

Électromagnétisme en classe de Première F 3

par J.-M. GHINAMO, J. TERRAS, J.-P. ZAYGEL,
Lyon.

Le présent article propose un exemple de progression pédagogique pour le cours d'électromagnétisme en classe de Première préparant au baccalauréat de technicien électrotechnique.

La nécessité d'une telle démarche a semblé nécessaire par suite de la spécificité de cette section :

1. Préparation d'un bac de technicien situant les enseignements à un certain niveau, afin de préparer les élèves à des études supérieures (en I.U.T. et classes de T.S. principalement) et avec une certaine finalité professionnelle.

2. Coordination délicate du cours d'électromagnétisme avec le cours de mécanique ; ce dernier étant assuré par le professeur de construction mécanique selon la progression schématique suivante : statique en Première, cinématique et dynamique en Terminale ; ce qui rend impossible l'introduction du vecteur \vec{B} à partir de la force appliquée à une particule chargée en mouvement.

La progression proposée est fondée alors sur les idées directrices suivantes :

1. *Après une présentation qualitative des phénomènes magnétiques, la sonde à effet Hall est utilisée systématiquement comme détecteur magnétique.*

2. *Les deux grandeurs fondamentales pour l'électrotechnicien (vecteur \vec{B} et flux magnétique) sont définies le plus rapidement possible.*

3. *Le rôle d'un milieu ferromagnétique est mis en évidence dès la leçon sur les champs magnétiques créés par les courants, en raison de l'utilisation fréquente des circuits magnétiques dans les expériences de cours et dans les dispositifs industriels.*

4. *La réversibilité des systèmes électromécaniques est soulignée, en vue de l'étude des machines électriques en Terminale.*

Cette progression a été élaborée par trois professeurs enseignant depuis plusieurs années dans les classes préparant au baccalauréat F 3.

I. PHENOMENES MAGNETIQUES.

Abordant un domaine tout à fait nouveau pour les élèves, il semble suffisant, dans cette première leçon, de s'intéresser seulement à l'aspect qualitatif des propriétés magnétiques des aimants et des circuits électriques alimentés en continu, pour en souligner l'analogie.

Des expériences classiques permettent donc de bien mettre en évidence :

- la création d'un espace champ magnétique ;
 - les actions mécaniques subies dans un champ magnétique ;
- par un aimant ou un courant électrique (les différentes formes usuelles étant envisagées).

II. LE CHAMP MAGNETIQUE.

Il s'agit d'abord de caractériser les propriétés magnétiques en un point par l'introduction du vecteur \vec{B} , puis d'étudier la topographie de quelques champs magnétiques au moyen de leur spectre.

Conformément aux recommandations du programme, \vec{B} est appelé vecteur champ magnétique, mais l'ancienne appellation (vecteur induction magnétique) peut être indiquée en remarque.

A) Propriétés magnétiques en un point : l'utilisation d'une boussole puis d'une sonde de Hall en montre le caractère directif, orienté et mesurable ; d'où la définition du vecteur \vec{B} en ce point.

L'interprétation de l'effet Hall sera vu dans la leçon sur les forces électromagnétiques. On admet pour l'instant la relation $U_H = K B I_H$ sans évoquer l'existence de la tension résiduelle facilement compensable par le réglage du zéro de l'amplificateur de mesure.

B) Topographie d'un espace champ magnétique : spectres magnétiques dans les cas de forme usuels d'aimants et de circuits électriques.

III. CHAMPS MAGNETIQUES CREEES PAR LES COURANTS.

A) Circuits entourés d'air ou d'objets non ferreux : l'étude expérimentale quantitative est particulièrement facile à l'intérieur

d'un solénoïde, ce qui permet d'établir avec une bonne précision la relation $B = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{NI}{L}$ au centre d'une bobine longue.

Les résultats pour les autres circuits usuels peuvent être suggérés (cas du tore) ou admis (cas du fil rectiligne).

B) Circuits en présence de fer : ce paragraphe est une première approche de l'influence d'un milieu ferromagnétique sur le champ magnétique créé par un courant. L'étude détaillée de ces phénomènes faisant l'objet d'un chapitre ultérieur, on peut se contenter de mettre en évidence :

- La canalisation des lignes de champ par les objets contenant du fer ; ce qui permet d'introduire la notion des circuits magnétiques.
- L'augmentation de B en un point ; d'où la définition de la perméabilité relative puis absolue d'un matériau en considérant le cas d'un circuit magnétique torique.

