

Supraconducteurs à haute température : mesure des caractéristiques par impulsions de courant.

Ing. Jean-Philippe Bodesson
Ir Ralph Lescroart
PIERRARD - Virton

Les limiteurs de courant à supraconducteurs sont des dispositifs qui permettent de limiter, presque instantanément, le courant lorsqu'il y a un court circuit sur une ligne à haute tension. Les supraconducteurs utilisés dans cette application sont des supraconducteurs à haute température. Pour que les limiteurs fonctionnent de manière optimale, il est impératif de bien connaître les valeurs de la température critique et du courant critique du supraconducteur utilisé. Cet article montre la démarche qui a été suivie pour déterminer ces deux paramètres.

Mots clés : Supraconducteur à haute température, Limiteur de courant, Courant critique, Température critique, Résistivité, LabVIEW.

Superconductor current limiters are devices developed to protect high-voltage lines against short-circuits. The superconductors used here are high-temperature superconductors. In order to implement the current limiter in an optimal way, it is imperative to determine very precisely the values of the critical temperature and the critical current. This paper shows how these two parameters have been determined.

Keywords : High Temperatur Superconductor, current limiter, cortical current, critical temperatur, LabVIEW.

1. Introduction

Les supraconducteurs dont il est question sont de la famille $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8-x}$. Ce type de supraconducteur a été créé pour servir de limiteur de courant sur des lignes HT.

Lorsqu'un court-circuit apparaît sur une ligne HT, le courant de court-circuit (I_{cc}), très supérieur au courant nominal (I_n) du générateur, peut provoquer d'importants dommages. Il est donc nécessaire de couper ou de limiter ce courant de court-circuit au plus vite. Les limiteurs de courant à supraconducteurs fonctionnent comme suit : le supraconducteur, refroidi en dessous de sa température critique et donc en régime de supraconduction, est placé en début de ligne à haute tension ; il n'ajoute donc aucune résistance dans le circuit.

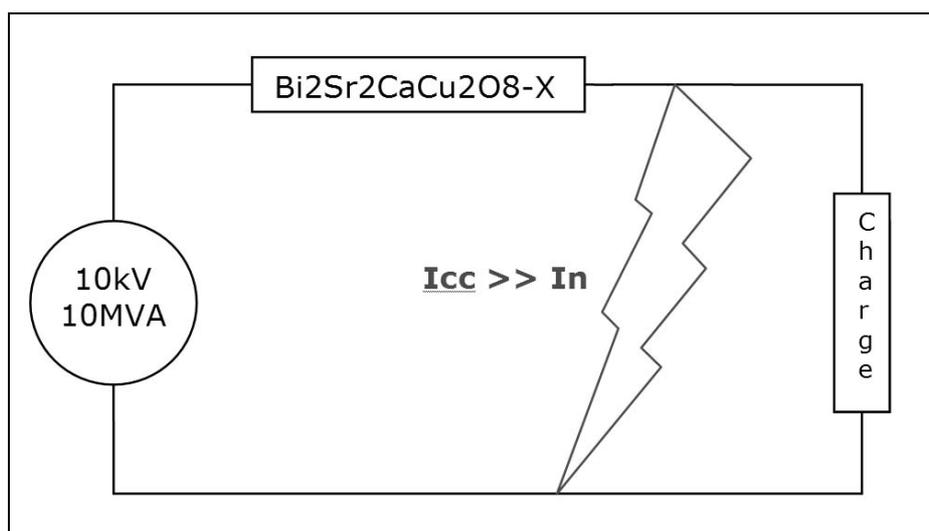


Figure 1 : Principe du limiteur de courant à supraconducteur

Mais dès que le courant de court-circuit (I_{cc}) apparaît et dépasse le courant critique (I_c) du supraconducteur, celui-ci perd très vite sa supraconductivité et introduit ainsi une grande résistance dans le circuit, ce qui a pour effet de limiter I_{cc} .

On comprend donc toute l'importance de bien mesurer, de façon précise et fiable, les température et courant critiques de ces supraconducteurs.

Les limiteurs de courant à supraconducteur présentent un certain nombre d'avantages intéressants :

- leur fonctionnement est non destructif et donc réversible,
- le temps de réponse est très faible par rapport à celui d'un fusible,
- ils fonctionnent aussi bien en AC qu'en DC,
- ils fonctionnent en monophasé comme en triphasé.

