

Dimensionnement d'un système de câbles supraconducteurs pour SuperRail

Kévin BERGER¹, Gabriel HAJIRI^{1,2}, Yanis LAIB¹, Jean LEVEQUE¹ et Hervé CARON³

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

²Nexans, 92070 Paris, France.

³Département de la Traction Électrique, SNCF Réseau, 93418 La Plaine Saint-Denis, France.

RESUME – L'importante augmentation du trafic ferroviaire attendue d'ici à 2030 oblige la SNCF à renforcer son réseau électrique. Pour répondre aux contraintes d'espace en région ultra-dense, un système de câbles supraconducteurs à haute température critique (HTc) va être mis en place en 2025 pour renforcer l'alimentation électrique de la gare Montparnasse. Dans cet article, les outils et méthodes nécessaires à la réalisation d'un système de câble supraconducteur sont présentés. En particulier, le dimensionnement du câble supraconducteur, des conduites cryogéniques, des terminaisons et du système de refroidissement est détaillé, permettant une vue d'ensemble de cette technologie qui sera installée pour la première fois sur le réseau électrique français dans le cadre du projet SuperRail.

Mots-clés—câble supraconducteur, méthodes de calcul, renforcement électrique, réseau ferroviaire.

1. INTRODUCTION

Le réseau ferroviaire français en courant continu alimenté à une tension nominale de 1500 V s'étend sur une longueur de 5904 km, soit environ un quart de l'électrification ferroviaire nationale. En contrepartie de cette configuration à faible tension, l'usage de conducteurs de forte section est nécessaire pour éviter les chutes de tension le long des lignes. Néanmoins, l'augmentation de 80% du trafic ferroviaire attendue d'ici à 2030 amène la SNCF à procéder à un renforcement de son réseau électrique. Une des solutions étudiées dans le cadre du projet SuperRail [1], lancé en février 2022, consiste à développer, fabriquer et installer un système composé de deux câbles supraconducteurs à haute température critique (SHTc) pour renforcer l'alimentation électrique de la gare Montparnasse. La mise en service de ces câbles constituera une première pour le réseau électrique français. Dans cet article, nous détaillons les méthodes de conception des éléments essentiels de cette installation, à savoir le câble supraconducteur, la conduite

cryogénique, les terminaisons et le système de refroidissement. En complément, les paramètres du système de câbles SHTc développé dans le cadre de SuperRail sont présentés.

2. LE SYSTEME DE CÂBLE SUPRACONDUCTEUR

Les principaux composants d'un système de câble supraconducteur nécessitent un dimensionnement rigoureux pour garantir le bon fonctionnement du système. Il existe de nombreuses références qui traitent tout ou partie de la conception de système de câble avec des supraconducteurs HTc pour le réseau électrique [2], [3], [4], [5] ou d'autres applications concernant l'alimentation de grands instruments pour la physique [6], [7]. Cette section regroupe les points clefs du dimensionnement d'un système de câble supraconducteur HTc.

2.1. Le câble supraconducteur HTc

La topologie de câble supraconducteur la plus courante pour un usage sur le réseau électrique est celle présentée en Fig. 1, correspondant à la solution proposée par Nexans dans le cadre du projet SuperRail. Contrairement à la solution proposée dans [8] où le câble est formé par un empilement de rubans supraconducteurs, la topologie avec des conducteurs torsadés sur plusieurs couches a l'avantage d'offrir une flexibilité identique dans toutes les directions. Cette topologie permet alors une intégration plus aisée en milieu urbain et dense, notamment lorsque les chemins de câble sont complexes et tortueux.

Le câble de la Fig. 1 est composé d'une âme centrale en cuivre multi-filamentaire pouvant supporter des courants de courts-circuits importants, de deux couches de rubans supraconducteurs torsadés l'une sur l'autre, 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'une conduite cryogénique permettant d'isoler le câble de la température extérieure et de faire circuler l'azote liquide (LN₂).

