

Recherche d'un coefficient de magnétostriction par interférométrie

L'objectif de cette expérience est d'obtenir le coefficient de magnétostriction en fonction du champ H appliqué pour des échantillons en forme de tube de diamètre 10 mm. Les échantillons disponibles sont en fer Armco (fer pur) et en nickel. Pour cela, on va fixer l'un des miroirs d'un interféromètre de Michelson sur l'une des extrémités du tube à tester, l'autre étant maintenue immobile.

Le solénoïde est dimensionné afin d'avoir H suffisamment homogène sur toute la longueur de l'échantillon, ce dernier devant être suffisamment long pour que l'allongement caractérisé permettant de remonter à la magnétostriction confère une résolution suffisante.

L'interféromètre de Michelson

Pour observer les faibles allongements (qq μm) mis en jeux dans l'expérience proposée, on peut choisir d'utiliser un interféromètre de Michelson.

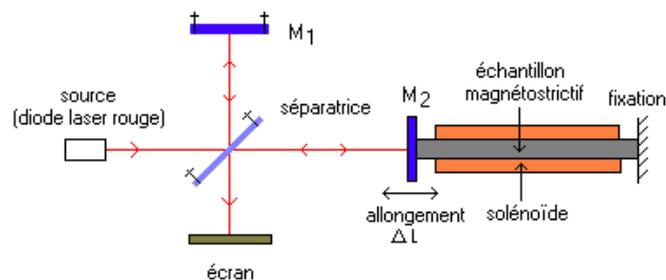
Source lumineuse utilisée :

Compte tenu de la précision recherchée et afin que les réglages soient assez rapides on utilisera une diode laser rouge (longueur d'onde λ de l'ordre de 625 nm).

rq : Il faut noter que dans ce type d'expérience, lorsque l'on cherche à mesurer l'allongement du trajet optique sur un bras de l'interféromètre, la résolution augmente lorsque la longueur d'onde de la source diminue... Cette dernière vaut en effet $\lambda/2$.

Géométrie du dispositif :

Dans la mesure où il est difficile de faire des réglages sur le miroir fixé sur l'échantillon à analyser, on choisit de rajouter un miroir M_c en plus des miroirs M_1 et M_2 . Globalement, on obtient donc un système de structure suivante :



On va chercher à faire en sorte que M_2 et M_1 soient perpendiculaires afin d'observer des anneaux. Une fois cette configuration obtenue, on va augmenter le courant dans le solénoïde afin d'augmenter le champ H . Avec l'évolution de H , le barreau à étudier va changer de longueur (se dilater ou se contracter suivant les cas et les matériaux). L'une des extrémités du barreau étant fixée, l'autre, celle où est fixé le miroir, va se déplacer. Entre deux maxima successifs au centre des anneaux, le miroir M_2 s'est déplacé de $\lambda/2$.

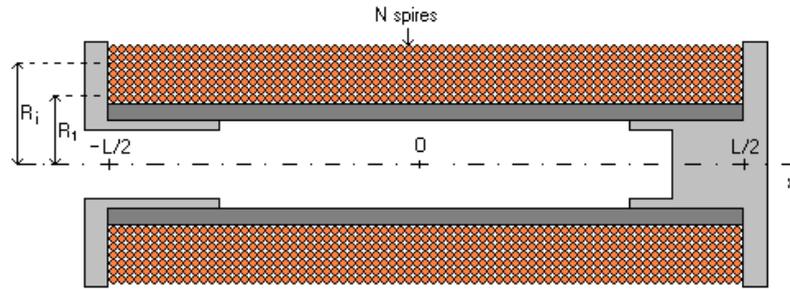
Caractéristiques du solénoïde

I. Conception.

Le solénoïde est réalisé à partir d'un fil émaillé de cuivre de diamètre 1mm (section 0.78 mm^2). Le bobinage est enroulé sur une longueur de 500mm avec 12 couches de 500 spires. Les 12 couches ont un rayon maximum qui va de 9mm à 20mm par pas de 1mm. Les 6000 spires environ, représentent au total une longueur de 550 mètres environ soit masse de cuivre de 4 kg environ. La résistance électrique de ce circuit devrait avoisiner 12 Ω .

