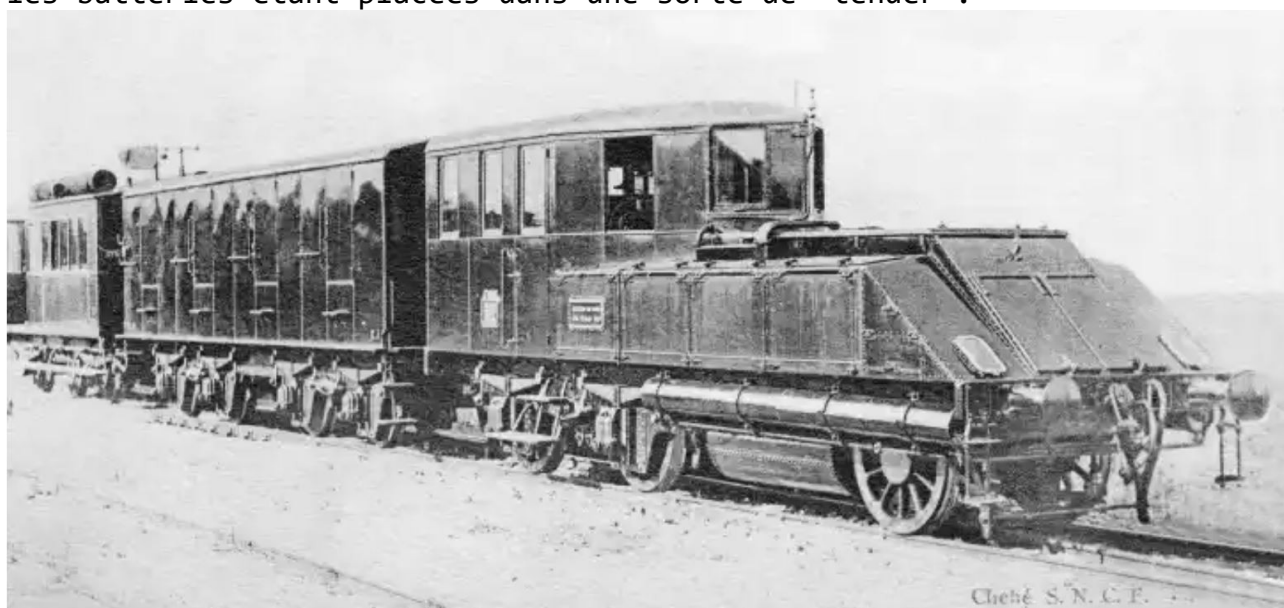


AEDTF

Assemblée Générale du 6 juin 2026 stockage de l'électricité dans le ferroviaire : des avancées technologiques importantes

un petit historique

Le chemin de fer s'est développé bien avant l'électricité dont l'usage a mis un certain temps à s'imposer. Au début ce sont surtout des piles qui ont fourni cette énergie (signalisation) puis ensuite des batteries. Quelques rares expériences ont été menées dans le domaine de la traction les batteries étant placées dans une sorte de 'tender'.



*Locomotive expérimentale du PLM. Elle a atteint les 100km/h
Cliché SNCF collection Clive LAMING*

A partir des années 1920, le développement de la télégraphie puis de la téléphonie, des postes électro-mécaniques a vu l'intensification de l'usage des batteries : le '220v' n'existait pas partout et la fiabilité de la fourniture du 'secteur' était aléatoire. La technologie de ces batteries était très proche de nos Cadmium-Nickel. Beaucoup plus tard, le développement des passages à niveau automatiques a nécessité l'utilisation d'un grand nombre de batteries d'une technologie proche du plomb. A bord des trains de voyageurs, l'éclairage électrique s'est assez rapidement étendu car il supprimait les inconvénients nombreux de l'éclairage au pétrole. Mais il était impossible d'installer une ligne de train (les locomotives à vapeur ont été éclairées au pétrole jusqu'après la 2ème guerre mondiale). Une prise de force était systématiquement installée sur un essieu et entraînait une dynamo qui éclairait la voiture et chargeait une batterie (Cd-Ni) (la régulation de charge était mécanique !). Ce principe existe encore aujourd'hui sur quelques types de voiture).

