PREMIER MINISTRE

COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

Mesures de contraintes par jauges à fil résistant en présence de champ magnétique

par

G. ARMAND et J. LAPUJOULADE

Rapport CEA n° **1710**

CENTRE D'ETUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY

CEA 1710 - ARMAND G., LAPUJOULADE J.

Note sur les mesures de contraintes par jauges à fil résistant en présence de champ magnétique (1960).

Sommaire. — La technique de mesure de contraintes par jauges à fil résistant est bien connue. Elle présente de nombreux avantages, beaucoup de possibilités, bien que n'étant pas encore parfaite.

En présence de champ magnétique, la mesure est perturbée par un certain nombre de phénomènes dont nous avons été conduits à chiffrer l'ordre de grandeur afin de connaître l'erreur commise lors de la mesure. Précisons qu'il s'agissait pour nous de mesurer les contraintes sur les différents organes de l'aimant du synchrotron Saturne. L'on sait que la valeur de l'induction au droit de l'entrefer passe d'une valeur sensiblement nulle à 15 000 gauss en 0,8 secondes, pour revenir ensuite à zéro pendant un temps égal au précédent; le cycle ci-dessus se reproduit toutes les 3,2 secondes.

Afin de séparer les effets, nous examinerons d'abord le problème des mesures en champ statique puis nous étendrons les résultats obtenus au cas des champs dynamiques.

CEA 1710 - ARMAND G., LAPUJOULADE J.

Notes on the measurement of stress by resistance gauges in the presence of a magnetic field (1960).

Summary. — The technique of stress measurement by resistance gauges is well known. Although it is not yet perfect it possesses many advantages and shows great possibilities.

In the presence of a magnetic field the measurement is perturbed by certain phenomena, and we have undertaken to calculate their order of magnitude with a view to establishing the error involved in the measurement. Our problem was to measure the stresses on the various parts of the magnet in the synchrotron Saturne. It is known that the induction passes from a value of about nil to 15 000 gauss in 0.8 second, and returns to zero in the same time interval; this cycle recurs every 3.2 seconds.

In order to isolate the effects the problem of measurements in a static field will be examined first, after which the results obtained will be extended to the case of dynamic fields.

MESURES DE CONTRAINTES PAR JAUGES A FIL RÉSISTANT EN PRÉSENCE DE CHAMP MAGNÉTIQUE

par

G. ARMAND et J. LAPUJOULADE

Service de physique appliquée, Centre d'études nucléaires de Saclay

La technique de mesure de contraintes par jauges à fil résistant est bien connue. Elle présente de nombreux avantages, beaucoup de possibilités, bien que n'étant pas encore parfaite.

En présence de champ magnétique, la mesure est perturbée par un certain nombre de phénomènes dont nous avons été conduits à chiffrer l'ordre de grandeur afin de connaître l'erreur commise lors de la mesure. Précisons qu'il s'agissait pour nous de mesurer les contraintes sur les différents organes de l'aimant du Synchrotron Saturne. L'on sait que la valeur de l'induction au droit de l'entrefer passe d'une valeur sensiblement nulle à 15 000 gauss en 0,8 seconde, pour revenir ensuite à zéro pendant un temps égal au précédent ; le cycle ci-dessus se reproduit toutes les 3,2 secondes.

Afin de séparer les effets, nous examinerons d'abord le problème des mesures en champ statique puis nous étendrons les résultats obtenus au cas des champs dynamiques.

I. — Champs statiques.

1.1. — Si l'on applique sur l'une des jauges d'un pont de mesure, un champ magnétique constant, l'on constate un déséquilibrage fixe du pont. Ce phénomène aura pour effet de fausser les mesures de contraintes que l'on aura à effectuer : il s'agit donc de le chiffrer et mieux encore de trouver une disposition telle qu'il soit rendu négligeable.

1.2. — Pour effectuer la mesure de cette perturbation, on dispose l'une des jauges du pont, collée sur un matériau amagnétique sans effet magnétostrictif (cuivre, plexiglass, ...) dans l'entrefer d'un électroaimant, la jauge de la branche voisine, dite jauge de compensation, collée sur le même matériau, étant soit placée en dehors du champ, soit dans le champ.