Les limiteurs de courant à supraconducteur sont cependant difficiles à mettre en place et encore peu rentables à cause du coût du refroidissement.

2. Deux caractéristiques essentielles des supraconducteurs.

2.1. La température critique (T_c [K])

La température critique est la température en dessous de laquelle le supraconducteur entre en régime de supraconduction. En dessous de cette température, sa résistivité devient donc nulle. La figure 2 montre un exemple de graphique de la résistivité en fonction de la température d'un supraconducteur.

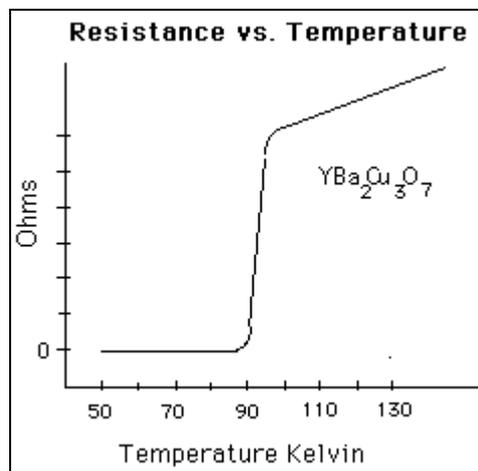


Figure 2 : Résistance en fonction de la température

2.2. Le courant critique (I_c [A])

Le courant critique est l'intensité de courant au-dessus de laquelle l'échantillon supraconducteur, bien que refroidi en dessous de sa température critique, présente à nouveau une résistivité. La valeur du courant critique est fonction de la température du supraconducteur : plus l'échantillon est froid, plus le courant critique sera élevé. Sur la figure 3, le courant critique se situe à l'endroit où la tension relevée aux bornes de l'échantillon commence à être différente de 0V.

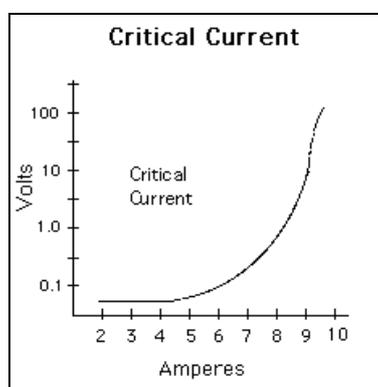
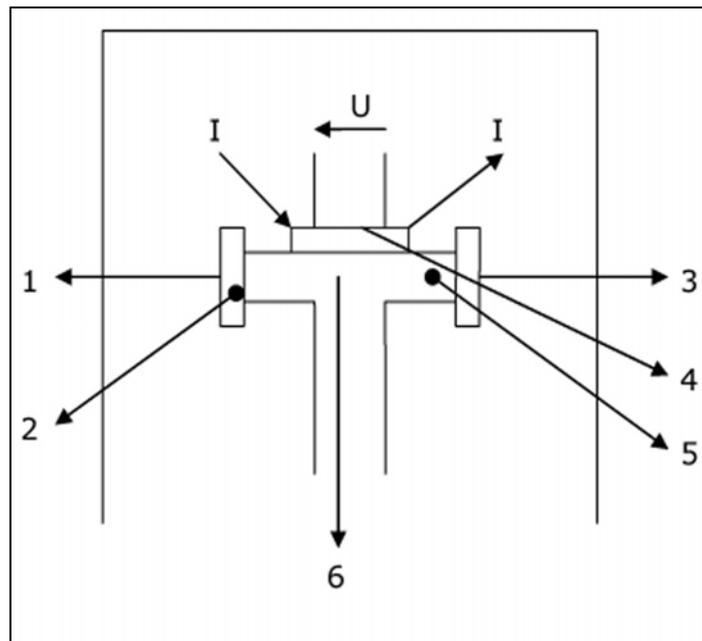


Figure 3 : Evolution du courant critique pour une température donnée

3. Première partie : Mise au point d'une méthode de mesure automatique de la résistivité en fonction de la température.

Le but ici est d'automatiser la mesure de la résistivité d'un échantillon supraconducteur. Pour mesurer la résistivité, une méthode 4 points est utilisée. Le banc d'essai est refroidi par un système cryogénique et la température est régulée par un contrôleur PID. Un programme LabVIEW a été mis au point pour l'acquisition des données (températures, courant, tension), le traitement de celles-ci et l'automatisation des mesures.

