

La supraconductivité appliquée

Pascal Tixador

Professeur des Universités, Université Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, Institut Néel.

Introduction

Après avoir réussi à liquéfier l'hélium (4,2 K) en 1909 à Leiden (Pays Bas), H. Kammerling Onnes (1853-1926) explore ces territoires inconnus et étudie la résistivité des matériaux aux très basses températures. Le 8 avril 1911, il note dans son cahier de manipulation que la résistivité du mercure disparaissait. Il reste très prudent tant cette découverte le surprend ; il a découvert la supraconductivité.

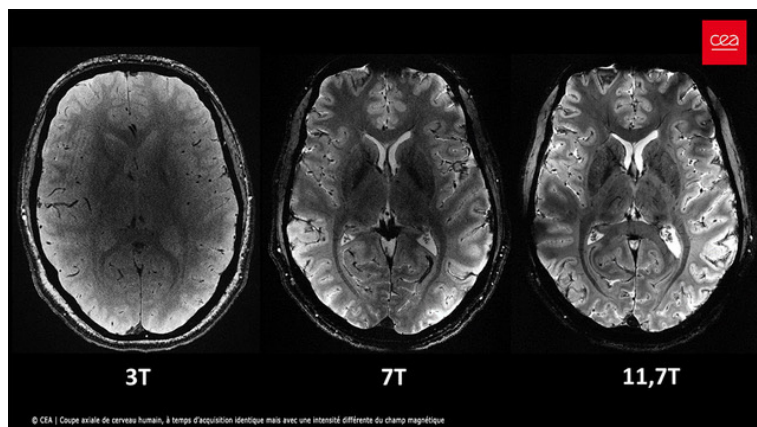
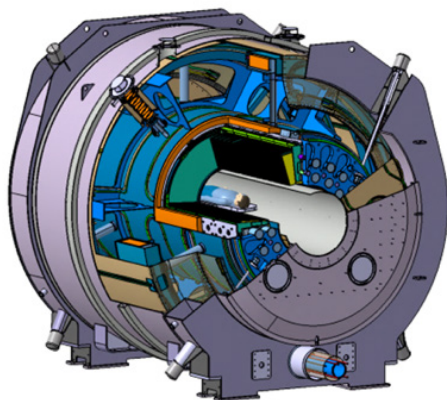
Visionnaire, H. Kammerling Onnes lance dès 1913 un projet d'aimant supraconducteurs 10 T. Mais la supraconductivité est détruite non seulement par la température, mais aussi par le champ magnétique, la densité de courant ou la déformation mécanique.

Les supraconducteurs à haute température critique ont révolutionné le monde de la supraconductivité, mais pas encore celui des applications. En revanche, les avancées sont importantes depuis quelques années avec les conducteurs de 2^{ème} génération, les rubans REBCO. Ces matériaux autorisent certaines applications refroidies à l'azote liquide pour les réseaux électriques (câble et limiteur de courant de défaut) et des inductions magnétiques intenses notamment pour des machines de fusion compactes.

Le rêve d'aimants supraconducteurs puissants de H. Kammerling Onnes ne se réalise que dans les années 60 lorsque des supraconducteurs supportant des champs magnétiques élevés sont élaborés. La supraconductivité appliquée naît et va concerner principalement les aimants, notamment pour la physique des particules, le « bon compagnon » de la supraconductivité [1]. Le LHC au CERN reste le plus grand système supraconducteur au monde avec plus de 1600 aimants disposés le long des 27 km du collisionneur. Mais le champ magnétique ne sert pas qu'à dévier ou focaliser les particules, il permet la résonance magnétique nucléaire (RMN), c'est-à-dire la précession de certains noyaux autour du champ magnétique. La RMN est à la base des deux principales applications supraconductrices commerciales (6,9 milliards

de dollars, 63 % du marché mondial évalué à 10,9 milliards de dollars en 2022 [2]) : les imageurs (IRM) et les spectromètres RMN. Avec plus de 40 000 IRM supraconducteurs dans le monde, c'est une technique d'imagerie exceptionnelle des organes et tissus mous. Le CEA a conçu l'aimant de l'imageur le plus puissant au monde produisant 11,7 T (figure 1, [3]) et conduisant à une résolution inégalée pour les neurosciences en particulier. Les spectromètres RMN atteignent eux 28,2 T, mais dans des volumes beaucoup plus petits (analyse d'échantillons).

La fin des années 80 reste le troisième temps fort de la supraconductivité avec la découverte de la supraconductivité à haute température critique en 1986 et en 1987 du matériau YBaCuO supraconduc-



© CEA | Coupe axiale de cerveau humain, à temps d'acquisition identique mais avec une intensité différente du champ magnétique

Figure 1 : Imageur 11,7 T et images du cerveau à différentes inductions (temps d'acquisition identiques) - (projet ISEULT, photos CEA).

teur à 90 K, donc dans l'azote liquide (77 K), fluide industriel courant. Le magazine Times avait titré en couverture « *the superconductivity revolution* » en 1987 [4]. Cette révolution n'a pas eu encore lieu car ces Supraconducteurs à Haute Température Critique (SHTC) se sont révélés particulièrement difficiles à mettre sous forme de conducteurs performants. Cependant, depuis les années 2020 des conducteurs à très hautes performances sont disponibles. Les coûts restent encore toutefois élevés pour certaines applications. Les supraconducteurs conventionnels type NbTi ou Nb₃Sn sont appelés Supraconducteurs à Basse Température Critique (SBTC).

