



HAL
open science

Les supraconducteurs en courant alternatif

A. Lacaze, Y. Laumond

► **To cite this version:**

A. Lacaze, Y. Laumond. Les supraconducteurs en courant alternatif. Journal de Physique III, 1991, 1 (2), pp.261-270. 10.1051/jp3:1991121 . jpa-00248578

HAL Id: jpa-00248578

<https://hal.science/jpa-00248578>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
 Physics Abstracts
 74.60J — 74.70

Les supraconducteurs en courant alternatif

A. Lacaze et Y. Laumond

GEC ALSTHOM, Département d'Electrotechnique Avancée, 3 avenue des Trois Chênes, 90018 Belfort, France

(Reçu le 6 mars 1990, accepté le 28 juin 1990)

Résumé. — Les premiers brins supraconducteurs utilisables en courants alternatifs sont apparus en 1983. Depuis, des progrès importants ont été réalisés sur le plan de la compréhension des phénomènes électromagnétiques commandant les pertes et la stabilité dans des brins ⁽¹⁾ multifilamentaires à filaments ultrafins. L'amélioration des performances et des procédés de fabrication nous permet aujourd'hui de présenter des brins, fabriqués à l'échelle industrielle, comprenant jusqu'à près d'un million de filaments de 140 nm de diamètre, avec des niveaux de pertes et de stabilité inégalés à ce jour.

Abstract. — Since 1983, when the very first AC wire became available, the comprehension of electromagnetic phenomenas ruling over stability and losses of multifilamentary superconductors in AC use, has much improved. Improvements of manufacturing process has opened up the possibility of industrial scale manufacturing of up to one million, 140 nm in diameter, filaments. The AC loss performances and stability remains at the best level up to date.

Introduction.

Au fur et à mesure du développement des applications des supraconducteurs, le besoin en conducteurs pouvant supporter des régimes variables de plus en plus soutenus est apparu. Or, si les supraconducteurs permettent de s'affranchir des pertes en régime continu, il n'en est pas de même en régime variable ou en alternatif.

Les pertes thermiques dans les supraconducteurs en régime variable ont deux origines : l'hystérésis du cycle d'aimantation, et les courants induits dans les métaux normaux de la matrice.

En négligeant le régime de pénétration incomplète la puissance de pertes par unité de volume peut s'écrire comme la somme de deux contributions P_h et P_i :

$$P_h = \alpha \frac{\sqrt{\pi}}{8} d_f J_c(B) \left[1 + \left[\frac{J(t)}{J_c(B)} \right]^2 \right] \left| \frac{dB}{dt} \right|$$

$$P_i = \frac{\beta}{2 \rho_{tr}} \left[\frac{p}{2 \pi} \right]^2 \left| \frac{dB}{dt} \right|^2$$

⁽¹⁾ Le terme « brin » désigne un fil monolithique, constitué par les filaments supraconducteurs noyés dans une matrice métallique non supraconductrice. Un conducteur peut être constitué de un ou plusieurs brins assemblés.

avec :

- P_h pertes hystérétiques (W/m^3)
- P_i pertes par courants induits (W/m^3)
- d_f diamètre des filaments (m)
- $J(t)$ densité de courant apparente instantanée (A/m^2)
- $J_c(B)$: densité apparente de courant critique (A/m^2)
- B induction magnétique (T)
- ρ_{tr} résistivité transverse (Ωm)
- p pas de torsade (m)
- α coefficient sans dimension, proche de 1 en théorie
- β coefficient dépendant de la géométrie du brin.

Les formules précédentes, dérivées d'une analyse complète des pertes dans les bobinages supraconducteurs [1], permettent de calculer rapidement les pertes d'un bobinage soumis à des variations de courant et de champs transverse à l'axe du brin. Elles doivent être intégrées sur le volume du bobinage et moyennées dans le temps.

Pour une bobine fonctionnant en courant continu les valeurs de dB/dt sont souvent nettement inférieures à 0,1 tesla par seconde. Par contre dans les applications aux fréquences industrielles, les variations de champs se comptent en centaines de teslas par seconde.

