

# Programme de Colle PSI

*Semaine 10 : du 27 novembre au 1er décembre*

Tout exercice en magnétostatique, induction dans l'ARQS magnétique. Tout exercice portant sur les courants de Foucault et la puissance en régime sinusoïdal. A partir de mercredi, on pourra donner des exercices simples sur les milieux magnétiques (fondements, circuits magnétiques, transformateurs). Aucun exercice portant sur la conversion électro-magnéto-mécanique cette semaine.

La partie « **Champ magnétique en régime stationnaire** » introduit les équations de Maxwell-Ampère et Maxwell-Thomson comme des postulats de l'électromagnétisme. La conservation du flux du champ magnétique, traduction intégrale de l'équation de Maxwell-Thomson, est l'occasion de revenir sur les connaissances de première année. La loi de Biot et Savart et le potentiel vecteur sont hors programme. L'expression de la densité volumique d'énergie magnétique est établie sur le cas particulier d'une bobine longue, sa généralisation est admise. L'usage des distributions surfaciques de courant sont strictement limité à l'étude de la réflexion d'une onde électromagnétique sur un métal parfait.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.4. Champ magnétique en régime stationnaire</b>	
Équations de Maxwell-Ampère et Maxwell-Thomson.	Énoncer les équations de Maxwell-Ampère et Maxwell-Thomson en régime variable et en régime stationnaire
Conservation du flux magnétique.	Exploiter la conservation du flux magnétique et ses conséquences sur les lignes de champ magnétique.
Théorème d'Ampère.	Énoncer et appliquer le théorème d'Ampère. Établir l'expression du champ magnétique créé par un fil épais et infini, par un solénoïde infini en admettant que le champ extérieur est nul, et par une bobine torique.
Forces de Laplace.	Exprimer les forces de Laplace s'exerçant sur un conducteur filiforme et sur une distribution volumique de courant.

La partie « **Électromagnétisme dans l'ARQS** » étudie l'électromagnétisme en régime variable, principalement dans le cadre de l'ARQS magnétique, afin d'établir le lien avec le cours sur l'induction de première année. La notion de champ électromoteur est hors programme, la force électromotrice induite est calculée à l'aide de la loi de Faraday. Cette partie prépare également le cours sur la conversion de puissance en abordant les courants de Foucault et l'énergie magnétique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.5. Électromagnétisme dans l'ARQS</b>	
Courants de déplacement.	Établir la compatibilité des équations de Maxwell avec la conservation de la charge.
ARQS magnétique.	Simplifier les équations de Maxwell et l'équation de conservation de la charge dans l'ARQS en admettant que les courants de déplacement sont négligeables. Étendre le domaine de validité des expressions des champs magnétiques obtenues en régime stationnaire.

Énergie magnétique. Densité volumique d'énergie magnétique.	Exprimer l'énergie magnétique d'une bobine seule ou de deux bobines couplées en fonction des coefficients d'inductance et des intensités. Déterminer, à partir de l'expression de l'énergie magnétique, l'expression de la densité volumique d'énergie magnétique dans le cas d'une bobine modélisée par un solénoïde long. Citer l'expression de la densité volumique d'énergie magnétique.
Couplage partiel, couplage parfait.	Établir, dans le cas de deux bobines couplées, l'inégalité $M^2 \leq L_1 L_2$ .
Induction.	Relier la circulation du champ électrique à la dérivée temporelle du flux magnétique.
Courants de Foucault.	Décrire la géométrie des courants de Foucault dans le cas d'un conducteur cylindrique soumis à un champ magnétique parallèle à son axe, uniforme et oscillant. Exprimer la puissance dissipée par effet Joule en négligeant le champ propre et expliquer le rôle du feuilletage.
Actions subies par un dipôle magnétique dans un champ magnétique extérieur.	Utiliser les expressions fournies de l'énergie potentielle, de la résultante et du moment. Décrire qualitativement l'évolution d'un dipôle magnétique dans un champ magnétique extérieur.
Magnéton de Bohr.	Établir l'expression du magnéton de Bohr dans le cadre du modèle de Bohr.
Aimantation d'un milieu magnétique.	Définir le champ d'aimantation d'un milieu magnétique.
Courants d'aimantation.	Associer à une distribution d'aimantation une densité volumique de courants liés équivalente, l'expression étant admise.
Vecteurs champ magnétique, excitation magnétique et aimantation. Équation de Maxwell-Ampère écrite avec le vecteur excitation magnétique.	Définir le vecteur excitation magnétique. Écrire l'équation de Maxwell-Ampère dans un milieu magnétique. Interpréter qualitativement que les sources de l'excitation magnétique sont les courants électriques libres, et que celles de champ magnétique sont les courants électriques libres et l'aimantation.
Milieu ferromagnétique.	Représenter l'allure des cycles d'hystérésis (excitation magnétique, aimantation) et (excitation magnétique, champ magnétique) d'un milieu ferromagnétique. Distinguer milieu dur et milieu doux ; citer des exemples de matériaux.  <b>Tracer le cycle d'hystérésis d'un milieu ferromagnétique.</b>
Milieu ferromagnétique doux.	Modéliser un milieu doux par une relation constitutive linéaire. Définir la perméabilité relative et donner un ordre de grandeur.

