en matière d'incitants financiers pour les véhicules propres et présentant une bonne efficacité énergétique⁷⁶. Ces lignes directrices s'appliquent aux mesures centrées sur la demande, notamment en ce qui concerne les véhicules M1, M2 et M3.

Les principes de ces lignes directrices relatives aux incitants financiers pour les véhicules propres et économes en énergie sont également d'application dans le cadre des marchés publics. Outre des principes obligatoires (respect du Traité et de la législation européenne), des principes additionnels sont également recommandés, dont notamment :

- la neutralité technologique : ne pas favoriser une filière si une autre filière présente les mêmes performances environnementales ;
- la proportionnalité par rapport aux performances des véhicules : préférer les incitants évoluant par paliers à ceux attribués au-delà d'un seuil unique ;
- la valeur de l'incitant : ne pas attribuer d'incitants supérieurs aux coûts additionnels de la technologie qui permet d'améliorer les performances environnementales des véhicules, ceci pour éviter d'indirectement subsidier les constructeurs.

4. Lignes directrices relatives aux aides d'Etat à la protection de l'environnement

En 2014, la Commission européenne publiait une communication explicitant ses lignes directrices concernant les aides d'État à la protection de l'environnement et à l'énergie pour la période 2014-2020. Une actualisation de ces lignes directrices est en cours, l'adoption de la version révisée prévue fin 2021⁷⁷.

Les lignes directrices « *s'appliquent aux aides d'État octroyées en faveur de la protection de l'environnement ou de la réalisation d'objectifs en matière d'énergie dans tous les secteurs relevant du traité.*

« *Les aides au dépassement des normes de l'Union ou à l'augmentation du niveau de protection de l'environnement en l'absence de normes de l'Union (y compris les aides à l'acquisition de nouveaux véhicules de transport)* » font partie des mesures couvertes par les lignes directrices.

⁷⁶ European Commission. Staff working document – Guidelines on financial incentives for clean and energy efficient vehicles - Brussels, 28.2.2013 - SWD(2013) 27 final

⁷⁷ Voir https://ec.europa.eu/competition/state_aid/legislation/timeline_table_SA_final.pdf



Les aides à l'investissement sont soumises à l'obligation de notification (article 108, §3 du traité) lorsque le montant de l'aide dépasse 15 millions d'euros par entreprise.

Les coûts admissibles sont déterminés comme suit :

- a) lorsqu'il est possible de distinguer, en tant qu'investissement distinct, les coûts nécessaires à la réalisation de l'objectif d'intérêt commun du coût total de l'investissement, par exemple parce qu'il est facile d'établir que l'élément écologique est un élément rajouté à une installation préexistante, les coûts de l'investissement distinct constituent les coûts admissibles ;
- b) dans tous les autres cas, les coûts admissibles sont les coûts d'investissement supplémentaires déterminés en comparant l'investissement bénéficiant de l'aide avec la situation contrefactuelle en l'absence d'aide d'État. En principe, il est possible de renvoyer au coût d'un investissement comparable sur le plan technique qui pourrait être vraisemblablement réalisé sans aide et qui ne permet pas de réaliser l'objectif d'intérêt commun ou qui ne réalise cet objectif que dans une moindre mesure.

Pour garantir la prévisibilité et des conditions identiques pour tous, la Commission applique des intensités d'aide maximales exprimées en pourcentages des coûts admissibles. Pour l'acquisition de nouveaux véhicules de transport, la Commission définit 3 pourcentages (de base, en cas d'innovation écologique et en cas de mise en concurrence) dont les valeurs respectives sont : 60%, 70% et 100% pour les petites entreprises, 50%, 60% et 100% pour les moyennes et 40%, 50% et 100% pour les grandes.



Conclusions et recommandations

Pouvoirs publics, autorités organisatrices et opérateurs de transport ne peuvent qu'éprouver de l'incertitude face aux stratégies à adopter pour électrifier les flottes de véhicules en transport à commun. Le problème est multidimensionnel, le secteur est en constante évolution technique – et le changement urgent (dès lors que l'on désire relever les défis environnementaux). **Dans ce contexte particulièrement difficile, il est crucial :**

- d'investir le temps et les capacités humaines indispensables pour réaliser une veille permanente (aspects techniques, économiques et légaux) ;
- de savoir prendre des décisions ;
- et de savoir, aussi, se remettre en question, accepter de revoir la stratégie adoptée en fonction des évolutions techniques.