Toutes choses égales par ailleurs, les pertes hystérétiques seraient typiquement dix mille fois plus grandes, les pertes par courants induits étant augmentées de huit ordres de grandeurs. Dans ces conditions l'état supraconducteur ne peut être maintenu.

Les pertes hystérétiques sont proportionnelles au diamètre des filaments. Les conducteurs soumis à des variations de champs magnétiques devront donc posséder des filaments de petit diamètre, quelques 0,1 μm contre quelques 10 à 100 μm en courant continu.

Les pertes par courants induits sont proportionnelles au carré du pas de torsade et inversement proportionnelles à la résistivité de la matrice. L'utilisation pour la matrice de métaux fortement résistifs tels que le cupronickel, au lieu de cuivre de haute pureté permet un gain d'un facteur 1 000 ou plus sur les pertes.

Pour réduire encore les pertes par courants induits il faut diminuer le pas de torsadage. Le pas de torsadage est limité par valeur inférieure, à environ cinq fois le diamètre du brin. Au-delà, le courant critique diminue et le taux de casses en fabrication devient rédhibitoire.

Mais, pour que les applications aux fréquences industrielles se développent il ne suffit pas d'assurer la permanence de l'état supraconducteur, encore faut-il que l'utilisation des supraconducteurs soit intéressante sur le plan du rendement.

Pour cela il faut que les pertes multipliées par le coefficient de performance du réfrigérateur, COP (soit 500 à 1 000 W/W à la température de l'hélium liquide 4,2 K et 7 à 10 W/W à la température de l'azote liquide 77 K) soient inférieures aux pertes par effet Joule de la machine équivalente à enroulements cuivre.

Ce résultat a été obtenu pour la première fois en France en 1983 avec le brin CCN 14000 LL [2]. Depuis 1986 les japonais disposent aussi d'un brin fonctionnant aux fréquences industrielles [3].

Dans cet article, nous faisons le point sur la poursuite du développement de brins et de conducteurs pour applications aux fréquences industrielles. Ces développements sont effectués par GEC ALSTHOM avec la collaboration des Laboratoires de Marcoussis et d'Electricité de France, la fabrication étant assurée par ALSTHOM INTERMAGNETICS SA.

1. Courant et densité de courant critique.

Au fur et à mesure que le diamètre de filament diminue la densité de courant critique augmente et passe par un maximum pour des filaments de 100 nm environ comme le montre la figure 1. On notera les valeurs très élevées, dépassant les 10^{10} A/m².

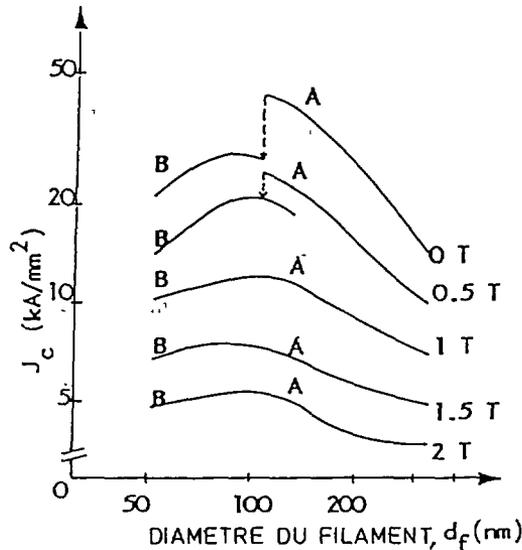


Fig. 1. — Densité de courant critique, ramenée à la section supraconductrice, en fonction du diamètre de filament. Mesures effectuées [4] sur deux brins, référence AC87/3A et AC87/3B, en échantillons courts non torsadés. Le saut entre les courbes s'explique par l'importance du champ propre aux inductions faibles.

[Critical current density, over superconducting section, *versus* filament diameter. Short sample measurements carried on of two untwisted strands, reference AC87/3A and AC87/3B [4]. The gap between the two curves shows the self field effect.]