Depuis quelques années, le domaine du stockage de l'électricité a fait d'énormes progrès en particulier, mais pas que, dans le domaine automobile.

Un tout petit peu de technique

Il y a plusieurs moyens de stocker l'énergie électrique ; chacun de ces moyens ayant un domaine d'utilisation propre. A noter que la limite entre ces 3 types est assez floue.

► les condensateurs

ils permettent de stocker très rapidement (on parle de millième de seconde) et de fournir aussi rapidement une relativement petite quantité d'énergie.

► les super-condensateurs

associés à une électronique de puissance (domaine en pleine progression), les 'condensateurs' peuvent stocker une quantité plus importante d'énergie (capable de mouvoir un tramway).

► Les batteries

dont la charge et la décharge sont beaucoup plus lentes (on est à l'échelle de l'heure) peuvent stocker une grande quantité d'énergie. (NDLR le développement de batteries 'haute technologie' est un peu la conséquence des problèmes des piles à hydrogène). Il y a plusieurs types de batteries correspondant à différents usages. Le Lithium-Ion (en fait Lithium titanate oxyde beaucoup moins inflammable) est utilisé lorsque la place manque ou que le poids est un critère important ; il reste le type le plus utilisé. Parmi les pistes d'évolution on trouve les batteries à électrolyte solide, les batteries sodium-ion, lithium-air, zinc-air et enfin les batteries Redox-flow (on sépare le lieu de stockage de l'énergie de son lieu de production (un peu comme dans une pile à combustible). Un des problèmes de ces batteries est leur 'faible' durée de vie.

Stockage de l'électricité au sol

Nous avons vu dans l'historique, l'utilisation des batteries dans les télécommunications, les postes d'aiguillages et les passages à niveau. C'est toujours vrai ; ces éléments étant d'une longévité très grande, il y a peu d'avancée technologique sur le stockage dans ces domaines.

Côté passages à niveau, on essaie d'installer des batteries 'hors norme' pour éviter leur vol. De plus en plus, on utilise l'énergie solaire pour les alimenter. Certains PN à faible moment (peu de train et peu de circulation automobile) ne sont plus reliés à l'EDF (en général ils sont à franchissement conditionnel : 2 lampes vertes côté voie (2 de chaque côté!) indiquent le bon abaissement des barrières.