Dans ce dernier cas, l'on veille à ce que les deux jauges soient orientées de la même façon par rapport à la direction du champ et placées toutes deux dans une zone où le champ est constant.

Aucune contrainte n'est appliquée sur chacun des supports. Les deux jauges sont prélevées dans le même lot de fabrication et ont pour caractéristiques :

$$R = 120\ \Omega \qquad K = 2$$

L'on excite l'aimant et l'on attend avant de faire la mesure que les phénomènes transitoires dus à la période d'établissement du champ soient effacés.

L'on passe d'une valeur de champ à une autre sans revenir à une valeur nulle. Les mesures sont effectuées pour chaque valeur choisie, dans le sens des champs croissant et décroissant.

Les valeurs moyennes obtenues sont consignées dans le tableau ci-dessous, les champs étant exprimés en gauss et les valeurs observées exprimées en $\frac{\Delta l}{l}$ équivalent, en unités de 10^{-6}.

Provenance	Dispositions des jauges	Champ					
		2.600	6.000	10.000	14.000	16.000	20.000
1	1 jauge perpend. au champ	8	70	95	110	130	185
1	1 jauge parall. au champ	4	12	18	22	28	35
1	2 jauges perpend. au champ	sensiblement linéaire					5
1	2 jauges parall. au champ	—	—				5
2	1 jauge perpend. au champ	2	8	10	12	16	20
2	1 jauge parall. au champ	5	8	10	12	15	20
2	2 jauges perpend. au champ	sensiblement linéaire					3
2	2 jauges parall. au champ	—	—				3

On voit que l'on a expérimenté sur des jauges provenant de deux fabricants (provenance 1 et 2), et sur deux orientations des capteurs par rapport au champ : jauge dont le plan est orthogonal à la direction du champ, jauge dont le plan est parallèle à la direction du champ, celui-ci étant orthogonal à la plus grande dimension de la jauge.

1.3. — Avant de discuter les résultats ci-dessus, il est nécessaire de faire remarquer que les valeurs données sont des ordres de grandeur pour les raisons suivantes :

1.3.1. — Il semble qu'il y ait une dispersion des valeurs mesurées d'un lot de fabrication à l'autre pouvant atteindre en $\frac{\Delta l}{l}$ équivalent plusieurs unités de 10^{-6}. Il serait nécessaire d'effectuer un assez grand nombre de mesures afin de déterminer une moyenne et une dispersion.

1.3.2. — Pour une même paire de jauge, les valeurs mesurées ne sont pas strictement reproductibles. D'une part, les valeurs observées dans le sens des champs croissants sont en général plus faibles que celles relevées dans le sens des champs décroissants. D'autre part, les valeurs diffèrent d'une série de mesure à une autre. Ceci est dû en partie à la difficulté d'obtention de champs reproductibles mais n'explique pas pour autant l'hystérésis et la dispersion constatées. Il est utile de remarquer que cette hystérésis et cette dispersion sont réduites lorsque les deux jauges sont placées dans le champ du fait même de la réduction d'amplitude des phénomènes et que, dans ce cas, tout au moins pour les valeurs faibles de champ, nous sommes à la limite de la sensibilité des appareils de mesure.

1.4. — On voit à la lecture des résultats que :

1.4.1. — Le $\frac{\Delta l}{l}$ équivalent mesuré dépend de l'intensité du champ. Il semble difficile de lier les valeurs de $\frac{\Delta l}{l}$ aux valeurs de H par une relation correcte.

Dans le 2e cas (provenance 1, 1 jauge parallèle au champ) une loi linéaire $\frac{\Delta l}{l} = \alpha H$ ($\alpha = 17\ 10^{-10}$) semble donner des résultats concordants. Dans le 6e cas (provenance 2, 1 jauge parallèle au champ) la loi devrait être de la forme $\frac{\Delta l}{l} = \beta H + C^{te}$.