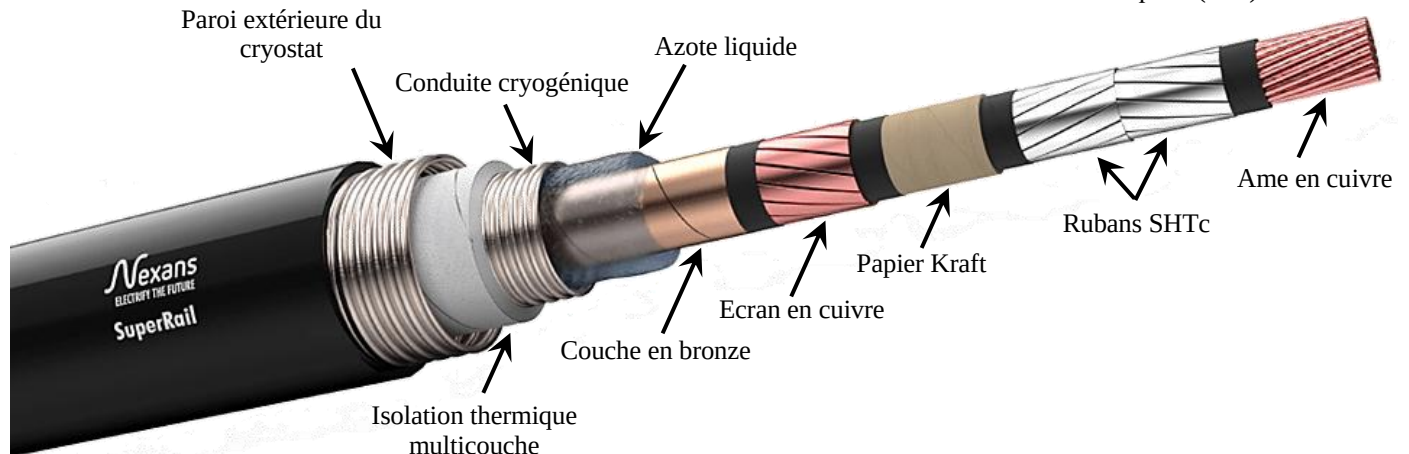


Fig. 1. Vue d'ensemble du câble supraconducteur HTc développé par Nexans pour SuperRail [1].

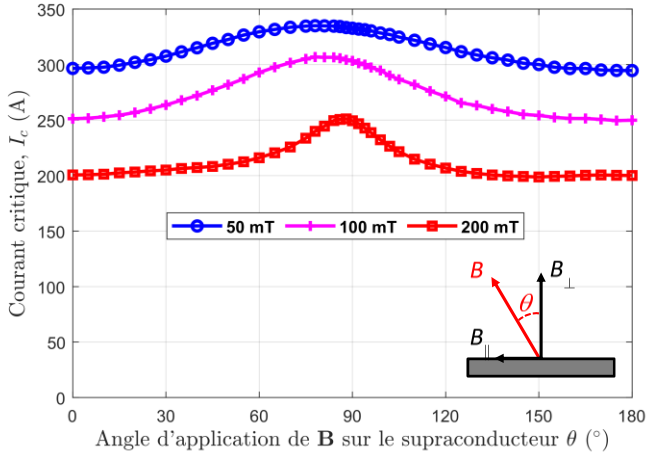


Fig. 2. Dépendance du courant critique à 70 K d'un ruban supraconducteur Fujikura FESC 2G en fonction de l'angle d'application de l'induction magnétique θ pour différentes valeurs de $\|B\|$.

2.1.1. Conception électromagnétique du câble

La conception d'un câble supraconducteur nécessite la mise en œuvre de plusieurs domaines de la physique, en particulier l'électromagnétisme et la thermique. La résistance électrique d'un câble supraconducteur HTc est fortement non linéaire et dépend de la température T , de l'induction magnétique B et de du courant I . En effet, la caractéristique $U-I$ d'un matériau supraconducteur peut être modélisée autour du courant critique I_c par une loi en puissance :

$$U = U_c \left(\frac{I}{I_c(T, B)} \right)^{n(T, B)} \quad (1)$$

avec U_c la tension critique, qui dépend de la longueur entre les prises de potentiel, définie pour $1 \mu V/cm$, et n l'indice de raideur de la loi en puissance qui dépend aussi de la température T et de l'induction magnétique B .