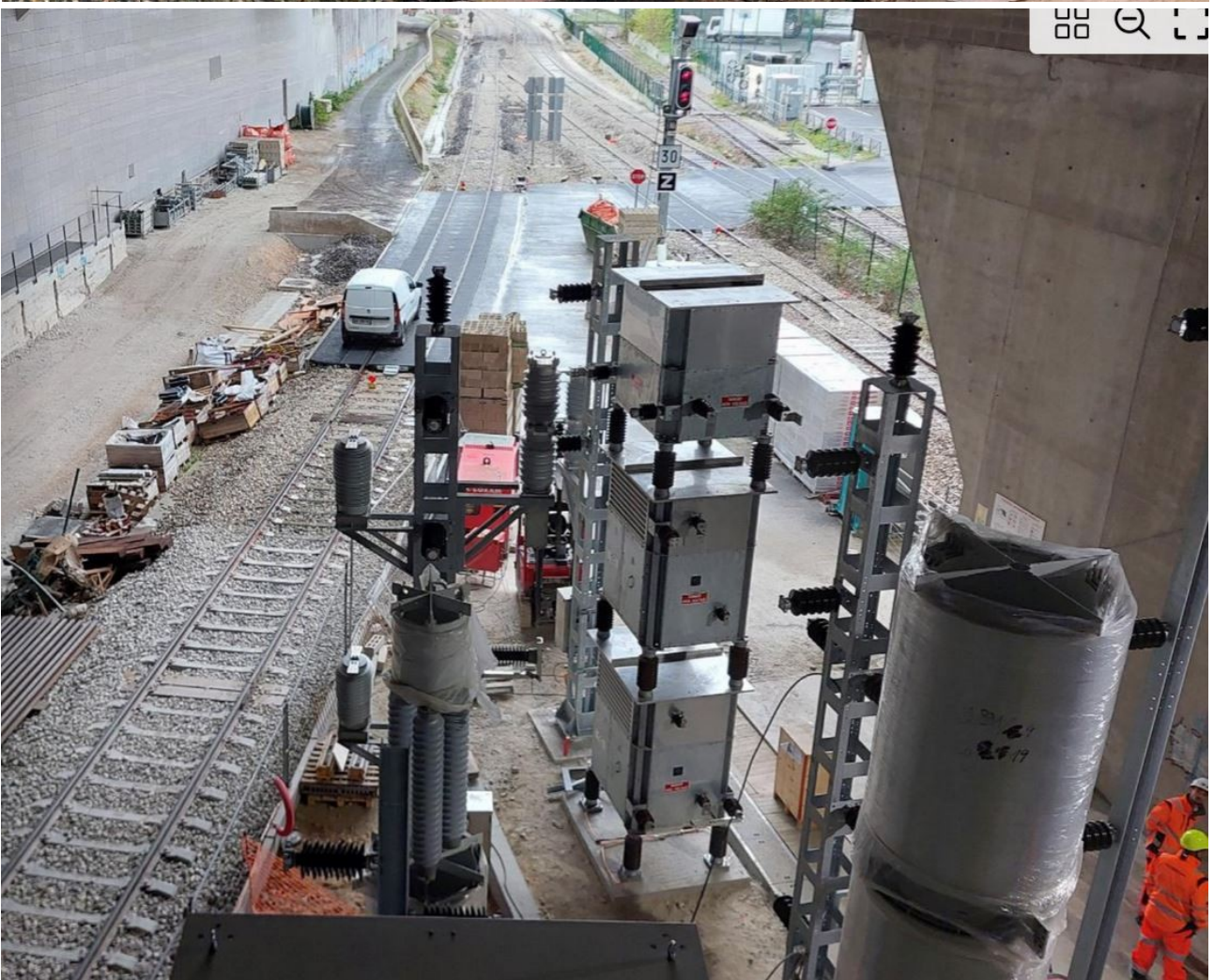
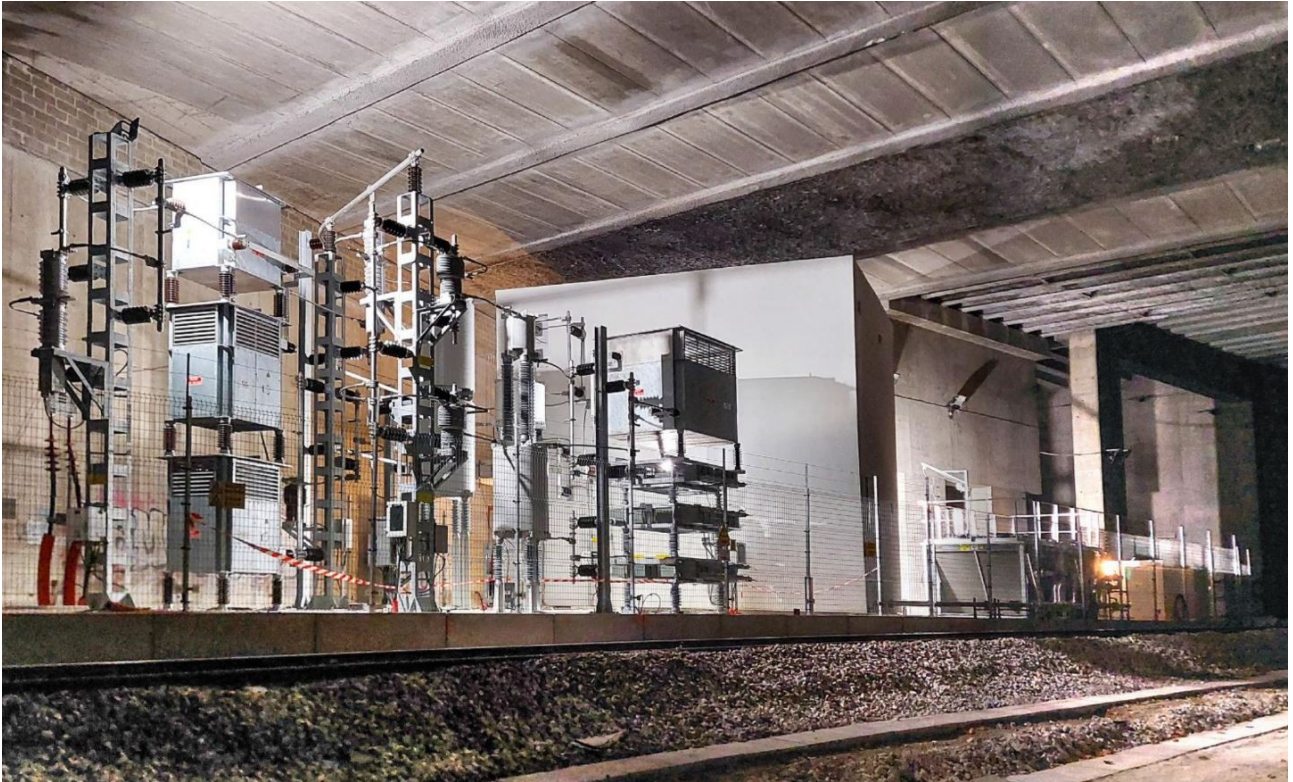
Une des caractéristiques de ce stockage au sol est qu'on n'est pas limité en poids et en encombrement. On voit donc se développer des installations