3.1. Description du banc d'essai



- | | |
|----|-----------------------------|
| 1. | R _{chauffante} 1 |
| 2. | Capteur de température 1 |
| 3. | R _{chauffante} 2 |
| 4. | Echantillon Supraconducteur |
| 5. | Capteur de température 2 |
| 6. | Support de l'échantillon |

Figure 4 : Banc d'essai

Support de l'Echantillon

L'échantillon supraconducteur se présente sous la forme d'une lamelle coupée dans un tube creux de diamètre extérieur de 25mm. Pour garantir un bon contact thermique entre l'échantillon et le système de refroidissement, la plus grande surface possible de l'échantillon doit être en contact avec le support. Un support spécifique qui épouse la surface de l'échantillon a dû être réalisé (fig. 5).

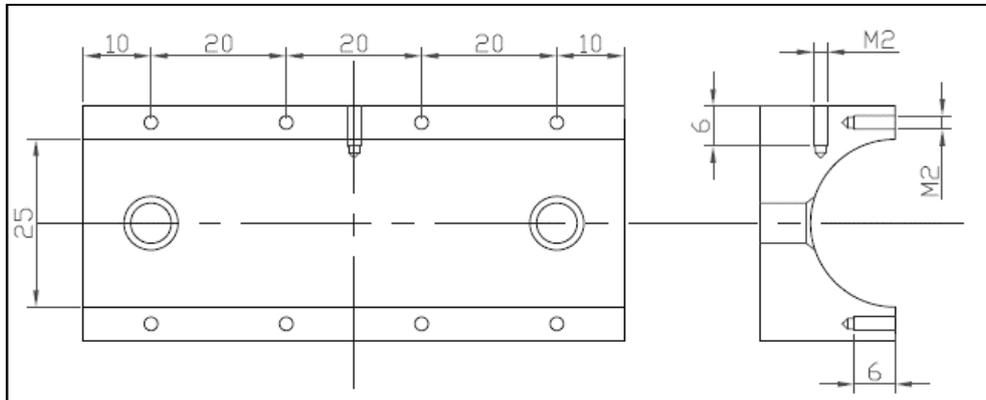


Figure 5 : Support de l'échantillon

La pression de contact de l'échantillon sur le support est assurée par des barrettes de fixation vissées sur la surface supérieure du support et qui, grâce à leur ressort, assurent le maintien de l'échantillon tout au long de la manipulation.

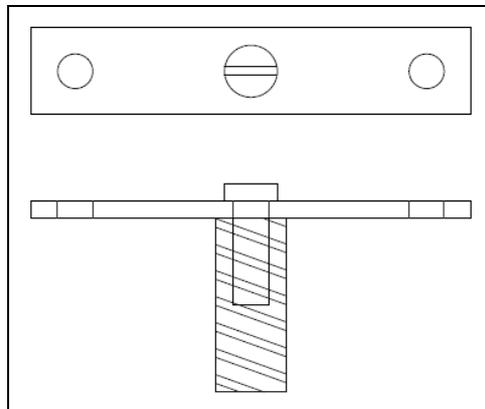


Figure 6 : Barrette de fixation

Régulation de la température

Le banc d'essai est refroidi par un système cryogénique (cryogenic Stirling machine) qui fonctionne toujours à pleine puissance. Donc, pour atteindre la température voulue et pour stabiliser cette température, un apport de chaleur variable doit être assuré. Ceci est réalisé à l'aide de résistances chauffantes. Les températures de contrôle du banc d'essai sont obtenues à l'aide de deux diodes au germanium : la première, placée sur une résistance

chauffante, commande le régulateur PID, la seconde, située sur le support de l'échantillon, fournit la température de l'échantillon.

A l'intérieur du banc d'essai, on assure une pression de $5 \cdot 10^{-3}$ mbars, ce qui permet d'avoir une isolation thermique suffisante entre le banc d'essai et l'extérieur.

Mesure de la résistivité

Principe de la mesure.

