

Introduction au magnétisme

Principes élémentaires

L'examen de radioamateur est basé en Suisse (et dans la CEPT) sur la recommandation T/R 61-02 de la CEPT. Ce document délimite les sujets de l'examen de radioamateur.

Sur la question du magnétisme, ce document mentionne :

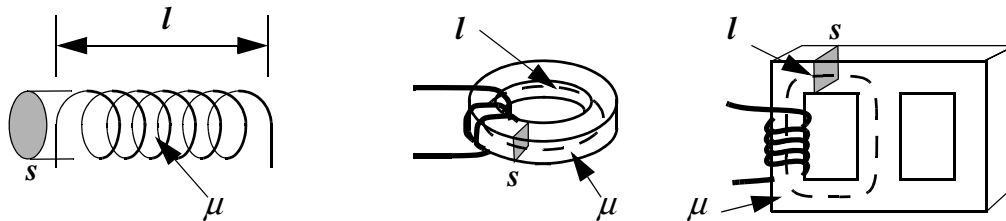
- *Magnetic field surrounding live conductor* (Champ magnétique autour d'un conducteur parcouru par un courant).
- *Shielding of magnetic fields* (Blindage contre les champs magnétiques).

Ces deux sujets sont traités dans le cours. Cependant, l'OFCOM, pour des raisons qui lui sont propres, va bien au delà de ces sujets dans ses questions d'examen. C'est pourquoi le présent document introduit des notions de magnétisme suffisantes pour aborder sereinement ces questions de l'OFCOM.

Essentiellement basé sur la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=Z4iE3aaNeTM>

Commençons d'abord par définir quelques termes de base.

Longueur [l] en mètre (m) : longueur du circuit magnétique, dans le cas d'une bobine (longue) ou dans le cas d'un tore par exemple ou dans le cas du circuit magnétique d'un transformateur.



Surface [s] en mètre carré (m^2) : surface d'une spire de la bobine ou section du noyau dans le cas d'un tore ou d'un transformateur.

Perméabilité [μ] en Tesla · mètres / ampères ($T \cdot m/A$)¹. La perméabilité est composée de deux grandeurs, la perméabilité du vide μ_0 , qui vaut $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} T \cdot m / A$ et μ_r qui est sans unité et qui est une caractéristique du matériau du noyau. μ_r vaut ~ 1 pour l'air et le vide (voir tableau ci-dessous).

La perméabilité μ totale vaut $\mu_0 \cdot \mu_r$

Spire ou tour [N] : le nombre de spire d'une bobine, soit d'un solénoïde, soit sur un tore, soit tel l'enroulement d'un transformateur.

Courant [I] en ampères (A) : le courant dans le conducteur de la bobine.

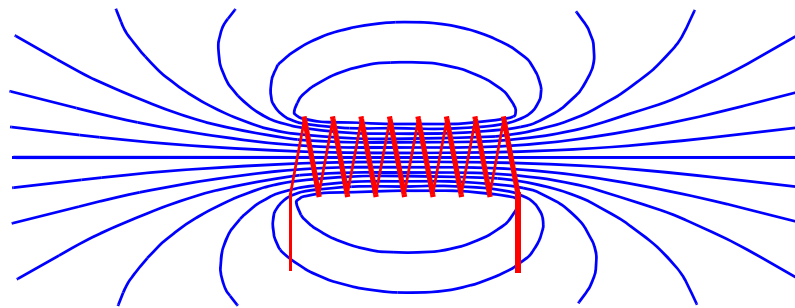
1. Ou ce qui est équivalent en H / m (Henry par mètre).

Principe de base.

Un courant qui circule dans un conducteur génère un champ magnétique autour de ce conducteur. Ce champ magnétique est plus intense aux abords immédiats du conducteur et diminue avec la distance. Ce champ magnétique est mesuré en Ampères / mètre [A / m]. Dans ce cas, la longueur en mètres dont il est question est la distance du fil à laquelle on considère le champ magnétique ; en effet, plus on s'éloigne du conducteur, plus le champ magnétique diminue, c'est pourquoi la distance est au dénominateur.

Si maintenant le fil est bobiné et forme une bobine solénoïde (figure de gauche ci-dessus), le champ magnétique est confiné à l'intérieur de la bobine et le champ magnétique de chaque tour s'ajoute au champ magnétique total et se mesure alors en Ampères · tours / mètres [A · t / m].

