

SuperRail - Premier câble supraconducteur au monde à être installé sur un réseau ferré à usage commercial

Kévin BERGER¹, Loïc QUEVAL^{2,3}, Hervé CARON⁴, David FERANDELLE⁴,
Arnaud ALLAIS⁵, Jean-Maxime SAUGRAIN⁵, Louise TERRIEN⁶ et Grégory BOUVIER⁶

¹Université de Lorraine, GREEN, F-54000 Nancy, France.

²Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electrotechnique de Paris,
91190 Gif-sur-Yvette, France.

³Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electrotechnique de Paris, 75252 Paris, France.

⁴Département de la Traction Électrique, SNCF Réseau, 93418 La Plaine Saint-Denis, France.

⁵Nexans, 92400 Courbevoie, France.

⁶Absolut System, 38170 Seyssinet-Pariset, France.

RESUME – Le réseau ferroviaire français est soumis à de nombreuses contraintes, notamment liées à l'augmentation du trafic de 60% entre 1998 et 2008 et qui devrait encore augmenter de 4 fois d'ici 2030. Pour renforcer les capacités de transport en ville tout en réduisant les pertes électriques, il peut être intéressant d'installer des câbles supraconducteurs. C'est le choix retenu par la SNCF dans le cadre du projet SuperRail, lancé en février 2022 et qui consiste en le développement, la fabrication et l'installation de câbles supraconducteurs à haute température critique (HTc) pour renforcer l'alimentation électrique de la gare Montparnasse à Paris. Deux câbles HTc de 1,5 kV-3,5 kA et 80 m de long seront installés en parallèle et reliés à la sous-station électrique de Ouest-Ceinture pour alimenter deux faisceaux de voies. Dans cet article, nous détaillerons les innovations mises en œuvre dans le cadre de ce projet, notamment : le câble supraconducteur, les terminaisons et le système de refroidissement fournissant 2 kW à 68 K. Pour finir, des études prospectives visant à améliorer davantage l'efficacité énergétique du système en optimisant ou remplaçant certains éléments seront présentées.

Mots-clés—câble supraconducteur, réseau ferroviaire, système de refroidissement, efficacité énergétique.

1. INTRODUCTION

Le réseau ferroviaire français alimenté en courant continu à une tension inférieure à 1,5 kV représente une longueur de 5904 km, soit environ un quart de l'électrification ferroviaire nationale [1]. Cette configuration à faible tension présente un inconvénient majeur, à savoir les chutes de tension le long des lignes, qui nécessitent la mise en place de sous-stations proches les unes des autres. Par ailleurs, ce réseau est soumis à de nombreuses contraintes, notamment liées à l'augmentation du trafic ferroviaire qui a augmenté de 60% entre 1998 et 2008 et devrait encore augmenter de 4 fois d'ici 2030. De plus, l'insertion de sous-stations dans des zones à forte densité urbaine devient de plus en plus difficile. Pour éviter de très contraignants chantiers, notamment lorsqu'il faut intervenir sur des ouvrages d'art, tout en améliorant la qualité de l'alimentation électrique, en réduisant les pertes d'énergie dans un espace limité, il peut être intéressant d'installer des câbles électriques supraconducteurs. C'est le choix retenu par la SNCF dans le cadre du projet SuperRail, lancé en février 2022 et qui consiste

en le développement, la fabrication et l'installation de câbles supraconducteurs à haute température critique (HTc) pour renforcer l'alimentation électrique de la gare Montparnasse à Paris. Dans cet article, nous détaillerons la conception des principaux éléments de cette installation, à savoir le câble supraconducteur, les terminaisons et le système de refroidissement. En complément, des solutions originales seront présentées pour remplacer les terminaisons par d'autres systèmes intégrant une partie du convertisseur de puissance et du transformateur à température cryogénique.

2. LES INNOVATIONS DE SUPERRAIL

Les principales innovations qui sont développées et qui seront mises en œuvre sont détaillées ci-dessous.

2.1. Câble supraconducteur DC

La topologie du câble supraconducteur développé par Nexans est présentée en Fig. 1. Le câble est composé d'une âme centrale en cuivre pouvant supporter le courant de court-circuit, de deux couches de rubans supraconducteurs, d'une couche d'isolant en papier Kraft, d'un écran composé de rubans de cuivre et relié à la terre aux extrémités, et d'un cryostat permettant d'isoler le câble de la température extérieure et de faire circuler l'azote liquide à 68 K. Les spécifications du câble de SuperRail sont les suivantes : un courant nominal de 3,5 kA, une tension nominale de 1,5 kV, un courant de court-circuit de 67 kA pendant 200 ms, et deux longueurs unitaires de 80 m. *Un descriptif détaillé du câble et une estimation des différents indicateurs de performance (pertes, etc.) sera proposé dans l'article étendu.*

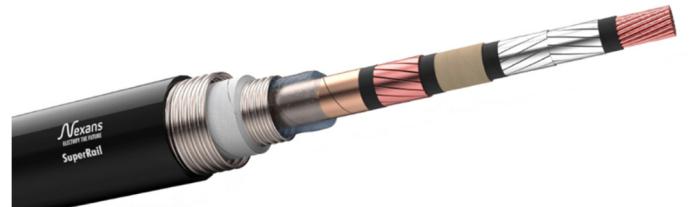


Fig. 1. Vue du câble supraconducteur développé par Nexans pour SuperRail.

