

## Deux méthodes de mesures de résistances au moyen d'une alimentation, d'un voltmètre et d'un ampèremètre

### Introduction :

Lorsque l'on veut mesurer la valeur d'une résistance, le réflexe est d'utiliser un multimètre (analogique ou numérique) et de sélectionner la fonction Ohm-mètre. Sur certains multimètres (en général analogiques), il y a aussi moyen de sélectionner un calibre de la fonction Ohm-mètre afin de définir l'étendue de mesure la plus appropriée en fonction de l'ordre de grandeur de la valeur de la résistance à mesurer. Toutefois, il existe d'autres méthodes pour mesurer une résistance avec grande précision. On procédera alors par une méthode indirecte, c'est-à-dire par une mesure de tension et une mesure de courant. À partir de ces deux mesures, on pourra en déduire la valeur de la résistance sous test.

### Qu'est-ce qu'un Ohm-mètre ?

Vous aurez remarqué qu'à l'intérieur d'un Ohm-mètre (analogique), il y a une pile (en général de 1,5 V). Dans les multimètres numériques, il s'agit en général d'une pile de 9 V.

La pile électrique de l'ohm-mètre est une source de tension (en considérant que la résistance interne de la pile soit relativement faible). En plaçant cette pile en série avec un ampèremètre re-gradué avec une échelle en Ohms, et en plaçant la résistance à mesurer en série avec ce circuit (pile et ampèremètre), la mesure du courant va nous donner le reflet de la mesure de la résistance selon la loi d'Ohm :

$$R = \frac{U}{I} \text{ (mesure de } I \text{ avec } U = \text{ constante) .}$$

Il y aurait moyen de procéder autrement (par exemple dans un multimètre électronique). En utilisant une alimentation interne à courant constant que l'on place en série avec la résistance à mesurer. Le multimètre fonctionne alors en voltmètre qui est placé en parallèle sur la résistance à mesurer. En appliquant une nouvelle fois la loi d'Ohm :

$$R = \frac{U}{I} \text{ (mesure de } U \text{ avec } I = \text{ constante) .}$$

## Deux méthodes de mesure ; une pour des grandes résistances, l'autre pour des petites résistances

Il existe deux méthodes (procédés) de mesure : la méthode « amont » (longue dérivation, parfois appelée « long shunt ») et la méthode « aval » (parfois appelée « court shunt »). Ces méthodes sont utilisées dans les laboratoires de mesure mais aussi en industrie, en particulier pour la mesure des résistances de très faibles valeurs.

Les radioamateurs utilisent aussi ces méthodes de mesure d'une manière indirecte dans leur alimentation de leur atelier d'électronique pour des mesures des courants élevés (de l'ordre de 50 A) pour alimenter un *transceiver* sous une tension de 13,8 V. Il s'agit d'une déclinaison de la mesure d'une résistance de faible valeur, appelé *Shunt* de mesure. En mesurant la différence de potentiel aux bornes du Shunt, on peut en déduire le courant qui y circule.

### En quoi consistent les deux méthodes de mesure

Le concept est d'utiliser deux appareils de mesure : un voltmètre et un ampèremètre. Ces appareils vont relever ce que l'on appelle des grandeurs d'entrée : les deux grandeurs d'entrée sont la tension « U » et le courant « I ». Ce que l'on veut mesurer, c'est la valeur de la résistance, que l'on appelle la grandeur de sortie (en Ohm). Le résultat de la mesure est appelé le *mesurande*. Pour pouvoir mesurer une tension et un courant, il faut bien entendu disposer d'une alimentation.

### Où faut-il raccorder le voltmètre : avant ou après l'ampèremètre ?

Tel est le but de cet article technique de répondre à cette question. Nous adopterons volontairement une approche scientifique de ce problème en effectuant une analyse de l'incertitude de mesure en fonction des deux méthodes et en fonction de la valeur de la résistance à mesurer. Un graphique nous aidera à se prononcer sur la méthode à choisir.

Dans les circuits électriques selon les méthodes « amont » ou « aval », on a une répartition des courants et des tensions. Il y a donc moyen d'exprimer une série de relations mathématiques en s'aidant des lois de Kirchhoff et de la loi d'Ohm.

Ne perdons pas de vue que nous partons de deux grandeurs d'entrée (tension et courant) et que nous arrivons à une grandeur de sortie, le *mesurande* (résistance).