La méthode de mesure de la résistivité est la méthode 4 points :

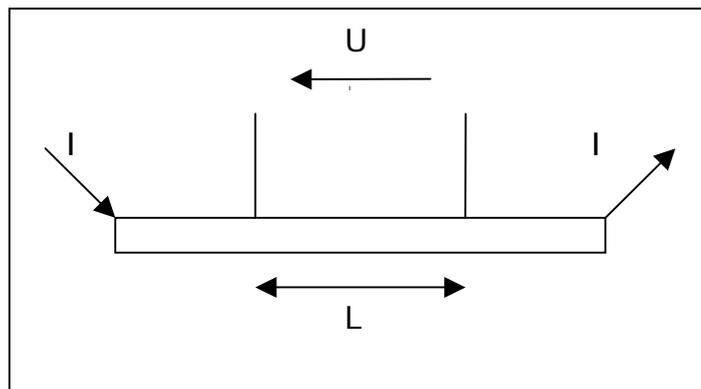


Figure 7 : Méthode 4 points

I est connu (source de courant), U est mesuré (voltmètre), R et ρ sont calculés :

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} = \frac{U}{I} \cdot \frac{A}{L}$$

Elimination des FEM thermiques.

Les tensions mesurées sont très faibles, de l'ordre du μV , ce qui en soi ne pose pas de problème si on dispose d'un nano-voltmètre. Mais pour des valeurs de cette ordre de grandeur, il convient de tenir compte d'éventuelles tensions parasites thermiques. Celles-ci sont dues à l'effet thermocouple aux points d'insertion de l'échantillon dans le circuit de mesure. Elles

peuvent également être de l'ordre du μV et donc fausser de façon significative les valeurs mesurées.

A défaut de pouvoir éliminer ces FEM thermiques, il convient donc d'en supprimer les effets sur les mesures. Ceci se fait par la méthode des deltas, qui consiste à mesurer deux tensions différentes, l'une sur un pulse de courant positif et l'autre sur un pulse de courant négatif (les deux pulses doivent avoir la même valeur absolue).

Le calcul ci-dessous illustre la méthode des deltas :

Lorsqu'on injecte un courant positif : $V_{1t1} = V_{\text{therm}} + R.I = V_{\text{therm}} + V_r$

Lorsqu'on injecte un courant négatif : $V_{1t2} = V_{\text{therm}} + R.(-I) = V_{\text{therm}} - V_r$

V_{therm} = FEM thermique parasite.

V_r = chute de tension dans la résistance (celle qui nous intéresse).

Le calcul à effectuer est :

$$\Delta = \frac{V_{1t1} - V_{2t2}}{2} = \frac{(V_{\text{therm}} + V_r) - (V_{\text{therm}} - V_r)}{2} = V_r$$

3.2. Programme LabVIEW

Le but du programme est d'acquérir les mesures de température, tension et courant, de calculer la résistivité et d'automatiser ces mesures. Pour communiquer avec les différents instruments, le bus GPIB (norme IEEE 488) est utilisé car il est aisé à implémenter et tous les instruments en sont équipés.

Le programme permet de :

- commander la source de courant pour qu'elle envoie le courant voulu dans l'échantillon,
- commander le voltmètre pour qu'il lise la tension aux bornes de l'échantillon,
- gérer la méthode des deltas pour l'élimination des FEM thermiques,
- afficher les deux températures mesurées sur un graphique en temps réel,
- calculer la résistivité de l'échantillon,
- envoyer les valeurs de résistivité avec les températures correspondantes dans un fichier Excel en vue d'un traitement de données.

3.3. Résistivité du Supraconducteur

La mesure de la résistivité en fonction de la température est faite en deux phases distinctes. Une première phase où l'échantillon est refroidi et une seconde durant laquelle il est réchauffé. Le but de cette mesure en deux temps est de s'assurer de l'absence de toute hystérésis. Une telle hystérésis sur le graphique montrerait que le couplage thermique entre l'échantillon et le support de celui-ci n'est pas bon.

Première phase : le refroidissement

Durant cette phase, les mesures ont été prises à intervalles réguliers de 2 min jusqu'à ce que la température atteigne 81,23K, ce qui a pris près de 4h30. Voici le graphe de ces mesures (fig. 8).

