
**Soudage — Micro-assemblage
des supraconducteurs à haute
température de deuxième
génération —**

**Partie 3:
Méthode d'essai des assemblages**

*Welding — Micro joining of second generation high temperature
superconductors —*

Part 3: Test methods for joints

ISO 17279-3:2021

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/67a9a027-6081-4640-b3fb-d0672ecb480f/iso-17279-3-2021>



iTeh Standards
(<https://standards.iteh.ai>)
Document Preview

[ISO 17279-3:2021](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/67a9a027-6081-4640-b3fb-d0672ecb480f/iso-17279-3-2021)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/67a9a027-6081-4640-b3fb-d0672ecb480f/iso-17279-3-2021>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2021

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, ou la diffusion sur l'internet ou sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8
CH-1214 Vernier, Genève
Tél.: +41 22 749 01 11
E-mail: copyright@iso.org
Web: www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos	v
Introduction	vi
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	1
4 Méthode d'essai des assemblages	1
4.1 Généralités	1
4.2 Contrôle visuel	2
4.2.1 Généralités	2
4.2.2 Qualification du personnel d'essai	2
4.2.3 Matériel d'essai	2
4.2.4 État et préparation de la surface	2
4.2.5 Essais	2
4.2.6 Critères d'acceptation	3
4.2.7 Rapport d'essai	3
4.3 Essai par mesure quatre pointes	3
4.3.1 Généralités	3
4.3.2 Qualification du personnel d'essai	3
4.3.3 Matériel d'essai	3
4.3.4 État et préparation de la surface	3
4.3.5 Essais	3
4.3.6 Critères d'acceptation	9
4.3.7 Rapport d'essai	9
4.4 Essai d'affaiblissement du champ	9
4.4.1 Généralités	9
4.4.2 Qualification du personnel d'essai	9
4.4.3 Matériel d'essai	9
4.4.4 État et préparation de la surface	9
4.4.5 Essais	10
4.4.6 Critères d'acceptation	13
4.4.7 Rapport d'essai	13
4.5 Essai en champ magnétique	13
4.5.1 Généralités	13
4.5.2 Qualification du personnel d'essai	13
4.5.3 Matériel d'essai	13
4.5.4 État et préparation de la surface	13
4.5.5 Essais	13
4.5.6 Critères d'acceptation	15
4.5.7 Rapport d'essai	16
4.6 Essai de traction	16
4.6.1 Généralités	16
4.6.2 Qualification du personnel d'essai	16
4.6.3 Matériel d'essai	16
4.6.4 État et préparation de la surface	16
4.6.5 Essais	16
4.6.6 Critères d'acceptation	17
4.6.7 Rapport d'essai	17
4.7 Essai de pliage	17
4.7.1 Généralités	17
4.7.2 Qualification du personnel d'essai	17
4.7.3 Matériel d'essai	17
4.7.4 État et préparation de la surface	17
4.7.5 Essais	17

4.7.6	Critères d'acceptation.....	18
4.7.7	Rapport d'essai.....	18
4.8	Essai de champ magnétique critique.....	18
4.8.1	Généralités.....	18
4.8.2	Qualification du personnel d'essai.....	18
4.8.3	Matériel d'essai.....	18
4.8.4	État et préparation de la surface.....	19
4.8.5	Essais.....	19
4.8.6	Critères d'acceptation.....	19
4.8.7	Rapport d'essai.....	19
4.9	Essai de distribution de densité de courant critique.....	19
4.9.1	Généralités.....	19
4.9.2	Qualification du personnel d'essai.....	20
4.9.3	Matériel d'essai.....	20
4.9.4	État et préparation de la surface.....	20
4.9.5	Essais.....	20
4.9.6	Critères d'acceptation.....	20
4.9.7	Rapport d'essai.....	20
4.10	Essai au microscope et par diffraction des rayons X.....	20
4.10.1	Généralités.....	20
4.10.2	Qualification du personnel d'essai.....	20
4.10.3	Matériel d'essai.....	20
4.10.4	État et préparation de la surface.....	21
4.10.5	Essais.....	21
4.10.6	Critères d'acceptation.....	21
4.10.7	Rapport.....	21
Annexe A (informative) Rapport des résultats de contrôle visuel.....		22
Annexe B (informative) Rapport des résultats d'essai par mesure quatre pointes.....		24
Annexe C (informative) Rapport des résultats d'essai d'affaiblissement du champ.....		27
Annexe D (informative) Rapport des résultats d'essai en champ magnétique.....		30
Annexe E (informative) Rapport des résultats d'essai de traction.....		34
Annexe F (informative) Rapport des résultats d'essai de pliage.....		37
Annexe G (informative) Rapport des résultats d'essai de champ magnétique critique.....		40
Annexe H (informative) Rapport des résultats d'essai de distribution de densité de courant critique.....		43
Annexe I (informative) Rapport des résultats d'essai au microscope et par diffraction des rayons X.....		45
Bibliographie.....		47