A titre d'exemple, la variation du courant critique I_c d'un ruban supraconducteur à 70 K en fonction de l'orientation θ de l'induction magnétique et pour différentes amplitudes de celle-ci est représentée sur la Fig. 2. Ces valeurs proviennent d'une base de données regroupant plusieurs rubans supraconducteurs de différents fabricants et accessible en ligne [9].

Il est possible de connaître précisément l'amplitude du champ magnétique et son orientation sur les rubans supraconducteurs HTc d'un câble torsadé à l'aide de formules analytiques développées dans [10]. Néanmoins, pour des raisons techniques lors de la fabrication, les rubans supraconducteurs torsadés pour former un câble sont généralement espacés de l'ordre de 0,5 mm. Cet espacement se traduit par un angle d'application du champ magnétique sur le ruban autour de 30° . Ainsi, pour une température de fonctionnement donnée, habituellement le point le plus chaud envisagé dans le câble, le courant critique d'un ruban est obtenu en prenant l'intersection de la courbe $I_c(B, 30^\circ)$ avec la droite de charge du câble, comme illustré sur la Fig. 3. Lorsque les rubans supraconducteurs occupent toute la périphérie d'une couche, cette droite de charge peut être approximée par :

$$I(B) \approx \frac{w_{SHTc}}{\mu_0 N_{couches} \beta} B \quad (2)$$

avec w_{SHTc} la largeur d'un ruban SHTc (typiquement de 4 mm), $N_{couches}$ le nombre de couches de rubans SHTc, $\beta > 1$ le

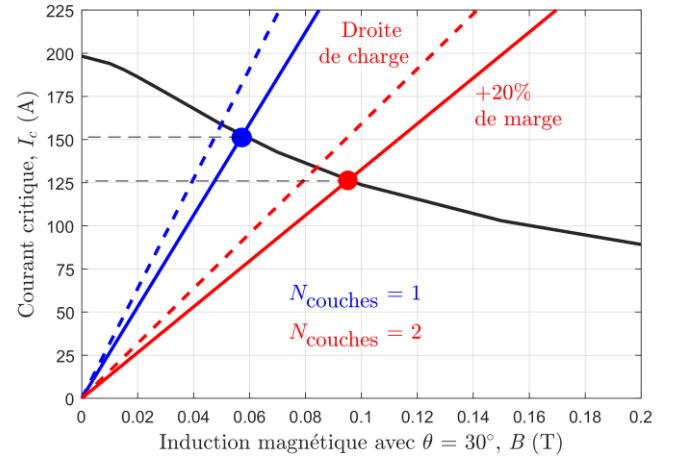


Fig. 3. Evolution du courant critique à 77,5 K pour un angle d'application de l'induction magnétique de 30° d'un ruban supraconducteur Fujikura FESC 2G en fonction de l'amplitude de l'induction magnétique. En bleu et en rouge, les droites de charge d'un câble avec une et deux couches, respectivement. En pointillé, les droites de charge critiques. En trait plein, les droites de charge avec un coefficient de sécurité de 20% soit $\beta = 1,2$.

coefficient de sécurité et B l'amplitude de l'induction magnétique.

Les points de fonctionnement obtenus sur la Fig. 3 avec une marge de sécurité de 20% correspondent à un courant critique par ruban de 152 A et 126 A pour un câble à une et deux couches respectivement. Ainsi, pour réaliser un câble SHTc avec un courant critique de 3500 A, 23 rubans sont nécessaires pour un câble à une couche et 28 rubans pour un câble à deux couches. Le diamètre du câble ainsi formé est alors de 33 mm pour le câble à une couche contre 20 mm pour le câble à deux couches. On constate aisément que les propriétés du ruban et le nombre de couches ont une incidence directe sur les dimensions du câble et son coût, dépendant fortement du nombre de rubans supraconducteurs. Dans le cadre du projet SuperRail, deux câbles SHTc de 60 m ont été réalisés [1]. Ils comportent chacun 25 rubans supraconducteurs de 4,4 mm de largeur répartis sur deux couches. L'un des câbles contient des rubans du fabricant SuNAM [11] et l'autre du fabricant AMSC [12]. Pour chacun des câbles, le courant critique est supérieur à 4000 A tandis que le courant maximal de fonctionnement attendu est de 3500 A.

