

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	89 (1998)
Heft:	25
Artikel:	Câbles supraconducteurs, développement présent et futur
Autor:	Flükiger, René
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-902152

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Considérant les activités dans le domaine des câbles supraconducteurs au niveau mondial on note un nombre croissant de projets mis à la réalisation qui visent l'évaluation des avantages et des désavantages de la supraconductivité par rapport aux câbles traditionnels en Cu. Les résultats obtenus apparaissent prometteurs, mais ils révèlent qu'il faudra attendre encore plusieurs années de test et de développement avant de résoudre les majeurs problèmes techniques, c'est-à-dire l'augmentation de la densité de courant critique des rubans de Bi(2223) et la réduction des pertes dans les câbles.

Câbles supraconducteurs, développement présent et futur

■ René Flükiger

Depuis la découverte de la supraconductivité, la possibilité de transporter de l'énergie électrique sans pertes a été à la base de nombreux projets dans beaucoup d'applications à moyenne et à grande échelle. Avec les progrès obtenus pendant les dernières années dans la fabrication de conducteurs industriels de grande longueur, d'ambitieux projets de câbles ont vu le jour dans le monde entier. Les plus importants projets actuels sont les suivants: au Japon: Furukawa, Sumitomo avec Tokyo Electric Power; aux Etats-Unis: Epri avec American Superconductor, Pirelli Cable et Southwire Corporation et en Europe: EdF (Électricité de

France), BICC, NKT/NST, Alstom. En Suisse, un prototype de 5 m est en construction dans le cadre d'une collaboration entre le PSI et Kabelwerke Brugg.

Bien que dans cet article il ne sera question que des câbles, il est important de mentionner que l'entreprise ABB en Suisse a réalisé deux prototypes supraconducteurs: un transformateur de 630 kW, fabriqué à Sécheron avec des rubans de Bi(2223) (prononcé «bisco») fournis par American Superconductor a été relié au réseau des Services Industriels à Genève pendant une année (voir l'article page 18), et un limiteur de courant, fabriqué par ABB Dättwil à base de cylindres de Bi(2212), aussi relié au réseau pendant une certaine période afin d'accumuler des expériences.

Les avantages d'un câble supraconducteur par rapport à un câble conventionnel sont décrits par le tableau I.

Haute densité de courant critique j_c Grande capacité de transmission dans un espace limité ↓ Transmission de fortes puissances à des tensions «basses»: Par exemple 2 000 MW \pm 50 kV au lieu de \pm 500 kV pour systèmes conventionnels ↓ Placement dans des conduites de câbles en sous-sol déjà existantes («Retrofit») Utilisation effective des espaces dans le sous-sol ↓ Accroissement de la capacité de transmission d'énergie sans constructions coûteuses Réduction des coûts pour de futurs systèmes de puissance
--

Tableau I Avantages d'un câble supraconducteur par rapport à un câble conventionnel

Cet article était publié dans les Recueils de conférences ETG N° 55 d/f.

Adresse de l'auteur

Prof. René Flükiger, Dépt. de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève
Quai Ernest-Ansermet 24, 1211 Genève

Techniques de l'énergie

Bien sûr, il ne sera pas possible de bénéficier de ces avantages avant que tous les problèmes techniques causés par l'introduction de cette nouvelle technique ne soient résolus et que la preuve de fiabilité soit fournie. Lors des premiers essais avec des câbles supraconducteurs, aucun problème fondamentalement nouveau n'est apparu: du point de vue technique, leur introduction entraîne une technique difficile et sophistiquée, mais maîtrisable. Les plus grands obstacles lors de l'utilisation de câbles supraconducteurs sont sans doute constitués par les coûts encore trop élevés des rubans à base du composé Bi(2223) et par le refroidissement à la température de l'azote liquide, 77 K (-196 °C). Sous cette perspective, la question des pertes en régime alternatif (a.c.) prend une importance capitale: elle sera discutée dans le dernier chapitre de cet article.

Le premier chapitre donne un bref aperçu de technologie utilisée pour fabriquer des rubans multifilamentaires de Bi(2223). Les domaines d'application de câbles supraconducteurs sont énoncés dans le deuxième chapitre, tandis que quelques projets de câbles poursuivis aux USA, au Japon et en Europe sont décrits dans le troisième chapitre.

Fabrication de rubans supraconducteurs

Depuis la découverte des supraconducteurs à haut T_c en 1986, plus qu'une douzaine de systèmes ont été trouvés avec des températures de transition supraconductrice dépassant 77 K, la température de l'azote liquide. Toutefois, de nombreux obstacles se dressent lors du chemin entre le laboratoire et l'application dans un câble à l'échelle industrielle. Tout d'abord, dans le cas des supraconducteurs à haut T_c , il ne s'agit plus de métaux, mais d'oxydes, présentant des structures en couches hautement anisotropes. Vu la fragilité des oxydes en général, il faut s'attendre à des problèmes quant à la stabilité mécanique de ces matériaux qui ne sont résolus que par des configurations de conducteurs microfilamentaires. Pour l'application dans les câbles à température de l'azote liquide (77 K), le matériau le plus prometteur est aujourd'hui le composé $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.2}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$, avec $T_c=110$ K généralement caractérisé par l'abréviation Bi,Pb (2223). Aujourd'hui, il est possible de produire des rubans multifilamentaires à base de ce composé en de très grandes longueurs, bien supérieures à 1 km.