Plus il y a de tours [N], plus le champ magnétique est intense. La distance ici serait la longueur du circuit magnétique. Le circuit magnétique des lignes de force passe par l'intérieur de la bobine et se reboucle à l'extérieur, cependant, à l'extérieur rien ne le guide et il se reboucle dans un grand espace, où il est par conséquent très faible. Il est cependant important et homogène dans l'espace confiné à l'intérieur du solénoïde. De ce fait l'essentiel du circuit magnétique « utile » est dans la bobine, et la longueur [l] est celle de la bobine. Ceci est encore renforcé par le fait que pour un nombre de spires donné, plus la bobine est longue, plus faible est le champ magnétique.



La figure ci-dessus représente, pour une bobine (en rouge) parcourue par un courant, le champ magnétique (bleu) en 2 dimensions, en réalité il est tri-dimensionnel. Bien entendu le champ magnétique ne forme pas des lignes, il s'agit ici d'une représentation imagée.

Dans le cas d'un circuit magnétique fermé (tore, enroulement d'un transformateur), la longueur du tore, respectivement du circuit magnétique du transformateur est déterminante.

Nous constatons que dans tous les cas, ce qui engendre le champ magnétique, est le courant dans un conducteur, et que si ce conducteur est bobiné, le champ magnétique est proportionnellement plus important. On parle de force magnétomotrice **f.m.m**, en effet cette « force » pousse le champ magnétique le long du circuit magnétique.

Nous pouvons déjà poser les formules suivantes :

Force magnétomotrice f.m.m en Ampère · tour [A · t] = $N \cdot I$

Champ magnétique ou intensité du champ magnétique H [A / m] ou [A · t / m] = $N \cdot I / l$

À ce stade nous devons considérer l'utilisation d'un noyau ou d'un support magnétique ou non pour la bobine. Ceci se fait en prenant en compte la perméabilité de ce support. On nomme

cette grandeur **Induction** ou **densité de flux magnétique** et on utilise pour cela la formule suivante :

Induction ou densité de flux magnétique B en Tesla [T] = $\mu \cdot H$

Dans le cas de l'air (ou du vide), l'induction B est simplement proportionnelle au champ magnétique, il y a une relation fixe entre B et H . Les deux champs sont identiques à un facteur dimensionnel (μ) près.

Cependant l'induction B prend plus de sens lorsque l'on considère un matériau ferromagnétique pour le noyau, car dans ce cas l'induction B dépend des caractéristiques du noyau.

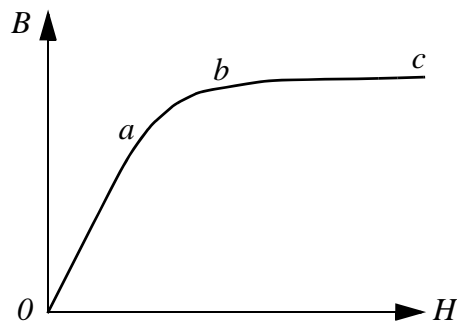
B n'est plus directement équivalent à H .

En effet, lorsque le noyau de fer est excité par le champ magnétique de la bobine, il devient aimanté, et cette aimantation s'ajoute au champ magnétique de la bobine pour le renforcer. Comme indiqué ci-dessus, ceci est pris en compte par μ_r (sans dimension).

Voici quelques exemples de valeur de μ_r pour des matériaux courants.

Matériau	Perméabilité magnétique relative (μ_r)
Vide	1
Air	1,00000037 = ~ 1
Cuivre	0,999994 = ~ 1
Aluminium	1,000022 = ~ 1
Acier	~ 1000 à 4000
Fer	~ 5000 à 8000
Mumétal	$> 100\ 000$

Note. Le calcul de B au moyen de l'expression ci-dessus est une approximation car il ne tient pas compte de différents effets, en particulier de l'aplatissement de la courbe de μ_r aux fortes densités de flux (saturation du noyau).



On voit que de 0 à a , la relation entre B et H est linéaire, puis de a vers b elle s'aplatit, et fini entre b et c asymptotiquement en μ_0 . Nous négligeons ici tout ce qui est au delà de a , car en pratique, on essaie de rester dans la partie linéaire de cette relation.