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir www.iso.org/directives).

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir www.iso.org/brevets).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir www.iso.org/avant-propos.

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 44, *Soudage et technique connexes*, Sous-Comité SC 10, *Gestion de la qualité dans le domaine du soudage*, en collaboration avec le Comité Technique du Comité européen de Normalisation (CEN) CEN/TC 121, *Soudage et techniques connexes*, conformément à l'Accord sur la coopération technique entre l'ISO et le CEN (Accord de Vienne).

Une liste de toutes les parties de la série ISO 17279 se trouve sur le site web de l'ISO.

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse www.iso.org/members.html.

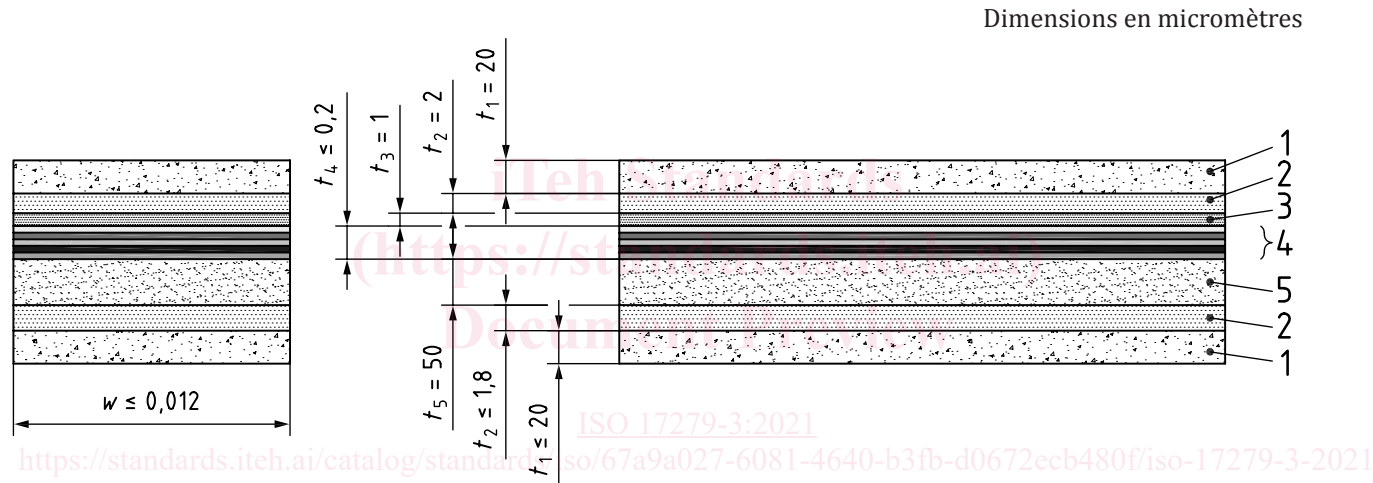
Les interprétations officielles des documents de l'ISO/TC 44, lorsqu'elles existent sont disponibles depuis la page: <https://committee.iso.org/sites/tc44/home/interpretation.html>.