Il existe un deuxième composé à base de Bi, le $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ ou Bi(2212),

avec $T_c = 92$ K, mais les densités de courants critiques de fils ou de rubans à 77 K sont plus faibles, et la dépendance du champ magnétique est beaucoup plus prononcée, de manière qu'aujourd'hui, toute l'attention est concentrée sur le Bi,Pb(2223) en ce qui concerne l'opération dans l'azote liquide. D'autres composés à base de Tl et de Hg ont des températures de transition supraconductrices plus hautes ($T_c=133$ K), mais présentent des difficultés d'ordre métallurgique qui n'ont pas encore été résolues jusqu'à présent.

Les propriétés chimiques et physiques ainsi que le comportement métallurgique d'un conducteur à base d'oxyde sont fondamentalement différents de ceux d'un supraconducteur métallique classique tel que NbTi, Nb₃Sn ou Nb₃Al, et les méthodes de fabrication sont aussi très différentes. Une condition reste toutefois inchangée pour les deux classes de supraconducteurs: toute application technologique à grande échelle dépend de manière impérative de la capacité du fil ou du ruban de transporter de forts courants: les valeurs requises pour la densité du courant critique, j_c , sont de l'ordre de $>10^5$ A/cm² à la température d'opération. Pour toute la section du câble, en tenant compte de la section occupée par la gaine stabilisatrice d'Ag, de l'isolation thermique et de la conduite de refroidissement, ces valeurs se réduisent à >5000 A/cm², ce qui est toujours encore 5 fois supérieur à celle de conducteurs conventionnels à base de Cu. Un câble à base de Bi,Pb(2223) peut donc être fabriqué avec une plus faible section que celle d'un câble conventionnel à base de Cu. Nous reviendrons plus tard sur cet aspect, qui est intéressant aussi du point de vue économique.

Rubans multifilamentaires de Bi(2223)

Vu l'aspect anisotrope de la structure Bi,Pb(2223), les grains de cette phase se présentent sous forme de plaquettes, avec les axes cristallographiques a et b parallèles, et c qui est perpendiculaire à la surface du ruban. Il est impératif que l'angle entre plaquettes voisines soit aussi faible que possible (en moyenne $\leq 5^\circ$), afin de permettre au courant supraconducteur de traverser d'une plaquette à l'autre sans

subir de réduction notable. Il est clair que cette particularité caractéristique des oxydes supraconducteurs entraîne des techniques de fabrications spécifiques: de manière à obtenir l'orientation correcte de la totalité des plaquettes supraconductrices, il est nécessaire que le conducteur ait la forme d'un ruban.

La méthode généralement utilisée pour la fabrication de rubans multifilamentaires de Bi,Pb(2223) est appelée «powder in tube». Elle consiste à remplir un tube d'Ag de précurseurs d'oxydes et de carbonates dans les proportions appropriées après la calcination, de sceller les extrémités et de déformer ce barreau par tréfilage jusqu'à une section hexagonale. Ces tiges hexagonales, dont chacune constituera un filament dans le ruban final, sont ensuite assemblées à l'intérieur d'un tube d'Ag et déformées jusqu'à un diamètre d'environ 1,5 mm. A partir de ce diamètre, la géométrie de ruban, représentée dans la figure 1, est obtenue par laminage. L'effet du laminage est celui d'orienter les plaquettes du précurseur, qui en majorité est constitué par la phase Bi(2212). La texture de ce précurseur influence celle de la phase finale Bi,Pb(2223), formée lors de la réaction finale à environ 840 °C. Les dimensions typiques d'un tel ruban sont de 4 à 5 mm de largeur et de 200 à 300 µm d'épaisseur. Le nombre de filaments dans un ruban industriel varie généralement de 55 à 85, mais des rubans avec plus que 200 filaments ont déjà été fabriqués.

La phase Bi,Pb(2223) dans les rubans s'obtient par réaction à l'air à 840 °C ou sous une atmosphère de 0,07 bar d'oxygène, à des températures de l'ordre de 825 °C. Après une durée de 30 à 50 heures, la dilatation anisotrope des nouveaux grains dans le ruban provoque un léger gonflement du filament: la réaction est interrompue pour permettre un laminage à froid, qui a l'effet d'une densification. La suite des opérations comprend un deuxième traitement thermique à la même température, jusqu'à une durée allant de 100 à 200 heures. La texturation de la phase supraconductrice dans les filaments, obtenue par l'effet combiné de laminage à froid et de la présence des parois en Ag est d'une importance capitale pour l'optimisation du courant critique.



Figure 1 Section d'un ruban de Bi,Pb(2223) avec 37 filaments et un taux de supraconducteur de 25%

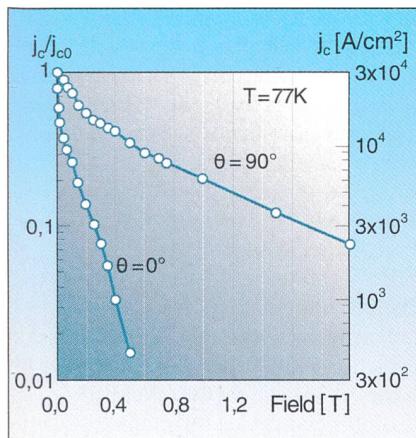


Figure 2 Variation de $j_c(77\text{K})$ en fonction du champ magnétique pour des rubans multi-filamentaires de Bi,Pb(2223) à 77 K pour les deux orientations B_{\parallel} et B_{\perp} à la face du ruban

Le *courant critique*, I_c , est défini comme étant le courant auquel le ruban supraconducteur transite de l'état supraconducteur à l'état normal; le critère industriel habituel pour ce dernier étant une tension de 0,1 µV/cm. La *densité de courant critique*, j_c , est déterminée en divisant la valeur de I_c par la section d'oxyde supraconducteur dans le ruban. Cette grandeur est surtout utilisée pour caractériser la qualité du ruban de Bi(2223). Pour les applications techniques, une autre grandeur est d'une importance capitale: la *densité de courant critique effective*, j_e , qui tient compte de la section totale du conducteur, donc de la partie supraconductrice et de la gaine en Ag. En règle générale, le supraconducteur occupe environ 25–28% de la section totale du ruban, de manière que l'on a approximativement $j_e \approx j_c/4$.