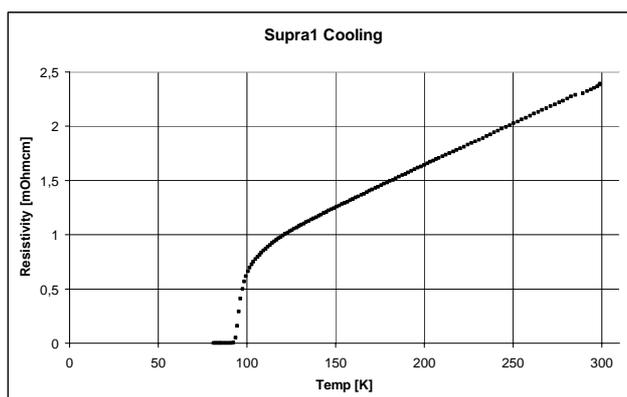


Figure 8 : Résistivité en de la température : refroidissement

Seconde phase : le réchauffement

Durant cette phase, l'échantillon a été réchauffé par rayonnement thermique naturel. Il a fallu près de 20h pour revenir à une température de 299,2K (température du local lors des tests). Les mesures ont été prises à intervalles réguliers de 2 min. Voici le graphe de ces mesures (fig. 9)

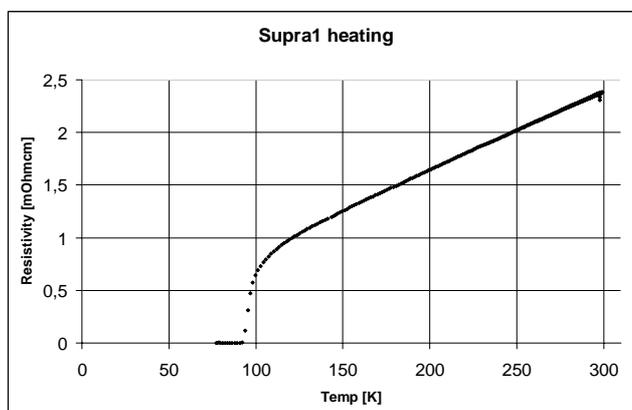


Figure 9 : Résistivité en de la température : réchauffement

Superposition :

Le graphe de la figure 10 montre qu'il n'y a pas d'hystérésis. On déduit de ces mesures que la température critique de ce type de supraconducteur est située dans l'intervalle [91,59K, 92,36K] qui correspond à la précision des mesures.

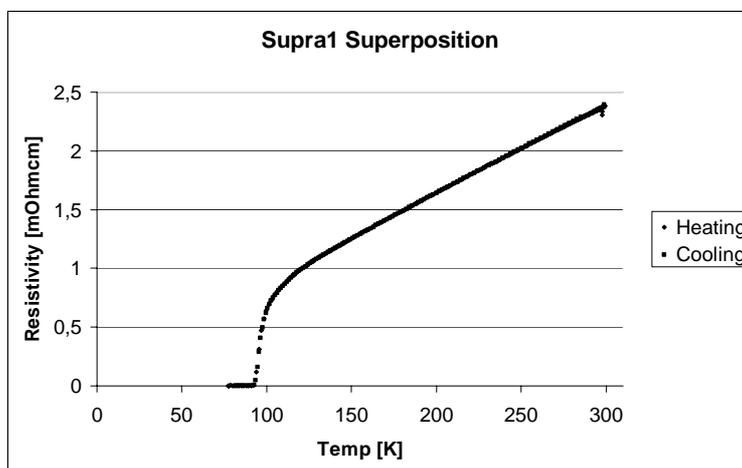


Figure 10 : Résistivité en de la température : superposition

3.4. Conclusion

Cette première partie de mesures a donné des résultats très satisfaisants. Des améliorations restent cependant possibles : une première en diminuant le laps de temps entre deux mesures, une deuxième en réduisant le temps pris par le programme pour calculer une valeur de delta.

4. Seconde partie : Mise au point d'une méthode de mesure de la densité de courant critique en fonction de la température

Après la mesure de la température critique du supraconducteur, il reste maintenant à déterminer les valeurs du courant critique en fonction de la température.