La longueur de l'échantillon à étudier a été choisie afin que ce dernier reste dans une zone où le champ reste supérieur à 90% de sa valeur maximale.

Pour définir les paramètres du bobinage, on se basera sur la figure suivante :

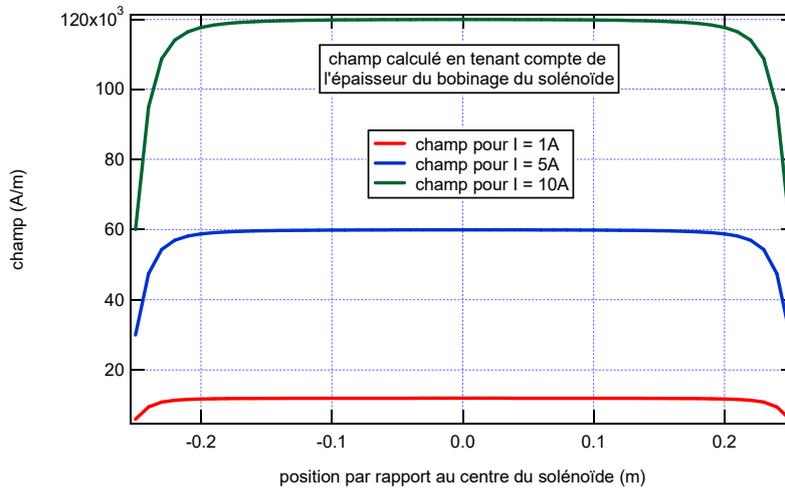


Pour le calcul, on a tenu compte de l'épaisseur de bobinage, ce qui signifie que l'on a utilisé la formule

$$H(x) = \frac{N.I}{2.L} \cdot \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{L/2 - x}{\sqrt{(L/2 - x)^2 + R_i^2}} + \frac{L/2 + x}{\sqrt{(L/2 + x)^2 + R_i^2}} \right)$$

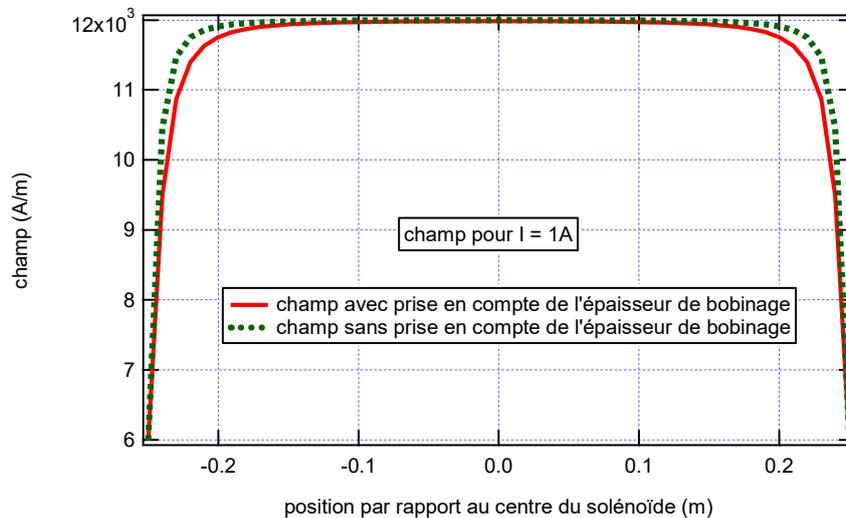
avec R_i prenant des valeurs comprises entre 9mm et 20mm par pas de 1mm

On obtient alors des profils d'allure suivante :