- Méthode « amont » (long shunt) :

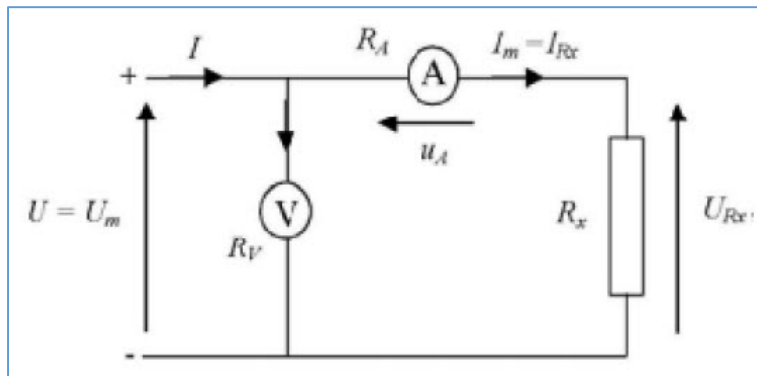


Fig. 1 : Procédé de mesure d'une résistance par une méthode voltampèremétrique « amont » en configuration « long shunt ». Source : Travaux Pratique (TP) n° 1A, Mesure de résistance, Méthode Voltampèremétrique, Faculté des Sciences de la Technologie, Université des frères Mentouri, Constantine, Algérie.

La résistance mesurée «  $R_m$  » est le résultat de :

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U_{R_x} + u_A}{I_{R_x}} = \frac{R_x \cdot I_{R_x} + R_A \cdot I_{R_x}}{I_{R_x}}$$

$$R_m = R_x + R_A \Rightarrow R_m > R_x$$

La valeur vraie de la résistance est :

$$R_x = R_m - R_A$$

L'expression de l'incertitude absolue avec «  $R_m$  », le *mesurande*, est :

$$\Delta R_x = R_m - R_x = R_A$$

Et donc, l'incertitude relative due à la méthode de mesure a pour expression :

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x} = \frac{R_A}{R_m - R_A}$$

Cette expression montre que l'incertitude relative sur le *mesurande* due à cette méthode de mesure est d'autant plus faible que la valeur de la résistance interne de l'ampèremètre est très petite devant la résistance à mesurer. On remarquera que l'incertitude relative est indépendante de la résistance interne du voltmètre.

- Méthode « aval » (long shunt) :

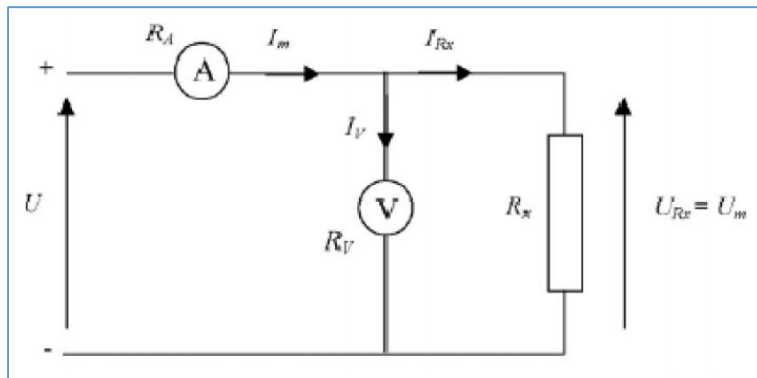


Fig. 2 : Procédé de mesure d'une résistance par une méthode voltampèremétrique « aval » en configuration « court shunt ». Source : Travaux Pratique (TP) n° 1A, Mesure de résistance, Méthode Voltampèremétrique, Faculté des Sciences de la Technologie, Université des frères Mentouri, Constantine, Algérie.

La résistance mesurée «  $R_m$  » est le résultat de :

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U_{R_x}}{I_m} = \frac{U_{R_x}}{I_{R_x} + I_V} = \frac{U_{R_x}}{\frac{U_{R_x}}{R_x} + \frac{U_{R_x}}{R_V}} = \frac{U_{R_x}}{\frac{U_{R_x} \cdot R_V + U_{R_x} \cdot R_x}{R_x \cdot R_V}} = \frac{U_{R_x} \cdot R_x \cdot R_V}{U_{R_x} (R_V + R_x)}$$

$$R_m = \frac{R_x \cdot R_V}{R_V + R_x} \Rightarrow R_m < R_x$$

La valeur vraie de la résistance est :