2.1.2. Isolation électrique du câble

Dans les câbles SHTc, le papier laminé en polypropylène (PPLP) ou le papier Kraft sont couramment utilisés pour l'isolation en tension. La tenue en tension du PPLP est donnée à 28,60 kV/mm en AC et 74,88 kV/mm en DC lorsqu'il est dans l'azote liquide à pression atmosphérique selon [13]. Ces valeurs augmentent encore avec l'augmentation de la pression ou la diminution de la température. L'épaisseur minimale de l'isolant peut être obtenue par :

$$th_{PPLP, \min} = R_i \left(e^{\frac{U_0}{R_i E_{\max}}} - 1 \right) \quad (3)$$

avec R_i le rayon intérieur de l'isolation, $E_{\max}$ le champ électrique critique de l'isolant et U_0 la valeur de la tension normalisée à tenir.

En prenant $U_0 = 15$ kV, $R_i = 9$ mm et $E_{\max} = 28,60$ kV, on obtient une épaisseur de PPLP de 1,08 mm. Néanmoins, pour des raisons pratiques lors de la fabrication du câble et de sécurité, l'épaisseur choisie est rarement en dessous de 2 mm.

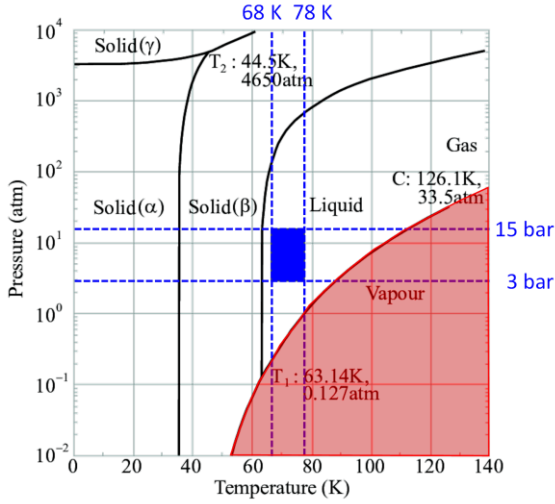


Fig. 4. Diagramme de phase de l'azote et la zone de fonctionnement usuellement retenue pour maintenir l'azote sous forme liquide dans un câble supraconducteur HTc.

2.1.3. Conception de l'âme en cuivre (cœur du câble)

L'âme en cuivre comme illustrée sur la Fig. 1 permet une résilience plus forte du câble SHTc aux courants de court-circuit qu'il peut subir. Pour trouver la section de cuivre nécessaire, on peut résoudre l'équation de la chaleur en supposant des conditions adiabatiques lors du court-circuit car il intervient généralement de façon abrupte :

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \rho_{el}(T) \frac{I_{cc}^2}{S^2} \quad (4)$$

La solution dérivée de l'annexe A de la norme IEC 60364-5-54 et également introduite dans [14] s'écrit alors :

$$S = \frac{I_{cc}}{k} \sqrt{\frac{1}{\Delta T}} \quad (5)$$

$$\text{avec } k = \sqrt{\rho \langle C_p \rangle \frac{(\alpha_0^{-1} + T_0)}{\rho_{el0}} \times \ln \left(\frac{\alpha_0^{-1} + T_0 + \Delta T}{\alpha_0^{-1} + T_0} \right)} \quad (6)$$

Pour du cuivre immergé dans l'azote liquide à $T_0 = -196^\circ\text{C}$, les valeurs suivantes peuvent être utilisées : $\rho = 8900 \text{ kg/m}^3$, $\langle C_p \rangle = 180 \text{ J/kg/K}$, $\alpha_0 = 8 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ et $\rho_{el0} = 2 \times 10^{-9} \Omega\cdot\text{m}$. Ainsi, pour résister à un court-circuit d'intensité $I_{cc} = 40 \text{ kA}$ durant une durée $\Delta t = 200 \text{ ms}$ et pour élévation de température ΔT de 5 K, on obtient $k = 64,5 \text{ A/mm}^2/\text{s}^{0,5}$, soit une section de cuivre $S = 277,5 \text{ mm}^2$ équivalente à un diamètre de 18,8 mm. A noter que dans le cas le plus critique d'un court-circuit entre le conducteur et l'écran, il faudra choisir une section équivalente pour l'écran en cuivre qui verra circuler le même courant de court-circuit. Les valeurs de court-circuit ci-dessus sont celles initialement fournies par la SNCF dans le cahier des charges des câbles SHTc devant être fabriqués par Nexans dans le cadre du projet SuperRail.