Introduction

L'utilisation croissante de supraconducteurs à haute température de deuxième génération (2G HTS) et l'invention d'assemblages sans résistance sur les 2G HTS ont créé le besoin de la série ISO 17279 afin de garantir que l'assemblage est réalisé de la manière la plus efficace possible et que tous les aspects de l'opération sont correctement contrôlés. Les normes ISO relatives aux modes opératoires de micro-assemblage et d'évaluation des assemblages sont par conséquent essentielles pour obtenir un assemblage 2G HTS de qualité excellente et uniforme.

Le supraconducteur est un matériau qui conduit l'électricité sans résistance et qui se caractérise par un diamagnétisme en dessous d'une température critique (T_c), d'un champ magnétique critique (B_c) et d'une densité de courant critique (J_c). Une fois déclenché, le courant électrique circule à l'infini en boucle fermée dans le matériau supraconducteur en phase diamagnétique.

Un 2G HTS est constitué de plusieurs couches dont l'épaisseur totale se situe entre 60 μm et 90 μm ; la couche supraconductrice en $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ne fait qu'entre 1 μm et 3 μm selon les spécifications du fabricant. La [Figure 1](#) montre un schéma des multiples couches typiques, ainsi que les constituants et l'épaisseur de chaque couche du 2G HTS.



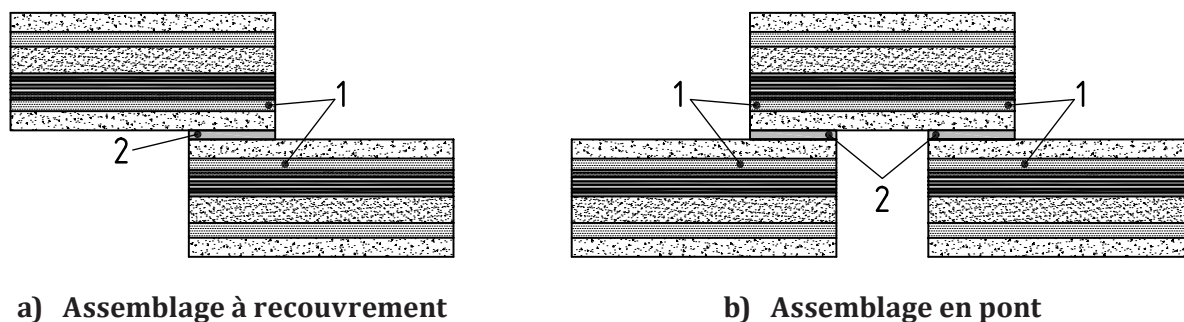
Légende

- | | | | |
|---|-----------------------------------|-------|--------------------------|
| 1 | stabilisant en cuivre (Cu) | t_1 | épaisseur de la couche 1 |
| 2 | couche protectrice en argent (Ag) | t_2 | épaisseur de la couche 2 |
| 3 | couche supraconductrice ReBCO | t_3 | épaisseur de la couche 3 |
| 4 | couche tampon | t_4 | épaisseur de la couche 4 |
| 5 | substrat en hastelloy®C-276 | t_5 | épaisseur de la couche 5 |

NOTE schéma non à l'échelle.

Figure 1 — Multiples couches typiques d'un 2G HTS, et constituants et épaisseur de chaque couche

Pur l'heure, l'industrie des supraconducteurs recourt aux techniques de brasage fort ou tendre ainsi qu'à tout procédé d'apport de métal comme l'indique la [Figure 2](#), qui montre la haute résistance électrique au niveau de l'assemblage, source de défaillance fatale dans le supraconducteur.

