

SNCF
SARDO-Bibliothèque
45, rue de Londres
75379 PARIS CEDEX 08
(PARIS SAINT-LAZARE)
Tél. : 01 53 42 90 11

REFERENCE

FER064911

CAHIER

223

1865

Rail

2009-01/02, n° 153, p. 36-38, ill. - (REVUE) - S/C : 0702

Bombardier au ras des pâquerettes

ALLEMAGNE



La rame de Halle sur laquelle est testé le système Primove. On la voit arriver pantographe baissé sur la section de voie équipée, à Bautzen

Investissant lui aussi le domaine des tramways sans caténaire, Bombardier vient de mettre au point Primove, une solution d'alimentation par induction par le sol pleine de promesses: plus de câble haute tension accessible, plus de pièces d'usure pour le captage, plus de fils aériens devant les monuments. Les essais se poursuivent à Bautzen.

ET si ce qui apparaissait hier comme une lubie d'élus et un pari technique risqué, était finalement l'avenir du tramway? En se lançant lui aussi dans l'aventure du tram sans caténaire – et même "sans contact", serait-on tenté d'écrire – Bombardier donne en tout cas du crédit à cette vision d'un véhicule ferroviaire glissant avec fluidité sur ses rails, sans rien qui ne dépasse...

L'alimentation par le sol, mieux connue sous son abréviation d'APS, était jusqu'à présent la spécialité d'Alstom. Un avantage concurrentiel qui a révélé son importance à partir de 2006, une fois la technologie fiabilisée sur le réseau de tramway de Bordeaux. L'APS a permis au groupe français d'emporter coup sur coup deux appels d'offres, à Angers et Orléans, conquises par la perspective d'avoir une section sans caténaire en ville, quitte à payer un peu plus cher.

Un domaine dans lequel Bombardier n'entend pas laisser le champ libre à son grand rival. Comment expliquer autrement que le leader mondial du tramway, après avoir cru d'abord aux vertus des supercapacités, se soit finalement lancé lui aussi dans la mise au point d'un sys-

tème d'alimentation sans caténaire? Baptisée Primove, cette innovation a été dévoilée d'abord au salon Innotrans (Berlin) l'automne dernier. Elle est rangée sous la nouvelle bannière "Eco⁴" (pour Energie-Efficacité-Economie-Ecologie), un sigle qui regroupe toutes les solutions techniques de Bombardier destinées à rendre les trains et tramways plus "verts". En phase finale de développement, le système Primove est maintenant en cours de test sur le circuit d'essais de l'usine de Bautzen, l'un des sites de Bombardier spécialisés pour le tramway, situé dans l'est de l'Allemagne, où la presse professionnelle a pu le voir en vraie grandeur le 22 janvier.

Effets de sol

Premier constat de Carsten Struve, directeur Développement Technologies de pointe chez Bombardier: la caténaire (dans le cas des tramways, on parle plutôt de "ligne aérienne de contact" ou LAC), a des décennies d'expérience derrière elle et constitue aujourd'hui une solution d'alimentation éprouvée, extrêmement stable, et au comportement physique parfaitement maîtrisé.

Passé l'étape de l'incrédulité – l'univers ferroviaire est traditionnellement conservateur et réticent à abandonner une solution technique qu'il connaît bien – force est de constater, pourtant, qu'une alimentation sans caténaire présente aussi un certain nombre d'avantages.

Il y a tout d'abord l'aspect esthétique, auxquels les élus semblent aujourd'hui très sensibles, au point peut-être d'en faire trop. Ceux qui réclament des tramways discrets et des stations épurées sont-ils aussi exigeants vis-à-vis des enseignes, des panneaux de signalisation et des feux tricolores? A leur décharge, ce sont les constructeurs eux-mêmes qui ont largement mis en avant les qualités environnementales et l'absence de nuisances garanties par le tramway. C'était par opposition au bus mais on les a pris au mot... On pense moins souvent aux trois autres facteurs. Sans la caténaire, la ligne de tramway ne gêne plus les pompiers (c'est un avantage dans les rues étroites du centre-ville) ni les convois exceptionnels (utile à la traversée des rocades en banlieue). Elle nécessite un gabarit moins généreux pour les ouvrages d'art où chaque centimètre de gagné se traduit en

milliers, sinon en millions d'euros d'économie. Enfin, elle diminue les précautions à prendre au dépôt où il faut consigner la caténaire avant toute intervention sur les (nombreux) équipements en toiture du tramway, pour éviter que les agents ne soient électrocutés.