Lors du calcul des performances d'un transformateur ou d'un câble, il faudra tenir compte encore de l'isolation électrique, du taux de remplissage des rubans et de la conduite de refroidissement d'azote liquide. Les valeurs de densité de courant critique obtenues jusqu'à présent sont dépendantes des conditions sous lesquelles le ruban a été préparé. Dans le cas de rubans multifilamentaires courts (de quelques cm de longueur), la plus haute valeur publiée est de 70 000 A/cm². Pour des longueurs de quelques dizaines de mètres, des valeurs entre 30 000 et 35 000 A/cm² ont été obtenues, contre 21 000 à 25 000 A/cm² pour des longueurs de 0,5 à 1 km. La situation actuelle pour des longs rubans industriels n'est donc pas encore satisfaisante du point de vue économique: avec un taux de supraconducteur de 25 à 28%, la valeur de la densité de courant critique effective à 77 K, 0 T n'est que 6000 à 10 000 A/cm². D'autre part, il y a

raison d'être optimiste, vu les valeurs de $j_e = 15 000$ A/cm² obtenues pour des rubans plus courts et qui sont de 2 à 3 fois supérieures. Quant à la limite supérieure de j_c , une récente extrapolation basée sur des valeurs de résistivité électrique a permis d'estimer une limite supérieure de 130 000 A/cm² ($j_e > 30 000$ A/cm²).

La variation de la densité de courant critique en fonction du champ magnétique appliqué est représentée dans la figure 2 pour les deux directions de champ, parallèle et perpendiculaire à la surface du ruban. La nature anisotrope de la structure cristalline est nettement visible, la décroissance de j_c avec B étant beaucoup plus forte pour des champs perpendiculaires à la surface du ruban, donc parallèles à l'axe c cristallographique. Il en suit que le champ propre dans un câble à 77 K, même étant relativement faible, peut déjà mener à une réduction de la densité du courant critique.

Câbles supraconducteurs à haute puissance

Possibilités d'utilisation de câbles

La dérégulation du marché d'énergie aux Etats-Unis pourrait entraîner un besoin accru en techniques supraconductrices. Une vue optimiste verrait même la construction d'un «Energy Highway» de conduites à puissances Multi-GW pour un transfert d'énergie entre les neuf réseaux indépendants à l'intérieur des E.-U. De manière plus réaliste, on peut plutôt s'attendre à des longueurs de transfert plus courtes entre réseaux voisins, comme par exemple le réseau West (le plus grand, avec 40% de couverture de la surface des E.-U.) avec un des réseaux de la côte Est. Pour le moment, toutefois il n'existe pas encore de projet concret.

D'après une investigation près des producteurs d'énergie électrique aux E.-U., il apparaît qu'à long terme, le remplacement de vieux câbles par des câbles

supraconducteurs aurait de bonnes chances, à condition que la puissance transportée puisse être au moins doublée par rapport aux lignes actuelles, sans que les coûts calculés pour toute la longueur de vie d'un câble soient augmentés. On estime que 10 à 20 ans après leur introduction les câbles supraconducteurs pourraient couvrir ≈50% du marché pour câbles souterrains. Avec des coûts inférieurs de 20%, on pourrait même s'attendre à une part du marché atteignant 75%. Il est toutefois évident que des câbles supraconducteurs devraient d'abord prouver leur fiabilité et leur efficacité économique dans des projets de démonstration couvrant plusieurs années. De plus, on ne peut pas simplement s'attendre à ce que les compagnies électriques soient prêtes à remplacer leurs câbles actuels avant que des dérangements du fonctionnement ne soient enregistrés (bien que la durée de vie attendue pour un câble soit autour de 40 ans).

Une possibilité économique d'introduire des câbles supraconducteurs consiste à remplacer de vieux câbles conventionnels dans des conduites déjà existantes par des câbles supraconducteurs, ayant une plus forte puissance. Dans ce procédé, appelé Retrofit, Pirelli voit une mesure pour introduire les câbles supraconducteurs, mais juge impératif que ces composantes, testées sous conditions opérationnelles, aient fourni des données positives quant à leur fiabilité ainsi qu'aux coûts de tels systèmes. Ce n'est qu'ensuite que les ingénieurs pourront être plus enclins à réaliser de nouveaux réseaux de distribution d'énergie électrique.