4.1. Description du problème

Pour définir le courant critique d'un échantillon supraconducteur, il faut envoyer des courants électriques de plus en plus élevés dans l'échantillon jusqu'à ce qu'une tension soit mesurée. Une valeur typique pour le courant critique est $10\text{A}/\text{mm}^2$, ce qui donne, pour des échantillons de 4mm^2 de section, une plage intéressante allant de 0 à 60A. Le problème avec ces courants élevés est que l'énergie dissipée dans les fils de connexion est également très élevée :

$$E = R.I^2.\Delta t \text{ [J]}$$

Cette énergie calorifique se traduit par une élévation de la température des fils :

$$E = C_m.m.\Delta T \text{ [J]}$$

Pour éviter que les fils n'amènent, par conduction thermique, de la chaleur dans l'échantillon, ils doivent être les plus fins possibles.

Un autre problème se présente alors. Ces fins fils de connexion risquent de fondre lorsqu'ils sont parcourus par un courant intense. Pour éviter cela, une solution est d'utiliser de très courtes impulsions de courant. Une première étude théorique a donc été faite pour déterminer si l'élévation de température dans un fil de $0,1\text{mm}^2$ de section, suite à une impulsion de 60A durant 10ms, était acceptable.

Avec, pour le cuivre :

$$\begin{aligned} \rho &= 1,7 \cdot 10^{-8} [\Omega \cdot \text{m}] \\ C_m &= 385 [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \\ \mu_m &= 8\,900 [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \end{aligned}$$

les calculs montrent que l'élévation de température serait de l'ordre de 18 K, ce qui est tout à fait acceptable.

Il reste ensuite à déterminer la longueur de la pause entre deux impulsions de courant pour que les fils reviennent à leur température initiale. Cette étude a été faite pour des fils à la température initiale de 300 K.

L'énergie évacuée par rayonnement est donnée par :

$$E = \sigma \cdot S \cdot T^4 \cdot \Delta t \quad [\text{J}]$$

avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$
 $S = 2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot L$: surface externe du fils
 R_1 = rayon du câble avec l'isolant
 L = longueur du câble
 l'émissivité de l'isolant est très proche de 1.

On montre qu'à 300K, les câbles évacuent 6,7 K/s. Il faut donc faire une pause d'à peu près 3 secondes après chaque impulsion.

4.2. Méthode de mesure

Les impulsions de courant sont créées par un générateur de fonction connecté à un amplificateur de courant. La tension (U_L) dans l'échantillon (R_L) doit être amplifiée car elle est très faible. Le courant et la tension sont mesurés sur deux canaux d'une carte d'acquisition. La figure 11 donne le schéma de cette méthode de mesure.

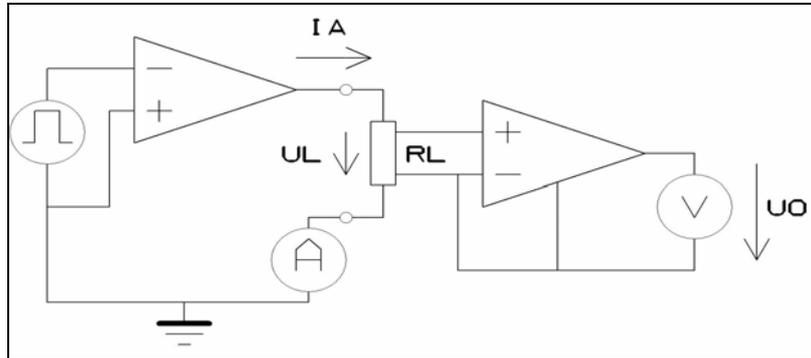


Figure 11 : Méthode de mesure

4.3. Programme LabVIEW

Le but du programme est de convertir les deux canaux de la carte d'acquisition durant une impulsion de courant.

Le programme permet d' :

- envoyer les paramètres de l'impulsion au générateur de fonction,
- envoyer les données converties (tensions et courant) dans un fichier Excel en vue d'un traitement ultérieur.

La figure 12 montre la description séquentielle du programme.