Partant de  $R_m = \frac{R_x \cdot R_V}{R_V + R_x}$  on a :

$$R_m \cdot (R_V + R_x) = R_x \cdot R_V$$

$$\Leftrightarrow R_m \cdot R_V + R_m \cdot R_x = R_x \cdot R_V$$

$$\Leftrightarrow R_m \cdot R_x - R_x \cdot R_V = -R_m \cdot R_V$$

$$\Leftrightarrow R_x (R_V - R_m) = R_m \cdot R_V$$

$$\Leftrightarrow R_x = \frac{R_m \cdot R_V}{R_V - R_m}$$

L'expression de l'incertitude absolue avec «  $R_m$  », le *mesurande*, est :

$$\Delta R_x = R_x - R_m = \frac{R_m \cdot R_V}{R_V - R_m} - R_m = \frac{R_m \cdot R_V - R_m \cdot (R_V - R_m)}{R_V - R_m} = \frac{R_m \cdot R_V - R_m \cdot R_V + R_m^2}{R_V - R_m}$$

$$\Delta R_x = \frac{R_m^2}{R_V - R_m}$$

Et donc, l'incertitude relative due à la méthode de mesure a pour expression :

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\frac{R_m^2}{R_V - R_m}}{\frac{R_m \cdot R_V}{R_V - R_m}} = \frac{R_m^2}{R_m \cdot R_V} = \frac{R_m}{R_V}$$

$$\text{Or : } R_m = R_x \parallel R_V \Rightarrow R_m = \frac{R_x \cdot R_V}{R_x + R_V}$$

$$\text{Donc : } \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\frac{R_x \cdot R_V}{R_x + R_V}}{R_V} = \frac{R_x \cdot R_V}{R_V \cdot (R_x + R_V)}$$

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R_x}{(R_x + R_V)}$$

Cette expression montre que l'incertitude relative sur le *mesurande* due à cette méthode de mesure est d'autant plus faible que la valeur de la résistance interne du voltmètre est très grande devant la résistance à mesurer. On remarquera que l'incertitude relative est indépendante de la résistance interne de l'ampèremètre.

L'observation des variations des erreurs relatives en fonction de la valeur de la résistance  $R_x$  à déterminer montre le domaine d'emploi pour chacune des deux méthodes de mesure.

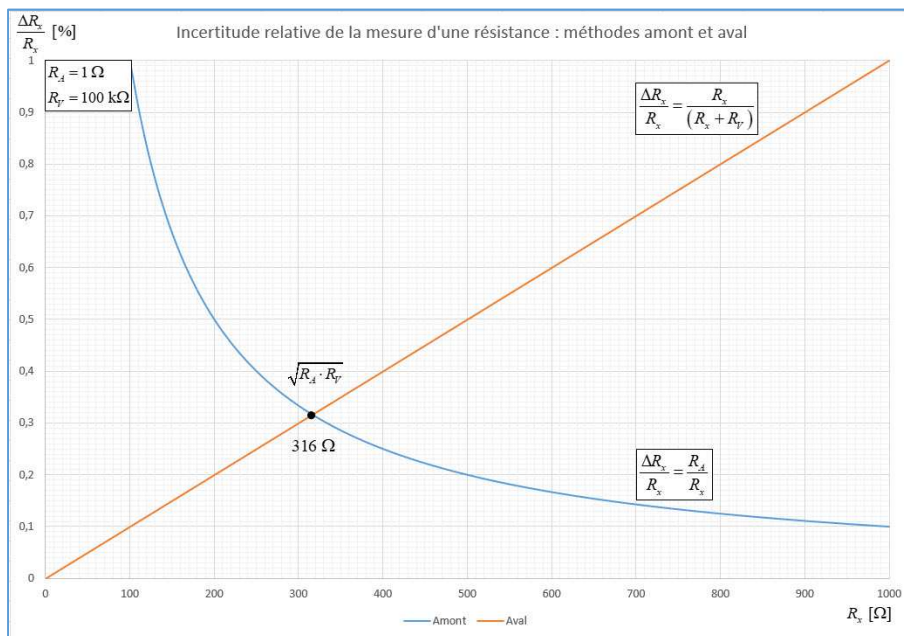


Fig. 3 : Graphe de l'incertitude relative de la mesure d'une résistance en fonction de la valeur de la résistance à mesurer selon les deux méthodes « amont » et « aval ». On remarquera que l'incertitude relative est identique selon les deux méthodes lorsque la valeur de la résistance à mesurer correspond à la moyenne géométrique des résistances internes de l'ampèremètre et du voltmètre pour autant que les appareils de mesures soient idéaux sans incertitude des mesures de courant et de tension. Graphisme : ON4IJ.