imposantes avec des technologies peu courantes. On n'est qu'au début de cette évolution. Voici quelques exemples significatifs.

► Forte réduction des parasites, sur-tensions et sous-tensions sur les caténaires des lignes très chargées.

L'exemple le plus symptomatique est l'installation d'un 'poste de survoltage et de régulation de tension' à Paris La Défense sur le prolongement ouest du RER E. Sur cette ligne le nombre très important de trains s'arrêtant et démarrant fréquemment, bourrés d'électroniques de puissance provoquant des harmoniques très importantes pouvant se cumuler, pose des problèmes de sur-tension ($> 28\text{kV}$) et de sous-tension ($< 22\text{kV}$) : ces sous-tensions, même brèves, sont suffisantes pour provoquer la disjonction des engins moteurs. On a des phénomènes de l'ordre du millièmètre de seconde (donc condensateurs) et de l'ordre de la dizaine de secondes (donc super-condensateurs). L'installation de ce poste (de plusieurs m^2 au sol et de plusieurs dizaines de tonnes) a permis de limiter les variations de tension à $\pm 200\text{V}$ et d'éviter l'installation d'une sous-station supplémentaire. Ce type d'installation est promis à un bel avenir vu sa 'rentabilité'.





Images Revue Générale des Chemins de Fer n°364

► le biberonnage vu du sol

le biberonnage est un système qui permet la recharge des tramways et des trains à batteries sur des points de charge rapide installés généralement dans les stations ou les gares. Le souci est que l'on a une consommation importante de courant sur un bref instant. Si sur les tramways cela ne pose pas de problème car EDF (ou autre) est là et la puissance n'est pas trop grande (de plus on récupère facilement l'énergie de freinage), cela l'est beaucoup plus dans le ferroviaire où les trains à batteries circulent principalement sur de petites lignes mal reliées au réseau de distribution électrique, avec un nombre de charges quotidiennes assez faible et une puissance exigée très importante. On est donc en train de développer un nouveau type de batterie (d'une technologie peu répandue (Lithium-Fer-Phosphate) mais qui, là, a toute sa place : on a de la place, on n'est pas limité par le poids, etc. Une attention particulière est portée sur la sécurité intrinsèque de ces installations. Ces batteries vont autoriser un lissage de la consommation du point de charge (d'où une puissance souscrite plus faible) et une possible utilisation de l'énergie solaire.

Le Japon qui collabore étroitement sur ce point avec la SNCF, part sur un autre principe : la récupération des batteries usagées des voitures NISSAN qui, pour l'usage qui en est fait dans le ferroviaire ont encore une durée de vie de 6 à 8 ans. Une partie de la charge de ces batteries est fournie lors des surplus de la production photo-voltaïque.



Photos Revue Générale des Chemins de Fer n° 365

En plus, un allongement de la zone de biberonnage va permettre la mise en vitesse du train en utilisant l'énergie stockée au sol plutôt que celle du bord.