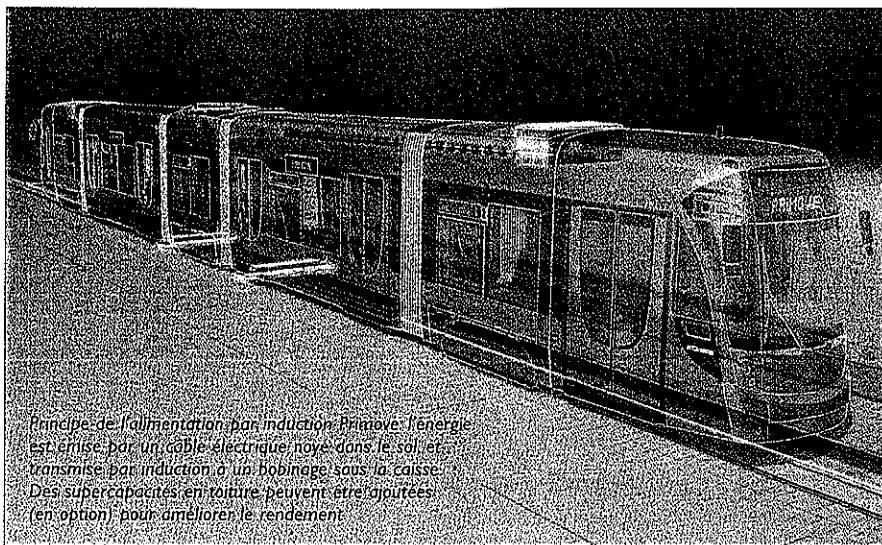
Outre l'aspect esthétique, il y a donc des considérations objectives de coûts et de disponibilité du matériel que l'industriel ne peut ignorer en répondant à un appel d'offres. L'enjeu semble aussi être, pour Bombardier comme pour Alstom, de séduire d'autres villes qui n'étaient pas entièrement convaincues par un tramway "classique". Même si le marché est déjà en pleine croissance et que les capacités de production de l'usine de Bautzen (200 à 250 trams/an) sont totalement utilisées plusieurs mois à l'avance.

Un principe séduisant

Les mauvaises langues diront que Bombardier a tiré profit du retour d'expérience d'Alstom et de ses difficultés à mettre au point l'APS. Les autres retiendront plutôt que, s'étant attelé plus tard à la tâche, Bombardier a su tirer profit des derniers développements technologiques pour imaginer une solution différente. Plus de captage du courant par une sorte de troisième rail central, en effet, qui rappelle aux historiens le système Diatto utilisé avec un succès très relatif par certains tramways de province au début du 20^e siècle. Primove utilise à la place un transfert de puissance par induction, entre un câble situé dans le sol et un enroulement situé sous la caisse du tramway. L'idée n'est pas nouvelle à proprement parler, puisque l'induction est déjà utilisée dans un certain nombre d'applications domestiques et industrielles: plaques de cuisson, brosses à dent électriques, etc. En revanche, c'est une grande première dans le domaine ferroviaire où les puissances mises en jeu sont bien plus importantes.

Dans les grandes lignes, l'alimentation par induction utilise le même principe de transfert d'énergie qu'un transformateur: L'énergie arrive dans un enroulement primaire, traverse un noyau de fer doux sous forme magnétique, pour être "récupérée" sous forme électrique dans un enroulement secondaire. Le noyau de fer peut être découpé en deux parties, séparées par un "entrefer". Ce qui permet de réaliser une partie "sol", avec l'enroulement primaire déroulé au milieu de la voie pour former une simple boucle et une partie "bord" sous la caisse, avec l'enroulement secondaire.

L'idée est séduisante pour plusieurs raisons, en premier lieu parce qu'elle permet une alimentation sans contact physique. Ainsi, elle devient totalement insensible aux aléas climatiques (neige, givre, pluie...) qui peuvent perturber ou empêcher la circulation de tramways ali-



Principe de l'alimentation par induction: Primove: l'énergie est émise par un câble électrique noyé dans le sol et transmise par induction à un bobinage sous la caisse. Des supercondensateurs en toiture peuvent être ajoutés (en option) pour améliorer le rendement.

© Bombardier Transport

mentés par APS ou par caténaires. Fini aussi les pièces d'usure à changer régulièrement comme les bandes de contact des pantographes. Le câble au sol est un "simple" conducteur en cuivre dont la durée de vie peut atteindre 50 ou 100 ans, comme les fils électriques d'une maison, explique en substance Carsten Struve. Le câble au sol est toujours isolé électriquement. Il n'y a donc plus de risque d'électrocution au contact de la haute tension. Enfin, il peut être placé dans n'importe quel type de revêtement (pavés, béton, bitume, gazon, sable), la seule contrainte étant qu'il soit situé 1 à 2 cm sous la surface. Plus le câble est profondément enterré, en effet, plus l'entrefer est important et plus la déperdition d'énergie entre sol et tramway augmente. Dans ces conditions, l'alimentation Primove a une efficacité de 98% environ, et les tramways ont les mêmes performances (accélération, etc.) que lorsqu'ils circulent sous caténaire.