Le dialogue est fondamental, comme le souligne l'UITP : « *Vehicle OEMs, civil society organizations, public transport operators, utilities, local authorities, charging operators, and customers are essential points of contact for any government seeking to play a convening role around eMobility.*⁷⁸ »

C'est dans le souci d'aider les différentes parties prenantes à progresser sur la voie de l'électrification des flottes de véhicules de transport en commun, et en toute humilité, qu'Inter-Environnement Wallonie formule une série de recommandations.

1. Développer une stratégie à long terme

Dans un document publié en 2017, la Commission européenne⁷⁹ insiste avec raison sur la nécessité de définir des plans de mobilité durable à long terme, avec des objectifs chiffrés. **Il est en effet indispensable de savoir quels services on veut développer dans le futur afin de pouvoir définir une stratégie d'électrification adaptée, avec des objectifs intermédiaires.** Pour que le matériel acheté aujourd'hui puisse s'inscrire dans le schéma d'exploitation de demain. Ceci vaut aussi bien sûr pour les infrastructures de recharge.

En amont, il s'agit donc, pour les autorités régionales, de **fixer au transport public des objectifs stratégiques clairs** en termes sociaux (pourcentage de la population bien desservie), environnementaux (taux d'occupation des véhicules) et économiques (taux de couverture), en plus d'un objectif général de parts modales à atteindre.

IEW recommande de **faire évoluer l'offre de transport public wallon selon deux principes⁸⁰** : d'une part, une meilleure complémentarité train-bus (intégration horaire des services et création de nœuds multimodaux), et, d'autre part, une hiérarchisation et une diversification des services de transport public wallon (distinction entre transport public régulier, flexible et complémentaire).

Au niveau régional, il est donc nécessaire de **préciser pour le transport public wallon la politique de desserte souhaitée** en arrêtant les principes qui serviront de guides pour restructurer l'offre de transport public régulier et en définissant les balises de fonctionnement de l'offre de transport public flexible. En ce qui

⁷⁸ UITP. 2018. *Electric mobility & development – An engagement paper from the World bank and the international association of public transport*, p. 6

⁷⁹ European Commission. 2017. *Declaration of intent on promoting large-scale deployment of clean, alternatively fuelled buses in Europe*

⁸⁰ Ces principes sont pris en compte dans la stratégie régionale de mobilité



concerne le transport régulier, une stratégie de développement permettrait aussi d'identifier les lignes sur lesquelles des bus à haut niveau de service (BHNS) seraient nécessaires.

Pour le transport public flexible, entendu ici comme le transport par route, individuel ou collectif, organisé et financé par les pouvoirs publics et effectué à l'aide d'un véhicule de faible capacité (midibus, minibus, voiture), **la Wallonie devrait en prévoir le cadre et le financement, en partenariat étroit avec les pouvoirs locaux et les centrales de mobilité à développer à un niveau supra-communal**. C'est ce cadre qui déterminera les besoins physiques et qui permettra d'établir un calendrier d'investissements, avec très certainement une plus grande diversification des véhicules en termes de capacité.

Une stratégie à long terme permet aussi d'**assurer une certaine prévisibilité aux différents acteurs** (en ce compris les constructeurs et fournisseurs d'équipements). Aux Pays-Bas, « l'accord bus zéro émissions »⁸¹ conclu entre le gouvernement et les opérateurs de transport public établit que tous les nouveaux bus dédiés au transport public achetés à partir de 2025 devront être « zéro émissions » ; obligation qui concernera tous les bus dédiés au transport public en circulation à partir de 2030.

Les opérateurs ont également besoin de temps pour convertir leurs flottes : une stratégie régionale d'électrification devrait donc réaliser un équilibre entre l'urgence associée au défi climatique et le temps d'apprentissage nécessaire aux opérateurs : la première plaide pour une conversion des flottes aussi rapide que possible, le second pour une approche incrémentale.⁸²

2. Favoriser la filière tout électrique

Il y a 4 ans, au terme d'un travail prospectif, IEW concluait à l'opportunité de limiter le passage au « tout électrique » à certains lignes urbaines et de privilégier l'hybride partout ailleurs. Aujourd'hui, sur base de la présente étude bibliographique, **Inter-Environnement Wallonie recommande de** :

- envisager le redéploiement de trolleybus à batteries dans les grandes agglomérations wallonnes ;
- privilégier, dans la mesure du possible, les bus à batteries (BEB), technique à préférer absolument pour les véhicules les plus modestes (minibus et midibus) ;
- pour les services interurbains et ruraux pouvant difficilement être assurés avec les BEB actuellement disponibles sur le marché, opter pour des bus hybrides rechargeables ;
- pour les lignes express, envisager le passage aux bus à hydrogène (bus à pile à combustible ou FCEB), à condition que l'hydrogène soit généré par électrolyse, à base d'énergies renouvelables.