IV. LE FLUX MAGNETIQUE.

L'introduction de cette deuxième grandeur fondamentale pour l'électrotechnicien permet d'étudier plus finement le comportement de la sonde de Hall, en montrant qu'elle est en fait, sensible au flux algébrique à travers sa surface.

A) **Notion de flux**, à travers une surface plane dans un champ uniforme. Dans ce cas, le flux apparaît comme une grandeur caractérisant le nombre de lignes de champ traversant la surface, ce qui conduit à une relation de la forme $\Phi = BS \cos \alpha$ (Φ est une grandeur arithmétique).

B) Nature de la grandeur détectée par la sonde.

1° ETUDE EXPERIMENTALE.

La sonde de Hall est placée dans le champ magnétique uniforme créé par un aimant en U, orientable de 0 à $\frac{\pi}{2}$. On construit le tableau :

α	$V_{\text{Hall}}(\alpha)$	$\frac{V_{\text{Hall}}(\alpha)}{V_{\text{Hall}} \text{ maxi}}$
----------	---------------------------	--

Les précautions expérimentales sont prises pour que :

$$V_{\text{Hall}}(\alpha) > 0 \quad \text{si} \quad \alpha \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right].$$

2° CONCLUSIONS.

a) La sonde est sensible à $B \cos \alpha$ donc à une constante près au flux $\Phi(\vec{B})$ à travers sa surface.

b) Justification de la position de la sonde pour la mesure de $\|\vec{B}\|$.

C) Algébrisation du flux.

On envisage maintenant une rotation complète de :

$$\vec{B} \quad (\alpha \in [0, 2\pi]),$$

ce qui provoque un changement de signe de $V_{\text{Hall}}(\alpha)$ et conduit à la nécessité d'algébriser le flux (noté φ : flux algébrique). L'introduction de la normale orientée \vec{ON} à la surface considérée permet le passage à la relation de définition du flux algébrique $\varphi(\vec{B}) = B \cdot S \cdot \cos \alpha$ avec $\alpha = (\vec{B}, \vec{ON})$, qui se trouve étayée par l'expérience.

D) Généralisation.

1° CHAMP NON UNIFORME.

Décomposition de la surface en éléments S , où le champ magnétique est quasi-uniforme.

2° SURFACE GAUCHE.

Décomposition en surfaces élémentaires quasi-planes.

On pourrait faire calculer, à titre d'exemple, le flux sous un pôle d'électroaimant, ou sous un pôle d'aimant de cadre magnéto-électrique (car $\|\vec{B}\| = \text{cste}$).

V. LES FORCES ELECTROMAGNETIQUES.

Sans anticiper sur l'étude des machines tournantes qui sera faite en Terminale, il est souhaitable que cette leçon dégage leur structure générale (inducteur-induit) et consacre une place importante aux applications.

Bien que la balance de Cotton ne soit plus industriellement utilisée, elle n'en reste pas moins très commode pour établir la loi de Laplace (B étant mesuré avec la sonde de Hall).

A) Etude expérimentale.

1° Mise en évidence des forces électromagnétiques sur un conducteur rectiligne (rôle de l).

2° Balance de Cotton : Mise en évidence du rôle des différents paramètres (I , B , $\sin \alpha$).

3° Conclusion : Caractérisation de la force électromagnétique.

B) Applications.

1° Transducteur électromagnétique (« rails de Laplace »).

2° Cadre dans un champ uniforme et dans un champ radial. Règle pratique du flux maximal.

3° Efforts électrodynamiques : Origines - ordres de grandeurs des forces mises en jeu lors de court-circuits.

4° Principe de la sonde de Hall. Applications industrielles.

5° Moteur à rotor plan : Principe de fonctionnement.

C) Travail des forces électromagnétiques.

1° Le dispositif des rails de Laplace permet de montrer que $W = i \cdot \Delta\phi$, relation qui sera généralisée sans démonstration.

2° Cette relation permet de justifier l'existence, pour toutes les conversions électromagnétiques d'un inducteur (origine de $\Delta\phi$) et d'un circuit d'induit (dans lequel circule le courant i).

VI. LA F.E.M. D'INDUCTION.

A) Etude expérimentale qualitative (habituelle).

B) Etude expérimentale quantitative.

L'observation à l'oscilloscope de la f.é.m. induite dans une spire (ou une bobine) traversée par un flux vibrant linéairement dans le temps (créé par une deuxième bobine alimentée par un générateur de courant en dent de scie) permet de trouver à un coefficient multiplicatif près l'expression instantanée de la f.é.m. induite.

On établit donc la relation $e = -k\phi'(t)$ de façon expérimentale, après l'orientation indispensable des circuits.

C) Applications pratiques.

1° Courants de Foucault : Avantages - Inconvénients.