Dans le 1er et le 5e cas, une loi parabolique semblerait la mieux adaptée, les valeurs en champ faible étant toutefois aberrantes.

Il paraît donc impossible de donner une loi générale valable dans tous les cas surtout si l'on tient compte des réserves indiquées en 1.3.

Signalons que Takaki et Tsuji (*) donnent, pour des jauges en constantan et des champs limités à 2 000 Gauss, une loi parabolique $\frac{\Delta R}{R} = kH^2$.

Ces auteurs étudient d'ailleurs le phénomène dans un domaine de température de — 180°C à + 100°.

1. 4. 2. — L'effet constaté dépend de l'orientation de la jauge par rapport au champ pour les jauges de la provenance 1, tandis que pour celles de la provenance 2 l'effet directif n'existe pas.

1. 4. 3. — L'influence du champ est plus ou moins importante selon la provenance des jauges. Ceci est dû certainement à la nature des alliages employés, aux différentes méthodes de fabrication (écrouissage du fil plus ou moins prononcé...).

1.4.4. — Dans tous les cas où deux jauges sont placées dans le champ, dans les conditions indiquées en 1.2, les valeurs relevées sont faibles et se traduisent par une erreur max en $\frac{\Delta l}{l}$ de $5\ 10^{-6}$ soit sur acier par une contrainte de 0,1 kg/mm².

Dans la majorité des cas, une erreur systématique maxima de cette importance peut être tolérée.

1.5. — On sait que les jauges à fil résistant sont en général fabriquées à la partir d'alliage de Nickel, métal ferro-magnétique.

Sans vouloir expliquer tous les phénomènes constatés on peut penser que :

1.5.1. — La résistivité du métal constituant l'alliage varie avec la valeur du champ (phénomène de magnétorésistance). Ce phénomène a été étudié sur des métaux ferromagnétiques et leurs alliages; d'une manière générale, il a été constaté sur tous les métaux, la variation de résistance ne devenant mesurable que pour des champs très intenses (nettement plus élevés que ceux avec lesquels nous avons expérimenté).

L'amplitude du phénomène varie avec la nature de l'alliage (pourcentage de métal ferromagnétique) mais aussi avec la valeur de la contrainte appliquée au métal.

1.5.2. — Les fils constituants la jauge sont soumis à des efforts d'ordre :

— électrodynamique proportionnel au champ ;
— magnétique, la perméabilité de l'alliage étant certainement supérieure à l'unité.

Ces efforts tendront à déformer la jauge d'une façon différente dans les deux cas d'orientation que nous avons choisis.

1.5.3. — Étant donné les ordres de grandeur des phénomènes indiqués ci-dessus, il semble probable que le premier soit nettement prépondérant

1. 6. — Du point de vue qui nous intéresse principalement ici, c'est-à-dire du point de vue mesure, il apparaît donc que ces effets seront réduits à des valeurs faibles ($\frac{\Delta l}{l} = 5\ 10^{-6}$ maximum pour 20 000 Gauss) à condition de soumettre une jauge de compensation aux mêmes valeurs de champ que la jauge active et suivant la même orientation. Ces deux capteurs seront prélevés dans le même lot de fabrication, la jauge de compensation étant alors collée sur un matériau amagnétique de coefficient de dilatation aussi voisin que possible de celui du matériau sur lequel la jauge active est collée.

En toute rigueur, pour estimer l'erreur de mesure commise, il serait nécessaire de préciser l'influence des contraintes sur le phénomène de magnétorésistance (voir 1.5.1), ceci ne jouant bien entendu que sur la jauge active sans possibilité d'obtenir d'une façon simple, une bonne compensation.

(1) *Journal of Physical Society of Japan*, 1958, 13, 11, 1406.

Dans le cas qui nous préoccupait, les contraintes étant faibles (1 à 2 kg /mm²) nous avons estimé ce dernier effet comme étant négligeable.

2. — Champs dynamiques.