3. Adopter une approche holistique

En « passant le pas » de la motorisation électrique, les opérateurs, villes, communes et collectivités ne décident pas seulement d'acheter de nouveaux véhicules de transport en commun : il s'agit de repenser tout un système, dont de nombreux éléments seront impactés. Une approche holistique est dès lors indispensable.

⁸¹ <https://www.government.nl/latest/news/2016/04/15/dutch-public-transport-switches-to-100-percent-emissions-free-buses>

⁸² UITP. 2018. *Electric mobility & development – An engagement paper from the World bank and the international association of public transport*, p. 63



Sur le plan technique, l'électrification (dans ses différents déclinaisons : BEB, trolleybus ou FCEB) constitue actuellement (et à moyen terme) le seul moyen de décarboner les transports en commun motorisés. Ce qu'il convient de faire au plus tôt dès lors que l'on tente de relever le défi climatique.

Néanmoins, **l'électrification est nécessaire mais n'est pas suffisante. Elle ne fait sens que si l'entièreté du cycle de vie des véhicules et de l'énergie qu'ils consomment est prise en compte** en vue d'en diminuer autant que faire se peut les impacts environnementaux et sociaux. Ce qui implique notamment :

- de calibrer correctement la taille et la puissance mécanique des véhicules en fonction de leur utilisation (éviter de les sur-dimensionner) ;
- de générer l'électricité (ou tout autre vecteur énergétique, notamment l'hydrogène) à base d'énergies renouvelables.

Pour l'UITP, l'électrification devrait être vue comme une opportunité de développer des principes de soutenabilité qui n'ont pas été pris en compte lors du développement de la motorisation thermique.⁸³

L'approche holistique ne doit pas se limiter à la nécessaire prise en compte du cycle de vie des véhicules, carburant et vecteurs énergétiques. Ainsi, la réflexion devrait idéalement intégrer des éléments tels que :

- la possibilité d'installer des bornes de recharge pour voitures et vélos électriques en P+R couplées à des stations de recharge pour bus électriques (économies d'échelle) ;
- la possibilité de livraisons en ville par trolleybus⁸⁴ ;
- la pertinence d'électrifier des véhicules affectés à des services particuliers, tels que les bus scolaires (notamment ceux de faible capacité) : avec des trajets concentrés en début et fin de journée, ils sont plus simples à recharger durant la nuit ou la journée en faible tension et offrent la possibilité de jouer le rôle de stockage d'énergie, à restituer au réseau durant les pics (« vehicle-to-grid »)⁸⁵, etc.

4. Développer des aides et incitants ciblés

Migrer vers un système de transport durable nécessite de développer une approche globale incluant trois axes stratégiques et connue sous l'acronyme ASI (avoid-shift-improve)⁸⁶ :

1. une très forte réduction de la demande de transport ;
2. un transfert modal massif de la voiture vers les transports en commun et les modes actifs (marche, vélo et micromobilité) ;
3. un transfert technologique vers des véhicules « zéro émissions » (à l'échappement).

Dans cette optique, l'électrification des transports en commun par route fait triplement sens : d'une part, elle participe à renforcer leur attrait et donc à accélérer le transfert modal en leur faveur ; d'autre part, elle améliore les performances environnementales d'un mode de transport appelé à jouer un rôle majeur dans un système de transports soutenable et, enfin, elle constitue une « porte d'entrée » pour des technologies dont l'application à de plus petits véhicules est (économiquement ou techniquement) moins aisée.

⁸³ UITP. 2018. *Op. Cit.*, p. 64

⁸⁴ Spousta J. et al. 2013. *Trolleybus Intermodal Compendium*, p. 62-63

⁸⁵ Miller A. et al. 2018. *Electric Buses - Clean Transportation for Healthier Neighborhoods and Cleaner Air*, p. 16

⁸⁶ UITP. 2018. *Electric mobility & development – An engagement paper from the World bank and the international association of public transport*, p. 62



Inter-Environnement Wallonie recommande dès lors aux pouvoirs publics de cibler les aides et incitants vers les véhicules de transport en commun plutôt que vers les véhicules privés.

Des formules novatrices de soutien financier public à l'achat de bus électriques peuvent être développées, telles le mécanisme de « pay as you save » par lequel les bénéficiaires d'un prêt à taux avantageux remboursent en fonction des économies d'énergie et de coûts de maintenance réalisées⁸⁷.