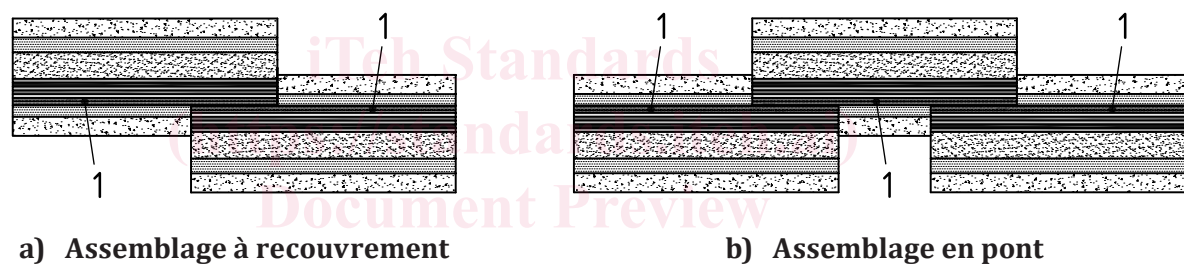


Légende

- 1 couche supraconductrice ReBCO
- 2 produit d'apport de brasage tendre

Figure 2 — Brasage d'assemblage d'un 2G HTS

Néanmoins, la série des ISO 17279 s'intéresse plus particulièrement à l'assemblage autogène direct de couches supraconductrices de 1 μm à 3 μm d'épaisseur de 2G HTS tel que présenté sur la [Figure 3](#), sans métaux d'apport et avec récupération des propriétés supraconductrices par procédé de recuit d'oxygénation, qui ne montre quasiment aucune résistance électrique au niveau de l'assemblage.



Légende

- 1 couche supraconductrice ReBCO

Figure 3 — Assemblage autogène direct de couches supraconductrices de 1 μm à 3 μm d'épaisseur de 2G HTS pour un assemblage supraconducteur

L'ISO 17279-1 spécifie les exigences pour la qualification du mode opératoire d'assemblage de 2G HTS. Il convient que les assemblages de 2G HTS soient capables de réunir les propriétés électriques, magnétiques et mécaniques requises et libres d'imperfections graves en production et en service. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de prévoir des contrôles pendant la conception et la fabrication.

L'ISO 17279-2 spécifie les exigences pour la qualification du personnel réalisant le soudage et les essais.

Soudage — Micro-assemblage des supraconducteurs à haute température de deuxième génération —

Partie 3: Méthode d'essai des assemblages

1 Domaine d'application

Le présent document spécifie les exigences pour les méthodes d'essai du micro-assemblage de deuxième génération (2G HTS) pour remplir les exigences des ISO 17279-1 et ISO 17279-2.

Le présent document spécifie les méthodes d'essai pour déterminer la capacité des assemblages pour la production de la qualité indiquée. Elle définit des exigences d'essai spécifiques, mais n'attribue pas ces exigences à un groupe de produits spécifique.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 17279-1:2018, *Soudage — Micro-assemblage des supraconducteurs à haute température de 2ème génération — Partie 1: Exigences générales pour la procédure*

ISO 15607:2019, *Descriptif et qualification d'un mode opératoire de soudage pour les matériaux métalliques — Règles générales*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO 17279-1 et l'ISO 15607 s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>

4 Méthode d'essai des assemblages

4.1 Généralités

L'ISO 17279-1:2018, 5.5.4, décrit les exigences pour la qualification du personnel d'essai, pour les méthodes d'essai, l'examen pendant les essais et le contre-essai. En particulier, l'ISO 17279-1:2018, Tableau 1, présente le type d'essai, l'étendue des essais, la confirmation des essais, et les essais requis pour la qualification des modes opératoires conformément à l'ISO 17279-1. L'ISO 17279-1:2018, 5.9, requiert les critères d'acceptation des essais. Le fabricant peut avoir à sa disposition suffisamment de personnel compétent pour les essais et l'utilisation du matériel d'essai, ou peut sous-traiter les essais

spécifiques aux organismes spécialisés. Le fabricant peut assister aux essais de la préparation des éprouvettes à l'acquisition et l'analyse des données selon les exigences d'assurance qualité du fabricant.

Les modes opératoires et les précautions d'utilisation du matériel d'essai doivent être appliquées lorsque l'équipement est utilisé pour des essais selon le présent document. L'opérateur de l'équipement spécifique doit établir la capacité à réaliser l'essai requis, et l'étalonnage et la qualification de l'équipement d'essai doivent être mis à jour selon un programme de management de la qualité approprié. Les procès-verbaux et certificats de qualification doivent être tenus à jour.

Les essais, excepté le contrôle visuel, doivent être réalisés dans l'environnement cryogénique et ne prétendent pas répondre aux préoccupations de sécurité associées à son utilisation. Il est de la responsabilité de quiconque utilise cette méthode d'établir des pratiques de sécurité et de santé appropriées avant toute utilisation.