L'histoire n'est pas finie avec des annonces, en général démenties, de supraconductivité à des températures élevées, y compris la température ambiante. Néanmoins T_c est un paramètre, certes important, mais pas le seul. Il faut que le matériau supraconducteur s'élabore sous forme de conducteurs de grande longueur, transportant des densités de courant importantes sous champ magnétique et à un coût acceptable. Par exemple, les conducteurs NbTi restent de très loin les plus utilisés malgré une température critique faible (9,5 K). Ils sont produits en grande quantité (3000 tonnes par an) à bas coût et restent faciles à utiliser.

Cet article fait le point sur la supraconductivité appliquée. Nous allons aborder tout d'abord la cryogénie, science des basses températures. Nous évoquerons le principal conducteur SHTC, le ruban REBCO, avant de nous intéresser à quelques applications.

La cryogénie : un élément clé

La cryogénie est indissociable de la supraconductivité appliquée et c'est son handicap majeur. Extraire des pertes à basse température (température froide) nécessite de fournir de la puissance à température ambiante. La pénalité cryogénique (watts à fournir pour extraire un watt à la température froide) augmente lorsque la

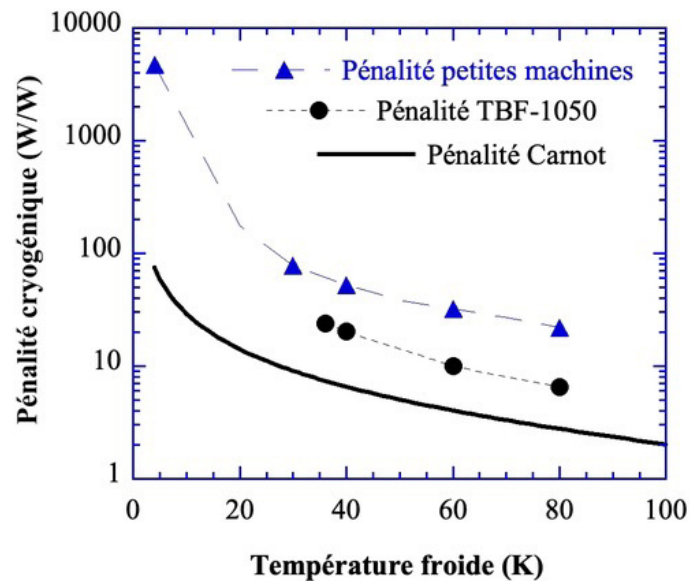


Figure 2 : Pénalité cryogénique en fonction de la température froide (température chaude : 300 K) formule de Carnot (trait plein) et valeurs expérimentales (triangles : compresseur de 7 kW ; ronds : compresseur de 1050 kW [5]).

température froide diminue. La pénalité minimale est donnée par la formule de Carnot, mais la valeur réelle est nettement plus élevée comme l'indique la figure 2. Celle-ci donne les pénalités cryogéniques minimales (Carnot), de petites machines froides réelles (7 kW à température ambiante) et d'une machine froide plus puissante (1050 kW à température ambiante [5]). Cette figure montre que la pénalité cryogénique diminue beaucoup au-dessus de 20 K et que cette tendance est nettement renforcée pour les machines réelles. En revanche plus la machine froide est puissante, moindre est sa pénalité cryogénique. Au-dessus de 65 K, il est possible d'utiliser de l'azote liquide, fluide industriel courant et peu coûteux. A 63 K, l'azote se solidifie.

Ce coût cryogénique est surtout pénalisant pour les dispositifs fonctionnant

en AC (câbles AC, induits de machines synchrones...) puisque les pertes sont nulles en DC et que les pertes du cryostat (dispositif maintenant le supraconducteur à froid) peuvent être extrêmement faibles. En AC un supraconducteur est le siège de pertes : l'équation de Maxwell Faraday indique qu'une induction magnétique AC induit un champ électrique qui, associé à une densité de courant, crée des pertes, appelées pertes AC. Ces pertes AC peuvent être réduites en adaptant le conducteur, mais pas annulées. Les conducteurs SHTC, en particulier les rubans REBCO, n'ont pas une configuration bien adaptée pour minimiser les pertes AC, mais beaucoup de travaux sont en cours.

