MATÉRIAUX SUPRACONDUCTEURS

O. BÉTHOUX et J. DOSDAT.

Le but de cette table ronde, destinée à réunir les chercheurs et ingénieurs qui s'intéressent à la fabrication et à l'étude des divers matériaux supraconducteurs, était de faire le point sur la recherche effectuée en France dans ce domaine et d'essayer de tirer quelques conclusions pour l'avenir.

Il a tout d'abord été procédé à un inventaire des laboratoires, tant publics que privés, étudiant à l'heure actuelle des matériaux supraconducteurs et participant au Colloque. Cet inventaire est résumé dans le tableau I.

Les travaux effectués sur la stabilisation des matériaux supraconducteurs par des métaux normaux ont été exposés et discutés au cours de la table ronde « Bobinage et stockage ».

Par ailleurs, les représentants des sociétés Imphy et Sodern, bien que ne travaillant plus actuellement sur les matériaux supraconducteurs, ont pris part à la discussion.

Seules les études suffisamment avancées ont fait l'objet d'exposés rapides, suivis de discussion.

I. Alliages supraconducteurs. — M. Dosdat (C.F.T.H.) expose les résultats des études effectuées sur des alliages Nb-Ti, alliages désormais commercialisés par sa Société sous forme de fils gainés de cuivre.

Les études entreprises sur ces alliages avaient pour but d'obtenir les densités de courant critiques les plus élevées possible pour les fils, tout en leur conservant les meilleures propriétés mécaniques possibles.

Alors que la plupart des études ont porté sur un alliage contenant 40 % de Ti en poids, qui apparaît comme monophasé aux rayons X (cubique centré), certaines études ont été effectuées sur un alliage à 57 % en poids de Ti, qui lui est polyphasé, bien que la nature exacte des phases en présence n'ait pas été déterminée.

M. Dosdat montre l'influence considérable de l'écrouissage et des traitements thermiques à températures relativement faibles (inférieures à 450 °C) sur les caractéristiques densité de courant critique en fonction du champ magnétique appliqué $J_c(H)$. Il montre aussi comment l'alternance du tréfilage et des traitements thermiques (traitements « thermomécaniques ») permet d'obtenir des caractéristiques $J_c(H)$ plus élevées. De même l'addition d'impuretés interstitielles comme l'oxygène augmente la densité de courant critique; il semble que la limite

admissible se situe au voisinage de 2 500 ppm, limite au-delà de laquelle l'alliage devient difficilement transformable à froid.

De nombreuses observations au microscope électronique effectuées sur l'alliage à 40 % de Ti n'ont pas permis de mettre en évidence des « défauts » structuraux (précipités par exemple) autres que les dislocations qui forment un réseau extrêmement complexe.

M. Béthoux (C.N.R.S.-C.R.T.B.T.) expose ensuite les premiers résultats acquis dans l'étude en cours des propriétés supraconductrices d'alliages Nb-Hf de différentes concentrations comprises entre 6 et 66 % atomiques de Hf, domaine de concentration où ces alliages apparaissent comme monophasés (cubique centré) aux rayons X.

Le but poursuivi dans ces études est d'essayer de comprendre comment les différents traitements métallurgiques, en modifiant la structure microscopique des alliages, modifient leur propriétés supraconductrices.

Notons qu'en raison de leurs champs critiques, qui ne dépassent guère 70 kœ, ces alliages ne semblent pas devoir concurrencer les alliages Nb-Ti pour l'obtention de champs magnétiques élevés. En ce qui concerne l'écrouissage et les traitements thermiques, les alliages Nb-Hf se comportent qualitativement d'une manière semblable aux alliages Nb-Ti. Le résultat le plus remarquable obtenu jusqu'ici concerne la variation des caractéristiques $J_c(H)$ en fonction de la concentration pour des alliages écrouis, variation qui s'explique difficilement si l'on admet la seule présence des dislocations comme centres d'ancrage pour les lignes de vortex.

La discussion qui suivit ces deux exposés porta essentiellement sur la possibilité d'existence dans ces alliages, structuralement très semblables, de défauts structuraux autres que les dislocations, dont les dimensions seraient de l'ordre de quelques dizaines d'Å et qui pourraient être responsables du comportement supraconducteur de ces alliages : fluctuations de concentration, transformations structurales de type martensitique, zones de Guinier-Preston. Il semble que des études de diffraction des rayons X aux petits angles seraient souhaitables sur ces alliages.

