



La batterie, nouvel atout de

Les partisans du « bifilaire » ne désarment pas. Les défenseurs du trolleybus y voient en effet le véritable bus réellement « tout électrique », puisque la batterie peut être ici un appoint non négligeable pour développer les réseaux et « faire du propre ». Comme l'ont démontré les intéressants débats de la VI^e rencontre « e.Bus : conférence », et qui, cette année, s'est opportunément tenue les 21 et 22 novembre à Solingen. La véritable capitale allemande du trolleybus ...

On ne pouvait imaginer un meilleur lieu de rendez-vous en Allemagne, tant le réseau de Solingen apparaît autant comme l'une des forteresses européennes du trolleybus, que l'un des véritables laboratoires de son avenir. Aussi, les quelques 200 experts, représentants de réseaux et d'exploitants, d'industriels et d'équipementiers réunis dans le cadre de la VI^e « eBus : conférence » par l'association *Trolley-motion* qui lance le programme trolley : 2.0 soutenu par l'Union

européenne ont ici trouvé durant deux jours un forum à la mesure des enjeux espérés.

Les enjeux en question ont été rappelés par Daniel Steiner, président de *Trolley motion*, qui voit de « grandes promesses d'avenir dans les trolleybus équipés de batteries en raison de leur flexibilité, de leur fort impact environnemental⁽¹⁾ et de leur moindre coût économique ». En effet, la question des coûts, et donc plus largement celle du modèle économique du trolleybus, ont été l'objet de discussions ap-

➦ Le trolleybus à Arnhem aux Pays-Bas.

profondies durant cette conférence. Comme l'a rappelé Marcel Manheiler, représentant de Kiepe Electric, même si l'investissement initial de création d'un système de trolleybus reste très inférieur à celui d'un tramway - une différence considérable, de l'ordre de un à trois, voire de cinq à dix - elle se situe en moyenne autour d'un niveau minimal de 0,8 à 1,2 M€ par kilomètre selon l'UITP⁽²⁾. Un coût qui concerne la construction des lignes aériennes et leur approvisionnement électrique via les sous-



es trolleybus



stations. Un ensemble auquel s'ajoute l'acquisition des véhicules qui peut doubler la facture. Mais, si les trolleybus sont deux fois plus coûteux que les autobus classiques (à peine plus qu'un bus électrique), ils offrent aussi une durée de vie double, précise l'intervenant...

La volonté d'étendre les réseaux de transports urbains et de les électrifier au maximum pour réduire les émissions (et la facture pétrolière) met en avant l'intérêt renouvelé des trolleybus. Pourtant, ➤

⚡ Batteries Solaris sur les trolleybus de Solingen en Allemagne.

LES TROLLEYBUS DE SOLINGEN S'AFFIRMENT COMME LE RÉSEAU DE L'INNOVATION

Le réseau des trolleybus de Solingen dessert une ville de 160 000 habitants. Située géographiquement dans une sorte « d'entre-deux », puisqu'elle se trouve coincée entre le nord de l'agglomération de Cologne et le sud-ouest de celle de Wuppertal, à l'extrémité occidentale de la gigantesque conurbation de la Ruhr.

Solingen est la ville qui gère le plus important réseau trolleybus d'Allemagne. Né en 1952 pour succéder à un ancien système de tramways dévasté par les bombardements de 1942-1944, et qui avait été sommairement réparé à l'issue du conflit, il se développe aujourd'hui sur six lignes*, qui totalisent près de 200 km de trajets. Sur la solide base technique de 56 kilomètres d'équipements électriques aériens bifilaires qui sont notamment très intensivement utilisés au centre-ville. Là où les six lignes réunies forment un tronc commun de deux kilomètres sur lequel les véhicules se succèdent aux deux minutes voire moins en heures de pointes.

Ce réseau est le reflet fidèle des besoins atypiques de desserte d'un espace urbain qui ne l'est pas moins, puisque l'aire urbaine de Solingen est marquée par un étalement considérable, et est située dans une zone de relief naturel de vallées ponctué de véritables espaces forestiers. Ainsi, le quartier de la gare principale desservi par la ligne Cologne-Dortmund est distant de six à huit kilomètres du centre-ville selon les itinéraires offerts par les réseaux de transports publics.

L'un, ferroviaire, bénéficie d'une offre à la fois rapide (10 minutes), dense et cadencée (80 trains/jour) qui traverse les zones boisées et dessert les entrées du sud du centre-ville. L'autre est assuré par deux lignes de trolleybus parallèles, elles-mêmes en contact intermodal avec les deux gares ferroviaires les plus proches du centre-ville. Avec, respectivement, 16 et 19 stations intermédiaires jusqu'au centre-ville, leurs parcours desservent finement des quartiers d'urbanisation de type pavillonnaire parfois lâche mais généralement plus densément construits que ceux qui bénéficient de la voie ferrée.