Si on réduit encore le diamètre des filaments la densité de courant critique diminue. Cette diminution est corrélée avec la diminution du champ critique et de la température critique, dont on reparlera plus loin pour les problèmes de stabilité.

Les caractéristiques courant-tension des brins à filaments ultrafins montrent une apparition progressive de la résistance. Pour les brins classiques, il est d'usage de décrire cette caractéristique par une loi de la forme $V = kI^n$, où n vaut typiquement de 30 à 50. Pour les brins alternatifs les valeurs trouvées sont de l'ordre de 10.

Le courant critique dépend donc fortement du critère de mesure. Entre le courant critique mesuré à 0,1 μ V/cm et celui mesuré à 1 μ V/cm, un écart de 25 % est couramment observé, voir figure 2.

Des valeurs de l'exposant n aussi faibles, sont généralement signe d'irrégularité et de déformation des filaments résultant de la transformation. Toutefois pour nos brins à filaments ultrafins, il n'a pu être établi aucune corrélation entre l'état des filaments et la valeur de n . De plus les performances des brins, que ce soit en terme de densité de courant ou en terme de pertes, ne sont en rien affectées.

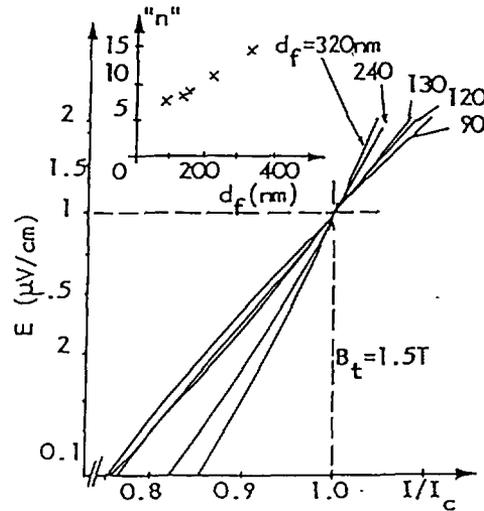


Fig. 2. — Variation du courant critique avec le critère de mesure, pour différents diamètres de filaments, dans un champ transverse continu $B_t = 1,5\text{ T}$ [4].

[Critical current at $B_t = 1.5\text{ T}$ versus criterion, as a function of filament diameter [4].]

2. Pertes en régime variable.

La proportionnalité des pertes hystérétiques avec le diamètre de filaments prévue par le modèle de Bean, n'est vérifiée que tant que les filaments sont isolés par une barrière résistive. Or, dans le cupronickel, la profondeur de pénétration est de l'ordre de 15 nm. On doit s'attendre à une augmentation notable des pertes hystérétiques dès que la distance entre filaments est comparable à la longueur de cohérence.

De plus, pour des filaments ultrafins soumis à de faibles inductions, les pertes hystérétiques sont réduites par les effets de mouvements réversibles des lignes de flux.

Le phénomène de mouvement réversible des lignes de flux est lié à l'interaction des vortex avec les sites d'ancrage. Classiquement, pour obtenir une densité de courant critique élevée, on favorise l'ancrage par les défauts métallurgiques. Dans ce cas les mouvements des vortex sont brutaux et font l'objet de mouvements vibratoires amortis donc dissipatifs.

Dans le cas des filaments ultrafins, l'ancrage de surface par la frontière supraconducteur/métal normal prend de l'importance. Or l'échange d'énergie potentielle au passage de l'interface est quasi réversible. L'énergie fournie lors de la pénétration est récupérée lors de la dépénétration.

La figure 3 montre que lorsque le diamètre des filaments est de l'ordre de grandeur de la longueur de cohérence, 200 à 400 nm, les pertes hystérétiques diminuent plus vite que le diamètre des filaments. En dessous de 150 nm, la tendance s'inverse car les effets de proximité commencent à se manifester. C'est alors l'espacement entre les filaments qui n'est plus suffisant.