2.2. La conduite cryogénique

L'azote liquide est un fluide cryogénique couramment utilisé pour refroidir les câbles supraconducteurs HTc. Afin d'être maintenu sous forme liquide et dans une plage de pression et de température acceptable, comme illustrée sur le diagramme de phase de l'azote de la Fig. 4, le câble supraconducteur et l'azote liquide doivent être placés dans une conduite cryogénique qu'il convient de dimensionner correctement. Il existe de nombreuses

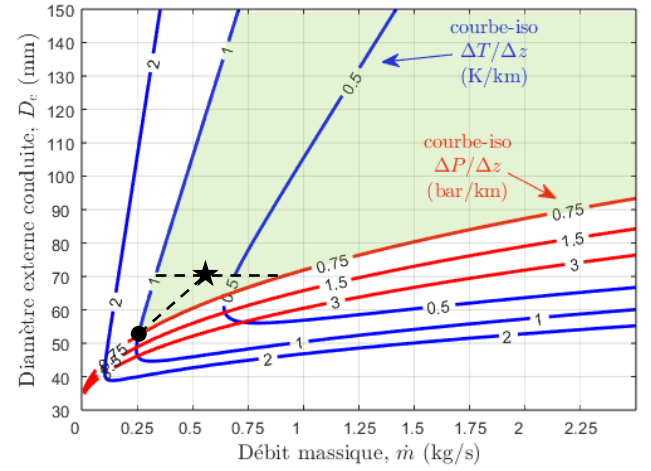


Fig. 5. Exemple de courbes-iso $\Delta T/\Delta z$ et $\Delta P/\Delta z$ en fonction du débit massique et du diamètre externe de la conduite, obtenues à partir de (7) et (8) pour une conduite cryogénique possédant un diamètre interne de 32 mm.

méthodes pour résoudre et calculer les équations thermo-hydraulique d'un câble supraconducteur dans une conduite cryogénique [10], [15], [16], [17], [18]. La modélisation analytique hydraulique et thermique d'une conduite parcourue par un fluide cryogénique montre que les dimensions de la conduite a une incidence directe sur l'élévation de température (7) et la chute de pression le long du câble (8), ainsi que sur les spécifications du système de refroidissement.

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} = f \frac{8\dot{m}^2}{\rho^2 C_p \pi^2 (D_e - D_i)^3 (D_e + D_i)^2} + \frac{\lambda \pi D_e + q_{em}}{\dot{m} C_p} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta z} = -f \frac{8\dot{m}^2}{\rho \pi^2 (D_e - D_i)^3 (D_e + D_i)^2} \quad (8)$$

avec f , $\dot{m}$, ρ , C_p , D_e , D_i , λ , q_{em} étant respectivement : le coefficient de friction de Darcy [19], le débit massique du fluide, sa masse volumique, sa chaleur spécifique, le diamètre externe et le diamètre interne de la conduite, le flux thermique par unité de surface et enfin les pertes électromagnétiques dans la conduite.

En traçant les courbes-iso $\Delta T/\Delta z$ et $\Delta P/\Delta z$ dans le plan $(\dot{m}, D_e)$ comme sur la Fig. 5, le débit massique du fluide et le diamètre externe de la conduite peuvent être choisis pour répondre à un cahier des charges donné. Ainsi, la surface dessinée en vert sur la Fig. 5 correspond à une zone de fonctionnement où l'élévation de température sera inférieure à 1 K/km et la chute de pression inférieure à 0,75 bar/km. En choisissant une conduite externe de diamètre 70 mm, le câble pourra fonctionner dans la zone souhaitée avec un débit massique compris entre 0,33 et 0,91 kg/s. Un bon compromis consiste à prendre un débit massique moyen de 0,62 kg/s représenté par l'étoile noire sur la Fig. 5. On obtient ainsi une marge de fonctionnement à la fois sur l'élévation de température et sur la chute de pression le long de la conduite. Le point de fonctionnement respectant exactement une élévation de température de 1 K/km et une chute de pression de 0,75 bar/km se situe à l'intersection des deux courbes-iso représenté par le rond noir. Dans ce cas, le diamètre externe de la conduite est de 52 mm et le débit massique de 0,26 kg/s.