Ici, le trolleybus concrétise donc des liens d'agglomération qui seraient a priori peu évidents à mettre en place, grâce à une offre de transport dense qui, sur 20% du kilométrage du réseau, concentre 65% des 26 millions d'usagers annuels de l'entreprise de transports du SWS, le Stadtwerke Solingen. Le réseau associe les trolleybus (six lignes et 170 arrêts) et les autobus (15 lignes et 500 arrêts), ainsi que les lignes S6 et S7 du S-Bahn (RER) de Cologne qui desservent Solingen. Ces lignes appartiennent à la même « communauté tarifaire », et leur offre est coordonnée avec celles des transports urbains dans trois gares, dont les deux desservant le centre-ville.

Le parc des trolleybus de Solingen totalise 50 véhicules articulés. Soit 15 Berkhof-Traxis livrés en 2001-2002, 20 Van Hool-Kiepe livrés de 2001 à 2003, et 15 Hess-Kiepe de type Swisstrolley III à plancher bas intégral mis en service en 2009 et en 2010. Vont s'ajouter les 16 véhicules Solaris 18 non articulés en version IMC et équipés de batteries Kiepe Electric, dont le premier sera mis en service commercial expérimental sur la ligne 695 dès janvier 2019.

MC

(*) Dont une allant au nord jusqu'à Wuppertal dans le quartier de Wohwinkel, terminus du célèbre monorail suspendu, le « Schwebebahn ».

depuis de nombreuses années, ceux-ci ont été mis de côté, en raison du vieillissement de nombreux réseaux et des critiques souvent liées à « l'esthétique urbaine »⁽³⁾.

La solution de mixité en tout électrique

Toutefois, l'irruption de l'idée d'une solution de « mixité en tout électrique » parfois qualifiée « d'hybride électrique », et qui associe alimentation aérienne et batteries, est née de la volonté de résoudre des problèmes qui pourraient se

poser dans la création et l'exploitation d'un système de trolleybus classique.

Ce qu'explique Alex Naeff, responsable de Carrosserie Hess AG, emblématique constructeur helvétique de trolleybus, en présentant les deux méthodes de chargement des batteries en ligne. La première, dite IMC (*In Motion Charging*), via l'alimentation par perche, et la seconde, en stations notamment en terminus, dite OC (*Opportunity Charging*) avec diverses technologies de « biberonage »⁽⁴⁾, depuis le rail d'alimentation au sol jusqu'au

« pantographe renversé » qui se colle au véhicule, et en passant par la classique utilisation de la perche.

Toujours du côté de l'alimentation-recharge des batteries, Thierry Jenelten, d'ABB Schweiz, y ajoute les possibilités de récupération de l'énergie de freinage, tout en précisant que la solution des batteries peut permettre, par exemple, de supprimer des intersections bifilaires installées en centre-ville (notamment dans des secteurs monumentaux ou historiques), ce qui serait à la fois inesthétique et

TROLLEY : 2.0 : DU BOB DE SOLINGEN



L'appui du programme trolley 2.0 aux projets de trolleybus à batteries a été initié par le plan BOB du réseau de Solingen, BOB comme Batterie Oberleitung Bus, ou trolleybus à batteries. Un investissement de 15 M€ appuyé par l'État fédéral allemand dans le cadre de son programme NOW de mobilité électrique et mis en place ici en partenariat avec l'Université de Wuppertal.

Du côté des matériels roulants, il se concrétise par la mise en service progressive de l'IMC (*In Motion Charging* ou chargement dynamique en ligne) de 16 trolleybus articulés Trollino Solaris 18.75, dont le moteur auxiliaire Diesel est ici remplacé par un pack de batteries Kiepe Electric installées en arrière-caisse. Elles totalisent une puissance de 60 kW pour un poids de 1,2 tonnes,

soit moins de 5% de la masse totale du véhicule. Elles offrent une autonomie de 20 kilomètres qui varierait en fonction de la topographie du parcours. Le premier trolley 100% électrique livré en janvier 2018 est en essais depuis six mois. Il sera en service commercial dès début 2019 sur la ligne 695 du réseau qui du nord, à Abteiweg près de Wuppertal, au sud à Meigen associe une section centrale de 3 km équipée d'alimentation aérienne traversant le cœur de l'agglomération, et deux sections terminales (3 km au nord et 2,5 km en boucle au sud) où les trolleybus fonctionneront sur batteries avec des postes de rechargement en stations terminus (*Opportunity Charging OC*), les batteries étant également alimentées en ligne, donc en IMC, sur la section bifilaire.