Plus la température de fonctionnement augmente, moins le dispositif est sensible aux perturbations extérieures (chocs mécaniques par exemple). Cet avantage

“ La cryogénie est indissociable de la supraconductivité appliquée et c'est son handicap majeur. Extraire des pertes à basse température (température froide) nécessite de fournir de la puissance à température ambiante. ”

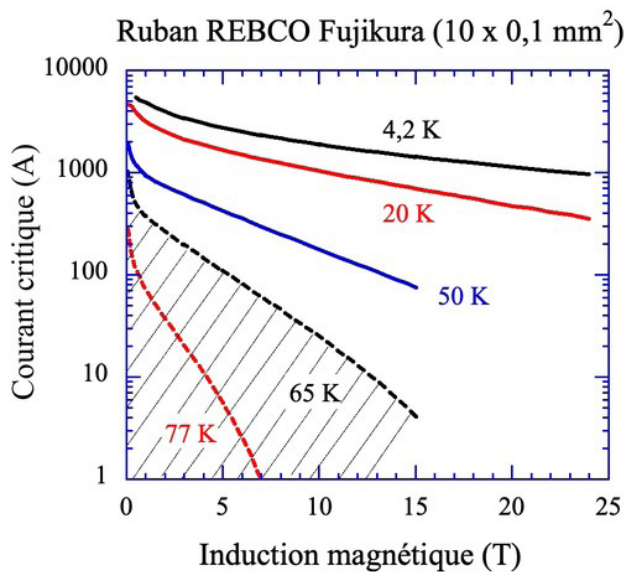


Figure 3 : Caractéristiques $I_c(B)$ à différentes températures pour un ruban SHTC de Fujikura [7] (zone hachurée : azote liquide possible).

●●● important est lié à l'augmentation avec la température des chaleurs spécifiques (facteur environ 100 entre 4 K et 20 K) qui représentent le frein interne des matériaux contre les élévations de température.

L'intérêt des SHTC est donc multiple, mais à condition de disposer de conducteurs SHTC performants et à coût « acceptable ».

Si la cryogénie est complexe et coûteuse, elle est parfaitement maîtrisée par certains industriels. De très nombreuses expériences montrent son extrême fiabilité et sa totale transparence pour l'utilisateur.

Les conducteurs supraconducteurs

Un conducteur supraconducteur est parfait : dans un aimant commercial d'IRM court-circuité sur lui-même (mode persistant), la décroissance du courant est inférieure à 10 % après un siècle et des décroissances bien moindres (facteur 100) peuvent être obtenues [6]. Malheureusement, la contrainte de fonctionner à très basse température rend le supraconducteur non idéal. Nous venons de voir que

les contraintes cryogéniques diminuent quand la température de fonctionnement augmente, en particulier lorsque l'azote liquide peut être utilisé.

La figure 3 montre le courant dans un ruban SHTC en fonction de l'induction magnétique pour plusieurs températures. Elle montre les capacités exceptionnelles de transport de courant des SHTC. Les densités de courant usuelles

dans les appareils électriques de puissance sont de quelques A/mm². Un courant de 1000 A dans le ruban correspond à une densité de courant globale de l'ordre de 1000 A/mm².

On distingue en général trois zones en fonction de l'induction magnétique visée :

- Faibles inductions (< 1 T (câbles, limiteur de courant de défaut, transformateur)) ; il est alors possible de fonctionner à « haute température », dans l'azote liquide ($T \geq 65$ K), fluide industriel courant et peu coûteux qui est en plus un bon isolant électrique durable.
- Inductions élevées (< 10 T, machines tournantes) ; la température doit être intermédiaire (20 à 50 K).
- Inductions très élevées (fusion, aimants très haut champ) ; la température doit être inférieure ou égale à 20 K.

Dans cette dernière catégorie, la figure 4 montre que les SHTC deviennent indispensables pour des inductions supérieures à 20 T environ. Les spectromètres 28,2 T utilisent des SHTC pour créer les derniers teslas.

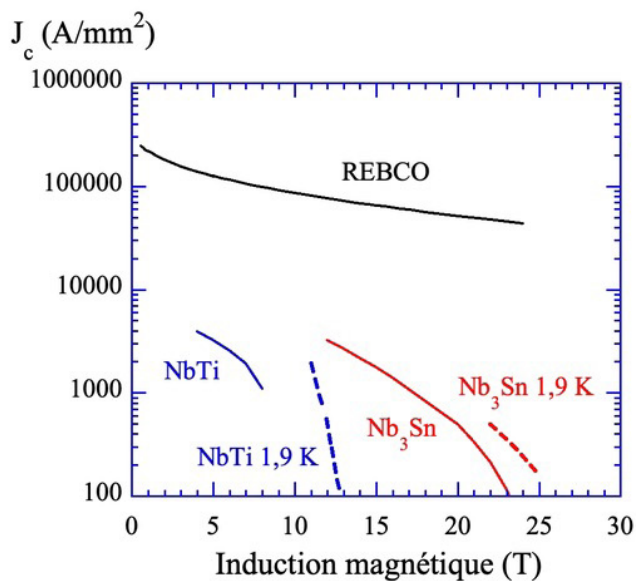


Figure 4 : Caractéristiques $J_c(B)$ à 4 K (sauf spécifié) de SHBC (NbTi, Nb₃Sn) et SHTC (REBCO) [8].