Le plus grand avantage des câbles supraconducteurs par rapport aux câbles conventionnels est certainement attendu lors de la transmission de fortes puissances dans des zones urbaines. En effet, les stations de distribution intermédiaires pour les puissances moyennes peuvent

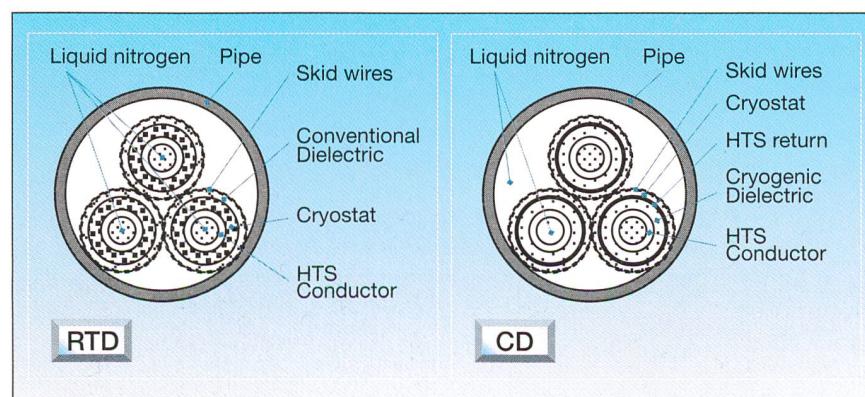


Figure 3 Différents types de câbles pour opération Retrofit: Room Temperature Dielectric (RTD) and Cold Dielectric (CD)



Figure 4 Représentation du câble supraconducteur triphasé de Sumitomo (Japon) avec 100 MVA (66 kV/1000 A)

être éliminées. Avec des câbles supraconducteurs, la même puissance peut être transmise à des tensions de distribution habituelle, par exemple: 200 MVA à 20 kV au lieu de 90/150 kV. Il n'y a pas d'alternative à la supraconductivité pour ce cas particulier.

En effet, une puissance supérieure pourrait être transmise par des câbles supraconducteurs, par exemple 1000 MVA à 90 kV au lieu de 500 MVA à 230 kV. Ceci réduirait la taille et les coûts du système de distribution.

La première application de câbles supraconducteurs sera sans doute réalisée dans la région de la ville de Tokyo d'après les estimations du Crieipi (Japon). En effet, la densité de lignes souterraines et l'augmentation de la tension électrique sont déjà arrivées à une saturation, de manière que l'augmentation supplémentaire attendue des besoins en énergie ne peut être satisfaite que par des câbles supraconducteurs.

Aussi en Europe, un besoin supplémentaire de câbles souterrains et donc éventuellement supraconducteurs pourrait se faire sentir à moyen terme. En effet, la construction de nouvelles lignes de haute tension à travers des régions fortement peuplées se heurte à des obstacles politiques croissants. L'impopularité de ces lignes est particulièrement grande au

Danemark, où des projets de câbles supraconducteurs sont en train d'être étudiés par NKT/NST.

Selon Siemens (Allemagne), le remplacement de câbles conventionnels de 380 kV refroidis à l'huile par des câbles supraconducteurs de 110 kV pourrait amener à l'élimination de stations de transformation. Toutefois, les conditions de courant/tension entre la technique conventionnelle et la technique supraconductrice sont très différentes, exigeant des interfaces particulières. Ici, des problèmes pourraient se poser quant à la taille des transformateurs nécessaires. Une autre chance pour l'emploi de câbles de 66 kV serait donnée par l'exigence de faibles champs magnétiques parasites dans les zones urbaines à forte densité: ceci constitue un argument supplémentaire en faveur de l'introduction de câbles supraconducteurs.

D'après BICC (Angleterre), la possibilité de câbles submergés semblerait être en principe envisageable, mais la nécessité de stations de refroidissement (très complexes dans ce cas) qui devraient être installées à chaque kilomètre, rendent cette solution improbable. Pour cette raison, cette entreprise ne se base que sur une comparaison entre l'utilisation de câbles supraconducteurs et celle de câbles conventionnels, mais du type XPLE (Cross Linked Polyethylen), qui sont depuis peu sur le marché pour des puissances allant jusqu'à plusieurs centaines de MW et qui sont destinés à remplacer les vieux câbles avec isolation en papier dans l'huile. Dans une section de 200 mm, un câble XPLE ne pourrait transporter qu'une puissance de 200 MW, tandis qu'avec un câble supraconducteur avec $j_c(77 \text{ K}, 0 \text{ T}) = 30\,000 \text{ A/cm}^2$ et 25% de section s.c., 400 MW seraient possibles. D'après cette estimation, les coûts d'un câble XPLE pour toute la durée de vie du câble (≈ 40 ans) seraient 3 fois

inférieures par rapport à ceux du câble supraconducteur.

D'après différentes estimations, on peut conclure que des câbles supraconducteurs ne pourront être employés à grande échelle que si les coûts seront inférieurs à ceux des câbles conventionnels en cuivre, qui sont de l'ordre de $\approx 26 \text{ CHF/kA}\cdot\text{m}$.

Projets actuels de câbles supraconducteurs dans le monde

La possibilité d'utiliser les canaux de câbles existants, appelée Retrofit, apparaît comme la plus économique et est étudiée dans plusieurs pays. On distingue entre plusieurs variantes (voir fig. 3):

Room Temperature Dielectric (RTD): Aux E.-U., seulement la conduite aller est supraconductrice, et chacune des trois phases est refroidie à l'azote liquide, tandis que pour la conduite de retour conventionnelle le diélectrique est à température ambiante.

Cold Dielectric (CD): Au Japon ainsi qu'en Allemagne, on poursuit plutôt la solution CD, où les deux conduites (aller et retour) sont supraconductrices et le diélectrique est refroidi à l'azote liquide.

