

SuperRail - État actuel du premier système commercial de câbles supraconducteurs pour le réseau ferroviaire

Said ABOUDRAR^a, Arnaud ALLAIS^b, Kai ALLWEINS^c, Kévin BERGER^d, Jérémie CAPRON^a, Hervé CARON^f, David FERANDELLE^f, Laurent GERVAISE^b, Romain GONCALVES^e, Gabriel HAJIRI^d, A. JAZZAR^a, Jérôme LACAPERE^e, Nicolas LALLOUET^b, Beate WEST^c, Loïc QUÉVAL^g

^a Agence d'Essai Ferroviaire, SNCF Voyageurs, Vitry Sur Seine, France. ^b Nexans, Paris, France. ^c Nexans, Hanovre, Allemagne.

^d GREEN, Université de Lorraine, Nancy, France. ^e Absolut System, Grenoble, France. ^f SNCF Réseau, La Plaine Saint-Denis, France. ^g GeePs, Centrale Supélec, Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France.

RESUME - Le projet SuperRail vise à améliorer l'alimentation électrique de la gare Montparnasse de Paris en utilisant la technologie des câbles supraconducteurs à haute température critique (HTS). Il répond à la demande croissante d'énergie et aux contraintes d'espace en installant deux câbles DC HTS de 60 mètres de long, de 1,5 kV / 3,5 kA, évitant ainsi des travaux de génie civil. Avant l'installation, des essais de qualification à l'Agence d'Essai Ferroviaire de la SNCF ont validé la capacité du système à fournir la puissance nominale requise de 4,5 MW et la puissance d'appel de 10,5 MW, tout en résistant aux courants de court-circuit. SuperRail est la première application commerciale de la technologie des câbles HTS à courant continu au sein d'un réseau électrique ferroviaire, utilisant l'infrastructure existante et démontrant la viabilité de cette technologie dans des environnements urbains difficiles.

Mots-clés — Système de câble supraconducteur, réseau électrique ferroviaire, essai de qualification.

1. INTRODUCTION

La demande de transport ferroviaire augmente rapidement, ce qui nécessite des améliorations substantielles de l'infrastructure électrique. Les méthodes traditionnelles de renforcement utilisant des câbles résistifs peuvent poser des difficultés en zone urbaine dense, en raison des contraintes d'encombrement, des coûts prohibitifs des travaux de génie civil et des perturbations liées. Les câbles supraconducteurs à haute température critique (HTS) constituent une alternative techniquement viable et économiquement compétitive grâce à leur densité de puissance élevée, qui permet de transmettre de grandes quantités d'énergie dans les conduits existants.

2. MOTIVATIONS ET CAHIER DES CHARGES

Le projet SuperRail est la première installation commerciale d'un système de câbles HTS dans un réseau ferroviaire. L'objectif est de renforcer l'alimentation électrique de la gare Montparnasse en reliant la sous-station de traction de Vouillé aux voies ferrées (Figures 1 et 2), distantes de 60 m. Le système est conçu pour délivrer une puissance nominale de 4,5 MW à 1500 V DC (3000 A) et supporter des pointes de puissance d'appel allant jusqu'à 10,5 MW (7000 A) lors de l'accélération

des trains. Le système doit également résister à des courants de court-circuit de 67 kA pendant 100 ms. Deux câbles HTS sont installés en parallèle pour assurer la redondance et la fiabilité. Les câbles sont installés dans des conduits existants, ce qui impose des contraintes sur le diamètre extérieur du câble (< 80 mm), le rayon de courbure (< 1,7 m) et les gradients hydrauliques [1].



Fig. 1. SuperRail - le premier système commercial de câbles HTS à courant continu pour le réseau ferroviaire.

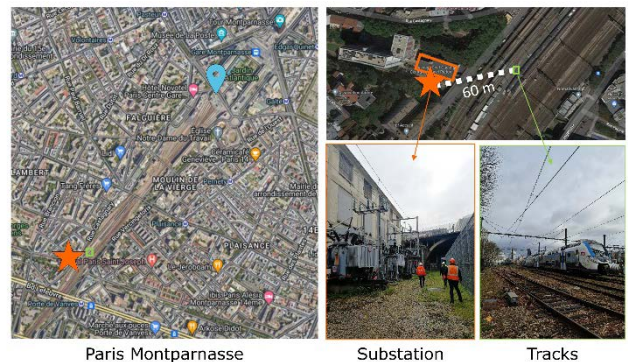


Fig. 2. Le système SuperRail est installé en gare de Paris Montparnasse, entre la sous-station de traction et les voies.