4.2 Contrôle visuel

4.2.1 Généralités

Le présent paragraphe définit la méthode de contrôle visuel des matériaux et des assemblages utilisés dans un 2G HTS.

4.2.2 Qualification du personnel d'essai

Les essais doivent être conduits par un personnel qualifié. Une qualification du personnel doit être effectuée selon un programme de management de la qualité approprié. Le personnel conduisant les contrôles visuels doit réussir une fois par an un examen où sa vision, avec ou sans correction, satisfait à un test de vision de près Jaeger J2 à une distance non inférieure à 30,5 cm, ainsi qu'à un test de perception des couleurs. Les dossiers des examens de vision doivent être tenus pour l'année courante et doivent être disponibles pour consultation.

4.2.3 Matériel d'essai

Chaque fois que nécessaire, des instruments étalonnés doivent être utilisés pour les essais, y compris tous les instruments de mesure et les gabarits nécessaires.

4.2.4 État et préparation de la surface

La surface de l'essai doit être uniforme et lisse et doit être propre et libre de calamine, de rouille, d'huile, de graisse, d'oxydes nocifs et d'autres matières étrangères nuisibles telles que les points d'Ag ou de Cu de 2G HTS. Les surfaces des assemblages finis doivent être appropriées pour permettre des essais corrects. Toutes les préparations d'assemblage doivent respecter les dimensions spécifiées sur dessin (qu'elles soient fournies via des cotes sur le dessin ou dans un descriptif de soudage). Si aucune cote n'est fournie dans le cadre du dessin ou des documents de commande, les cotes doivent respecter les dimensions spécifiées par un descriptif de mode opératoire de soudage qualifié (DMOS).

4.2.5 Essais

Les essais doivent être réalisés conformément à un mode opératoire ou une méthode écrit(e) applicable en vertu des essais. La zone d'essai doit inclure l'assemblage et la zone affectée thermiquement (ZAT) adjacente accessible pour une certaine distance à partir du bord de l'assemblage du métal de base. Les essais doivent être effectués dans l'état traité après assemblage et traitement thermique final (recuit d'oxygénation), ou un autre état nécessaire, et être libre de tous revêtements et autres états de surface tels que peinture, placage, etc. Les assemblages doivent être soumis à l'essai dans l'état brut de soudage. Les essais seront conduits avec des éprouvettes de dimensions adaptées.

Un contrôle visuel direct doit être utilisé. Si nécessaire, des miroirs et des lentilles de grossissement doivent être utilisés pour améliorer l'angle de vision et pour obtenir de l'aide. L'intensité lumineuse minimale à la surface doit être de 1 000 lux (100 pieds-bougies). Le mode opératoire ou la méthode

écrit(e) doit inclure, au minimum et, soit directement, soit par référence à un (des) document(s) applicable(s), un numéro d'identification de mode opératoire et une date, un numéro de révision, une identification des assemblages, des exigences d'essai complètes incluant un éclairage et une méthode d'essai, une évaluation des indications, des critères d'acceptation, la disposition des assemblages après évaluations.

4.2.6 Critères d'acceptation

Les exigences de l'ISO 17279-1:2018, Tableau 4, doivent être remplies. Un manque de collage, un manque de fusion, des fissures et des alvéoles ne sont pas acceptables.

4.2.7 Rapport d'essai

Après la réalisation des essais, les résultats doivent être consignés dans le rapport d'essai. Un formulaire d'un rapport d'essai est présenté dans l'[Annexe A](#).

4.3 Essai par mesure quatre pointes

4.3.1 Généralités

Le présent paragraphe définit la méthode d'essai par mesure quatre pointes des matériaux et des assemblages utilisés dans un 2G HTS. Un courant critique (I_c), une densité de courant critique (J_c) et une valeur n peuvent être mesurés à partir de l'essai.

NOTE Typiquement la résistance du point de contact (résistance de contact) est beaucoup plus faible que la résistance de l'éprouvette d'essai, et peut ainsi être ignorée. Cependant, pour les supraconducteurs dans des conditions cryogéniques, la résistance de contact peut dominer et complètement dissimuler les changements de la résistance de l'éprouvette d'essai elle-même. Les effets de la résistance de contact sont éliminés avec l'utilisation d'un essai par mesure quatre pointes.