Une autre source d'approximation est que, sauf dans le cas du tore, les circuits magnétiques ont pas mal de fuites, ce qui signifie qu'une partie du champ magnétique s'échappe du circuit magnétique (contrairement aux circuits électriques où les isolants sont efficaces pour empêcher les courants de fuite).

Finalement une dernière expression nous servira d'intermédiaire pour définir la valeur d'une inductance, il s'agit du **flux net** traversant la bobine. Le flux net ou simplement flux est défini comme l'induction dans une surface donnée. Ici typiquement la surface est celle de la bobine ou la section d'un tore ou d'un circuit magnétique. Le flux est représenté par la lettre Φ (Phi)

Net flux dans la bobine Φ en Weber [**Wb**] = $B \cdot s$

et en substituant pour B : $\Phi = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l} \cdot s$

Dans un circuit magnétique, le flux dépend du courant : plus le courant dans la bobine est élevé, plus le flux est important ; de même, pour un courant donné, plus l'inductance, de la bobine est élevée, plus le flux est élevé. Le flux dépend donc de L et de I .

$$\Phi = L \cdot I \quad \text{ou} \quad L = \frac{\Phi}{I} \quad (\text{pour une seule spire})$$

Cependant ce flux traverse la bobine, et chaque spire est sujette au flux tour à tour, et donc dans une bobine de N spires, l'inductance est proportionnelle à $N \cdot \Phi$.

$$L = N \cdot \frac{\Phi}{I} = N \cdot \frac{\mu \cdot N \cdot I}{I \cdot l} \cdot s = \mu \cdot \frac{N^2 \cdot s}{l}$$

Cette dernière expression est la formule pour le calcul d'une inductance telle que donnée dans le cours. On y voit que L est proportionnel à μ , N^2 et s et inversement proportionnel à l .

Utilisation de A_L (inductance spécifique)

Il est courant en pratique, quand il s'agit de tores ou de circuits magnétiques fermés de remplacer la quantité $\mu \cdot s / l$ par une valeur que le fabricant nomme A_L pour le tore donné. Ceci simplifie le calcul de l'inductance de la façon suivante :

$$L = A_L \cdot N^2$$

En pratique, tous les fabricants ne donnent pas A_L avec la même unité, car il ne s'agit pas d'un standard. Il convient donc de vérifier la documentation du fabricant du tore. Cependant l'OFCOM considère que A_L est toujours donné en nH (en réalité nH/N²).

Résumé : formules importantes

Force magnétomotrice (At) : $\text{f.m.m} = N \cdot I$

Champ magnétique (A/m) : $H = \frac{N \cdot I}{l}$

Induction ou densité de flux (T) : $B = \mu \cdot H$

Flux (Wb) : $\Phi = B \cdot s$

Inductance (H) : $L = \mu \cdot \frac{N^2 \cdot s}{l}$

Inductance (nH) : $L = A_L \cdot N^2$

Application à des problèmes d'examen

TB401 : Un noyau toroïdal a un diamètre moyen de 2,6 cm et comporte 6 spires de fil de cuivre. Quelle est l'intensité moyenne du champ magnétique dans le noyau lorsque le courant est de 2,5 A ?



La formule pour le champ magnétique est : $H = \frac{N \cdot I}{l}$

On nous donne I et N , nous devons calculer l . Il s'agit de la circonférence moyenne du tore :

$$l = \pi \cdot d = \pi \cdot 0,026 = 0,08168 \text{ m}$$

$$\text{et } H \text{ vaut : } 6 \cdot 2,5 / 0,08168 = 183,64 \text{ A/m}$$

TB402 : Une bobine sans noyau de fer produit une intensité de champ de 200 A/m. Quelle est la densité du flux magnétique ?

La formule à utiliser est : $B = \mu \cdot H$

On nous donne H et μ_0 est donné dans le formulaire de l'OFCOM ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$).

$$B = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 200 = 0,25 \text{ mT}$$

TC310 : En utilisant un noyau pot dont la valeur A_L est de 250, combien de tours faut-il pour fabriquer une bobine de 2 mH ?

On transforme : $L = A_L \cdot N^2$ pour obtenir $N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-3}}{250}} = 89,4$ tours

TC311 : Quelle est l'inductance d'une bobine de 300 spires bobinées sur un noyau avec un A_L de 1250 ?

$$L = A_L \cdot N^2 = 1250 \cdot 10^{-9} \cdot 300^2 = 112,5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$