A titre d'illustration, le câble triphasé de 100 MVA (66 kV/1000 A) Sumitomo pour Retrofit (dans des conduites déjà existantes) avec un diamètre extérieur de 130 mm est représenté dans la figure 4.

Des câbles supraconducteurs selon les deux solutions, RTD et CD, permettent d'utiliser un canal existant de 200 mm de diamètre et de 115 kV pour transporter une puissance dépassant considérablement celle correspondant à des conduites entièrement conventionnelles, tout en réduisant les pertes. La capacité de transport ainsi que les pertes sont comparées dans la figure 5.

La solution RTD est poursuivie aux E.-U. conjointement par Pirelli, le Electric Power Research Institute (Epri), le US Department of Energy (DOE) et American Superconductor, le producteur des rubans supraconducteurs. Elle a l'avantage d'une réalisation plus rapide et plus économique, avec moins de ruban supraconducteur. Un prototype de 50 m de longueur avec des prototypes de câble monophasé a été testé avec succès à 3,3 kA. Des prototypes pour les terminaisons à haute tension ainsi que pour les joints entre câbles ont déjà été fabriqués. Les tests sur un système prototype pour transport souterrain de 115 kV/400 MVA doivent être terminés pendant l'année 1998.

Electricité de France (EdF), avec 460 TWh en 1996 un des plus gros producteurs mondiaux d'énergie électrique, a

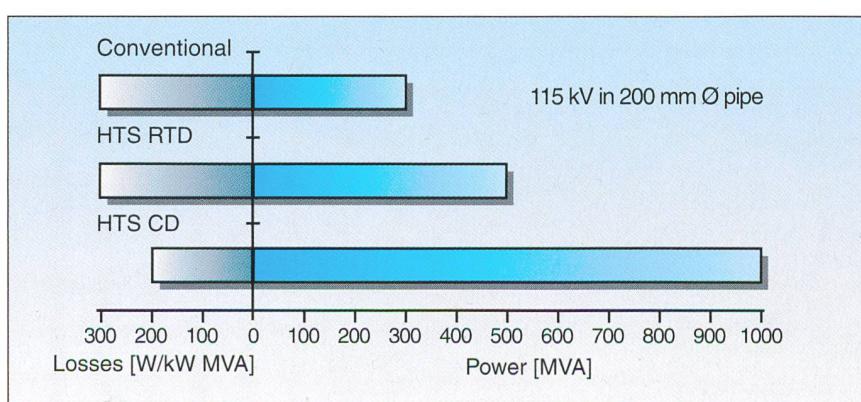


Figure 5 Pertes et capacité de transport d'un câble de 115 kV placé dans une conduite existante de 200 mm Comparaison pour câbles conventionnels et supraconducteurs avec diélectriques à température ambiante (RTD) et froide (CD)

décidé de fabriquer conjointement avec Pirelli pour 4,5 Mio. \$ un câble supraconducteur (CD) de 30 à 50 m de longueur dans un projet Epri. Ce câble sera testé ensuite dans une centrale à Paris sous conditions de haute tension. Les rubans supraconducteurs à base de Bi(2223) utilisés seront produits par American Superconductor.

Un autre projet de câble supraconducteur est celui de l'entreprise américaine Southwire qui jusqu'en 1999, construira un câble triphasé 12,4 kV/1,25 kA de 33 m de longueur.

Au Japon, plusieurs projets de câbles supraconducteurs sont en train d'être réalisés. La compagnie d'électricité de Tokyo, Tepco, poursuit des projets avec les entreprises Furukawa Electric et Sumitomo (SEI), deux producteurs de rubans de Bi(2223). Le but principal est l'installation de câbles de 66 kV/1 GW dans la région urbaine de Tokyo. SEI et Tepco ont déjà testé un câble monophasé de 50 m de longueur, mais encore sans isolation à haute tension, à 3 kA en courant alternatif et à 2 kA en courant continu. Furukawa et Tepco ont testé avec succès un câble de 5 m avec isolation à haute tension pendant 15 minutes à 66 kV/2 kA. Un modèle de câble pour 250 MW est à l'étude. Le récent progrès dans les densités de courant critique de rubans de Bi(2223) obtenu par Furukawa, avec $j_c(77 \text{ K}, 0 \text{ T}) = 40\,000 \text{ A/cm}^2$ et $j_e(77 \text{ K}, 0 \text{ T}) = 10\,000 \text{ A/cm}^2$ en grandes longueurs est très prometteur en vue des prochains projets de câbles supraconducteurs.

En Europe, Siemens a testé un câble de 10,5 m de longueur jusqu'à des courants alternatifs de 5340 A. Ce câble contient au total 2 km de rubans de Bi(2223), disposés en 4 couches isolées indépendamment. Le comportement lors du refroidissement par un circuit fermé de l'azote liquide (LN_2) sous une pression de 2 bar a été testé. L'augmentation du point d'ébullition du LN_2 à 83,5 K a permis l'introduction de l'azote liquide à une température initiale de 77 K sans la formation d'azote gazeux. Après un prérefroidissement pendant 3400 s, le refroidissement par le circuit réfrigérant a permis d'atteindre la température de 77 K en 2600 s, ce qui correspond à un temps de refroidissement spécifique de 4 mn par mètre de câble. Un comportement stable a été testé en régime continu jusqu'à 3 kA.