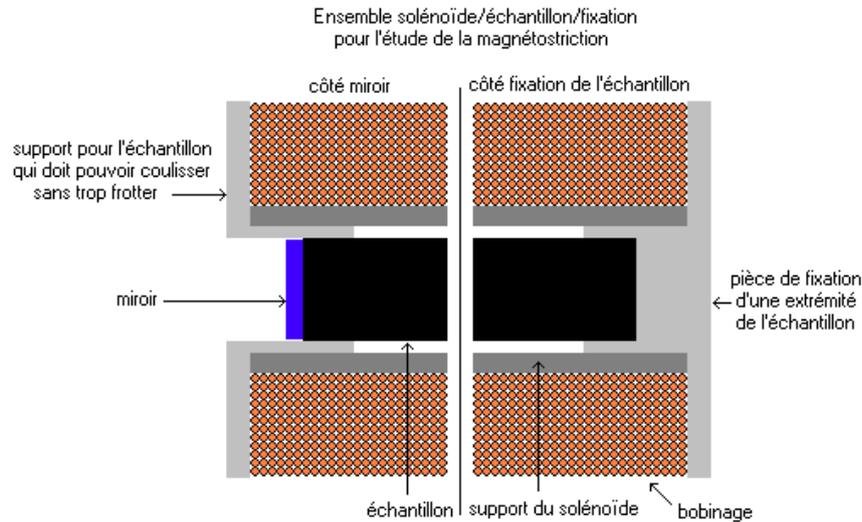


Compte tenu de ces courbes, on prendra un échantillon à tester de 44 cm de long, afin d'avoir un champ H relativement homogène sur toute la longueur de ce dernier. Au pire, on tolérera moins de 10% d'écart sur les bords par rapport au centre.

rq: on constate que le fait de ne pas prendre en compte l'épaisseur du bobinage modifie notablement le profil de champ en sortie de solénoïde.



Au final, la structure retenue pour associer échantillon, solénoïde et miroir est résumée sur le schéma suivant:



rq : Pour atteindre des champ suffisants pour observer des phénomènes intéressants, il faudra délivrer au moins 5A. Compte tenu de la résistance du bobinage (une dizaine d'ohms), il faudra une alimentation qui monte assez haut en tension (un peu plus de 50V).

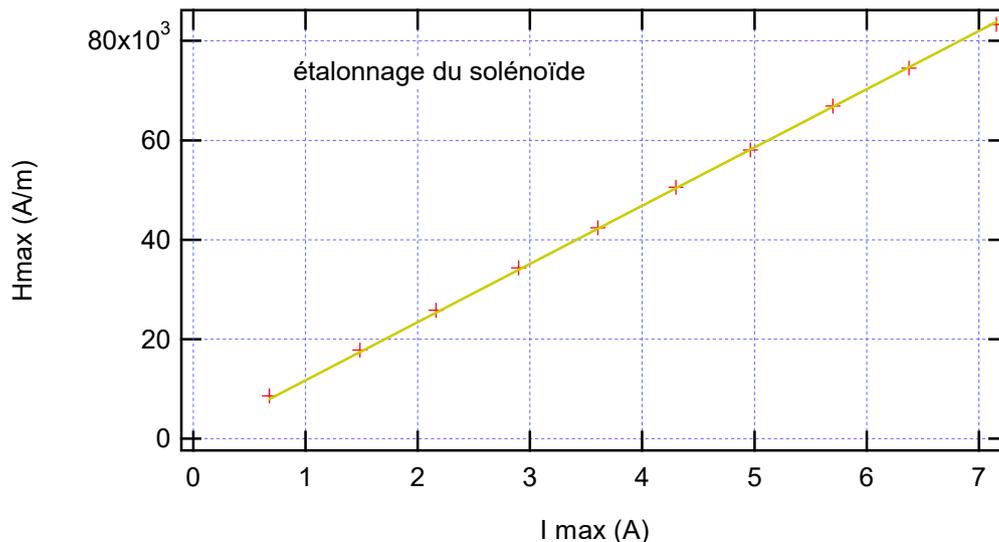
II. Système réalisé.

Le bobinage a été réalisé sur 12 couches comme prévu. Avant de l'utiliser, nous avons réalisé différents essais afin de mieux le caractériser.

II.1. Relation entre le champ dans la zone homogène et le courant injecté.

L'étalonnage du solénoïde a été réalisé avec une bobine de mesure de 128 spires circulaires de 10 mm de diamètre ce qui conduit à un produit du nombre de spires par la section de 10^{-2} m^2 .