A partir des résultats précédents on a déduit un diamètre optimal des filaments, 140 nm, et un espacement optimal, 125 nm.

3. Stabilité électromagnétique.

Les niveaux d'induction magnétiques dans les applications en courant alternatif sont faibles et les densités de courant critique sont élevées. Les effets du champ propre sont importants, et la

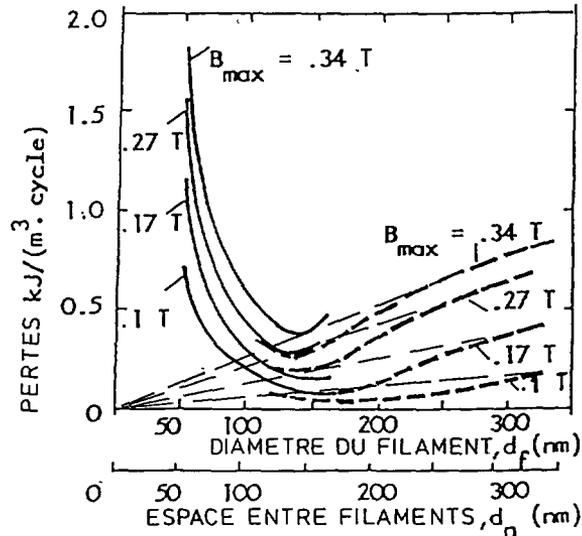


Fig. 3. — Pertes, mesurées par aimantation, pour les mêmes brins qu'à la figure 1, en fonction du diamètre et de l'espacement des filaments [4].

[Low frequency magnetization losses of strands AC87/3A and AC87/3B, as a function of filament diameter and spacing [4].]

distribution de courant dans le brin est très inhomogène. Les filaments des couches externes sont saturés alors que ceux des couches intérieures ne portent encore qu'une fraction faible du courant total.

Sur le plan des pertes et de la stabilité, les couches de filaments saturés se comportent comme un filament unique de diamètre égal à l'épaisseur totale de la couche. Dans le critère de stabilité on verra donc apparaître le produit $N_s d_f$ du nombre de couches saturées par le diamètre des filaments, à la place du seul diamètre d_f .

Le cupronickel présente une diffusivité magnétique plus grande que la diffusivité thermique, le critère de stabilité s'écrira donc, par référence au critère de stabilité adiabatique :

$$N_s < N_{sm} \quad \text{avec} \quad N_{sm} d_f = \left[\frac{12 C}{\pi \mu_0 J_c (dJ_c/dT)} \right]^{1/2}$$

avec :

- C Chaleur spécifique volumique du supraconducteur ($J/m^3/K$)
- N_{sm} . nombre maximum de couches saturées.

La stabilité est améliorée d'une part par l'augmentation de l'induction magnétique (J_c diminue), d'autre part par l'augmentation de la température (J_c diminue, C augmente).

Un brin sera parfaitement stable si N_{sm} est supérieur au nombre réel de couches de filaments. Si N_{sm} est plus petit que le nombre réel de couches, pour savoir si un brin est stable il faut déterminer la répartition de courant au niveau des filaments qui dépend de la relation champ/courant.

Un paramètre essentiel dans l'étude de la stabilité est la variation de la densité de courant avec la température (dJ_c/dT). A partir de mesures de courants critiques à des températures comprises entre 4,2 et 5,4 K, on déduit une pseudo-température critique telle que

$dJ_c/dT = J_c/(T_c - T)$. La courbe de pseudo-température critique, reportée à la figure 4, est nettement en dessous de la courbe similaire obtenue pour un brin à filaments de $5 \mu\text{m}$. Autrement dit, plus les filaments sont fins, plus le courant critique diminue vite quand la température augmente.