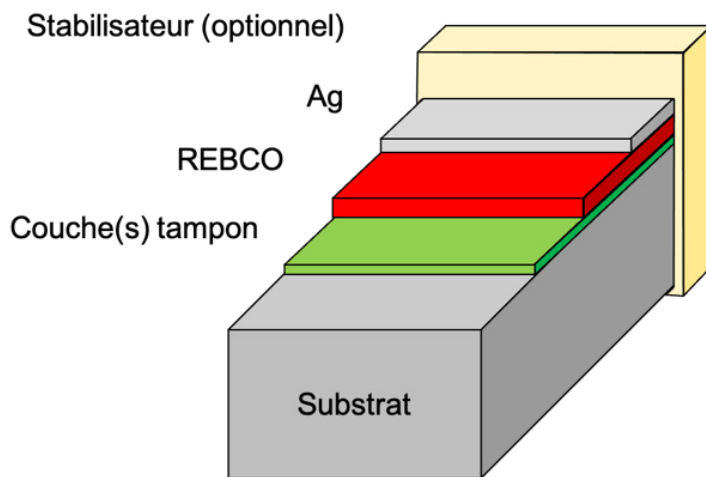


Figure 5 : Structure d'un conducteur SHTC le plus avancé, le ruban REBCO (pas à l'échelle).

La figure 4 donne la densité de courant critique dans le supraconducteur. Elle est extrêmement élevée pour les SHTC (ruban REBCO), mais le supraconducteur représente une très faible fraction (1/100) du conducteur, contrairement aux supraconducteurs à basse température critique (NbTi et Nb₃Sn).

La figure 5 donne la structure simplifiée d'un ruban REBaCuO (REBCO) qui représente le conducteur SHTC le plus avancé actuellement [9]. RE repré-

sente une terre rare (Y, Gd, Sm,...). Ces rubans sont appelés aussi conducteurs déposés ou bien aussi conducteurs 2G (2^{ème} génération). Cette figure montre que la structure du conducteur est très complexe, faite d'un empilement de multiples couches. La couche micro-métrique (1 – 3 µm) de supraconducteur (REBCO) ne représente qu'une toute petite fraction du conducteur. La couche la plus épaisse (30 – 100 µm) est en général le support de l'ensemble, appelé substrat, le plus souvent de

l'Hastelloy®, un superalliage de Ni qui confère les excellentes propriétés mécaniques du conducteur en traction. L'empilage de couches dites tampon (0,1 µm) sur le substrat permet le dépôt épitaxié de la couche supraconductrice qui forme pratiquement un monocristal. Une couche d'argent (1-2 µm) complète l'empilage. Elle protège le REBCO, permet l'injection du courant dans le supraconducteur et facilite son oxygénation. Un stabilisateur plus ou moins épais (5-500 µm) peut compléter la structure et protéger le conducteur en cas de défaut local. Le stabilisateur classique est le cuivre, mais pour les SFCL (*Superconducting Fault Current Limiter*), un stabilisateur résistif (Hastelloy par exemple), voire isolant [10], est préférable. Les conditions pour obtenir les propriétés de transport exceptionnelles (figure 3) sont particulièrement rigoureuses. Par exemple, le substrat doit avoir une qualité de surface extrême obtenue par électro-polissage. Le moindre défaut conduit souvent à une baisse locale rédhibitoire de courant critique et dégrade les rendements de production. C'est pourquoi les conducteurs ont encore des longueurs unitaires limitées (centaines de mètres), mais qui sont en