Le capteur d'étalonnage étant inductif, l'étalonnage a été effectué à 50 Hz sur le secteur, en veillant à ne pas dépasser 5A efficaces, afin de ne pas provoquer d'échauffement trop important dans le circuit. La caractéristique reliant le champ dans le solénoïde (supposé uniforme sur toute la section droite, quelle que soit la position, pourvu que l'on soit assez loin des bords) au courant injecté dans le bobinage est la suivante :



En réalisant un ajustement linéaire, on obtient la caractéristique suivante :

$$H_{\max} = (11712 \pm 30) \cdot I_{\max}$$

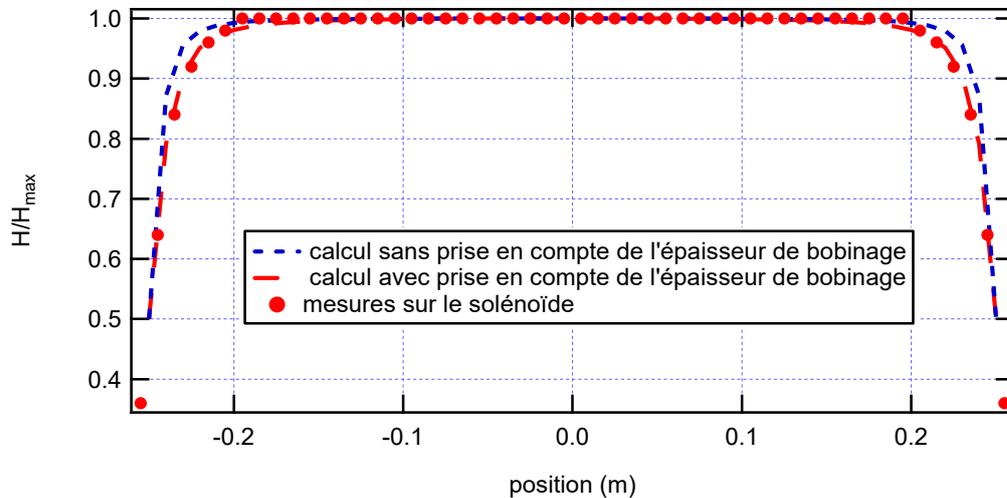
si H est en A/m et I en A.

D'après les calculs, on aurait dû obtenir $H_{\max} = 12000 \cdot I_{\max}$. La différence s'explique par le fait que les spires n'étant pas strictement jointives, le bobinage est légèrement moins dense que prévu. Ceci étant, la gamme

d'exploration en champ sera suffisante pour mener à bien des expériences sous quelques dizaines de milliers d'A/m sans avoir d'échauffement insupportable pour le bobinage.

II.2. Homogénéité du champ dans le solénoïde.

Avec un Teslamètre, on a également relevé l'évolution du champ axial (supposé uniforme sur toute section droite) en fonction de la position dans le solénoïde. On a obtenu les résultats suivants :



II.3. Résistance et inductance de bobinage.

La résistance du bobinage du solénoïde a été mesurée et vaut $11,6 \Omega$ ce qui est conforme à ce qui était attendu. Pour atteindre des champs de quelques dizaines de milliers d'ampères par mètre, il faudra appliquer des courants de quelques ampères (jusqu'à 8 A au maximum, sur quelques secondes, compte tenu des limites dues aux échauffements). Pour cela, les alimentations stabilisées utilisées devront délivrer des tensions suffisantes.

Le temps de réponse à 63% du courant dans le solénoïde avec à un échelon de tension vaut 9.6ms. Ce test a été fait en présence de l'échantillon. Connaissant la valeur de la résistance, on en déduit l'inductance du solénoïde qui vaut alors 110 mH environ. Cette inductance impose donc, d'attendre 50 ms environ pour appliquer le niveau de courant voulu (en considérant 5 constantes de temps). Compte tenu du protocole d'expérience suivi, ce temps d'application du courant ne pose aucun problème, ce que l'on constate d'ailleurs expérimentalement.

Relevé expérimental de l'allongement relatif du tube en fonction du champ d'excitation

I.Réflexion préalable.