A 2 kA_{rms} et 55 Hz, des pertes de 0,9 W/m ont été mesurées, ce qui constitue la valeur la plus basse publiée jusqu'à présent pour des câbles supraconducteurs de démonstration. La fabrication d'un

entrepris par le CRPP de l'EPFL, où un prototype de 5 m de longueur est prévu pour 1999 à une température d'opération de 40 à 50 K. Contrairement aux autres câbles, la température est inférieure à 77 K, la température de l'azote liquide, permettant ainsi d'utiliser des conducteurs de Bi(2212). Le prix de ces conducteurs est inférieur à celui du Bi(2223), ce qui est certainement compensé par les coûts d'opération plus élevés, mais l'avantage consiste à pouvoir utiliser des fils de Bi(2212) et non des rubans. Ceci entraîne certainement des coûts supérieurs lors de l'opération, mais la géométrie de fils ronds ouvre d'autres possibilités de câblage qu'avec des rubans: de ce fait, ce projet prototype présente un intérêt particulier. Il faut remarquer toutefois qu'il a été possible récemment de produire des fils ronds de Bi(2223).

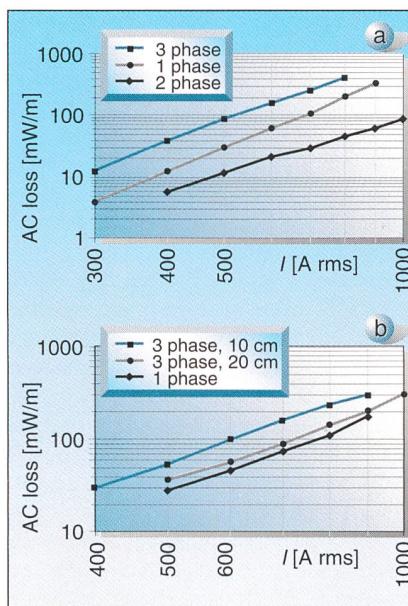


Figure 6 Pertes AC d'un câble prototype en Bi(2223) composé de 2 couches mutuellement isolées

Mode d'opération: 1 phase et 3 phases, distance entre les phases: 100 et 200 mm

câble monophasé de 50 à 100 m de longueur remplissant les spécifications pour un câble triphasé de 110 V/400 MW est en cours de route.

Au Danemark, un projet de câble supraconducteur, le Danish Cable, est actuellement à l'étude chez NST, une entreprise dépendante de NKT, qui est aussi le producteur des rubans de Bi(2223). Le projet actuel comprend un module de 10 m de longueur, avec $I_{op} > 2 \text{ kA}$. Avant l'année 2000, il est prévu de fabriquer et de tester un prototype «triphasé» à 10 à 60 kV. Dans ce module, les 3 phases se trouvent assez distantes l'une de l'autre, pour éviter une interaction électromagnétique. Le mode d'opération choisi est le RTD.

En Suisse, un projet de câble est aussi en cours de réalisation. Il s'agit du projet

Pertes en régime alternatif

Il est prévisible que la densité de courant critique de rubans de Bi(2223) sera encore considérablement augmenté pendant les prochaines années. D'après les valeurs mesurées sur des filaments isolés, mais aussi d'après une récente extrapolation basée sur la résistivité électrique des filaments de Bi(2223) (opérée à l'Université de Genève), des valeurs de $j_c(77 \text{ K}, 0 \text{ T}) > 80\,000 \text{ A/cm}^2$, correspondant à des valeurs de $j_e > 20\,000 \text{ A/cm}^2$, devraient être atteintes sur des rubans de longueurs industrielles par les techniques connues à présent.

Indépendamment de ces améliorations attendues, il n'est pas exclu que de nouvelles modifications de la microstructure et des défauts dans les plaquettes de Bi(2223) mènent à une augmentation de la force d'ancrage intragranulaire dans celles-ci et donc à une augmentation supplémentaire de la densité du courant

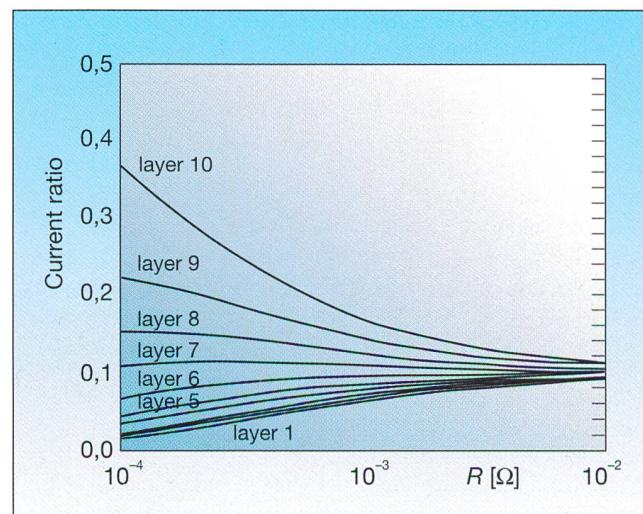


Figure 7 Résultat de la distribution du courant dans le câble à 10 couches de Bi(2223) de Furukawa, montrant l'influence de la résistance connectée à chaque couche

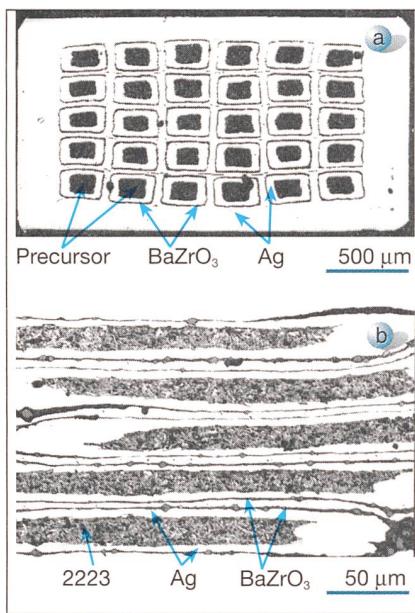


Figure 8 Section d'un ruban de Bi(2223) avec 30 filaments, isolés par une barrière de BaZrO₃ de 2 µm d'épaisseur et une gaine en Ag
a: lors d'une étape intermédiaire de la déformation
b: après la réaction finale

critique. Ce type de recherche est poursuivi dans un grand nombre de laboratoires, des progrès ayant directement un impact positif sur le coût de ces conducteurs et donc des câbles.