Stockage de l'électricité à bord des trains

Il est encore impossible de stocker suffisamment d'énergie dans des batteries pour autoriser des parcours longs. Coté voyageurs c'est peut-être le (futur) domaine de l'hydrogène et des piles à combustible. Coté fret, il n'y a pas grand chose.

► Alimentation des tramways

la suppression de la caténaire sur une partie du parcours est un sujet déjà un peu ancien. On a cherché à alimenter les rames par le sol (Bordeaux) mais les problèmes sont nombreux. Le stockage du courant à bord des rames s'est bien développé ces derniers temps. Plusieurs technologies sont en concurrence selon la distance à parcourir, la puissance des rames, le constructeur. Par exemple, les rames du tramway de Birmingham (GB) parcourent une dizaine de kilomètres en autonome. La présence de la batterie va aussi permettre la récupération de l'énergie de freinage à bord et autoriser des démarrages beaucoup plus vifs. On peut estimer à 20 % l'économie énergétique due à ce freinage **régénératif**.



*Tramway de Birmingham circulant panto baissé sous LAC !
Photo J. Maurice*

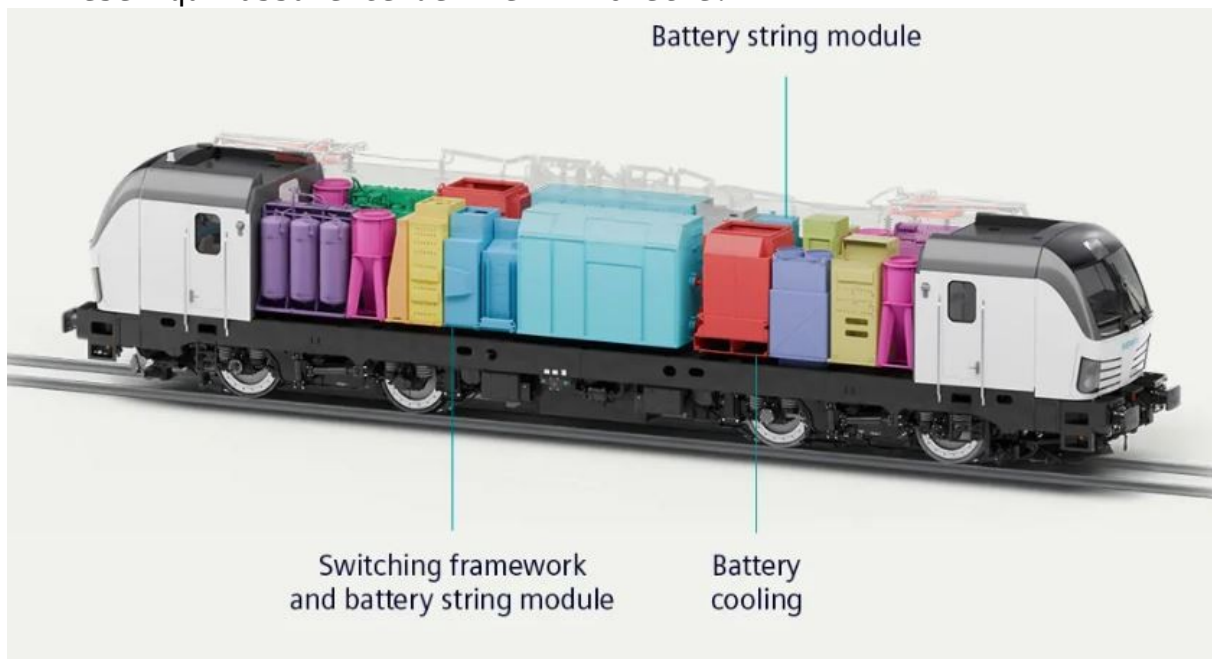
► alimentation de locomotives à usage particulier

l'utilisation de batteries sur les locomotives est déjà très ancienne soit pour le travail dans les tunnels, soit pour les manœuvres dans les usines chimiques. La puissance installée et l'autonomie augmente petit à petit. La RATP est très demandeuse des technologies

Lithium-Ion ‘non inflammables’ pour tous ses engins de chantiers. La sécurité des batteries est primordiale non seulement parce qu’on ne travaille que dans des tunnels mais aussi parce que les acheminements peuvent se faire en heures creuses au milieu du trafic normal avec des voyageurs sur les quais. A noter que les batteries ne servent pas qu’à la traction mais aussi à l’éclairage, la ventilation, les auxiliaires, les machine-outils etc. Un point essentiel est que le travail peut se faire courant traction 750V coupé sans émission de gaz nocifs.