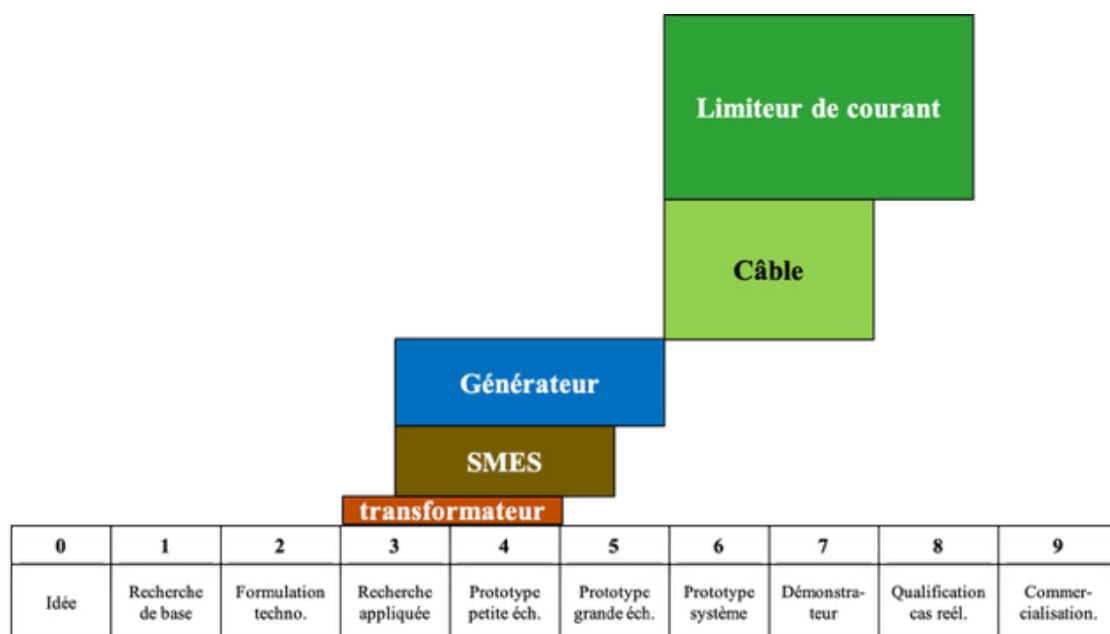


Figure 6 : Nombre relatif de projets pour différentes applications supraconductrices pour les réseaux électriques et degré de développement (TRL : Technology readiness level) [11]. (La hauteur des rectangles est proportionnelle au nombre de projets).

●●● constante progression. Des stratégies existent pour contourner ce problème. Seules quelques entreprises à travers le monde, dont une seule en Europe, maîtrisent l'ensemble du procédé pour élaborer ces rubans. Les coûts restent encore élevés, mais sont liés principalement au procédé. Le coût des matériaux est limité si bien que les coûts baisseront dans l'avenir d'autant plus que les quantités augmenteront

Applications des SHTC pour le système électrique, et la fusion

La figure 6 montre l'avancement en termes de TRL (*Technology Readiness Level*) et du nombre relatif de projets d'applications SHTC.

Câble supraconducteur

A même encombrement, cryostat compris, un câble supraconducteur transporte nettement plus de courant (facteur environ 5) donc de puissance qu'un câble résistif. Un autre avantage est qu'il peut présenter une inductance extrêmement faible (câble VLI : *Very Low Inductance*). Des pertes plus faibles ne sont pas forcément un argument du câble supraconducteur. Certes, elles sont plus faibles, mais uniquement pour des courants supérieurs au tiers environ du courant assigné. La référence [12] indique, avec les hypothèses prises, que les pertes totales annuelles ne sont plus faibles seulement si le courant moyen dépasse 43 % de la valeur assignée pour un câble de distribution. En revanche à la valeur assignée, le gain est significatif : environ 2. Seuls les câbles supraconducteurs qui sont constamment très chargés sont donc intéressants en termes de pertes. L'avantage principal reste une grande compacité.

Refroidis par une circulation d'azote liquide, la cryogénie des câbles SHTC est assez simple. Les réalisations sont nombreuses à travers le monde. Nexans [13] considère que c'est une technologie pra-

“ A même encombrement, cryostat compris, un câble supraconducteur transporte nettement plus de courant (facteur environ 5) donc de puissance qu'un câble résistif. Un autre avantage est qu'il peut présenter une inductance extrêmement faible (câble VLI - *Very Low Inductance*). ”

tiquement sur étagère (TRL élevé). Le coût reste le verrou sauf dans certaines niches comme le retrofit où le câble supraconducteur permet d'augmenter significativement la puissance transmissible sans toucher au génie civil. Les deux câbles SHTC Nexans [14] qui sont installés près de la gare Montparnasse à Paris en sont un exemple. Ils renforceront et sécuriseront l'alimentation électrique de la gare. Ces deux câbles supraconducteurs courant continu (3500 A, 1500 V) transporteront dans les passages existants une puissance impossible avec une technologie cuivre classique.

Limiteur supraconducteur de courant de défaut

Souvent désigné par son acronyme anglais SFCL (*Superconducting Fault Current Limiter* [15]), ce dispositif utilise la perte naturelle quasi-instantanée de l'état supraconducteur dès que le courant dépasse le courant critique. Il fonctionne comme un fusible ultra-rapide, mais n'est pas dégradé par la limitation et peut être remis en service ensuite. En revanche, si la limitation est quasi instantanée, le re-

tour à l'état supraconducteur après limitation est plus long.

Le SFCL est inséré en série dans la ligne à protéger ; son courant critique est adapté au courant maximum de la ligne en régime normal. Lors d'un défaut (court-circuit), le courant augmente et dès qu'il dépasse la valeur critique de l'élément supraconducteur du SFCL (l'équivalent du calibre du fusible), celui-ci dissipe, limitant naturellement et immédiatement le courant. Le SFCL empêche le courant de défaut de dépasser une certaine valeur connue et ajustable. La puissance de court-circuit peut être infinie avec un courant de défaut parfaitement maîtrisé, graal des concepteurs de réseaux électriques. Cela ouvre énormément de possibilités et d'opportunités dont toutes n'ont pas été mêmes encore imaginées. Le maillage du réseau pour le sécuriser et améliorer la qualité de tension peut croître sans poser de problème de courants de défaut.