📍 Gdynia
en Pologne.

📍 Eberswalde
en Allemagne.

Au delà des seuls matériels roulant, le projet BOB de Solingen vise à renforcer l'alimentation électrique des sections bifilaires, et à mettre en place un système informatisé et centralisé de gestion du trafic, d'alimentation énergétique des lignes, mais aussi de contrôle en ligne du niveau de chargement et de rechargement des batteries des véhicules équipés IMC.

Au premier « polygone d'essais » de Solingen s'ajoutent, avec l'aide de l'Union européenne* coordonnée par trolley : 2.0, une série d'expérimentations comparables de l'IMC, réalisées dans quatre importants réseaux de trolleybus européens. Elles sont ou seront appliquées sur une variété élargie de types de véhicules. Des projets qui, comme à Solingen, sont étudiés et mis en œuvre en partenariat avec

moins coûteux.

Autant d'exposés de solutions techniques variées qui ont mis en avant l'intérêt des trolleys sur batteries, et dont les applications ont largement été illustrées durant ces journées d'exemples vivants issus des réseaux de transports urbains, qu'il s'agisse d'études économiques ou d'impact comme de bilans d'expériences. Elles sont venues de Prague à Zurich, en passant par Stockholm et la région suédoise du Gotland, Lucerne, Berlin et Plzen. Même si on sentait parfois poindre une certaine confusion entre le

choix du trolleybus et celui du bus électrique partiellement ou ponctuellement équipé bifilaire...

Les solutions batteries et leur impact environnemental

Des témoignages d'exploitants auxquels s'ajoutent des exposés de chercheurs et d'industriels qui se penchent sur les solutions batteries existantes sur le marché.

Si on veut simplifier très exagérément le débat, le choix pourrait se résumer à deux options technologiques entre lesquelles le choix n'est pas évident, tant pour les

constructeurs de matériels que pour les exploitants de réseaux.

Il y a d'abord celui des batteries lithium-ion (2,7 millions exemplaires vendus en 2017), qui sont apparues durant les années 1990, et dont la « densité énergétique » aura triplé en moins de trois décennies, a rappelé Vanessa Wood (ETH Zurich). « Densité » et puissance pouvant encore s'accroître grâce à divers additifs, voire avec l'apport du nickel pour pouvoir utiliser de plus hauts voltages, et concurrencer dans ce domaine la seconde option.

NGEN AUX PROJETS PARTENARIAUX



des universités proches : à Arnhem (Pays-Bas) avec l'Université d'Arnhem, à Eberswalde (Allemagne) avec l'Université Technique de Dresde, à Gdynia (Pologne) avec l'Université de Gdansk et à Szeged (Hongrie) avec l'Université de Szeged.

À Arnhem, les projets d'extension du réseau, qui totaliseraient jusqu'à 31 km de lignes nouvelles d'ici l'horizon 2030, associeront des sections équipées ou non de caténaires bifilaires. D'ores et déjà, de premières expérimentations IMC réalisées avec des véhicules articulés Van Hool et Hess Swisstrolley ont été lancées depuis décembre 2018. À Eberswalde, après de premiers tests de batteries qui ont été réalisés cette année sur un midibus de type Evo-pro-Ikarus, c'est en 2019 qu'un classique trolleybus Solaris 18 du réseau sera

« transformé IMC », équipé de batteries LTO de 47 kW et doté d'un système de perchage automatique. Ce seront les premiers pas vers l'étude, en 2020, d'une nouvelle ligne qui serait mise en place en partie sans aucun équipement bifilaire.

À Gdynia, huit véhicules Solaris ou anciens bus convertis en trolleybus sont équipées de batteries (7 en lithium-ion et un en LTO) et fonctionnent déjà en service commercial sur des sections suburbaines sans caténaires. Le nombre de trolleybus équipés IMC devrait passer à 58 unités en 2020 (28 équipés en lithium-ion et 30 en LTO). Cela parallèlement à l'électrification et à l'hybridisation du parc des autobus (8 véhicules en 2018 et 64 en 2020). À Szeged, le réseau équipe une section de ligne non filaire et teste deux véhi-



📍 Szeged
en Hongrie.

📍 Solingen
en Allemagne.

cules articulés Skoda avec des batteries. Dans ce contexte foisonnant, on peut regretter l'absence française dans une « boucle » qui semble aussi vertueuse que prometteuse !