4.3.2 Qualification du personnel d'essai

Les essais doivent être conduits par un personnel qualifié. Une qualification du personnel doit être effectuée selon un programme de management de la qualité approprié.

4.3.3 Matériel d'essai

Des instruments étalonnés doivent être utilisés pour les essais.

4.3.4 État et préparation de la surface

Le [paragraphe 4.2.4](#) doit s'appliquer.

4.3.5 Essais

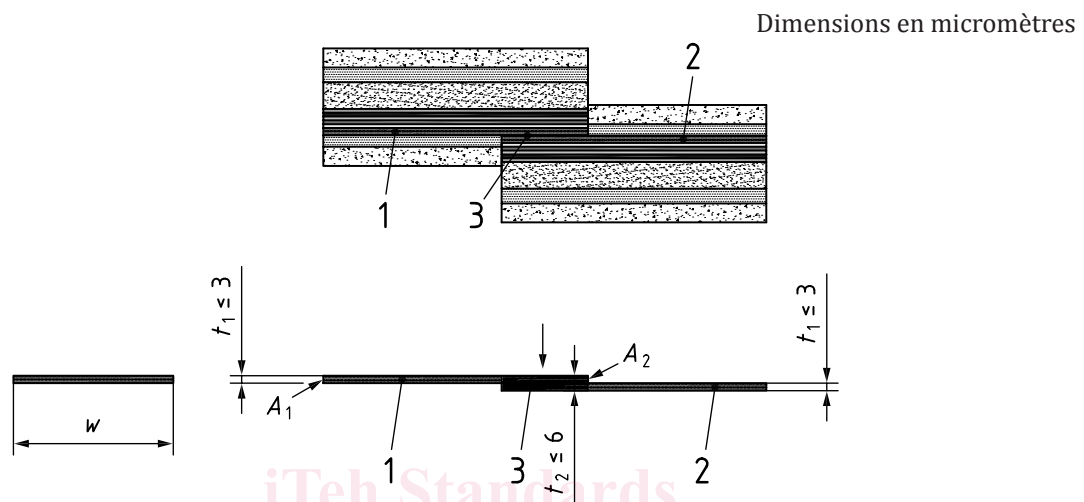
4.3.5.1 Généralités

Les essais doivent être réalisés conformément à un mode opératoire ou une méthode écrit(e) applicable au 2G HTS. Le mode opératoire ou la méthode d'essai écrit(e) doit inclure, au minimum et, soit directement, soit par référence à un (des) document(s) applicable(s), un numéro d'identification de mode opératoire, une date, un numéro de révision, une identification des assemblages, des exigences d'essai complètes incluant une méthode d'essai, une évaluation, et des rapports après évaluations.

La zone d'essai doit inclure l'assemblage et la ZAT adjacente accessible du matériau de base pour une certaine distance à partir du bord de l'assemblage. La longueur totale de l'éprouvette doit être au moins 60 mm, y compris un assemblage de 20 mm. L'essai doit être effectué dans l'état traité après assemblage et traitement thermique final (recuit d'oxygénation), ou un autre état nécessaire, et est réalisé dans l'environnement cryogénique LN₂ ou à une autre température déterminée par le fabricant. L'essai

doit être effectué dans un état de surépaisseur avec des matériaux commercialisés tenant compte du coefficient de retrait thermique pour ne pas que les assemblages soient endommagés pendant l'essai.

Un schéma de deux couches supraconductrices avec assemblage à recouvrement dans un 2G HTS est présenté à la [Figure 4](#). Lorsqu'un courant traverse une couche supraconductrice (épaisse de $1\ \mu\text{m}$ à $3\ \mu\text{m}$) d'un 2G HTS de la couche supraconductrice 1 à l'assemblage puis à la couche supraconductrice 2, le courant génère une différence de tension entre la couche supraconductrice 1 et la couche supraconductrice 2. Un 2G HTS sans assemblage et ZAT est sans résistance dans un environnement cryogénique, ainsi l'essentiel de la différence de tension vient de l'assemblage et de la ZAT.