Par ailleurs, les aides peuvent aussi prendre d'autres formes, telles la formation des conducteurs (eco-driving, gestion optimisée de l'énergie), la formation du personnel technique (haute tension, équipements électriques), la formation des pompiers, etc.

5. Soutenir les villes, communes et collectivités

Les collectivités, villes et communes ne disposent que rarement des moyens nécessaires à développer l'expertise (technique, juridique et financière) nécessaire pour poser des choix optimaux en termes d'électrification des flottes de véhicules dont elles ont la gestion.

Il semble dès lors raisonnable de collectiviser et partager cette expertise au sein de l'administration régionale (SPW MI, AOT), laquelle aurait dès lors un rôle de soutien et d'aide aux villes, communes et collectivités dans leurs projets d'électrification des véhicules de transport en commun.

Il est également intéressant de **développer une plateforme de partage d'expertise en collaboration avec les opérateurs utilisant déjà du matériel électrique** (OTW, SNCB, STIB, etc.).

Le co-financement existant dans le cadre des « Proxibus » (le véhicule est acheté par l'OTW qui en assure aussi le gros entretien, alors que les frais d'exploitation variables sont pris en charge par les communes) **pourrait être développé et optimisé pour favoriser l'achat de véhicules électriques.** Cela ferait d'autant plus sens que l'entretien de véhicules électriques demande un savoir-faire spécifique, plus facile à développer au sein de l'OTW qu'au sein de toutes les communes et collectivités.

⁸⁷ Horrox J., Casale M. 2019. *Electric buses in America*



Liste des acronymes

| | |
|--------|---|
| AOT : | autorité organisatrice du transport (voir PTA) |
| BEB : | bus électrique à batterie (ou battery electric bus) |
| CNG : | compressed natural gas (voir GNC) |
| FCEB : | fuel cell electric bus (bus électrique à pile à combustible – ou à hydrogène) |
| GNC : | gaz naturel comprimé |
| LEB : | low emission bus (bus à faibles émissions) |
| OEM : | original equipment manufacturer (entreprise fabricant des pièces détachées ou équipements – par extension : fabricant de véhicules) |
| OPT : | opérateur public de transport |
| PTA : | public transport authority (autorité de transport public – voir AOT) |
| PTO : | public transport operator (voir OPT) |
| TCO : | total cost of ownership (coût total d'utilisation) |
| UITP: | Union international du transport public |



Bibliographie

- [1] ABB. 28/10/2019. *The electric bus – range is a matter of perspective* [en ligne] <URL: <https://new.abb.com/news/detail/40849/the-electric-bus-range-is-a-matter-of-perspective>>

- [2] ACEA. 21/04/2020. Fuel types of new buses: diesel 85%, hybrid 4.8%, electric 4%, alternative fuels 6.2% share in 2019 – Press release

- [3] ADEME, Bénita D., AJBD, Fayolle D. 2018. Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains

- [4] APTA. 2019. Public Transit Leading in Transition to Clean Technology. Policy brief

- [5] Astbury D. 2017. Hybrid buses in Birmingham

- [6] BBL, CNCD-11.11.11, FIAN Belgique, Greenpeace Belgique, IEW, Oxfam Belgique. 2019. *Pas de nourriture dans nos voitures – Evaluation de la politique belge d'incorporation d'agrocarburants* [en ligne] <URL : <https://www.cncd.be/IMG/pdf/rapport-pas-de-nourriture-dans-nos-voitures-rapport-sept-2019-web.pdf>>

- [7] Bloomberg NEF. 2020. Electric vehicle outlook 2020 – Executive summary

- [8] Collignon A. 2016. *Agrodiesel : le remède empire l'état du malade !* Inter-Environnement Wallonie [en ligne] <URL : <https://www.iew.be/agrodiesel-le-remede-empire-l-etat-du-malade/>>

- [9] Commission européenne. Directive (UE) 2019/1161 du Parlement européen et du Conseil du 20 juin 2019 modifiant la directive 2009/33/CE relative à la promotion de véhicules de transport routier propres et économes en énergie

- [10] Commission européenne. 2014. Directive 2014/94/UE du Parlement européen et du Conseil du 22 octobre 2014 sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs

- [11] Commission européenne. 2014. Communication de la Commission - Lignes directrices concernant les aides d'État à la protection de l'environnement et à l'énergie pour la période 2014-2020 (2014/C 200/01)



- [12] Commission européenne. 2014. Directive 2014/25/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 relative à la passation de marchés par des entités opérant dans les secteurs de l'eau, de l'énergie, des transports et des services postaux et abrogeant la directive 2004/17/CE