3. COMPOSANTS DU SYSTEME DE CABLE HTS

Chaque câble HTS est dimensionné pour 1500 V et 3500 A, et est conçu pour résister à la totalité du courant de court-circuit. Les âmes des câbles sont constituées d'un former en cuivre, de couches conductrices en ruban HTS 2G, d'une isolation diélectrique en PPLP et d'un écran en cuivre. Le câble est refroidi à l'azote liquide sous-refroidi dans un cryostat flexible à double paroi. Des terminaisons conçues sur mesure permettent de minimiser les entrées de chaleur. Les paramètres électriques et géométriques sont résumés dans le tableau I. A noter que le diamètre extérieur du cryostat et le rayon de courbure minimal sont compatibles avec les contraintes d'installation.

Tableau I - Paramètres du câble HTS SuperRail

Paramètres électriques	
Tension nominal	1500 V DC
Courant nominal	1500 A
Courant d'appel	3500 A
Courant critique	>4000 A
Courant de court-circuit	67 kA - 100 ms
Paramètres géométriques	
Diamètre extérieur du cryostat	74 mm
Rayon de courbure minimal	1.5 m
Longueur	2× 60 m

4. ESSAIS DE QUALIFICATION

Une boucle d'essai de 35 mètres a été installée à l'Agence d'Essai Ferroviaires de la SNCF (Figure 3) [2]. Le programme d'essais comprenait : des essais de pression, des cycles thermiques, des essais diélectriques et des essais impulsions, des essais de courant nominal, la caractérisation des pertes du système, des essais de courant de défaut et la caractérisation V-I. Voici les principaux résultats des essais.

Pression - Un test de pression effectué immédiatement après l'assemblage, avant le refroidissement, a permis d'atteindre 18,5 bars. Lors des essais avec la boucle pressurisée LN₂, le système a fonctionné à 12 bars pendant plusieurs heures, avec une pointe maximale à 15 bars, ce qui correspond à la pression opérationnelle à Montparnasse-Vouillé. Cela a validé la capacité du système à supporter la pression, et la sélection des dispositifs de sécurité.

Cycles thermiques - Le système de câble supraconducteur a été soumis à 5 cycles thermiques, ce qui équivaut au cyclage thermique attendu pour une durée de vie de 40 ans. Le refroidissement prend environ 1 jour et le réchauffement environ 4 jours. Le processus de refroidissement est échelonné : il est plutôt lent de 290 K à 160 K, où il y a une contraction thermique significative, et progressivement plus rapide de 160 K à la température du LN₂. La vitesse moyenne de

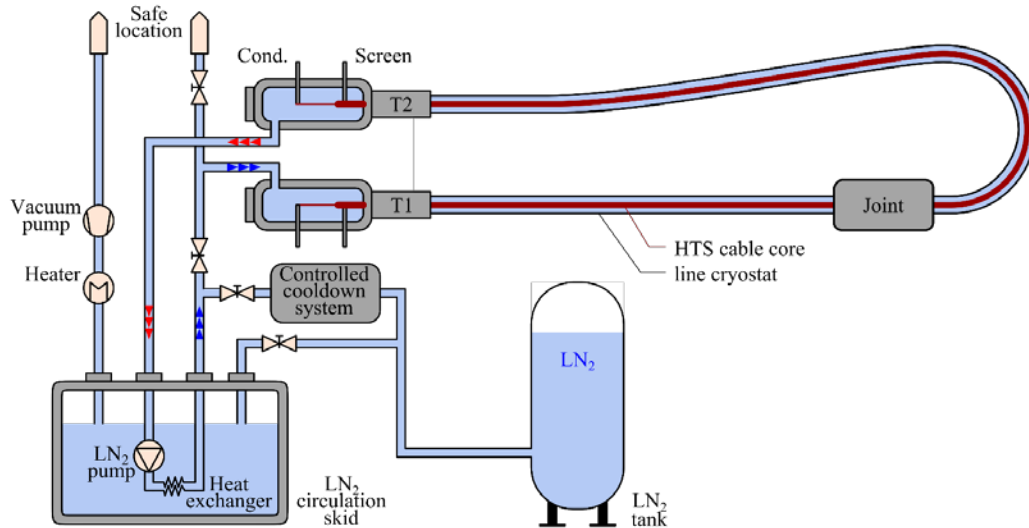
refroidissement qui en résulte est d'environ -10 K/h. Le processus de refroidissement est automatisé grâce à un système de refroidissement contrôlé (Figure 3).