Fig. 6. Illustration d'une terminaison de câble SHTc fabriquée par Nexans.

Dans cet exemple, les valeurs utilisées sont $\rho = 839 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 2662 \text{ J/kg/K}$, $\lambda = 4 \text{ W/m}^2$ et $q_{em} = 0 \text{ W/m}$. Des conceptions spécifiques de conduite cryogénique avec une trentaine de couches d'isolant thermique peuvent réduire le flux thermique par unité de surface à des valeurs proches de $1,2 \text{ W/m}^2$. Le coefficient de friction de Darcy f n'est ni constant ni simple à calculer. Dans cet exemple, nous avons utilisé la corrélation de Fang [20] en prenant un viscosité dynamique μ de l'azote liquide de $25,08 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

2.3. Les terminaisons

Les terminaisons sont des éléments indissociables et complexes du système de câble. A titre d'illustration, une terminaison du fabricant Nexans, similaire à celles utilisées dans le cadre du projet SuperRail est représentée sur la Fig. 6.

Les terminaisons permettent la connexion électrique du câble supraconducteur avec les infrastructures extérieures à température ambiante ainsi que l'injection du fluide cryogénique dans le câble. Les terminaisons sont soumises à des contraintes thermiques et mécaniques importantes et sont le siège de pertes par conduction thermique et par effet Joule. On peut montrer qu'il existe un ratio de longueur L sur section S optimal pour le conducteur reliant le point chaud au point froid de la terminaison [21] :

$$\left. \frac{L}{S} \right|_{op} = \frac{1}{I} \frac{k_a}{\sqrt{L_a}} \cos^{-1} \left(\frac{T_B}{T_H} \right) \quad (9)$$

avec I le courant de transport, k_a la conductivité thermique moyenne, L_a la valeur moyenne de la « constante » de Lorenz, T_B et T_H les températures froide et chaude respectivement.

Dans ces conditions, les pertes sont optimales et s'écrivent :

$$Q_{op} = I \sqrt{L_a (T_H^2 - T_B^2)} \quad (10)$$

En utilisant du cuivre OFHC entre 77 K et 300 K, avec $k_a = 436 \text{ W/m/K}$, $L_a = 2,18 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\Omega/\text{K}^2$ et en respectant la contrainte (9), les pertes en fonctionnement Q_{op} pour chaque terminaison sont estimées à $42,7 \text{ W/kA}$ et le rapport L/S optimal est de $15,5 \text{ cm par cm}^2$. Il faudra ajouter à ces pertes celles de l'enceinte cryogénique dans laquelle le conducteur de la terminaison est inséré.

Pour le système de câble du projet SuperRail, comme il y a deux câbles de 60 m, il y a donc quatre terminaisons qui représentent environ 70% des pertes totales du système de câbles car les câbles sont d'une longueur relativement faible.

Des conceptions plus complexes et optimisées de terminaisons sont possibles, par exemple, en immergeant une partie du conducteur en cuivre de la terminaison dans l'azote

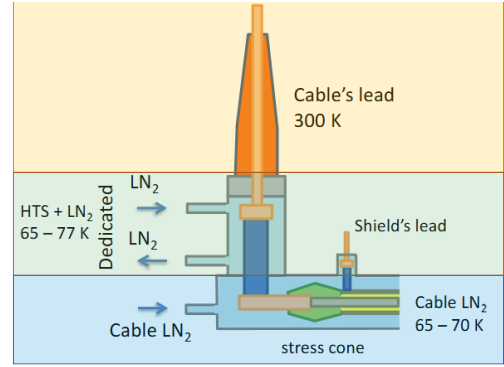


Fig. 7. Illustration d'une terminaison de câble SHTc avec une partie en cuivre (en haut), une partie intermédiaire comportant des supraconducteurs refroidis par un système dédié, et en enfin le câble supraconducteur (en bas).