- [13] Commission européenne. 2009. Directive 2009/33/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de véhicules de transport routier propres et économes en énergie

- [14] Cooney G. et al. 2013. Life Cycle Assessment of Diesel and Electric Public Transportation Buses

- [15] Croxford J. 2017. Hybrid buses in Leeds

- [16] Courbe P. 2010. Véhicules électriques? Changer de mobilité, pas de voiture! Namur : Inter-Environnement Wallonie

- [17] Element Energy. 2017. Commercialisation of hydrogen fuel cell buses - Discussion paper

- [18] Eudy L., Jeffers M. 2020. *Zero-Emission Bus Evaluation Results: Long Beach Transit Battery Electric Buses*. FTA Report No. 0163. Federal Transit Administration

- [19] Eudy L., Jeffers M. 2018. *Zero-Emission Bus Evaluation Results: County Connection Battery Electric Buses*. National Renewable Energy Laboratory

- [20] Eudy L., Post M. 2018. *Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Current Status 2018*. National Renewable Energy Laboratory

- [21] European Commission. 2017. Declaration of intent on promoting large-scale deployment of clean, alternatively fuelled buses in Europe

- [22] European Commission. 2013. Commission staff working document – Guidelines on financial incentives for clean and energy efficient vehicles SWD(2013) 27 final

- [23] Fabius B. 2018. Planning for EV fleet rollout: Experiences from the Netherlands

- [24] Grütter J. 2015. Real World Performance of Hybrid and Electric Buses



- [25] Holyszko P., Filipek P. Z. 2016. Estimation of the running costs of autonomous energy sources in trolleybuses

- [26] Horrox J., Casale M. 2019. *Electric buses in America*

- [27] IPCC. 2018. Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels* [en ligne] <URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf>

- [28] ISSeP, 2016, Exposition de sujets durant leur activité transport : Résultats projet ExTraCar

- [29] Kerslake M. et a. 2020. Shepherds bush electrification case study

- [30] Lebkowski A. 2019. Studies of Energy Consumption by a City Bus Powered by a Hybrid Energy Storage System in Variable Road Conditions

- [31] LowCVP. 2016. The Journey of the Green Bus

- [32] Miller A. et al. 2018. Electric Buses - Clean Transportation for Healthier Neighborhoods and Cleaner Air

- [33] Moataz M. et al. 2016. Electric Buses: A Review of Alternative Powertrains

- [34] Nottingham. 2017. Electric bus Factsheet

- [35] OXFAM. 2016. *Agrocarburants: comment l'Europe réchauffe le planète* (https://oi-files-d8-prod.s3.eu-west-2.amazonaws.com/s3fs-public/bp-burning-land-climate-eu-bioenergy-261016-fr_o.pdf)

- [36] Pourbaix J. 2019. Deployment of electric buses in Europe. UITP

- [37] RECORD. 2019. Recyclage et réemploi des batteries – Etat de l'art

- [38] Ricardo. 2016. The role of natural gas and biomethane in the transport sector



- [39] Ricardo. 2013. Air Quality Emissions Impacts of Low CO₂ Technology for Buses

- [40] Spousta J. et al. 2013. Trolleybus Intermodal Compendium

- [41] T&E. 2020. Recharge EU trucks: time to act! - A roadmap for electric truck charging infrastructure deployment

- [42] Tong F. et al. 2017. Life cycle ownership cost and environmental externality of alternative fuel options for transit buses

- [43] UITP. 20/04/2020. Progressive resumption of services and survival of urban public transport and local mobility services in Europe – Open letter

- [44] UITP. 2018. Electric mobility & development – An engagement paper from the World bank and the international association of public transport

- [45] UITP. 2014. *Trolleybus : back in focus* – News [en ligne] <URL: <https://www.uitp.org/trolleybus-back-focus>>

- [46] Varga B. O. 2020. Direct and Indirect Environmental Aspects of an Electric Bus Fleet Under Service

- [47] Volvo. 2018. Electric buses and opportunity charging

- [48] Walckiers J. 2017. *Trolleybus, mobilité d'une autre époque?* Inter-Environnement Wallonie [en ligne] <URL : <https://www.iew.be/trolleybus-mobilite-d-une-autre-epoque/>>

- [49] Wright T. 2018. First pure electric double deck buses on streets of London

- [50] ZeEUS. 2018. Demonstrations

- [51] ZeEUS. 2017. eBUS Report #2 – An updated overview of electric buses in Europe