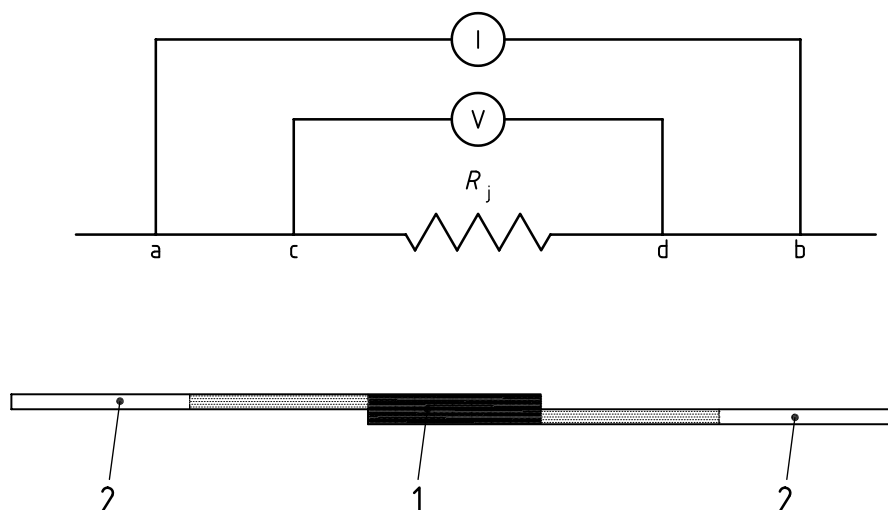


Légende

- 1 couche supraconductrice supérieure
- 2 couche supraconductrice inférieure
- 3 zone d'assemblage
- w largeur de la couche supraconductrice
- t_1 épaisseur de la couche supraconductrice ($1\ \mu\text{m} \sim 3\ \mu\text{m}$)
- t_2 presque $2\ t_1$ ou légèrement moins que $2\ t_1$ en fonction de la pression pendant l'assemblage
- A_1 surface de coupe transversale des couches supraconductrices 1 et 2 ($A_1 = t_1 \times w$)
- A_2 surface de coupe transversale de deux couches supraconductrices avec assemblage à recouvrement ($A_2 = t_2 \times w$)

Figure 4 — Multiples couches typiques d'un 2G HTS, et constituants et épaisseur de chaque couche

La [Figure 5](#) est un schéma d'un essai par mesure quatre pointes dans un 2G HTS avec assemblage à recouvrement. Quatre pointes sont attachées à l'éprouvette d'essai tel que montré sur la figure. Il est fait circuler un courant sur la longueur de l'éprouvette d'essai à travers les pointes étiquetées a et b sur la [Figure 5](#). Cela peut être effectué en utilisant une source de courant ou une alimentation électrique ayant un affichage de sortie du courant. Si l'éprouvette d'essai a une résistance au passage du courant électrique, alors il y a une perte de potentiel (ou de tension) au fur et à mesure de la circulation du courant dans l'éprouvette d'essai, par exemple entre les deux pointes étiquetées c et d sur la figure. La perte de tension entre les pointes c et d peut être mesurée par un voltmètre numérique. La résistance de l'éprouvette d'essai entre les pointes c et d est le rapport de la tension enregistrée sur le voltmètre numérique à la valeur du courant de sortie de l'alimentation électrique. L'impédance élevée du voltmètre numérique réduit au minimum le passage du courant dans la portion de circuit comprenant le voltmètre. Ainsi, puisqu'il n'y a aucune perte de potentiel au niveau de la résistance de contact associée aux pointes c et d, seule la résistance associée à l'assemblage et à la ZAT associée du supraconducteur entre les pointes c et d est mesurée comme une fonction du courant. Les longueurs des 2 ZAT adjacentes à l'assemblage sont environ le double de la longueur de l'assemblage. Cependant, la ZAT dépend de l'apport de chaleur et du temps de maintien pendant l'assemblage. Le fabricant peut déterminer la longueur de la ZAT par un essai par mesure quatre pointes.