Fig. 8. Illustration du système de refroidissement de type Turbo-Brayton Inversé développé par Absolut System dans le cadre projet SuperRail [23], [24].

liquide comme dans [22] ou encore en utilisant un système de refroidissement dédié pour la terminaison comme illustré sur la Fig. 7.

2.4. Le système de refroidissement

Pour éviter d'avoir à remplir régulièrement le réservoir alimentant le système de câble supraconducteur avec de l'azote liquide, un système de refroidissement peut être mis en œuvre pour compenser les pertes. Dans le cadre du projet SuperRail, un système est développé par la société Absolut System pour satisfaire les contraintes d'un environ industriel à usage commercial. Ce système de refroidissement, représenté sur la Fig. 8, est basé sur un cycle Turbo-Brayton Inversé (TBI) qui utilise des turbomachines à grande vitesse. Etant donné les vitesses de rotation élevées, supérieures à $30\,000 \text{ tr/min}$, le rotor de ces turbomachines lève sur des paliers à gaz. Cette technologie de machine TBI garantit une faible maintenance, une fiabilité accrue et permet un contrôle de la puissance de refroidissement entre environ 30% et 100% du nominal. D'autres sociétés comme Air Liquide développent également cette technologie [25], [26]. Les rendements des systèmes de refroidissement à cycle TBI sont parmi les meilleurs et peuvent atteindre aujourd'hui jusqu'à 30%.

3. CONCLUSION

Dans cet article, les notions théoriques nécessaires à la conception des principaux éléments d'un système de câble supraconducteur à haute température critique ont été abordées. Plusieurs caractéristiques du système de câbles développé dans le projet SuperRail [1] ont été présentées en lien avec les méthodes proposées. Le système de câbles SHTc de SuperRail a été complètement qualifié en avril 2024 [27] et nous attendons avec impatience la mise en service prévue en 2025 du premier câble supraconducteur en France.