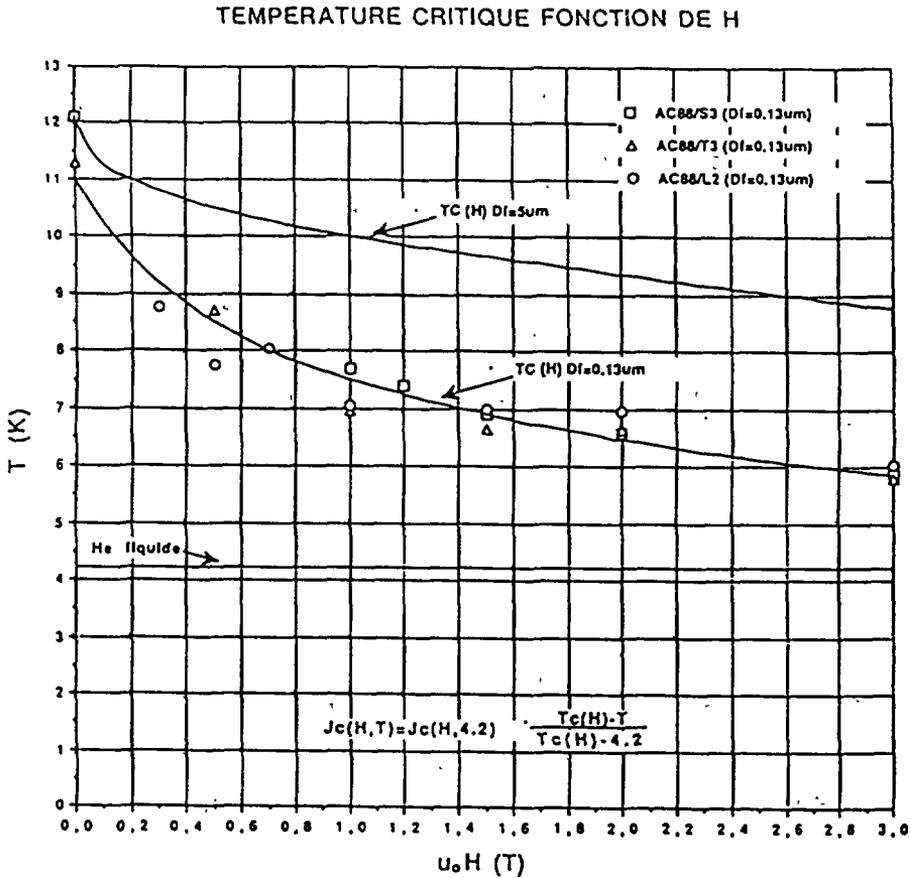


Fig. 4. — Courbes de pseudo-température critique pour des filaments de $5 \mu\text{m}$ et de $0,13 \mu\text{m}$ [7].

[Extrapolated critical temperature, relevant for filament diameter of $0.13 \mu\text{m}$ [7].]

De l'étude de la stabilité il découle que, selon la température et l'induction d'utilisation, le nombre de couches de filaments présent dans le brin doit être adapté. On a vu précédemment que le diamètre et l'espacement des filaments sont fixés. Ces paramètres suffisent à définir complètement la section supraconductrice d'un brin. Le diamètre final du brin est fixé dès que le diamètre du noyau et l'épaisseur de la couronne sont fixés.

4. Fabrication de brins à l'échelle industrielle.

Comme nous l'avons vu, un brin doit être adapté à son application, surtout du point de vue de la stabilité. Pour la campagne de fabrication de brins à l'échelle industrielle, trois types ont été prédéfinis, « L », « T » et « S », optimisés pour trois niveaux d'induction magnétique d'utilisation.

Les niveaux d'induction d'utilisation prévus sont :

- « L » : champ propre du conducteur
- « T » : environ 0,5 tesla
- « S » : environ 1 tesla.

Les applications du brin « L », en champ propre du conducteur, sont typiquement celles où on utilise l'effet de limitation du courant. Pour ces applications la résistance à l'état normal du brin doit être la plus élevée possible. Le noyau central des brins « L » ne comporte donc pas de cuivre, contrairement aux deux autres qui en comportent.