Essais diélectriques et essais impulsions - Ces essais visaient à vérifier le niveau d'isolation du câble supraconducteur. Pour ce faire, une source de tension pulsée a été connectée entre la plaque conductrice et la plaque de l'écran de la terminaison T1, tandis que la terminaison T2 était en circuit ouvert. La différence entre l'essai diélectrique et l'essai impulsif est la valeur et la durée de l'impulsion de tension [2]. Les deux essais ont été couronnés de succès, aucune défaillance d'isolation n'ayant été détectée.

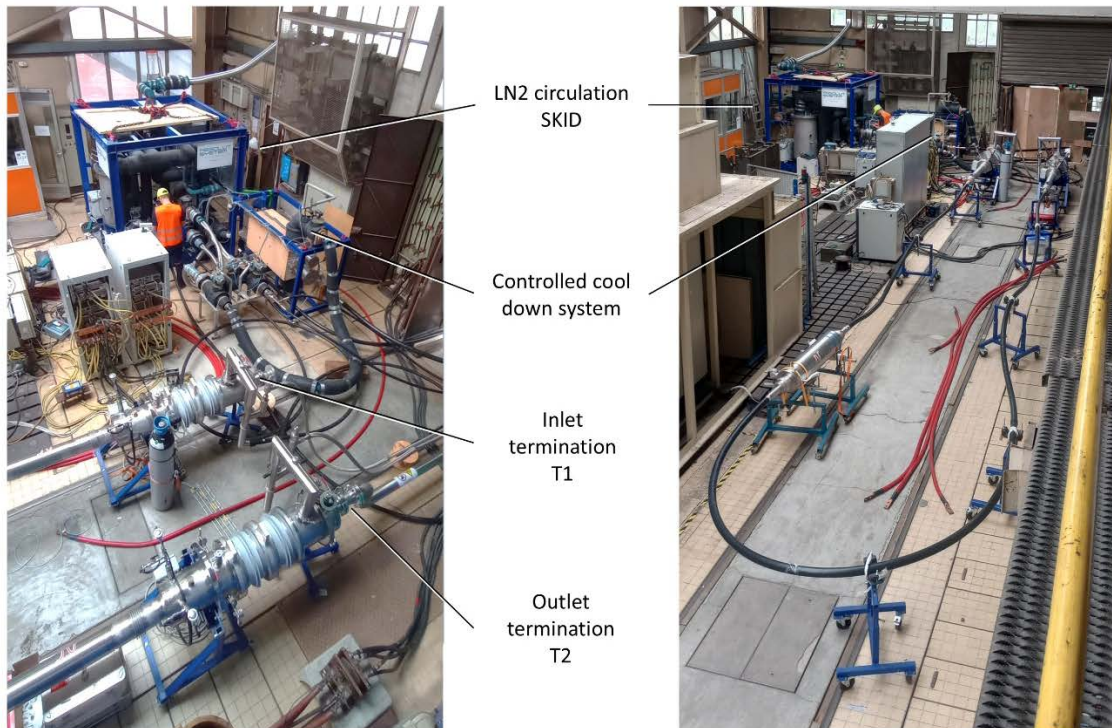
Courant nominal - Les essais en courant nominal ont permis d'évaluer la capacité du système à supporter un courant continu pendant une longue durée. Une source de courant continu de 10 kA a été connectée entre les plaques conductrices des terminaisons T1 et T2. Le test a été effectué à 1500 A DC (courant nominal) pendant 30 minutes. Les résultats n'indiquent aucune augmentation détectable de la température ou de la pression, et montrent une stabilisation dans le temps. En outre, aucune augmentation de la résistance de la boucle et aucun changement dans l'intégrité du système n'ont été détectés. Ceci valide le fait qu'un courant continu jusqu'à la valeur nominale, et pour une durée plus longue que celle prévue dans le réseau ferroviaire, est applicable à Montparnasse-Vouillé.

Pertes du système - Les pertes à froid globales, mesurées par le système de refroidissement, étaient de ~ 561 W sans courant (pour la boucle d'essai de 35 m avec 2 terminaisons). Cela a permis de valider notre modèle de pertes. Une estimation plus précise des pertes à Montparnasse Vouillé (pour le système de 2 × 60 m avec 4 terminaisons) les situe à 1200 W sans courant et à 1280 W à 1500 A DC. Cela correspond à la capacité de refroidissement prévue pour Montparnasse Vouillé (1700 W à 67 K, y compris les câbles, les terminaisons et les pertes dans le système de refroidissement).