4. REMERCIEMENTS

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

5. REFERENCES

- [1] A. Allais *et al.*, « SuperRail–World-First HTS Cable to be Installed on a Railway Network in France », *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, n° 3, p. 1-7, mai 2024, doi: 10.1109/TASC.2024.3356450.
- [2] J. Cho *et al.*, « Development of a single-phase 30m HTS power cable », *Cryogenics*, vol. 46, n° 5, p. 333-337, mai 2006, doi: 10.1016/j.cryogenics.2005.11.025.
- [3] X. Liang *et al.*, « Design of a 380 m DC HTS Power Cable », *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20, n° 3, p. 1259-1262, juin 2010, doi: 10.1109/TASC.2010.2040028.
- [4] D. Zhang *et al.*, « Design research on the conductor of 10kA class HTS DC power cable », *Cryogenics*, vol. 52, n° 12, p. 725-729, déc. 2012, doi: 10.1016/j.cryogenics.2012.04.019.
- [5] A. Morandi, « HTS dc transmission and distribution: concepts, applications and benefits », *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, n° 12, p. 123001, oct. 2015, doi: 10.1088/0953-2048/28/12/123001.
- [6] A. Ballarino, « Development of superconducting links for the Large Hadron Collider machine », *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 27, n° 4, p. 044024, mars 2014, doi: 10.1088/0953-2048/27/4/044024.
- [7] L. Bottura, C. Accettura, A. Kolehmainen, J. Lorenzo Gomez, A. Portone, et P. Testoni, « Design and analysis of a HTS internally cooled cable for the Muon Collider target and capture solenoid magnets », *Cryogenics*, vol. 144, p. 103972, déc. 2024, doi: 10.1016/j.cryogenics.2024.103972.
- [8] Y. Chen *et al.*, « Ultra-low electrical loss superconducting cables for railway transportation: Technical, economic, and environmental analysis », *J. Clean. Prod.*, vol. 445, p. 141310, mars 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.141310.
- [9] S. C. Wimbush, N. Strickland, et A. Pantoja, « Critical current characterisation of Fujikura FESC 2G HTS superconducting wire ». Figshare, Dataset, 18 août 2021. doi: 10.6084/m9.figshare.15095703.v1.
- [10] G. Hajiri, K. Berger, R. Dorget, J. Lévêque, et H. Caron, « Design and modelling tools for DC HTS cables for the future railway network in France », *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 35, n° 2, p. 024003, janv. 2022, doi: 10.1088/1361-6668/ac43c7.
- [11] « SuNAM Co., Ltd. Recommended Product ». Consulté le: 29 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://sunam2004.tradekorea.com/product.do>
- [12] « Amperium® HTS Wire », AMSC. Consulté le: 29 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.amsco.com/gridtec/amperium-hts-wire/>
- [13] C. Peng, Y. S. Wang, et S. T. Dai, « Insulation Characteristics of PPLP for HTS Power Cable at Liquid Nitrogen », in *2018 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, avr. 2018, p. 1-2. doi: 10.1109/ASEMD.2018.8558797.
- [14] J. G. Sverak, « Sizing of Ground Conductors Against Fusing », *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-100, n° 1, p. 51-59, janv. 1981, doi: 10.1109/TPAS.1981.316886.
- [15] L. Savoldi, D. Placido, et S. Viarengo, « Thermal-hydraulic models for the cooling of HTS power-transmission cables: status and needs », *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 35, n° 4, p. 044001, févr. 2022, doi: 10.1088/1361-6668/ac4f3c.
- [16] W. T. B. de Sousa, E. Shabagin, D. Kottonau, et M. Noe, « An open-source 2D finite difference based transient electro-thermal simulation model for three-phase concentric superconducting power cables », *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 34, n° 1, p. 015014, déc. 2020, doi: 10.1088/1361-6668/abc2b0.
- [17] W. T. B. de Sousa, D. Kottonau, J. Murta-Pina, A. Morandi, et M. Noe, « Thermal-electrical analogy for simulations of superconducting power cables », *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 37, n° 9, p. 095004, août 2024, doi: 10.1088/1361-6668/ad637b.
- [18] E. Shabagin, C. Heidt, S. Strauß, et S. Grohmann, « Modelling of 3D temperature profiles and pressure drop in concentric three-phase HTS power cables », *Cryogenics*, vol. 81, p. 24-32, janv. 2017, doi: 10.1016/j.cryogenics.2016.11.004.
- [19] « Darcy friction factor formulae », *Wikipedia*. 23 avril 2025. Consulté le: 29 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Darcy_friction_factor_formulae&oldid=1287007353
- [20] X. Fang, Y. Xu, et Z. Zhou, « New correlations of single-phase friction factor for turbulent pipe flow and evaluation of existing single-phase friction factor correlations », *Nucl. Eng. Des.*, vol. 241, n° 3, p. 897-902, mars 2011, doi: 10.1016/j.nucengdes.2010.12.019.
- [21] M. Furuse, K. Agatsuma, et S. Fuchino, « Evaluation of loss of current leads for HTS power apparatuses », *Cryogenics*, vol. 49, n° 6, p. 263-266, juin 2009, doi: 10.1016/j.cryogenics.2008.09.004.
- [22] G. Hajiri, K. Berger, et J. Lévêque, « Optimization of the Terminations of an HTS Cable Operating on a DC Railway Network », *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, n° 3, p. 1-8, mai 2024, doi: 10.1109/TASC.2023.3338603.
- [23] K. Berger *et al.*, « Progress of the superconducting cables project in Paris: SuperRail », in *10th International Conference on Superconductivity and Magnetism - Abstract Book*, Fethiye-Oludeniz, Turkey: Ali Gencer, avr. 2025, p. 297, ID 30310. Consulté le: 30 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-05058553>
- [24] « Absolut System - Reverse Turbo-Brayton », Absolut System. Consulté le: 30 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://absolut-system.com/produits/our_products/turbo-brayton/
- [25] C. Gondrand, « Air Liquide cryogenic solutions for HTS refrigeration », présenté à ICEC/ICMC 2014 Conference, The Netherlands. [En ligne]. Disponible sur: <https://indico.cern.ch/event/244641/contributions/1563442/>
- [26] « turbo-brayton_brochure_en_06.21_sd.pdf », Consulté le: 30 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://advancedtech.airliquide.com/sites/alat/files/2021/09/14/turbo-brayton_brochure_en_06.21_sd.pdf
- [27] S. Aboudrar *et al.*, « Qualification of the SuperRail HTS Cable System », *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. xx, n° x, p. 1-6, 2025.