2. 1. — Aux effets précédemment décrits, il faut ajouter les perturbations créées par la force électromotrice induite dans la boucle que constitue le capteur et les conducteurs de raccordement aux appareils de mesure. On sait que cette force électromotrice est donnée par la formule suivante, à un facteur numérique près dépendant des unités choisies :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \iint_S \frac{dB}{dt} \, ds$$

Φ étant le flux magnétique embrassé par la boucle. On voit immédiatement que l'on a intérêt à choisir des jauges dont la surface de boucle soit la plus faible possible et à effectuer les raccordements aux conducteurs de liaison de manière que cette surface soit réduite au minimum.

2. 2. — Afin de compenser cette force électromotrice induite et comme précédemment (voir 1.6) pour les champs statiques l'on placera une jauge de compensation dans une région où elle sera soumise au même champ que la jauge active (donc au même $\frac{dB}{dt}$), ces deux jauges étant orientées de la même façon par rapport au champ et prélevées dans le même lot de fabrication.

Ceci revient, pour les régions de champ à faible gradient, à les placer aussi voisine l'une de l'autre que possible.

2. 3. — Malgré les précautions prises pour obtenir une bonne compensation de la force électromotrice induite, un effet parasite subsiste dû aux inégalités de flux traversant les deux boucles.

On peut minimiser cet effet parasite en effectuant la mesure de la façon suivante :

soit n la contrainte à mesurer ;

soit b l'effet parasite.

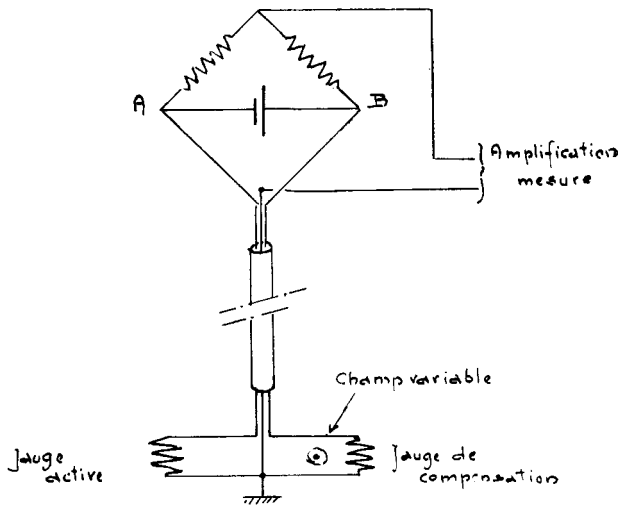
On effectue une première mesure selon la disposition indiquée par la figure 1.

On recueille une grandeur électrique proportionnelle à $n + b$ par exemple.

On intervertit les connexions de jauge aux bornes des résistances fixes du pont (points A et B) sans toucher aux jauges et en déplaçant au minimum les conducteurs de raccordements.

On rééquilibre le pont et on effectue une deuxième mesure ; on recueille alors une grandeur électrique proportionnelle à $- n + b$.

La moyenne de la différence des deux mesures permet d'éliminer le parasite b.



3. — Nous avons effectué de cette façon les mesures de contraintes sur l'électro-aimant du Synchrotron Saturne.

Le champ varie au droit de l'entrefer de 0 à 15 000 Gauss avec une vitesse $\frac{dB}{dt}$ de l'ordre de 20 000 G /s.

Pour ces valeurs et des contraintes ne dépassant pas 2 kg /mm², nous avons limité les erreurs de mesure à un $\frac{\Delta l}{l}$ maximum de 7 10^{-6} soit sur acier, une contrainte de 0,14 kg /mm².

4. — Il ne nous paraît pas inutile de souligner en terminant que l'erreur de mesure introduite par les effets de champ doit être mesurée dans chaque cas particulier car elle dépend :

— des jauges utilisées ;

— de la valeur maximum du champ ;

— dans le cas dynamique, de la valeur de $\frac{dB}{dt}$;

— et certainement, bien que nous n'ayons pas eu la possibilité de le mettre en évidence, du taux de contrainte à mesurer.