► dual-mode : la batterie pour le dernier kilomètre et en soutien au moteur principal

Un des grands progrès récent est l’installation de batteries sur des locomotives Diesel ou électriques avec une puissance très réduite (4000kW pour la motorisation principale, 250kW pour les batteries auxiliaires). Cela permet d’acheminer un train, à faible vitesse, sur des embranchements particuliers ou des faisceaux de voies non électrifiés. A noter que dans certains cas, des installations au sol peuvent faire économiser de l’énergie, par exemple un compresseur pour gonfler les freins. A noter aussi que souvent c’est un moteur Diesel qui assure ce dernier kilomètre.



Locomotive Siemens VECTRON Last-mile. Document Siemens.

► Régiolis hybride : B83519

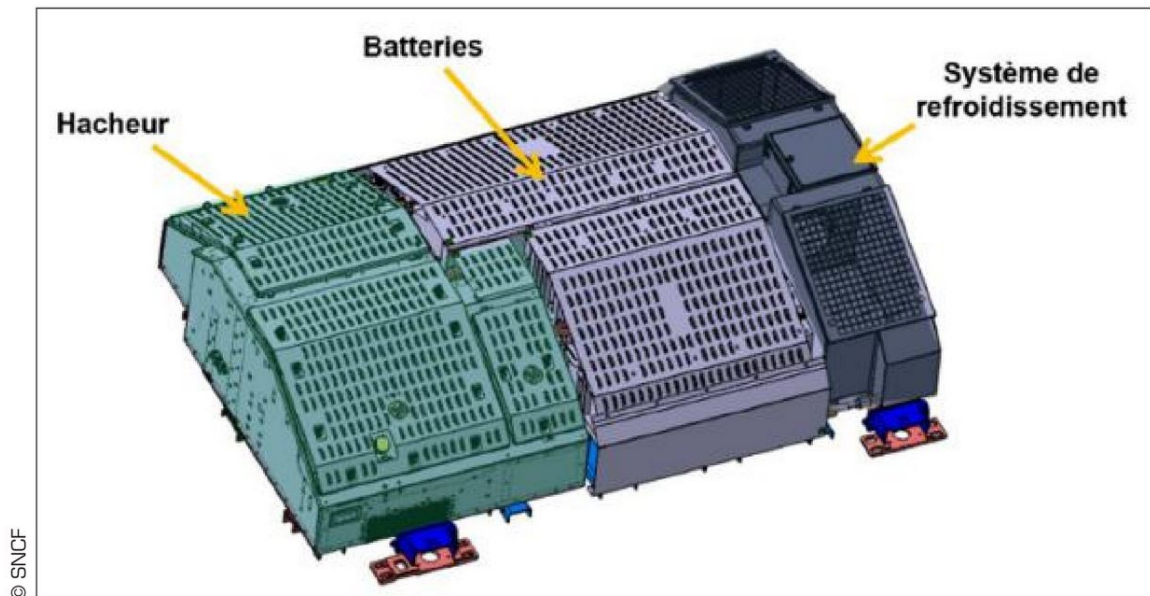


Photo RGCF

Un engin bimode est un engin qui peut rouler sous caténaire ou en autonome mais pas les deux en même temps. Sous caténaire, un engin bicourant peut circuler (en France) soit sous 1500V continu soit sous 25kV 50Hz. Un engin hybride peut utiliser plusieurs modes de propulsion en même temps.

Les Régiolis 4 caisses (Alstom) de la série B83500 sont bimode-bicourant ; ils ont sur le toit 4 'powerpacks' (moteur Diesel + alternateur + refroidissement) qui leur fournissent l'énergie de traction en l'absence de caténaire. A noter qu'un de ces powerpacks alimente aussi les auxiliaires.