Courant de défaut - L'essai de courant de défaut visait à prouver la capacité du système à gérer le courant de défaut et à obtenir une meilleure image du temps de rétablissement. Pour obtenir les courants de défaut cibles, il a fallu utiliser la sous-station de traction de la SNCF-AEF, qui comprend l'équipement standard que l'on trouve habituellement sur le réseau de la SNCF : un transformateur, un redresseur à diodes à 12 impulsions et un disjoncteur à courant continu sur le pôle positif. Pour l'essai, le conducteur et l'écran de la terminaison T1 ont été raccordés à la sous-station de traction par l'intermédiaire d'un interrupteur de court-circuit et d'une résistance de charge. Le conducteur et l'écran de la terminaison T2 étaient court-circuités. Le courant de défaut passait donc par le conducteur connecté en série avec l'écran. L'interrupteur de court-circuit a été utilisé pour fermer le circuit. La résistance de charge a été choisie pour obtenir le courant de court-circuit cible. Le disjoncteur de la sous-station avait pour fonction d'ouvrir le circuit. La procédure définie était de mener une série de courts-circuits, en augmentant progressivement l'énergie pour atteindre une énergie équivalente I²t à 67 kA pendant 100 ms. Quatre tests ont été menés : 5 kA-200 ms, 10 kA-200 ms, 18.5 kA-200 ms, et 40 kA-200 ms. Les tests ont démontré que la température et la pression du système restaient dans les limites attendues, avec



(a) Synopsis du système de refroidissement utilisé, y compris l'échangeur de chaleur et la pompe à azote liquide immergée dans le bain de LN₂ pompé, ainsi que les autres vannes et accessoires nécessaires.



(b) Boucle installée à l'Agence d'Essai Ferroviaire de la SNCF, comprenant le skid de circulation LN₂, le système de refroidissement contrôlé et les terminaisons d'entrée et de sortie, T1 et T2.

Fig. 3. Boucle d'essai du câble SuperRail HTS

un retour aux conditions initiale dans les 10 minutes pour toutes les conditions de défaut. Un scénario opérationnel pourrait même envisager la remise sous tension du câble avant 10 minutes, à condition que le LN₂ soit revenu à un état monophasé (liquide uniquement). Bien que les essais aient été limités à 40 kA-200 ms en raison des contraintes de la sous-station, l'extrapolation suggère des performances satisfaisantes à 67 kA-100 ms.

Caractéristique V-I - Comme il n'existe pas encore de norme pour la caractérisation V-I, une procédure spécifique a été adoptée. Elle sera décrite en détail dans un autre document. Les résultats montrent qu'aucune dégradation du courant critique n'a été identifiée après tous les tests, y compris les tests de courant de défaut.

Les tests ont donc confirmé que le système de câble répondait aux spécifications de sa conception.

5. INSTALLATION

Le calendrier du projet est montré sur la figure 4. Les travaux de génie civil sur site ont commencé en mars 2023. Les deux câbles ont été livrés puis tirés dans les conduites existantes à Montparnasse-Vouillé en octobre 2023 (Fig. 5). Les terminaisons et le système de contrôle ont été installées fin 2024. Le skid de circulation LN_2 a été livré, après la fin des travaux de génie civil côté sous-station, en mai 2025. Le système SuperRail devrait être mis en opération en 2025, sous réserve de la réussite des essais opérationnels.

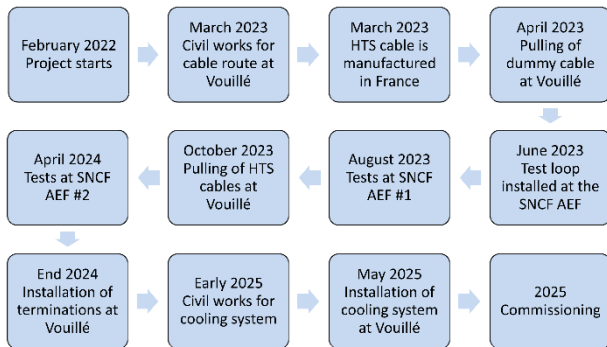


Fig. 4. Calendrier du projet SuperRail.