La réduction des pertes en régime alternatif est aujourd'hui un facteur d'une importance capitale pour tous les projets de câbles supraconducteurs. Ces pertes influencent le besoin en fluide cryogénique, et donc les frais d'opération. De plus, une consommation d'azote liquide accrue cause une réduction de la distance entre les stations de refroidissement le long du câble, ce qui mène aussi à une augmentation des coûts d'opération. Il est donc prévisible qu'un grand effort devra encore être fourni afin d'atteindre le but d'une minimalisation des pertes a.c. dans tout type de câble supraconducteur.

Du point de vue des pertes, la configuration de câble CD est plus favorable que celle RTD à cause de l'écrantage des champs a.c. des différentes phases à la suite des conduites en retour supraconductrices. En effet, les champs a.c. provenant des conduites conventionnelles voisines (voir fig. 6) causent des pertes supplémentaires. Ceci a été vérifié en simulant la configuration d'un câble à 3 dimensions du type RTD: parallèlement à la conduite supraconductrice, deux conduites en Cu ont été branchées, ce qui a causé une augmentation des pertes. En augmentant la distance entre les phases jusqu'à 200 mm, ces pertes ont pu être

considérablement réduites (voir fig. 6). Malheureusement, ceci augmente le diamètre total du câble à des valeurs considérablement au dessus de 200 mm, tandis que le diamètre des conduites existantes aux E.-U. prévues pour le Retrofit de câbles n'atteint que 200 mm.

Il est évident que pour obtenir un minimum de pertes dans chacune des trois phases, les courants doivent être distribués de manière homogène sur les différentes couches du câble. Ceci a été démontré pour le câble de Siemens avec quatre couches mentionné plus haut: chacune des quatre couches portait un courant de 25%, ce qui a donné des pertes de 0,8 W/m, les plus basses connues à présent dans un câble.

Dans un câble à plusieurs couches, la plus grande partie du courant a.c. est transportée par les couches extérieures. Ceci a été vérifié expérimentalement pour le câble à 10 couches de Furukawa. Une méthode pour rendre les courants plus uniformes consiste à connecter une grande résistance à chaque couche. La distribution du courant dans chacune des 10 couches du câble de Furukawa est représentée dans la figure 7.

Jusqu'à présent, nous avons uniquement tenu compte des pertes a.c. dues à la configuration du câble. Une autre source de pertes sont les pertes de couplage des rubans multifilamentaires de Bi(2223). La composante dominante est constituée par les pertes hystériétiques. Dans les rubans multifilamentaires de Bi(2223) industriels, le couplage électromagnétique n'a pas encore pu être réduit sensiblement, ni par torsadage, ni par addition de Mg ou Mn à la gaine d'Ag: dû à des «ponts» entre les filaments, tout l'assemblage multifilamentaire se comporte comme un seul filament.

Une nouvelle méthode pour réduire les pertes dues au couplage entre filaments a été proposée à l'Université de Genève. Il s'agit d'un nouveau concept, appelé «barrière d'oxyde». Vu que ni le torsadage ni

l'addition de Mg ou Mn a mené à des réductions des pertes de couplage entre filaments, il s'agissait de trouver une méthode pour augmenter la résistivité radiale entre les filaments voisins. Une augmentation d'un facteur 12 a été obtenue en introduisant une barrière de BaZrO₃ autour de chaque filament (voir fig. 8).

La technique de déformation de cette configuration complexe n'est pas encore optimisée. Néanmoins, une augmentation de la fréquence du maximum des pertes a été observée, de 5 Hz pour un ruban sans barrière à 82 Hz pour un ruban avec barrière (voir fig. 9).

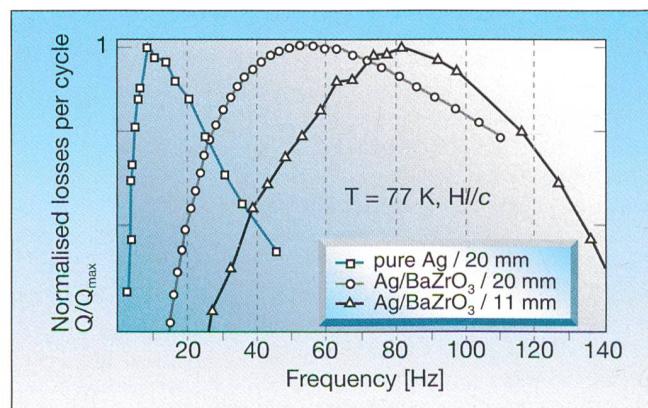
Il résulte que jusqu'à présent, l'effet positif de la barrière est surtout observé à basses fréquences. Puisque la fréquence opérationnelle est de 50 Hz, il est toutefois indispensable de déplacer la fréquence du maximum des pertes à des valeurs sensiblement plus hautes. A base des expériences faites jusqu'à présent, il semble tout à fait possible que le pic en figure 9 puisse être déplacé jusqu'à des fréquences sensiblement au delà de 100 Hz, peut-être même de 200 Hz. Pour ceci, la technique de déformation doit encore être améliorée, afin d'obtenir des barrières de meilleure qualité.