Les incertitudes à lever

Les techniciens allemands de Bombardier qui ont développé Primove en un temps record (18 mois à partir du lancement du projet au printemps 2007), auraient-ils donc trouvé le graal: l'alimentation discrète et qui n'a que des avantages?

A ce stade, la prudence reste encore de mise car plusieurs incertitudes demeurent. Premièrement, le champ magnétique rayonné par le câble au sol est en théorie suffisamment puissant pour perturber pacemakers, montres et téléphones portables. Bombardier assure aujourd'hui que «toutes les réglementations de compatibilité électromagnétique sont respectées», que le bon fonctionnement des stimulateurs cardiaques fait partie des points vérifiés lors des essais et que le système devrait à terme être certifié par un organisme technique (TUV). Par mesure de précaution supplémentaire, le câble au sol est découpé en petites sections de quelques mètres, activées

seulement au passage du tramway (le reste du temps, aucun champ magnétique n'est donc présent). Cette "activation" sous le tramway qui rappelle un des principes de fonctionnement de l'APS, peut se faire de plusieurs façons, explique Carsten Struve. Par exemple par un système de puces "lues" par une balise sans contact au sol ou tout simplement en utilisant le principe de l'auto-induction. Le câble au sol "voit" alors tout seul qu'il y a un tramway au-dessus. Avec deux induits sous le tramway, on peut alors commander l'activation du câble (au passage du 1^{er} induit) et son extinction (au passage du 2^e). En cas de double équipement induction/caténaire, le "changement de mode" ne prend qu'une dizaine de secondes. Il sera donc naturel de l'effectuer pendant un arrêt en station. Autre handicap prévisible: le coût et plus précisément le surcoût par rapport à une caténaire. Il n'est pas encore chiffré avec précision, puisque Bombardier en est encore au démonstrateur ou à la présérie mais Carsten Struve reconnaît qu'un équipement Primove reviendra «probablement 20 à 30% plus cher que la caténaire». Mais l'alimentation sans caténaire sera ensuite plus économique: plus de remplacement des pantographes, plus de remplacement du fil de contact, plus de "chute de caténaire" et donc autant d'indisponibilité en moins pour le parc. Le surcoût à l'investissement devrait donc être assez largement compensé si l'on raisonne en termes de "cycle de vie". Mais les villes qui ont déjà du mal à financer certains projets pourront-elles investir 20% supplémentaires tout de suite, même en étant assurées de payer moins cher après? Le succès des PPP incite à la prudence...

Enfin, pour compenser la légère déperdition d'énergie liée à la distance d'entrefer (efficacité annoncée de 95-98%), Bombardier devrait recommander, en complément de l'alimentation par induction, d'équiper les rames de ses superca-



Voie équipée sur le circuit d'essais à Bautzen. Le câble inducteur est caché sous les capots au centre de la voie. À droite, l'électronique de commande de chaque section élémentaire

pacités Mitrac. Ce sont des condensateurs de haute puissance à double couche qui permettent de récupérer l'énergie au freinage pour la restituer ensuite au démarrage. Cet équipement sera totalement optionnel. Compte tenu de son poids, il serait par exemple impossible de l'installer sur des rames existantes qui n'ont pas été dimensionnées pour. Mais les économies d'énergie réalisées permettront de ne pas "surdimensionner" l'alimentation électrique.

Du tram au métro?

Diverses applications de cette alimentation par induction sont aujourd'hui évoquées. La plus naturelle, c'est la solution que Carsten Struve qualifie de «bimode», c'est-à-dire le choix déjà fait à Bordeaux, Reims, Angers et Orléans: alimentation par le sol dans le centre historique, caténaire classique ailleurs. Cette option permet de limiter le surcoût à l'équipement mais empêche de profiter pleinement des avantages du "sans fil".

Bombardier devrait donc à court terme plaider plutôt pour l'équipement total des lignes avec son système Primove et proposer des réponses en ce sens aux appels d'offres. Dans ce cas, l'équipement se trouve simplifié et la rame est allourdie dans des proportions raisonnables: environ 200 à 300 kg en plus pour l'induit sous la caisse, environ 150 kg en moins puisqu'il n'y a plus de pantographe en toiture.

Sur le plan technique, le système Primove paraît adaptable à tout type de voie et à tout tramway. Pour des raisons «commerciales», Bombardier se limiterait pourtant à l'heure actuelle à ses propres rames Flexity dont l'adaptation se résume «à la pose du coil sous la caisse et à une mise à jour logicielle», précise Carsten Struve.