### Comment mesurer des résistances de très faibles valeurs (par ex. un *Shunt*) ?

Il s'agit ici d'une application pratique de la méthode « aval ». Mais comment éviter de placer une alimentation pratiquement en court-circuit pour la mesure d'une résistance de valeur très faible tout en évitant aussi de « claquer » un ampèremètre.

La réponse pratique est de transformer son alimentation en générateur de courant. C'est facile pour une alimentation de laboratoire qui dispose d'un limiteur de courant, mais comment faire avec une alimentation traditionnelle de 13,8 V ?

Une alimentation traditionnelle est une source de tension qui se caractérise par une résistance interne très faible. Le meilleur exemple est une batterie 12 V pour démarrer le moteur d'une voiture. La résistance interne d'une batterie est tellement faible que l'intensité du courant peut atteindre des proportions gigantesques si l'on raccorde cette batterie sur une résistance de très faible valeur (celle du démarreur de la voiture).

Un générateur de courant se caractérise par une résistance interne très élevée. Si l'on raccorde une source de courant sur un court-circuit, le courant va être limité par la résistance interne du générateur.

### Comment limiter le courant d'une source de tension ?

Si l'on dispose, par exemple d'une alimentation régulée de 13,8 V avec une capacité maximale en courant de 50 A, et que l'on dispose d'un ampèremètre dont le plus fort calibre est de 20 A, alors, en considérant que la résistance à mesurer est proche du court-circuit, on peut calculer la valeur d'une grosse résistance de puissance que l'on va devoir mettre en série avec l'alimentation pour limiter le courant du circuit à une valeur égale ou inférieure à 20 A.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{13,8}{20} = 0,7 \text{ } [\Omega]$$

Attention à la puissance dissipée dans la résistance que l'on place en série avec l'alimentation :

$$P = R \cdot I^2 = 0,7 \cdot 20^2 = 0,7 \cdot 400 = 280 \text{ } [W]$$

Pour arriver à composer une résistance de puissance de 0,7  $\Omega$  / 280 W, on peut associer plusieurs résistances en parallèle. Par exemple en associant 14 résistances de 10  $\Omega$  / 20 W, on obtient une résistance de 0,71  $\Omega$  / 280 W.

Attention à la puissance maximale de dissipation de la résistance de faible valeur que l'on veut mesurer. Si celle-ci a une résistance présumée de 0,47  $\Omega$  et a une puissance de dissipation maximale de 100 W, alors on devra limiter le courant de l'alimentation à une valeur de :

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{100}{0,47}} = 14,58 \text{ } [A]$$

Dans ce cas, on peut recalculer la valeur de la résistance de limitation en courant de l'alimentation que l'on va placer en série avec celle-ci :

$$R + R_x = \frac{U}{I} = \frac{13,8}{14,58} = 0,946 \text{ } [\Omega]$$

$$R_x = 0,47 \text{ } [\Omega]$$

$$\Leftrightarrow R = 0,946 - 0,47 = 0,476 \text{ } [\Omega]$$

Pour obtenir une résistance de limitation de courant directement supérieure à 0,476  $\Omega$  afin d'obtenir un courant limité à une valeur légèrement inférieure à 14,58 A, on peut associer 20 résistances de 10  $\Omega$  en parallèle pour arriver à 0,5  $\Omega$ . Dans ce cas, le courant sera limité à :

$$I = \frac{U}{R + R_x} = \frac{13,8}{0,5 + 0,47} = \frac{13,8}{0,97} = 14,23 \text{ } [A]$$

La puissance de dissipation de chaque résistance de 10  $\Omega$  dans une association de 20 résistance en parallèle devra être de :

$$P_{20} = R_{20} \cdot \left(\frac{I}{20}\right)^2 = 10 \cdot \left(\frac{14,23}{20}\right)^2 = 10 \cdot (0,711)^2 = 10 \cdot 0,506 = 5,06 \text{ } [W]$$

En prenant 20 résistances de 10  $\Omega$  avec une puissance de dissipation supérieure à 5,06 W, par exemple 7 W ou 10 W, on aura une résistance robuste pour la limitation de courant pour l'alimentation. La capacité de dissipation en puissance sera de 140 W ou 200 W.