Conclusions

Une revue des activités au niveau mondial sur les câbles supraconducteurs montre qu'un nombre croissant de projets est entrepris afin d'évaluer les avantages et les désavantages de la supraconductivité par rapport aux câbles traditionnels en Cu. Il apparaît que le principal obstacle actuel est le coût, calculé sur une longueur de vie de plusieurs dizaines d'années. Du côté technique, aucun problème fondamentalement nouveau n'est apparu lors des tests entrepris jusqu'à présent. Il est toutefois impératif de disposer d'expériences sur des prototypes en opération pendant plusieurs années avant

Figure 9 Variation des pertes AC par cycle pour deux rubans de Bi(2223) torsadés

gauche: avec une gaine en Ag et un pas de 20 mm (maximum à 5 Hz)
milieu: avec une gaine en Ag et une barrière en BaZrO₃ (maximum à 60 Hz)
droite: similaire à la courbe au milieu mais avec un pas de 11 mm (maximum à 82 Hz)



de remplacer un certain nombre de câbles par des câbles supraconducteurs.

De ce fait, l'introduction de câbles supraconducteurs apparaît prometteuse, mais il faudra attendre encore plusieurs années de test et de développement. Les majeurs problèmes techniques à résoudre sont dictés par l'exigence de la réduction des coûts:

- L'augmentation de la densité de courant critique des rubans de Bi(2223). Ceci influence fortement le coût total des rubans, et donc du câble.
- La réduction des pertes, par des configurations de câbles appropriées et par augmentation de la résistivité radiale

dans les rubans (barrière d'oxyde). La réduction des pertes limite la quantité du fluide cryogénique (l'azote liquide), et donc aussi le nombre de stations de refroidissement: ceci entraîne une réduction considérable des coûts d'opération.

Il est certain que l'introduction de câbles supraconducteurs se fera en premier dans les cas où une extension du transport d'énergie par la technique conventionnelle n'est plus possible, comme par exemple dans le réseau souterrain de grandes villes comme Tokyo. De plus, l'emploi de câbles supraconducteurs pourrait être d'abord envisagé dans

certains pays en voie de développement, où de nouveaux réseaux de transport d'énergie sont à construire.

Remerciements

L'auteur voudrait remercier le Dr T. Fukui de Sumitomo pour la mise à disposition de la photographie du câble prototype 66 kV.

Bibliographie

[1] P. M. Grant: Superconductivity and Electric Power: Promises, Promises... Past, Present and Future. IEEE Trans. Superconductivity 7(1997).

[2] Hott: Hotline zur angewandten Supraleitung. Forschungszentrum Karlsruhe, 2/97.

[3] S. Iwata, S. Mukoyama: Development of a 66kV 1000 MVA High-T_c Superconducting Power Cable. IEA Workshop, Milan (I), 14.4.1997.

[4] A. Bolza, M. Rahman, M. Nassi: HTSC Power Cable: Progress and Opportunities. IEA Workshop, Milan (I), 14.4.1997.

[5] H.-W. Neumüller, W. Nick, K. Schilling, R. Schroth: Status of HTS Cable Development at Siemens. IEA Workshop, Milan (I), 14.4.1997.

[6] P. Bodin, O. Tonnesen, J. Østergaard: The Danish Superconducting Cable Project. IEA Workshop, Milan (I), 14.4.1997.

[7] M. Pays: The Possible Respective Place of the Different Technologies for Bulk Power Transmission. IEA Workshop, Milan (I), 14.4.1997.

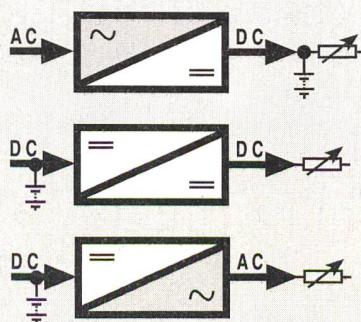
[8] Y.B. Huang, R. Flükiger: Reducing a.c. Losses of Bi(2223) Multifilamentary Tapes by Oxide Barriers. Physica C, 294(1998), pp. 71-82.

Hochtemperatur-Supraleiter in der Entwicklung

Die Anzahl von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für Hochtemperatur-Supraleiter steigt weltweit. Dieser Beitrag diskutiert technische und ökonomische Aspekte der Herstellung supraleitender Bi(2223)-Bänder im Hinblick auf ihren Einsatz in der Energietechnik. Im einzelnen werden Projekte aus Japan, den USA, Europa und der Schweiz vorgestellt. Bisher stehen dem grossindustriellen Einsatz dieser Kabel noch eine zu kleine kritische Stromdichte und zu grosse Leistungsverluste im Kabel entgegen. Bis zum Ende des nächsten Jahrzehnts könnten supraleitende Kabel aber zu einer ernsthaften Konkurrenz für klassische Kupferkabel werden.

Ihr Partner für Batterieladetechnik und gesicherte Stromversorgung

technisch innovativ
breites Sortiment
angepasste Lösungen



BENNING
Power Electronics GmbH

Industriestrasse 6, CH-8305 Dietlikon
Tel. 01 805 75 75, Fax 01 805 75 80
e-mail: benning@point.ch