2° Principe de fonctionnement du transformateur monophasé et de la machine asynchrone (analyse qualitative simple des phénomènes physiques).

D) Réversibilité d'un système électromécanique.

Une étude, sur le plan énergétique, du dispositif des rails de Laplace, permet de mettre en évidence que la barre mobile

est, soit générateur, soit récepteur, selon les conditions de fonctionnement (vitesse de la barre). Cette analyse pourra être l'occasion de conclure sur la réversibilité des transducteurs électromécaniques dans le cas général.

VII. LA F.E.M.. D'AUTO-INDUCTION.

A) Définition.

Pour éviter toute ambiguïté, il semble préférable de définir l'inductance L , d'un circuit dans le seul cas du milieu se comportant linéairement du point de vue magnétique (cas du solénoïde à noyau de fer ouvert, ou sans noyau ferromagnétique).

La notion d'inductance variable en fonction du courant n'est pas exploitable dans le cas de la bobine à noyaux de fer fermée, ce qui lui enlève tout intérêt.

1° Inductance d'un circuit : Définition pour une spire, définition pour un circuit.

2° Etude d'un exemple : Tore ou solénoïde infini. Calcul de L -facteurs influants.

B) F.E.M. d'auto-induction.

1° Expression.

2° Schéma équivalent d'une bobine - Orientations.

3° Mise en évidence expérimentale.

C) Conséquences.

Il est important d'insister sur la continuité du courant dans un circuit inductif.

1° Energie emmagasinée par un circuit inductif.

2° Continuité du courant :

a) Aspects positifs : Notion d'inductance de lissage.

b) Aspects négatifs : Phénomènes d'arcs et de surtensions lors de la coupure des circuits inductifs.

Remarque.

La notion de mutuelle inductance ne servant qu'à justifier le schéma équivalent d'un alternateur triphasé ne peut être introduite qu'en classe de Terminale, en prélude à l'étude des machines synchrones.

VIII. FERROMAGNETISME.

A) Rappels du chapitre III : Rôles qualitatif et quantitatif d'un milieu ferromagnétique sur le champ magnétique créé par un courant.

B) Vecteur excitation magnétique \vec{H} : Son introduction est indispensable pour l'électrotechnicien, mais délicate à ce niveau. On ne peut justifier vraiment cette grandeur que dans le cas d'un tore homogène, en la considérant comme caractérisant le rôle magnétique de la bobine indépendamment de la nature du circuit magnétique.

C) Courbe de première aimantation : met en évidence le phénomène de saturation du matériau. On en déduit la courbe représentant la perméabilité relative en fonction de H .

D) Phénomène d'hystérésis : particulièrement visible avec l'utilisation d'un oscilloscope.

E) Conséquences : les avantages (obtention de champs magnétiques intenses dans les machines) ne devant pas faire oublier les inconvénients (existence des pertes par hystérésis qui, jointes aux pertes par courant de Foucault, constituent les « pertes fer » des machines électromagnétiques). A propos des aimants permanents, il est intéressant de comparer les ordres de grandeur de H_c et B_r pour les divers matériaux ferromagnétiques (fer, aciers et alliages actuels).

IX. CIRCUITS MAGNETIQUES EN CONTINU.

Leur étude est la suite logique et indispensable de celle du ferromagnétisme.

A) Lois générales.

Elles sont, bien sûr, admises mais on peut les approcher de manière intuitive.

1° Conservation du flux à travers les sections d'un tube de champ.

2° Théorème d'Ampère : introduit à partir de l'exemple du tore (et du fil rectiligne) puis généralisé en mettant bien en évidence la nécessité d'algébriser la somme des ampères-tours (par exemple en constatant l'absence d'attraction de la culasse d'un transformateur démontable dont les 2 enroulements identiques sont couplés de façon à créer des « forces magnéto-motrices » opposées.)

B) Calcul d'un circuit magnétique parfait.

Le flux étant donné, il s'agit de trouver les ampères-tours nécessaires pour magnétiser un circuit, ou *vice versa*.

1° Circuit magnétique non saturé : les 2 méthodes (calcul ou graphique) sont possibles.

2° Circuit magnétique pouvant être saturé : seule, la méthode graphique est alors possible. On peut ainsi bien mettre

en évidence les rôles respectifs de la saturation et des entrefers dans les machines électriques.

C) Applications.

On peut, en particulier, justifier la différence de constitution des aimants permanents et des électroaimants en étudiant la conséquence de la création d'un entrefer dans un tore respectivement en acier ou en fer (ces matériaux étant caractérisés par leur cycle d'hystérésis).