Compte tenu de leur fort potentiel, de nombreux SFCL ont été installés dans les réseaux avec des fonctionnements

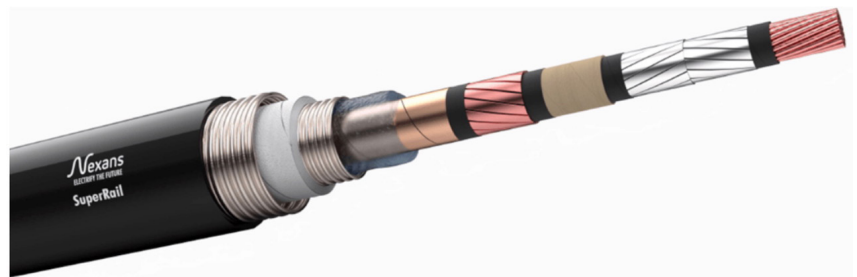


Figure 7 : Câble supraconducteur SuperRail de NEXANS (3500 A – 1500 VDC) pour la gare Montparnasse.



Figure 8 : Limiteur de courant de défaut 220 kV / 2,4 kA SuperOx installé à Moscou (Russie).

en conditions opérationnelles réussis. Deux réalisations sont particulièrement remarquables. Un limiteur supraconducteur (triphasé 10 kV, 2,4 kA) et un câble supraconducteur de 1 km de long ont fonctionné avec succès dans le réseau dans la ville d'Essen (Allemagne) pendant plus de sept ans [16]. Tous les essais y compris de limitation ont donné les résultats attendus : le SFCL est une technologie maîtrisée. La cryogénie considérée à tort souvent comme la bête noire n'a pas posé de difficulté hormis quelques problèmes de jeunesse et est restée transparente pour l'exploitant du réseau électrique. Cette expérience prouve la maturité de cette technologie dans des conditions réelles dans un réseau électrique.

L'autre exemple est le SFCL très haute tension (220 kV) de la société SuperOx installé à Moscou (figure 8) depuis décembre 2019 [17]. Le courant assigné est 1,2 kA (valeur efficace) et la limitation intervient au-delà de 3,4 kA. En essai, le courant a été limité à 7 kA pour un courant prospectif de 38 kA. Ces résultats démontrent que même en très haute tension, là où l'intérêt des limiteurs de courant est le

plus fort, des solutions préindustrielles existent.

Le SFCL est vraiment sorti des laboratoires et se rapproche du déploiement industriel (TRL élevé). Comme pour les câbles, le coût reste néanmoins un verrou, mais des solutions ont été proposées pour le réduire [18] tandis que le coût du conducteur SHTC (ruban REBCO) diminue.

Machines de fusion

La fusion thermonucléaire vise à domestiquer l'énergie du soleil. Les combustibles (isotopes d'hydrogène) sont bien répartis sur la terre et en grande quantité. En revanche les conditions de réaction sont extrêmes avec en particulier des températures supérieures à 100 millions de degrés Celsius. A ces températures, la matière est sous forme de plasma qu'il faut donc confiner. La technologie la plus avancée est le confinement magnétique : le plasma est contenu dans une bouteille magnétique. Deux configurations principales existent : tokamak et stellarator. Dans un tokamak le système magnétique est assez simple avec un tore, mais un courant dans le plasma est indispensable. C'est la combinaison du champ toroïdal et celui créé par le courant du plasma qui assure le confinement. Le courant dans le plasma est induit par effet transformateur via le solénoïde central, le primaire, le plasma étant le secondaire. Le système magnétique est complété par des bobines poloïdales (figure 9) qui assurent l'équilibre, la position et la forme du plasma.

Le stellarator ne requiert pas de courant dans le plasma, mais avec une géométrie des bobines très complexe. ●●●

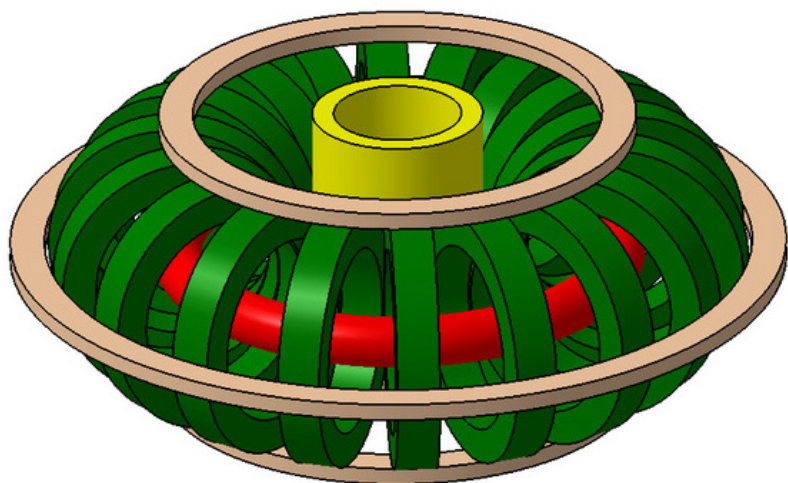


Figure 9 : Systèmes magnétiques d'un tokamak. Plasma : rouge ; système toroïdal : vert ; solénoïde central : jaune ; système poloïdal : beige.