2.2. Terminaisons

Les terminaisons sont un élément indissociable et complexe du câble. Elles permettent la liaison du câble supraconducteur avec les infrastructures extérieures et doivent notamment garantir un excellent contact électrique entre tous éléments conducteurs du câble. Les terminaisons sont soumises à des contraintes thermique et mécanique importantes et sont le siège de pertes par conduction thermique et par effet Joule. En général, les pertes dans les terminaisons sont de l'ordre de 50 W/kA/m. Dans le cas de SuperRail, les terminaisons représentent environ 75% des pertes totales du système au courant nominal. *Un exemple de dimensionnement et une comparaison des différentes pertes sera présenté dans la version étendue de cet article.*



Fig. 2. Exemple de terminaison Nexans pour un câble HTc basse tension.

2.3. Système de refroidissement

Le système de refroidissement est développé par Absolut System pour satisfaire les contraintes d'un environ industriel à usage commercial. Il est basé sur un cycle Turbo-Brayton Inversé (TBI) qui utilise des turbomachines à grande vitesse et des récupérateurs à haut rendement. Des paliers à gaz sont utilisés dans les turbomachines pour supporter les rotors, qui fonctionnent à des vitesses de 30 000 tr/min pour les plus grosses à plus de 300 000 tr/min pour les plus petites. Cette technologie de pointe est notamment celle proposée pour les futurs satellites d'observation européen, Fig. 3. Le système développé pour SuperRail garantit une faible maintenance et une fiabilité accrue grâce à ces paliers sans contact et fournit ici une puissance de refroidissement de 2 kW à 68 K.

Environ 6000 L d'azote liquide seront nécessaires pour refroidir le système de câbles SuperRail. Puis le système pourra soit fonctionner en boucle fermée avec l'aide du cycle TBI soit en boucle ouverte avec un apport journalier de 1000 L d'azote liquide.

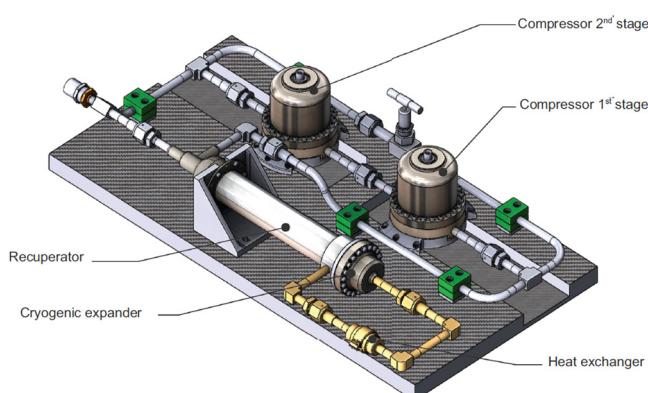


Fig. 3. Exemple de système de refroidissement TBI développé par Absolut System pour les futurs satellites d'observation européen [2].

3. AMELIORATION DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE

Les acteurs académiques du projet SuperRail, à savoir CentraleSupélec et l'Université de Lorraine, étudient, modélisent et optimisent différents éléments du système. Par exemple, en simulant le comportement des grandeurs électriques du réseau ferroviaire lors de l'ajout d'un câble supraconducteur soumis à des appels de courants liés aux départs des trains [3]. La connaissance de ces grandeurs permet d'envisager ensuite une meilleure définition du système de refroidissement et un dimensionnement adapté des terminaisons. D'autres études visent à valider la faisabilité d'associer un cryo-convertisseur et un transformateur supraconducteur au système de câbles. Cette option pourrait permettre de supprimer les terminaisons et d'améliorer l'efficacité du système, tout en conservant un fonctionnement adapté au milieu ferroviaire, Fig. 4.

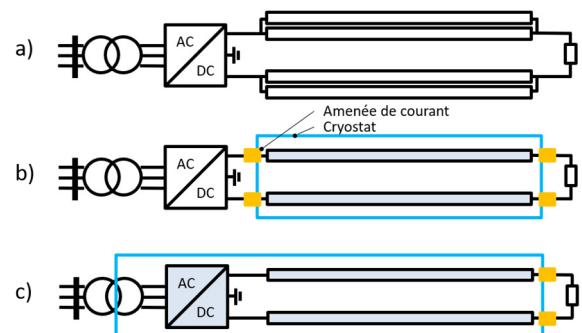


Fig. 4. a) câble résistif, b) câble supraconducteur et ses terminaisons (en jaune), c) câble supraconducteur + cryo-convertisseur + transformateur supraconducteur.

4. CONCLUSIONS

Dans cet article, le projet SuperRail sera présenté pour la première fois à la communauté Génie Electrique française. Il s'agit d'une première mondiale d'un câble supraconducteur fonctionnant sur un réseau ferroviaire à usage commercial. Plusieurs éléments innovants du projet seront présentés et détaillés mettant l'accent sur la complémentarité des actions de R&D et des technologies développées par les partenaires industriels et des études prospectives amonts menées par les laboratoires.

5. REMERCIEMENTS

Le projet SuperRail est financé par le gouvernement français via la BPI dans le cadre du programme France 2030.

6. REFERENCES

- [1] A. Steimel, « Under Europe's incompatible catenary voltages a review of multi-system traction technology », in *Railway and Ship Propulsion 2012 Electrical Systems for Aircraft*, oct. 2012, p. 1-8. doi: 10.1109/ESARS.2012.6387460.
- [2] J. Tanchon *et al.*, « A Turbo-Brayton Cryocooler for Future European Observation Satellite Generation », 2016. Consulté le: 5 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cryocooler.org/resources/Documents/C19/437.pdf>
- [3] G. Hajiri, K. Berger, F. Trillaud, J. Lévéque, et H. Caron, « Impact of Superconducting Cables on a DC Railway Network », *Energies*, vol. 16, n° 2, Art. n° 2, janv. 2023, doi: 10.3390/en16020776.