On fait défiler un nombre d'anneaux fixé et on mesure le courant qu'il a fallu appliquer pour obtenir ce résultat.

Expérimentalement, on procède de deux façons à chaque fois. La première consiste à compter les anneaux qui défilent à l'œil. La seconde consiste à récupérer simultanément le courant dans le solénoïde et la tension image du courant délivré par une photodiode placée au centre des anneaux et à en déduire la valeur du courant appliquée pour chaque anneau qui a défilé.

Tant que le courant est assez faible, les deux façons de procéder sont équivalentes. Mais dès que le courant dans le solénoïde dépasse l'ampère il faudra tenir compte des effets de la dilatation thermique qui va contribuer à un déplacement du miroir qui n'a rien à voir avec la magnétostriction. Dans notre cas, il semble que le se dilate miroir se déplace comme si on avait une contraction longitudinale. En effet, expérimentalement, on observe que les anneaux défilent dans le même sens que quand on augmente le champ pour de fortes valeurs, avec le « Nickel » et avec le « Fer ».

Avec la première approche, il faut faire en sorte, dès que l'on observe des anneaux qui défilent en l'absence de variation de champ, de laisser le système prendre une température stable. Pour ça, on attend que les anneaux arrêtent de défiler. On peut alors augmenter à nouveau le champ et compter les anneaux qui défilent. Très vite la variation de température va poser problème et il faudra à nouveau attendre que la température se stabilise... on recommence cette démarche jusqu'à la valeur de champ souhaitée. Le principal défaut de cette méthode, c'est que la température met plusieurs minutes à se stabiliser... La méthode est assez fastidieuse.

Avec la seconde approche, en une dizaine de seconde, on a fait défiler tous les anneaux souhaités, et il reste à dépouiller les fichiers de points acquis pour en déduire la courbe souhaitée... Tant que le courant dans le solénoïde ne prend pas de valeur trop élevée, on peut supposer que l'effet de l'élévation de température n'a pas

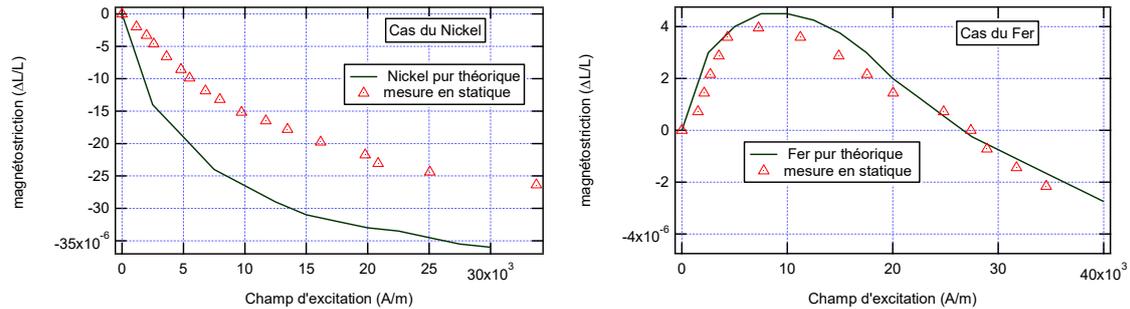
trop d'effet sur le nombre d'anneaux qui ont défilé. Ceci étant, il faut s'attendre à avoir de plus en plus d'erreur due à la dilatation quand on va augmenter le champ.

II. Résultats obtenus.

Expérimentalement, nous avons testé le dispositif avec un barreau de fer Armco et un barreau de nickel. Nous avons utilisé deux approches. L'une en augmentant manuellement le courant et point à point et l'autre en produisant une rampe de courant suffisamment courte pour limiter les effets liés à l'augmentation de température avec l'augmentation du courant.

II.1. Première approche : Comptage du défilement des anneaux à l'œil.