Quelle sera la tension aux bornes de la résistance à mesurer et dont la valeur présumée est de 0,47  $\Omega$  ?

$$U = R \cdot I = 0,47 \cdot 14,23 = 6,69 \text{ } [V]$$

Un cas pratique vécu en industrie en 1983 : mesure de la résistance de câbles dans une aciérie électrique (four à arc) ; application de « *Kelvin connexion* »

Dans une aciérie avec un four à arc électrique, plusieurs câbles souples relient la sortie du transformateur vers les crayons de graphite qui plongent dans le four à arc. Chaque câble est placé sous une gaine étanche qui permet de refroidir le conducteur du câble au moyen d'un circuit d'eau. La valeur maximale de l'intensité du courant qui circule dans chaque conducteur est de 20.000 A (20 kA). Les câbles ont une longueur de 10 m. Ces câbles ultra-souples, composés d'un grand nombre de brins sont souvent sollicités par la descente et le remontée des crayons dans le four à arc. À la longue, on peut supposer qu'il y ait un certain nombre de ruptures dans les nombreux brins composant le câble. On dispose d'un câble neuf et d'un câble usagé dans un atelier de maintenance. On demande de mesurer la résistance d'un câble neuf et de la comparer avec celle d'un câble usagé.

Voici un véritable défi !

La méthode utilisée est la méthode aval pour une mesure d'une résistance d'une telle extrême faible valeur.

On dispose d'une alimentation (Hewlett Packard) avec un dispositif de régulation automatique de courant pour de très faibles valeurs de tension. La capacité de l'intensité maximale de régulation en courant de l'alimentation est de 50 A. L'alimentation régulée est équipée de deux galvanomètres de grande précision : un premier pour la lecture de la tension et le second pour la lecture du courant. On dispose d'un multimètre électronique de laboratoire (Fluke) qui a une capacité de lecture de 20 000 points de mesure sur une échelle de 10 V. On dispose enfin d'un amplificateur étalonné de laboratoire qui est capable d'amplifier une tension DC par un gain de  $\times 1000$  en tension (60 dB) (Analog Devices). L'entrée de l'amplificateur gain de 1000 dispose d'une entrée différentielle à haute impédance de  $2\text{ M}\Omega$ . L'amplificateur dispose d'une sortie différentielle dont l'impédance de source est de  $100\ \Omega$ . L'impédance d'entrée du multimètre électronique est de  $2\text{ M}\Omega$ .

On relie les bornes de l'alimentation au moyen de fils souples d'une section de  $10\text{ mm}^2$  directement aux extrémités du câble dont on doit mesurer la résistance. Aux extrémités du câble à mesurer, on relie deux autres conducteurs d'une section de  $2,5\text{ mm}^2$ . Ces deux conducteurs d'une section de  $2,5\text{ mm}^2$  sont reliés au plus près des connexions de raccordement des deux fils souples de la section de  $10\text{ mm}^2$  au niveau des extrémités du câble à mesurer. Les deux autres extrémités des fils de section de  $2,5\text{ mm}^2$  sont raccordées à l'entrée de l'amplificateur gain de 1000. La sortie de l'amplificateur est raccordée au multimètre électronique de laboratoire paramétré sur la fonction voltmètre (calibre de 10 V).