Sur le B83519, on a remplacé deux powerpacks par deux blocs de batteries associées à leur électronique de puissance et de surveillance ; ceci dans le même poids et le même encombrement. Ce bloc s'appelle ESS Energy Storage System en anglais et SSE Système de Stockage de l'Energie en français.



↑ [4] Vue générale du coffre ESS.

Le cahier des charges est le suivant :

- -20 % de consommation de gas-oil et d'émission de gaz à effet de serre, en particulier grâce au freinage régénératif (sauf sous 25kV!)
- réduction du coût de maintenance
- performances identiques à un Régiolis standard en mode thermique ou sous caténaire 1500V sous-voltée
- offrir un peu d'autonomie sur batteries seules en bout de lignes (manœuvres) ou dans les technicentres (NDLR la présence de ces batteries pose des problèmes de sécurité pour les intervenants)
- développement d'un mode 'boost' (surpuissance) permettant de rattraper un horaire au détriment de la charge batteries.

L'hybridation a aussi des conséquences sur le confort des voyageurs et des riverains : on peut arrêter les Diesels dans les traversées des villes et lors des arrêts prolongés en gare (NDLR c'est pas vrai sur le B83519!)

Un powerpack délivre une puissance de 330kW (460cv) ; un SSE délivre lui 75kW ; ce qui fait une grosse différence. Lorsque la ligne empruntée s'y prête bien, cela ne se sent pas la rame hybride peut tenir son horaire. Par contre, si la ligne comporte de longues rampes, la perte de puissance va se faire sentir. Il y a donc quelque progrès à faire.

Une autre rame la B82775 a vu ses 4 moteurs diesel remplacés par des SSE. Elle est en cours de test sur des sillons commerciaux. Son autonomie sur batterie est limitée à environ 80km. Si elle tombe en rade sur une zone non électrifiée, son dépannage va être compliqué.



Photo RGCF

► TGV M

Pour la première fois, un TGV contient deux 'greffons' c'est à dire un petit compartiment dans lequel sont regroupés les équipements électriques. Et parmi ces équipements il y a une batterie 750V assez importante pour lui permettre de faire une quarantaine de km et de maintenir la climatisation pendant une heure (il ne faut pas confondre cette batterie avec la batterie basse tension (72V) utilisée pour certains auxiliaires). Le système TGV souffre en effet de plusieurs problèmes :

- la ligne est 'isolée' et les secours sont difficiles à réaliser
- on a créé des zones de garage mais il faut pouvoir les atteindre
- l'entrée ou la sortie des lignes à grande vitesse impose souvent un changement de tension et de type de courant qui est propice aux incidents.
- Il faut pouvoir sortir une rame arrêtée dans un tunnel soit par manque de tension ligne ou par une disjonction interne sur la haute tension.

La présence de ces 2 batteries pose des problèmes de maintenance : on ne peut plus être sûr de l'innocuité d'une rame juste en regardant si les pantographes sont baissés ! Je n'ai pas trouvé d'information sur la possibilité de freinage par régénération et d'assistance au démarrage mais les TGV ne sont pas censés s'arrêter souvent.

► sécurité des batteries Lithium-Ion

Vous avez tous entendu parler des incendies provoqués par l'emballage des batteries Lithium-ion. Il est inconcevable qu'un tel incendie arrive sur du matériel ferroviaire et la surveillance des batteries mobilise d'importants moyens de détection, de calcul et d'actionneurs. Il existe plusieurs technologies autour du Lithium-Ion ; la moins dangereuse étant la Lithium-Fer-Phosphate. On recherche aussi, au moins pour les besoins où la place et le poids n'est pas un problème, de nouveaux composants.

Conclusion

Je viens de vous donner les grandes idées de l'utilisation des batteries dans le ferroviaire soit au sol, domaine un peu nouveau et sûrement plein d'avenir, soit en embarqué. Mais je ne vous ai pas parlé des problèmes actuels : coût très élevé, durée de vie faible pour le ferroviaire, sécurité. De plus ces batteries exigent un environnement informatique très important. Comme pour l'hydrogène, il y a encore beaucoup de progrès à faire ...