Alors que le réseau STAS de Saint-Étienne vient d'investir 20 M€ pour l'acquisition de 22 nouveaux trolleybus « équipés IMC » à livrer en 2019-2020, et qu'à Lyon, le Sytral et les TCL relancent des lignes de trolleybus en réutilisant des sections déjà équipées bifilaires pour créer de nouvelles lignes, l'IMC permettant d'aller au-delà sans équipements aériens supplémentaires...

MC

(*) Aide accordée dans le cadre du programme « Elptic » (Electrification of Public transports in cities) de l'Union européenne en quelque sorte héritier du précédent programme Zeu des années 2000. « Elptic » se focalise sur le développement des transports électriques dans 11 agglomérations européennes en partenariat avec 33 institutions scientifiques et entreprises industrielles spécialisées. Avec un budget de 5,98 M € apporté dans le cadre du projet Civitas-UE.

Celle des batteries lithium-titanate (LTO), apparues chez Toshiba en 2005, et qui se targuent, outre d'une durée de vie décennale et de pas moins de 6000 cycles chargements/déchargevements, de vitesses de chargement qui seraient sept à dix fois plus rapides que les premières, tout en pouvant utiliser des courants plus élevés. Elles ont toutefois l'inconvénient d'un poids bien plus élevé (jusqu'à trois fois) ce qui pénalise les matériels.

« Les cycles chargevements-déchargevements-rechargevements n'est pas sans effet sur le vieillissement des batteries », constate Jürgen Lange, du cabinet Verkehrs Consult, qui a effectué des simulations en grandeur réelle en coopération avec l'Université Technique de Dresde. Ce qui poserait la question des techniques de rechargements qui joueraient un rôle dans le processus d'usure. Et qui amène une autre question : que faire des batteries usagées ?

Cet impact environnemental qui inclue les possibilités de recyclage a été brillamment expliqué par Lisbeth Dahllöf (Institut suédois pour la Recherche Environnementale). Elle constate qu'on possède cependant peu d'études en amont sur la phase de production des batteries elles-mêmes, incluant notamment les sources de production de matières premières. Elle distingue toutefois cinq étapes d'impact à prendre en compte, depuis les matériaux jusqu'à la fin de vie, en passant par l'exploitation minière, la fabrication et l'usage. Mais avec des estimations de proportions d'impacts très contradictoires en amont, puisqu'ils vont de 30 à 70% du total... ou inversement (!) mais plutôt bien délimités en aval, puisqu'ils vont de 0,5% à 10% en usage, et se situeraient à 20% en fin de vie. On remarquera que dans le débat d'aujourd'hui, c'est l'impact de



l'usage qui focalise le choix de « l'électrique tout batteries ». Aussi, en l'absence d'études encore suffisamment larges et fiables, l'option du trolleybus à batteries semble apparaître comme la plus intéressante, tant économiquement qu'au point de vue environnemental. Ce que ne peut finalement que réjouir les militants de *trolleyemotion*...

En tout état de cause, le potentiel d'électrification dans le domaine des transports urbains reste considérable, comme l'a rappelé Arnd Stephan, professeur à l'Université Technique de Dresde (Allemagne). Puisqu'« après les tramways qui auront mis vingt ans à s'électrifier entre 1890 et 1910, c'est désormais l'heure des bus qui a sonné. Alors que les trolleybus apportent une expérience déjà bien établie. Même s'il faut créer de nouvelles infrastructures électriques ce qui peut, aujourd'hui faute de programmes établis, prendre aussi de cinq à dix ans ».

Aussi, le rendez-vous et point d'étape incontournable des professionnels du secteur sera sans aucun doute... la prochaine rencontre de *trolleyemotion* ! ■

MICHEL CHLASTACZ



➤ Trolleybus de Lyon.

➤ Saint-Etienne.

- 1) Notamment si l'approvisionnement électrique des systèmes de transport est lié au « développement durable », ajoute-t-il. Tim Kurzbach, maire de Solingen, a rappelé dans son allocution de bienvenue que les trolleybus permettent ici une économie de carburant de 2000 tonnes par an !
- 2) Coût d'investissement qui est lui-même différencié entre une ligne d'alimentation simple (0,5 M €/km) et les croisements ou les reports, des sortes de complexes « aiguillages aériens » (0,65 et 0,85 M €/km). Voir « How to built and operate an efficient trolleybus system », UITP Publication, 2015.
- 3) Particulièrement fortes en France où les réseaux bifilaires sont jugés trop « voyants » par certains élus. Qui, en revanche, ne semblent pas voir l'espace occupé par les panneaux routiers et les espaces publicitaires !
- 4) Elles-mêmes exposées durant les débats par différents intervenants industriels, elles ne diffèrent pas de celles appliquées aux bus électriques.