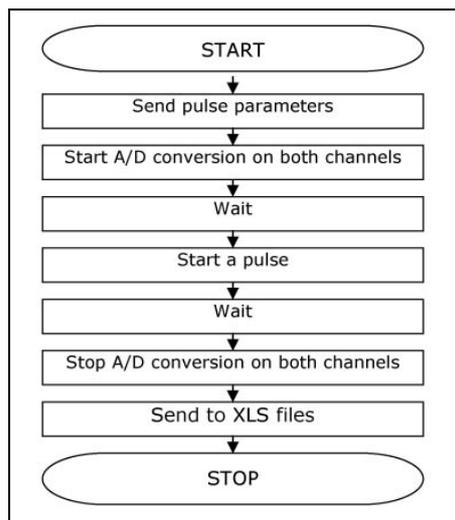


Figure 12 : Description séquentielle du programme LabVIEW

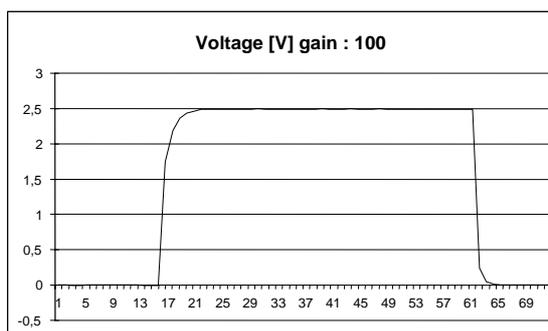
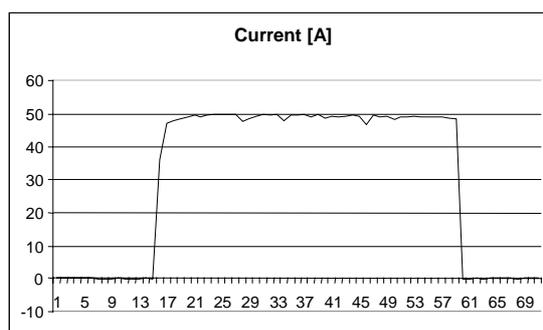
4.4. Tests sur des échantillons en cuivre

Les premiers tests ont été effectués sur des échantillons en cuivre pour s'assurer du bon fonctionnement avant les essais sur les supraconducteurs.

Test en dehors du banc d'essai

Ce premier test, fait en dehors du banc d'essai, permet d'utiliser l'amplificateur de courant à pleine puissance puisque la résistance qui lui est connectée est très faible (seulement les fils et l'échantillon).

Le courant envoyé dans l'échantillon est de 50A durant 10ms. Les figures 13 et 14 montrent les graphes des mesures sur les deux canaux de la carte d'acquisition :



Interprétation

La valeur théorique de la tension dans cet échantillon avec un courant de 50A est de :

$$V = \rho \cdot \frac{L}{A} \cdot I = 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{4,5 \cdot 10^{-2}}{1,5 \cdot 10^{-6}} \cdot 50 = 2,55 \cdot 10^{-2} \text{ volt}$$

La valeur mesurée est de 25mV ce qui est acceptable. L'erreur vient du fait que les contacts de mesure ne sont pas vraiment ponctuels sur l'échantillon.

Test sur une charge

Le but de cet essai est de déterminer la valeur maximale de l'impulsion de courant qui peut être envoyée dans une charge de 3Ω , ce qui correspond à la résistance de la boucle de courant dans le banc d'essai. Le tableau ci-dessous donne les résultats de ce test.

Pulse amp [V]	I calculé [A]	I mesuré [A]	Résultat
0,5V	5A	4,99A	OK
0,7V	7A	7,05A	OK
1V	10A	9,98A	OK
1,1V	11A	10,3A	KO
1,2V	12A	10,35A	KO
2V	20A	10,32A	KO

Pulse amp = valeur du pulse en entrée de l'amplificateur de courant.

I calculé = valeur théorique du courant dans l'échantillon en fonction de la valeur du pulse d'entrée

I mesuré = valeur du courant mesurée dans l'échantillon

On remarque donc que le courant maximum qui peut être envoyé est de 10A, ce qui est normal puisque la tension maximum que l'amplificateur peut appliquer à sa sortie est de 30V.

4.5. Conclusion

A cause d'une défaillance de l'amplificateur de tension, les tests ont du s'arrêter à ce point. Néanmoins, tous les essais effectués ayant donné des résultats satisfaisants, il est très probable que le protocole mis en place, permettra également de mener à bien les mesures sur les échantillons supraconducteurs.

5. Références Bibliographiques

CHIANG CHYE Teo, *Temperature Dependent Resistivity*, FH-Mannheim, Oversea Industrial Attachment, Final Report.

COPPER AND COPPER Alloys, *Compositions and Properties*, CDA Publication No TN10, 1986.

<http://superconductors.org/>