Les trois types de brins ont en commun le diamètre et l'espacement des filaments, respectivement 140 nm et 125 nm. Par contre le nombre de filaments et le diamètre final sont différents. Ceci nous autorise à avoir une partie de la fabrication commune aux trois types de brins.

La fabrication comporte trois étages (0, 1 et 2). Les étapes de fabrication communes sont :

— constitution de la billette d'étage 0 comportant un lopin de niobium-titane dans une couronne de cupronickel. Dès cette étape le diamètre et l'espacement des filaments sont fixés. La billette est filée à chaud puis tréfilée et mise à l'hexagone ;

— constitution de la billette d'étage 1 comportant 913 hexagones obtenus précédemment. Comme précédemment la billette est filée à chaud puis tréfilée et mise à l'hexagone ;

A partir de la constitution de la billette d'étage 2 (final), la fabrication est spécialisée :

- « L » : la billette d'étage 2 comporte 414 hexagones obtenus précédemment et 7 hexagones de cupronickel au centre ;
- « T » : la billette d'étage 2 comporte 654 hexagones obtenus précédemment et 19 hexagones de cuivre gainé cupronickel au centre ;
- « S » : la billette d'étage 2 comporte 1 008 hexagones obtenus précédemment et 19 hexagones de cuivre gainé cupronickel au centre.

Après constitution les billettes sont filées à chaud puis tréfilées jusqu'au diamètre final. Les caractéristiques des trois types de brins sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I. — Définition des brins industriels pour courant alternatif.

Type de brin	« L »	« T »	« S »
Nombre de filaments	377 982	597 102	920 304
Diamètre du brin non isolé	0,2 mm	0,25 mm	0,3 mm
Diamètre des filaments	140 nm	140 nm	140 nm
Espacement des filaments	125 nm	125 nm	125 nm
Fractions volumiques :			
— cuivre	0	2,3 %	1,3 %
— cupronickel	81,3 %	79,1 %	79,6 %
— supraconducteur	18,7 %	18,6 %	19,1 %
Niveau de champ d'utilisation	champ propre	vers 0,5 T	vers 1 T

Un bilan de fabrication, portant sur dix billettes des trois types, montre que la transformation se fait avec un bon rendement, comparable à celui des brins classiques.

Plusieurs dizaines de kilomètres de brin fini (torsadé, calibré, isolé) ont été fabriqués.

5. Caractérisation des brins industriels.

La caractérisation comporte des mesures de courant critique continu en échantillon court et des mesures de stabilité [5] et de pertes en courant alternatif. Les pertes sont mesurées par calorimétrie [4]. Les mesures en courant alternatif sont faites sur des bobines, soit une par point de mesure de stabilité ou par courbe de pertes. Plusieurs bobines sont donc nécessaires pour faire varier la relation champ/courant.

Les résultats de courant critiques alternatifs 50 Hz et continus des trois brins sont donnés à la figure 5. Le tableau II résume les résultats de stabilité en monobrin. Le courant de stabilité est celui pour lequel le courant de transition alternatif est égal au courant critique (critère $0,1 \mu\text{V}/\text{cm}$). Le champ de stabilité est le champ correspondant. Toutes les valeurs sont en valeurs crêtes.