“ Les progrès ont été très importants ces dernières années et les SHTC, avec notamment les rubans REBCO, très performants à présent. Leur prix reste élevé pour certains usages, mais il baissera forcément dans le futur puisqu’il est principalement lié au procédé. ”

Les deux voies sont étudiées, mais le tokamak reste plus avancé avec en particulier le projet international ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor* [19]) qui est cours de construction à Cadarache (France). Il utilise très majoritairement des conducteurs SBTC, Nb₃Sn et NbTi, 700 tonnes au total. L’induction magnétique atteint 5,3 T sur le plasma.

La figure 4 a montré que les SHTC permettent des inductions magnétiques bien plus élevées que le Nb₃Sn. Or la puissance de fusion augmente avec la puissance 4 de l’induction magnétique avec k un coefficient de proportionnalité :

$$P_{fusion} \approx k R^3 B_t^4 \left(\frac{a}{R}\right)^4$$

Avec R : rayon extérieur du plasma ; a : rayon intérieur du plasma ; B_t : induction sur le plasma.

La perspective d’inductions magnétiques très élevées rendues possible par les SHTC est extrêmement attractive pour réaliser des machines de fusion compactes. En revanche ces très fortes inductions posent des problèmes mécaniques très ardues. Plusieurs projets dans le monde explorent cette nouvelle voie. Le plus avancés est SPARC de la société Commonwealth Fusion System [20] (USA). SPARC vise pour 2025 un démonstrateur de tokamak avec des rubans REBCO avec 12,2 T sur le plasma (ITER : 5,3 T) et une température de fonctionnement de 20 K. Une étape importante a été franchie en septembre 2021 avec les

tests réussis d’une bobine toroïdale modèle qui a fonctionné à 20 K avec 20 T sur le conducteur et un courant de 40 kA [21].

Une start-up Grenobloise, Renaissance Fusion [22], travaille sur les stellarators SHTC avec plusieurs approches très innovantes.

Ces projets de tokamak SHTC utilisent des centaines de km de ruban REBCO. Ils ont permis le développement accéléré des SHTC : progrès significatifs en termes de performances, mais aussi d’industrialisation de la production. SPARC considère que les conducteurs ont atteint un niveau de performances suffisant pour les machines du futur. En revanche leur coût reste un verrou.

Conclusion

Les conducteurs SHTC ouvrent de nouvelles perspectives pour les applications supraconductrices qui restent cantonnées actuellement dans quelques niches ; ceci étant principalement dû au fonctionnement proche du zéro absolu (2-8 K). Les progrès ont été très importants ces dernières années et les SHTC, avec notamment les rubans REBCO, très performants à présent. Leur prix reste élevé pour certains usages, mais il baissera forcément dans le futur puisqu’il est principalement lié au procédé. Ils permettent, pour les câbles ou les limiteurs de courant de défaut, de fonctionner dans l’azote liquide, fluide industriel courant et peu coûteux. Ces deux applications

L’auteur

Pascal Tixador est professeur à l’université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble-INP. Il mène ses travaux sur les dispositifs supraconducteurs de puissance dans deux laboratoires Grenoblois : le G2Elab et l’Institut Néel. Il a coordonné plusieurs projets ANR ainsi qu’un projet H2020 (FASTGRID) et animé la communauté française via la Commission Supraconductivité et Cryogénie. Il est actuellement l’un des directeurs du PEPR (Programme et Equipement Prioritaire de Recherche) « Suprafusion » portant sur la supraconductivité à haute température critique appliquée en particulier à la fusion.



qui contribuent à sécuriser les réseaux électriques, font actuellement l’objet d’une demande forte. Elles permettent aussi une augmentation des capacités des réseaux électriques. Ceci s’avère très intéressant dans la perspective du développement des réseaux électriques pour faire face à une forte électrification afin d’atteindre la neutralité carbone. Utilisés à très basse température (20 K), ces conducteurs permettent de produire des champs magnétiques extrêmement élevés. Ceci pourrait ouvrir la possibilité pour des machines de fusion compactes, donc très attractives. Un autre domaine non abordé dans cet article concerne l’hydrogène liquide, vecteur d’énergie d’avenir en particulier pour l’industrie ou la mobilité. Avec l’hydrogène liquide (20,3 K, -252,9 °C), la cryogénie devient gratuite et les SHTC deviennent naturels. Un câble SHTC refroidi par de l’hydrogène liquide peut associer deux vecteurs d’énergie. ■