Fig. 5. Livraison du câble à Montparnasse-Vouillé.

6. PERSPECTIVES

Ce projet démontre le potentiel de la technologie HTS pour résoudre les problèmes d'alimentation électrique dans les zones urbaines denses. Pour anticiper les projets futurs, des outils de calcul pour simuler les câbles supraconducteurs dans les réseaux électriques ferroviaires sont en cours de développement au laboratoire GREEN de l'Université de Lorraine [3-5]. Des études sont également menées par le laboratoire GeePs de CentraleSupélec à l'Université Paris-Saclay pour intégrer des transformateurs supraconducteurs et des convertisseurs de puissance cryogéniques au système de câbles HTS [6, 7]. A noter que le projet a également mis en évidence la nécessité

d'établir des normes et des standards pour les systèmes de câbles HTS [8, 9].

7. CONCLUSION

Le projet SuperRail constitue une étape cruciale dans la démonstration de la viabilité des systèmes de câbles supraconducteurs pour des applications réelles, en particulier dans des environnements urbains difficiles. Le projet SuperRail constitue un jalon pour l'adoption plus large de la technologie supraconductrice dans les systèmes ferroviaires et autres systèmes de transmission d'énergie.

8. REMERCIEMENTS

Ce travail est soutenu par le projet SuperRail, financé par le gouvernement français dans le cadre de France 2030.

9. REFERENCES

- [1] A. Allais, J.-M. Saugrain, B. West, N. Lallouet, H. Caron, L. Terrien, G. Bouvier, K. Berger, L. Quéval, "SuperRail – World-first HTS cable to be installed on a commercial railway network in France," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, no. 3, id. 4802207, pp. 1-7, May 2024. doi: 10.1109/TASC.2024.3356450.
- [2] S. Aboudrar, A. Allais, K. Allweins, K. Berger, G. Bouvier, J. Caprona, H. Caron, D. Ferandelle, L. Gervaise, R. Goncalves, G. Hajiri, A. Jazzar, N. Lallouet, L. Quéval, B. West (alphabetical order), "Qualification of the SuperRail HTS cable system," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 35, no. 5, id. 4802006, pp. 1-6, Aug. 2025. doi: 10.1109/TASC.2025.3538520.
- [3] G. Hajiri, K. Berger, R. Dorget, J. Lévêque, H. Caron, "Design and modelling tools for dc HTS cables for the future railway network in France," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 2, id. 024003, Jan. 2022. doi: 10.1088/1361-6668/ac43c7.
- [4] G. Hajiri, K. Berger, F. Trillaud, J. Lévêque, and H. Caron, "Impact of superconducting cables on a dc railway network," *Energies*, vol. 16, no. 2, id. 776, Jan. 2023. doi: 10.3390/en16020776.
- [5] G. Hajiri, K. Berger, and J. Lévêque, "Optimization of the terminations of an HTS cable operating on a dc railway network," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, no. 3, id. 4800308, May 2024. doi: 10.1109/TASC.2023.3338603.
- [6] L. Ferreira, Y. Baazizi, S. Meunier, T. Phulpin, R. Beljio, F. Trillaud, T.-Y. Gong, G.A.L. Henn, L. Quéval, "Feasibility study of a cryogenic power supply for superconducting DC devices," *International Conference on Magnet Technology (MT28)*, id. 3PoM10-02, Aix-en-Provence, France, Sep. 2023.
- [7] Y. Baazizi, L. Ferreira, S. Meunier, T. Phulpin, L. Quéval, "Experimental study of a three-phase diode rectifier operating at cryogenic temperature," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, no. 3, id. 1101505, pp. 1-5, May. 2024. doi: 10.1109/TASC.2024.3365427.
- [8] L. Quéval, D. Huchet, F. Trillaud, M. Kiuchi, T. Matsushita, "Test station for high temperature superconducting power cables," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, no. 3, id. 9001504, pp. 1-4, May 2024. doi: 10.1109/TASC.2024.3360931.
- [9] T. Matsushita, M. Kiuchi, T. Masuda, S. Mukoyama, K. Funaki, J. Cho, J. Lu, M.J. Raine, L. Quéval, F. Trillaud, G. Zhang, M. Song, J. Zheng, Z. Chen, J. Li, "International round robin test of critical current of superconducting cable sample," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, no. 7, id. 4804706, pp. 1-6, Oct. 2024. doi: 10.1109/TASC.2024.3438251.