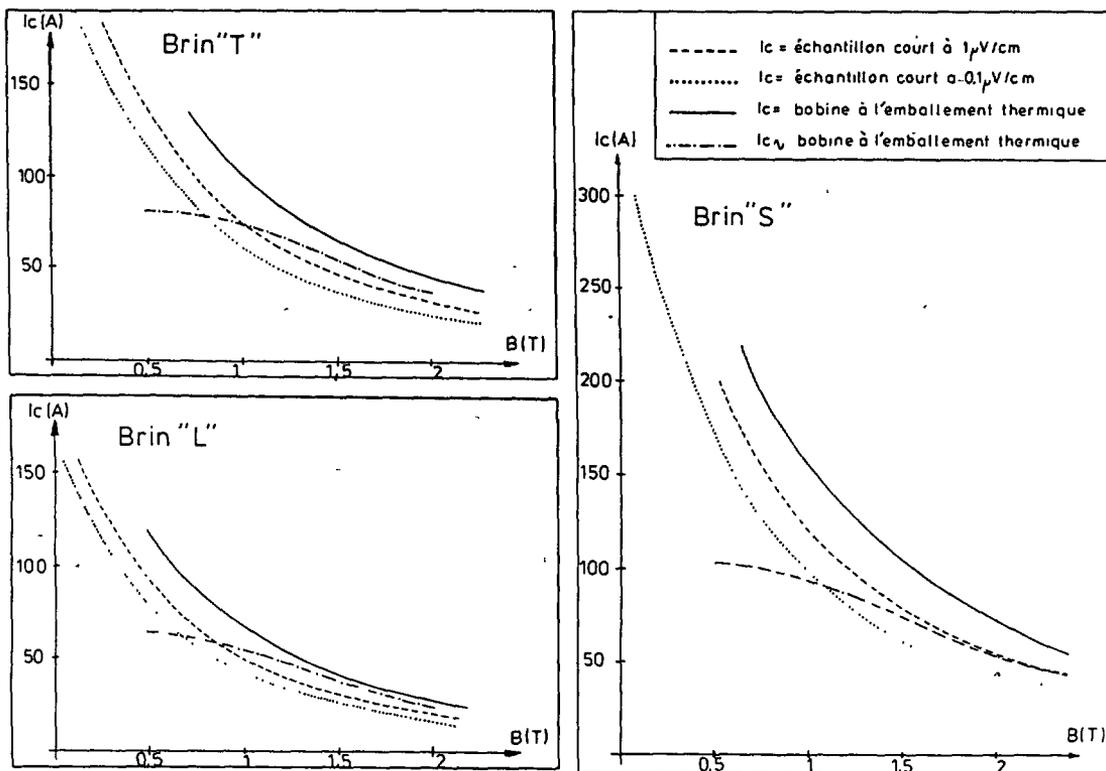


Fig. 5. — Courbes de courant critiques des brins industriels en courant continu avec des critères de $0,1$ et $1 \mu\text{V}/\text{cm}$, et courant de blocages obtenus en bobines en courant continu et alternatif.

[DC critical current of industrial AC superconductors, with criterion 0.1 and $1 \mu\text{V}/\text{cm}$, and AC and DC quench current.]

Tableau II. — *Champs et courant de stabilité des brins industriels.*

Type de brin et référence	« L » : L2	« T » : T3	« S » : S3
Niveau de champ d'utilisation	champ propre	vers 0,5 T	vers 1 T
Courant de stabilité à 4,2 K	64 A	80 A	96 A
Champ de stabilité à 4,2 K	0,65 T	0,78 T	1,05 T

En ce qui concerne les pertes, les résultats obtenus en monobrins industriels sont en accord avec ceux des brins modèles de 1987. Le tableau III donne des valeurs de pertes mesurées.

Tableau III. — *Pertes à 50 Hz : I_c = courant critique continu (critère 0,1 μ V/cm), I/I_c = courant crête 50 Hz/ I_c .*

Type du brin	Nombre de filaments	Diamètre brin mm	à 0,5 tesla				à 1 tesla			
			I_c A	I/I_c	Pertes kW/m ³	Pertes mW	I_c A	I/I_c	Pertes kW/m ³	Pertes mW
« L »	377 982	0,20	79							
				0,21	4,9	4,1	43	0,37	12,1	29,8
« T »	577 102	0,25	117							
				0,22	10,9	8,9	61	0,22	15,3	36,4
« S »	920 304	0,30	178	0,06	2,0	10,5	99			
				0,11	3,9	8,4		0,38	23,6	50,7
				0,21	10,5	8,1		0,76	106,4	81,9

Les pertes à 50 Hz sont mesurées sur des bobines d'un diamètre sous fil de 6,2 mm et une hauteur de bobinage de 32 mm.