II. Composés supraconducteurs. — M. Dosdat (C.F.T.H.) rappelle le mode de fabrication des rubans de Nb₃Sn commercialisés par sa Société. Le composé Nb₃Sn se forme par diffusion à la surface d'un

TABLEAU I

LABORATOIRE OU FIRMES	MATÉRIAUX ÉTUDIÉS	PROBLÈMES ÉTUDIÉS	MÉTHODES D'ÉTUDE UTILISÉES
Compagnie Française Thomson - Houston, 78-Chatou	Alliages Nb-Ti	Optimisation du courant critique en fonction des traitements mé- tallurgiques	Mesures de courants cri- tiques à 4,2 °K sur des fils
	Rubans Nb ₃ Sn	Développement in- dustriel de ces matériaux	Micrographies électro- niques
Société Ugine-Kuhl- mann, usine de Ven- thon, 73-Albertville	Alliages Nb-Hf	Fabrication des al- liages Étude du diagram- me d'équilibre Étude de la trans- formation des al- liages	Micrographie optique Rayons X Dureté
C.N.R.S. — Centre de recherches sur les très basses tempéra- tures, 38-Grenoble	Alliage Nb-Hf	Étude des courants critiques, tempé- ratures critiques, champs critiques en fonction de la concentration et des traitements métallurgiques	Mesures d'aimantation sur échantillons mas- sifs
C.N.R.S. — Centre d'études de chimie métallurgique, 94- Vitry	Composés de ty- pe A ₃ B de struc- ture A 15	Variations de la température cri- tique avec la na- ture des éléments A et B	Examens aux rayons X Mesure de la tempéra- ture critique par la va- riation de fréquence d'un circuit oscillant contenant l'échan- tillon
Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand — Laboratoire de physique théorique	V ₃ Ga	Diagramme d'équi- libre, tempéra- ture critique, champ critique	Mesures de résistivité, de température cri- tique, de champ cri- tique en champs pul- sés Rayons X
Société Alcatel, 91- Bruyères-le-Châtel	Nb-Al-Ge	Fabrication de ru- bans	Pulvérisation catho- dique

ruban de niobium trempé dans un bain d'étain. La couche de Nb₃Sn formée est de quelques microns et la densité de courant critique du ruban composite varie très fortement avec l'épaisseur de la couche de Nb₃Sn formée : J_c décroît d'un facteur 10 lorsque l'épaisseur passe de 1 à 5 microns. L'addition de

zirconium au bain d'étain permet d'améliorer J_c de 5 à 10 %.

M. Hallais (C.N.R.S.-C.E.C.M.) expose ensuite les travaux entrepris à Vitry sur les composés de type A₃B en vue d'obtenir des composés supraconducteurs à température critique élevée (T_c). La méthode consiste

à remplacer progressivement dans le composé Nb_3Al ($T_c = 18^\circ\text{K}$) le Nb par du V ou du Ti et l'Al par du Ge ou du Si. T_c décroît lorsqu'on remplace progressivement le Nb par du V ou du Ti et l'Al par du Si. Par contre, lorsqu'on remplace progressivement Al par Ge, T_c passe par un maximum de $19,3^\circ\text{K}$. Cette valeur de T_c est inférieure à la valeur trouvée par les Américains ($20,7^\circ\text{K}$). Aucune explication de ce désaccord n'a pu être trouvée jusqu'ici. Des études sont en cours sur les composés quaternaires Nb-V-Al-Ge.

Conclusions. — L'effort de la D.G.R.S.T. dans le domaine des matériaux supraconducteurs s'est concrétisé, grâce aux études efficaces poursuivies par la C.F.T.H., à la production en France de matériaux supraconducteurs techniquement très compétitifs. Par ailleurs, il est ressorti de ce Colloque qu'il n'y a pas à l'heure actuelle de demande de matériaux supraconducteurs destinés à d'autres utilisations que la production de champs magnétiques. Les efforts futurs devront donc porter sur l'amélioration des caractéristiques des matériaux actuels.

En ce qui concerne les densités de courant critique, les voies dans lesquelles une amélioration pourrait être recherchée ne sont pas claires, en raison de la méconnaissance des mécanismes fondamentaux qui conditionnent l'ancrage des lignes de vortex. L'effort dans ce sens doit être poursuivi, en particulier sur les

composés supraconducteurs pour lesquels très peu d'études, concernant l'influence de la structure sur les propriétés supraconductrices, ont été faites dans le monde.

En ce qui concerne la stabilité des matériaux supraconducteurs, il semble qu'un progrès décisif pourrait être fait si l'on pouvait mettre au point un matériau autostable, c'est-à-dire ne nécessitant pas de stabilisant extérieur au matériau lui-même. Certaines directions de recherche dans ce sens ont été évoquées au cours de cette table ronde.

En ce qui concerne l'élévation de la température critique et du champ critique, qui semblent aller de pair dans les composés supraconducteurs, les recherches doivent être poursuivies sur les composés, dont les atomes de métaux de transition (tels que Nb ou V par exemple) sont disposés en chaînes linéaires. De même il semble que l'étude de matériaux supraconducteurs en grains extrêmement fins, de l'ordre de quelques dizaines d'Å, puisse être intéressante de ce point de vue.

Il apparaît comme évident, en effet, qu'un gain très net sur la stabilité ou sur la température critique (ou sur les deux), en abaissant le prix de revient des installations cryogéniques et des installations annexes destinées à pallier les retours intempestifs du supraconducteur à l'état normal, ouvrirait aux matériaux supraconducteurs un champ d'application plus vaste.