On obtient les courbes suivantes :



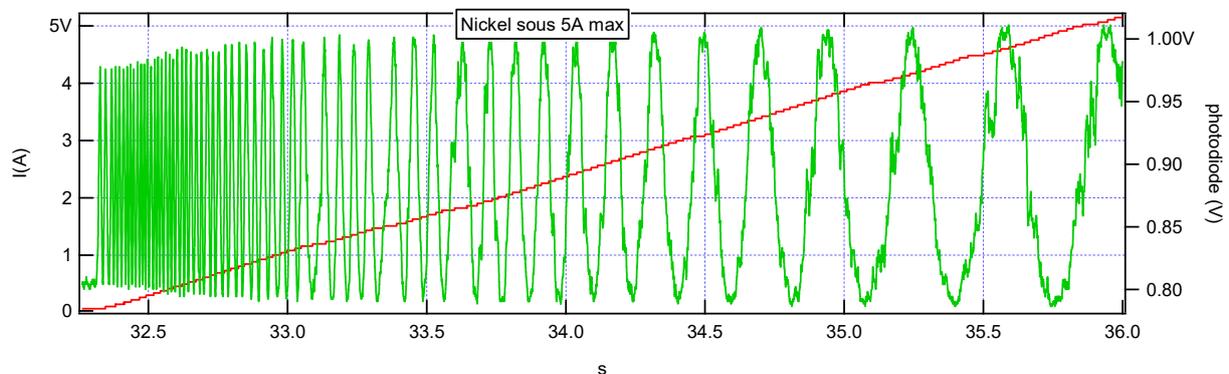
Pour le Barreau de Nickel, on trouve bien une contraction de l'échantillon. En revanche, la contraction relative est beaucoup plus faible que ce qui est attendu pour le nickel pur. Il est probable que le barreau employé n'est pas pur et comporte du fer, ce qui explique une contraction plus modérée que pour le matériau pur.

Pour le barreau de fer Armco, on observe un allongement de l'échantillon pour les faibles valeurs de champ et une contraction pour les valeurs plus importantes, conformément à ce qui est attendu pour le fer pur. Le maximum d'allongement a bien lieu pour la valeur de champ attendue. De même, avec la mesure à l'œil, on constate que le barreau revient à la longueur initiale pour la bonne valeur de champ.

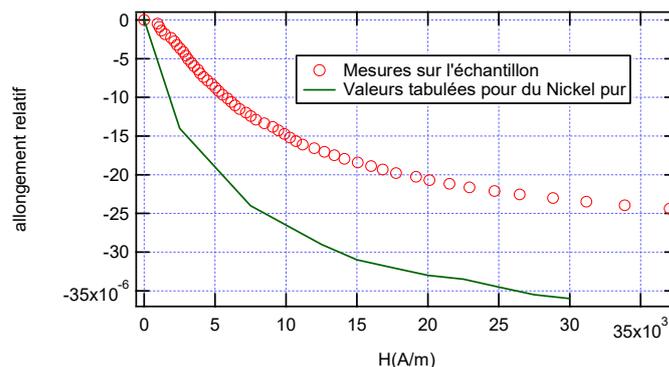
II.2. Comptage du défilement d'anneaux avec une photodiode et en appliquant une rampe de courant.

Remarque : pour faire des variations rapides de courant, on pourrait être tenté d'alimenter le solénoïde avec un autotransformateur délivrant le courant nécessaire sur 50Hz. En pratique, cette approche ne fonctionnera pas, car le fonctionnement à 50Hz provoque des vibrations qui ne sont pas compatibles avec des mesures par interférométrie sur les longueurs d'onde optique. On fera donc la rampe de courant manuellement avec une alimentation délivrant le courant nécessaire, en faisant attention de ne pas dépasser le courant supporté par le solénoïde.

Sur la figure suivante ; on présente la réponse d'une photodiode en vert ainsi que l'image du courant avec une rampe montant à 5A en 4 secondes environ en rouge. **En pratique, vous ne dépassez pas 3A quand vous ferez l'expérience afin de ne pas détériorer le solénoïde**