A moyen terme, Primove pourrait également servir à alimenter non seulement des tramways mais des métros... voire, prédit Carsten Struve, à alimenter des au-

torails bimode au niveau des gares. Ils circuleraient ainsi en mode diesel dans la campagne mais sur une courte distance à la traversée des villes et pendant l'arrêt à quai, l'induction prendrait le relais de manière à éviter les nuisances et améliorer les performances. Une perspective qui suppose d'augmenter encore la puissance transmissible, limitée avec les moyens techniques actuels à 1 000 kW environ. Ce qui explique la priorité aujourd'hui accordée chez Bombardier au marché du tramway. Non seulement c'est le premier à être demandeur d'alimentations "sans fil" mais en plus les puissances nécessaires correspondent à ce qui est possible.

Mais comme le progrès ne s'arrête pas, pourquoi pas imaginer d'étendre un jour l'alimentation par induction jusqu'aux TGV, édulcorant ainsi les problèmes posés par le captage sous caténaire à grande vitesse?

Le supermarché du sans-fil

Dans l'immédiat, les essais commencés en septembre 2008 se poursuivent sur le circuit de Bautzen jusqu'à la fin 2009. Une rame Flexity Classic neuve destinée à Halle a été équipée en conséquence, de même que 450 des 800 m du circuit d'essais. Il est encore difficile d'en tirer des conclusions sur la fiabilité du système en exploitation. Mais la démonstration qui en a été faite le 22 janvier permet de constater que, dans les conditions d'essai (changements de mode pas contraints par le temps, équipements très récents, peu de perturbations électromagnétiques à proximité), l'alimentation par induction fonctionne. La rame se déplace avec des performances similaires avec et sans caténaire.

Carsten Struve se projette déjà vers les étapes suivantes: celle d'une première installation en milieu urbain, sur une ligne en exploitation qui serait possible dès le début 2010, à l'issue des essais. Des négociations sont en cours avec

quelques villes pour équiper des sections de 1 à 2 km, «sans doute en Allemagne», précise Carsten Struve, pour des questions de proximité géographique avec les techniciens qui ont mis au point le système et parce que c'est le pays possédant le plus grand nombre de trams Bombardier en circulation.

Un premier contrat pour équiper une ligne de Primove pourrait être signé dès cet été. Une quarantaine de villes seraient potentiellement intéressées aujourd'hui, «dont toutes les villes françaises qui ont un projet de tramway». Mais c'est peut-être Amsterdam qui sera la première à se lancer, au gré d'un important marché de renouvellement de son parc à signer dans l'année.

Pour la suite, si l'alimentation par induction tient ses promesses, le marché pourrait être immense. Dès lors que les solutions techniques existent et sous réserve d'en maîtriser le coût, toutes les villes peuvent en effet se mettre à rêver elles aussi d'un tram sans caténaire... qui ne serait plus un caprice d'esthètes coincés mais une manière d'améliorer encore l'insertion du tramway dans la ville. Les initiatives en ce sens paraissent d'ailleurs se multiplier. Le constructeur espagnol CAF vient d'annoncer lui aussi qu'il travaillait à une solution d'alimentation "sans fil" entre les stations, en utilisant un accumulateur à charge rapide. Ce système, développé sur le site de Saragosse, viendrait concurrencer d'autres solutions proposées par Alstom ou Bombardier qui n'ont pour l'instant connu qu'un succès plus limité: Citadis alimenté par batteries (en service à Nice), supercapacités Mitrac (encore jamais vendues "seules" par Bombardier), voire équipement mixte avec caténaire en station et volant d'inertie entre deux stations (expérimenté par Alstom à Rotterdam).

Cette multiplicité de solutions est en tout cas une bonne chose. Elle recrée une forme d'émulation entre constructeurs qui oblige à fiabiliser les systèmes, à en contenir les coûts et à se raisonner sur les marges. A terme, elle donnera le choix, à un bien plus grand nombre de villes, entre un tramway avec et sans caténaires.

Et si dans dix ans, il ne restait qu'un seul système d'alimentation sans caténaire sur le marché? «Ce sera le nôtre», assure Carsten Struve, confiant dans la supériorité d'un système sans contact et évitant de fait tout courant vagabond dans le sol. On pourra y voir une nouvelle forme de rivalité entre techniciens ferroviaires français et allemands. Mais aussi en conclure que le "sans fil" n'est plus une solution hexagonale. Désormais, on s'y intéresse aussi outre-Rhin où on aurait pourtant juré il y a peu, que la caténaire ne dérangeait personne.

Jean-François Dancre