Légende

- 1 zone d'assemblage
- 2 zone affectée thermiquement (ZAT)
- R_j résistance électrique de l'assemblage
- a câble de courant 1
- b câble de courant 2
- c prise de tension 1
- d prise de tension 2

Figure 5 — Schéma d'un essai par mesure quatre points dans un 2G HTS CC avec assemblage à recouvrement

Le mode opératoire d'essai est comme suit:

- a) Attacher les points c et d (ligne de fusion de l'assemblage chacune) à l'éprouvette d'essai, raccorder à un voltmètre numérique, et attacher les pointes a et b (5 mm à partir de c et d chacune) à un ampèremètre et à une source d'alimentation. Un enregistreur graphique à bande peut être raccordé entre les pointes c et d.
- b) Régler le lecteur de thermocouple pour lire le thermocouple K et lire le symbole du thermocouple attaché au thermocouple. Ne pas plier le thermocouple.
- c) Placer le récipient, l'éprouvette d'essai avec les pointes attachées, et le thermocouple. Verser de l'azote liquide ou un autre cryogène dans le récipient. Lire le potentiel sur le thermocouple.
- d) Lorsque le récipient est complètement refroidi et que la température chute à environ 70 K ou autre décidée, allumer l'alimentation électrique. Lorsque la résistance du supraconducteur change avec un courant variable, la sortie de tension change. Lire la différence de potentiel sur le voltmètre. Le rapport de la tension au courant traversant l'éprouvette d'essai est la résistance du supraconducteur entre les deux pointes de tension (c et d).

Sur la [Figure 5](#), le courant (I) traverse les deux pointes d'extrémité (a et b) et la tension (V) est mesurée entre les deux pointes centrales (c et d), à savoir, pour l'assemblage et la ZAT. La résistance moyenne, R , entre les deux pointes centrales (c et d) est calculée à partir de la [Formule \(1\)](#).

$$I = V / R \quad (1)$$

où

V est la différence de tension;

I est le passage du courant entre les deux pointes centrales (c et d).

R est aussi donnée par [Formule \(2\)](#) parce que l'essentiel de la différence de tension vient de l'assemblage et de la ZAT.

$$R_j = \rho_j \times l_j / A_2 \text{ ou } R_{HAZ} = \rho_{HAZ} \times l_{HAZ} / A_1 \quad (2)$$

où

ρ_j est la résistivité de l'assemblage en $\Omega\text{-cm}$;

ρ_{HAZ} est la résistivité de la ZAT en $\Omega\text{-cm}$;

l_j est la longueur de l'assemblage mesurée en cm;

l_{HAZ} est la longueur de la ZAT mesurée en cm;

A_1 et A_2 Sont les surfaces de coupe transversale d'une couche supraconductrice et de deux couches supraconductrices avec assemblage à recouvrement en cm^2 , respectivement.

Ainsi, la résistance totale de l'éprouvette d'essai avec assemblage à recouvrement est comme indiquée dans la [Formule \(3\)](#).

$$I = V / (R_j + R_{HAZ}) \quad (3)$$

4.3.5.2 Courant critique en champ autonome (I_c)

La valeur du courant critique d'un assemblage ($I_{c,j}$) est extrêmement importante pour confirmer l'intégrité de l'assemblage. Les valeurs du courant critique en champ autonome (I_c) du supraconducteur assemblé doivent être mesurées en utilisant un essai par mesure quatre pointes type et dans un bain d'azote liquide (LN_2) ou un autre environnement cryogénique prédéterminé. Bien que cette méthode ne soit pas une méthode définitive, elle est tout à fait efficace dans l'évaluation du premier cycle. Si le courant est tracé par rapport au relevé de la tension dans un 2G HTS, le résultat est similaire à celui indiqué sur la [Figure 6](#). La courbe V - I est obtenue à partir d'un système d'acquisition de données (DAS) commercialisé et de LabVIEW¹⁾. Le DAS et LabVIEW doivent être étalonnés.

1) LabVIEW est la marque d'un produit. Cette information est donnée pour la commodité des utilisateurs du présent document et ne constituent pas un entérinement par l'ISO du produit nommé. Des produits équivalents peuvent être utilisés, s'il peut être démontré qu'ils conduisent aux mêmes résultats.