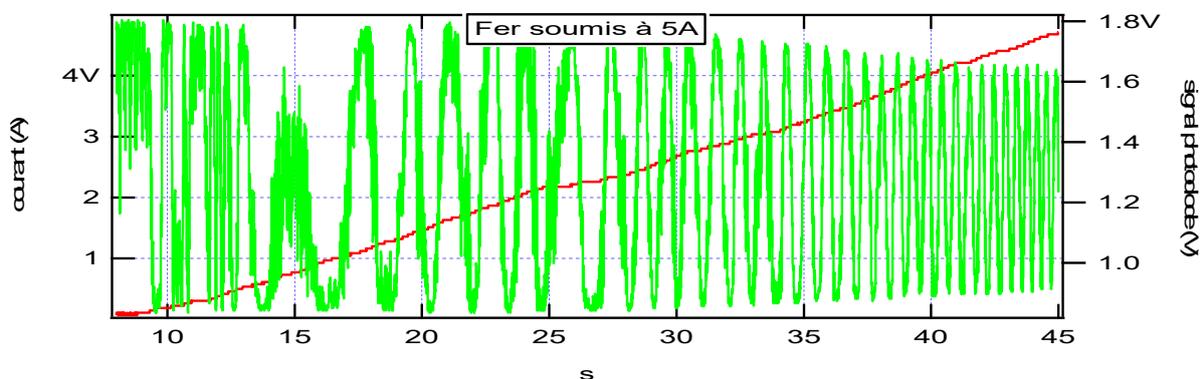


Dans ce cas, l'interprétation est un peu longue mais reste simple. On compte un décalage de $\lambda/2$ entre deux maxima successifs. Avec une diode laser bleue, on aura ainsi un peu plus de résolution qu'avec une diode rouge. C'est ce qui a été fait ici.

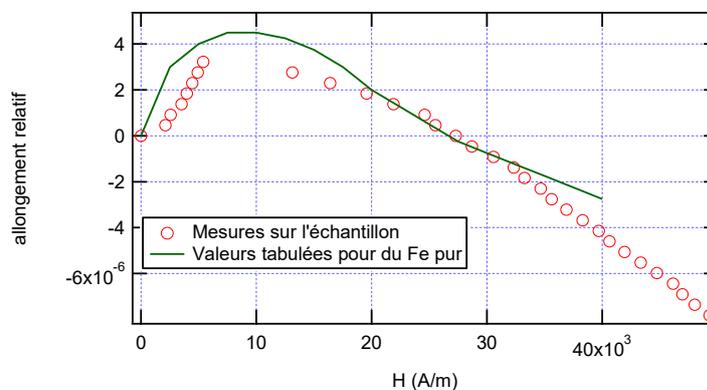


Néanmoins, la courbe d'évolution de la longueur avec H étant monotone décroissante pour le nickel, on obtiendrait des résultats très satisfaisants avec une diode rouge.

Pour du fer, le barreau se dilate puis se contracte. Il faut donc noter rapidement à la main au bout de combien d'anneaux le comportement s'inverse pour pouvoir ensuite interpréter le signal de la photodiode correctement. En pratique, avec un laser bleu, c'est en moins de 10 anneaux.



On arrive à un allongement relatif avec le champ qui évolue de la façon suivante :



Sur cette figure, la rampe ayant été assez longue (plus de 30s), il est probable que les derniers points sont affectés par les effets de température. La comparaison avec les valeurs tabulées va en ce sens puisque les anneaux permettent d'observer une contraction plus rapide avec H sur les mesures que sur les valeurs tabulées. Pour les premières mesures, les allures ne concordent pas, mais le signal est très bruité. Globalement, pour l'étude du fer, l'approche avec un comptage à l'œil du défilement semble plus satisfaisante.

Remarque : comment présenter cette expérience à l'agrégation ?

Pour cette expérience, le fer est plus intéressant que le nickel vu que le phénomène change de signe quand H augmente. L'inversion peut être observée pour des courants suffisamment faibles pour que les effets de température ne soient pas trop importants. Il est donc préférable, pour aller vite de tracer la courbe en comptant à l'œil et d'aller un peu au-delà du point où le sens de défilement des anneaux change de signe, c'est-à-dire jusqu'à 20000 A/m environ. Les mesures de préparation étant faites, on laisse le système refroidir et pour l'exposé, on reprend un point dans la phase de dilatation, avant de montrer qu'au-delà, le phénomène s'inverse pour une valeur proche de 10000 A/m.