Références

- [1] M. Wilson, "Superconductivity and accelerators: the good companions", IEEE Transactions Applied Superconductivity, vol. 9, pp. 111-121, 1999.
- [2] Global Market Insights Inc. : <https://www.gminsights.com>
- [3] L. Quettier, G. Aubert, J. Belorgey, C. Berriaud, P. Bredy, G. Dilasser, O. Dubois, G. Gilgrass, Q. Guihard, V. Jannot, F.P. Juster, H. Lannou, F. Molinié, F. Nunio, A. Roger, T. Schild, L. Scola, A. Sinanna, V. Stepanov, P. Védrine, "Commissioning completion of the Iseult whole body 11.7 T MRI system", IEEE Transactions Applied Superconductivity, vol. 30, 4401705, 2020.
- [4] Time, May 11, 1987, vol. 129, No 19.
- [5] C. Gondrand, "Turbo-Brayton cryogenics system", EASISchool2, octobre 2019.
- [6] J. File and R. G. Mills, "Observation of persistent current in superconducting solenoid", Physical Review letters, vol. 10, pp. 93-96, 1963.
- [7] <https://www.fujikura.co.jp/eng/rd/research/005/index.html>
- [8] Magnet lab, Tallahassee, <https://nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center/plots/>
- [9] A. Molodyk, D. Larbalestier, «The prospects of high-temperature superconductors», Science, 380 (2023) 1220-1222.
- [10] P. Tixador, J. Vialle, A. Zampa and A. Badel, "Stabilizers for REBCO Conductors for High Performance SFCL", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 33, 4600405, 2023.
- [11] International Energy Agency, "HTS Roadmap for Electric Power Systems", Octobre 2015.
- [12] A. Bucholtz, M. Noe, D. Kottonau, E. Shabagin, M. Weil, "Environmental Life-Cycle Assessment of a 10 kV High-Temperature Superconducting Cable System for Energy Distribution", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 31, 4802405, 2021.
- [13] Nexans : <https://www.nexans.com>
- [14] K. Berger, L. Quéval, H. Caon, D. Ferandelle, A. Allais, J.M. Saugrain, L. Terrien, G. Bouvier, « SuperRail - Premier câble supraconducteur au monde à être installé sur un réseau ferré à usage commercial », Symposium de Génie électrique, Lille, 5-7 juillet 2023.
- [15] P. Tixador, "Superconducting Fault Current Limiter", World Scientific, ISBN 978-981-3272-97-2.
- [16] M. Stemmler, F. Merschel, M. Noe, "Ampacity project – update on world's first Superconducting Cable and Fault Current Limiter Installation in a German City Center", 23rd International Conf. on Electricity Distribution, Lyon June 2015, paper 676.
- [17] M. Moyzykh, D. Gorbunova, P. Ustyuzhanin, D. Sotnikov, K. Baburin, A. Maklakov, E. Magomedov, A. Shumkov, A. Telnova, V. Shcherbakov, D. Kumarov, L. Sabirov, M. Medovik, A. Kadyrbaev, S. Alexandrov, I. Mikoyan, S. Samoilenkov and A. Vasilov, "First Russian 220 kV superconducting fault current limiter (SFCL) for application in city grid", Trans. on Applied Supercond., vol. 31, 5601707, 2021.
- [18] P. Tixador, A. Akbar, M. Bauer, M. Bocchi, A. Calleja, C. Creusot, G. Deutscher, F. Gomory, M. Noe, X. Obradors, M. Pekarcikova, F. Sirois, "Some results of the EU Project FASTGRID", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 32, Art no. 5601006, doi: 10.1109/TASC.2022.3151318, 2022.
- [19] www.iter.org
- [20] <https://cfs.energy>
- [21] Z. S. Hartwig et al., "The SPARC Toroidal Field Model Coil Program", Plasma Physics, eprint 2308.12301, 2023.
- [22] <https://renfusion.eu>

Résumé

Découverte en 1911, la supraconductivité appliquée date du début des années 60 avec l'apparition des supraconducteurs transportant des courants importants sous des inductions magnétiques élevées. Elle s'est développée pour la physique des hautes énergies puis l'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) et les spectromètres RMN (Résonance Magnétique Nucléaire). L'IRM et la RMN restent les deux applications commerciales majeures. La supraconductivité est incontournable pour les machines de fusion à confinement magnétique. Les supraconducteurs à haute température critique ont révolutionné le monde de la supraconductivité, mais pas encore celui des applications. En revanche, les avancées sont importantes depuis quelques années avec les conducteurs de 2^{ème} génération, les rubans REBCO. Ces matériaux autorisent certaines applications refroidies à l'azote liquide pour les réseaux électriques (câble et limiteur de courant de défaut) et des inductions magnétiques intenses pour des machines de fusion compactes notamment. ■

Abstract

Discovered in 1911, applied superconductivity originates from the early 1960s with the emergence of superconductors carrying high currents under high magnetic inductions. It was developed for high-energy physics, followed by MRI (Magnetic Resonance Imaging) and NMR (Nuclear Magnetic Resonance) spectrometers. MRI and NMR still remain the two major commercial applications. Superconductivity is essential for magnetic confinement fusion machines. High-temperature superconductors have revolutionized the world of superconductivity, but not yet the world of applications. However, significant progress has been made in recent years with 2nd generation conductors, REBCO tapes. These materials enable applications with liquid nitrogen cooling for applications in electrical networks (cables and fault current limiters) and intense magnetic induction for compact fusion machines in particular. ■