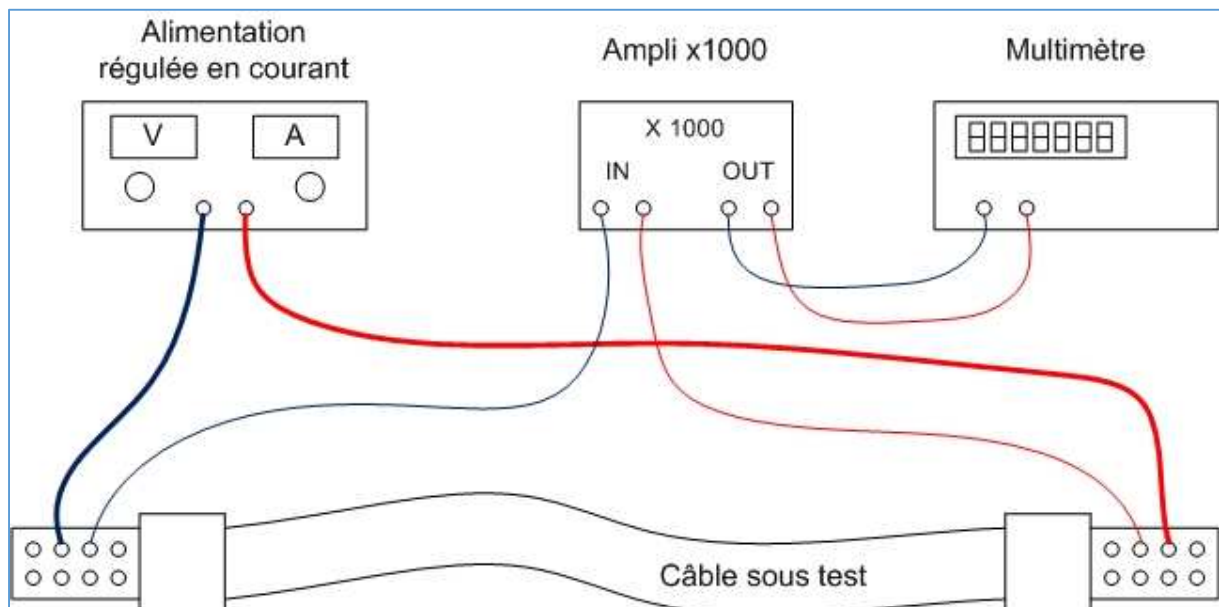


Fig. 4 : Set-up pour la mesure de la résistance d'un câble de raccordement de crayons d'un four à arc d'une aciérie. Le raccordement est du type « Kelvin connexion ». Graphisme : ON4IJ.



### Pourquoi un amplificateur gain de 1000 ?

Pour répondre à cette question, il faut commencer par examiner la résolution de mesure du multimètre électronique. 20 000 points de mesure sur une échelle de 10 V, cela représente une valeur de :

$$\frac{10}{20\,000} = 0,5 \text{ [mV par point]}$$

Si on devait mesurer une tension de l'ordre de 1 mV à 2 mV, la résolution du multimètre ne serait pas suffisante. On risquerait d'avoir une erreur de mesure inacceptable. Avec un amplificateur gain de 1000, on porte la valeur de mesure de tension de 1 V à 2 V, ce qui devient confortable sur une échelle de 10 V avec une résolution de 0,5 mV. La résolution globale de la mesure de tension avec l'amplificateur atteint 0,5  $\mu$ V.

La régulation en courant de l'alimentation est réglée sur 50 A. La lecture de ce courant est effectuée sur le galvanomètre de précision de l'alimentation. La lecture de la tension au multimètre électronique donne une valeur de 1,65 V. Cela signifie qu'on a une différence de potentiel de 1,65 mV aux bornes du câble sous test. La résistance du câble sous test est donc de :

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1,65 \cdot 10^{-3}}{50} = 33 \cdot 10^{-6} \text{ [\Omega]} = 33 \text{ }\mu\Omega$$

### Quelle puissance est dissipée dans le câble lors des maxima de courant de 20 000 A ?

$$P = R \cdot I^2 = 33 \cdot 10^{-6} \cdot (20 \cdot 10^3)^2 = 33 \cdot 10^{-6} \cdot 400 \cdot 10^6 = 33 \cdot 400 = 13,2 \cdot 10^3 \text{ [W]} = 13,2 \text{ [kW]}$$

Avec une telle puissance dissipée dans le câble, on comprend pourquoi ceux-ci sont refroidis à l'eau.

Le dispositif de raccordement du câble sous test est du type « *Kelvin connexion* », en d'autres mots, on réalise une mesure à quatre points. Les deux premiers points sont ceux du raccordement de l'alimentation en courant, les deux autres points sont ceux du raccordement du voltmètre. Les points doivent être aussi proches que possible deux à deux. En effet, de cette façon, on n'est pas perturbé par la chute de tension qui a lieu dans les conducteurs souples de raccordement entre l'alimentation en courant et le dispositif sous test. On prélève la différence de potentiel directement aux bornes du câble sous test.

### Conclusions

Les méthodes de mesure voltampèremétriques « amont » et « aval » pour déterminer la valeur d'une résistance sous test doivent être choisies d'une manière appropriée en fonction de la résistance interne de l'ampèremètre, de celle du voltmètre et de la valeur de la résistance sous test à mesurer. Il y a lieu de choisir la méthode « Amont » pour la mesure de résistances de valeurs élevées et la méthode « aval » pour la mesure de résistances de valeurs faibles.

Les mesures à quatre points (*Kelvin connexion*) sont très efficaces pour la mesure de résistances très faibles, comme par exemple celles des *Shunts* de mesure.