6. Fabrication de conducteurs.

La capacité de transport de courant d'un brin unitaire se situe entre 30 et 50 A efficaces au régime nominal dans les conditions réelles du conducteur en bobinage. Les courants mis en jeu dans les applications électrotechniques se comptent en kiloampères. Pour parvenir à de tels niveaux des assemblages de plusieurs dizaines de brins sont nécessaires.

Pour les applications en courant alternatif chaque brin d'un câble doit être isolé pour éviter les courants induits entre brins, qui non seulement augmenteraient les pertes mais encore surchargeraient les filaments, diminuant la capacité de transport de courant. Nous avons

lancé un ambitieux programme de développement des isolants et des assemblages pour répondre à ce problème.

Au stade actuel, des longueurs kilométriques de torons de 6 brins supraconducteurs isolés autour d'un brin central en cupronickel ont été fabriquées. La capacité de transport est dans ce cas de l'ordre de 200 à 300 A.

L'étape suivante sera de réaliser des assemblages de torons. D'ores et déjà un câble, un premier conducteur $6 \times (6 + 1) + 1$, a été essayé à 50 Hz. En champ propre il a porté un courant de 1 500 A crête sans transiter, limite de la capacité de l'alimentation. Le courant critique continu est, en champ propre, de 2 200 A.

7. Conclusion.

La première campagne de fabrication de brins supraconducteurs pour courant alternatif à l'échelle industrielle, s'est bien passée. Pour ces brins on retrouve les performances des meilleurs brins de recherche faits précédemment.

Pour les fabrications suivantes peu de changements sont envisagés. Le principe de la fabrication, non différenciée jusqu'à l'étape final, permet d'envisager une adaptation rapide de brins à des applications particulières.

La fabrication de longueurs kilométriques de $6 + 1$ est maîtrisée. La fabrication de conducteurs $6 \times (6 + 1) + 1$ progresse. Un premier conducteur de ce type a porté un courant de 1 000 A efficace.

La fabrication de conducteurs à deux étages, réellement capables de porter des courants au-delà du kiloampère progresse au rythme du programme d'étude d'isolation.

Bibliographie

- [1] FÉVRIER A., Losses in a twisted multifilamentary superconducting composite submitted to any space and time variations of the electromagnetic surrounding, *Cryogenics* **23** (1983) 185-200.
- [2] DUBOTS P., FÉVRIER A., RENARD J. C., TAVERGNIER J. P., GOYER J., HOANG GIA KY, Behaviour of multifilamentary NbTi conductors with very fine filaments under AC magnetic fields, Proc. 8th Int. Conf. Magnet Technology, *J. Phys. Colloq. France* **45** (1984) C1-467.
- [3] TSUKAMOTO O., ISHIGOHKA T., YAMAMOTO M., TANAKA Y., KOBAYASHI H., *IEEE Trans. Mag.* **23** (1987) 1592-1595.
- [4] CAVE J. R., FÉVRIER A., VERHAEGE T., LACAZE A., LAUMOND Y., Reduction of AC losses in ultra-fine multifilamentary NbTi wires, *IEEE Trans. Mag.* **25** (1989) 1945-1948.
- [5] FÉVRIER A., GUÉRAUD A., TAVERGNIER J. P., LACAZE A., LAUMOND Y., Thermo-electromagnetic stability of ultra-fine multifilamentary superconducting wires for 50-60 Hz use, *IEEE Trans. Mag.* **25** (1989) 1496-1499.
- [6] GEORGES J. Y., FÉVRIER A., LACAZE A., LAUMOND Y., BONNET P., Performances of industrial superconducting wires for 50-60 Hz applications, *Proc. 11th Int. Conf. Magnet Technology*, à paraître.
- [7] GUÉRAUD A., TAVERGNIER J. P., FÉVRIER A., LAUMOND Y., LACAZE A., DALLE B., ANSART A., Thermo-electromagnetic stability of ultrafine multifilamentary superconducting cables for industrial frequency use, *Proc. 11th Int. Conf. Magnet Technology*, à paraître.