La partie « **Puissance électrique en régime sinusoïdal** » présente quelques résultats généraux relatifs à la puissance électrique en régime sinusoïdal. La représentation de Fresnel est introduite pour illustrer le facteur de puissance. La notion de puissance réactive est hors programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.1. Puissance électrique en régime sinusoïdal</b>	
Puissance moyenne, facteur de puissance. Représentation de Fresnel.	Définir le facteur de puissance, faire le lien avec la représentation des tensions et des courants sur un diagramme de Fresnel. Citer et exploiter la relation $P = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi$ .
Puissance moyenne absorbée par une impédance.	Citer et exploiter les relations : $P = \Re_e(\underline{Z}) I_{\text{eff}}^2$ et $P = \Re_e(\underline{Y}) U_{\text{eff}}^2$ . Justifier qu'un dipôle purement réactif n'absorbe aucune puissance en moyenne.
Circuit magnétique avec ou sans entrefer.	Décrire l'allure des lignes de champ dans un circuit magnétique en admettant que les lignes de champ sortent orthogonalement à l'interface dans un entrefer.
Électroaimant.	Exprimer le champ magnétique produit dans l'entrefer d'un électroaimant.
Inductance propre d'une bobine à noyau de fer doux modélisé linéairement.	Établir l'expression de l'inductance propre de la bobine à noyau. Vérifier l'expression de l'énergie magnétique : $E_{\text{mag}} = \iiint \frac{B^2}{2\mu_0\mu_r} d\tau.$
Pertes d'une bobine réelle à noyau.	Exprimer le lien entre l'aire du cycle hystérésis et la puissance moyenne absorbée. Décrire les différents termes de pertes d'une bobine à noyau : pertes fer par courants de Foucault et par hystérésis, pertes cuivre.

La partie « **Transformateur** » complète le modèle du transformateur de tension vu en première année. On ajoute ici le rôle d'un noyau de fer doux de forte perméabilité permettant d'obtenir un transformateur de courant. Les pertes et les défauts sont évoqués mais ne sont pas modélisés. En particulier, l'inductance magnétisante est hors programme. On explique l'intérêt du transformateur pour l'isolement et le transport de l'énergie électrique sur de longues distances.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.2. Transformateur</b>	
Modèle du transformateur idéal.	Citer les hypothèses du transformateur idéal. Établir les lois de transformation des tensions et des courants du transformateur idéal, en respectant l'algébrisation associée aux bornes homologues. Relier le transfert instantané et parfait de puissance à une absence de pertes et de stockage de l'énergie électromagnétique.
Pertes.	Citer les pertes cuivre, les pertes fer par courant de Foucault et par hystérésis. Décrire des solutions permettant de réduire ces pertes.

Applications du transformateur.	<p>Expliquer le rôle du transformateur pour l'isolement. Établir le transfert d'impédance entre le primaire et le secondaire.</p> <p>Expliquer l'intérêt du transport de l'énergie électrique à haute tension afin de réduire les pertes en ligne.</p> <p>Expliquer l'avantage d'un facteur de puissance élevé.</p> <p><b>Mettre en œuvre un transformateur et étudier son rendement sur charge résistive.</b></p>
---------------------------------	--

## I Questions de cours à choisir parmi celles-ci

### Puissance électrique en régime sinusoïdal

1. (exercice long) Savoir refaire l'exercice suivant :

Une installation industrielle comporte en parallèle deux machines assimilées à des impédances inductives qui consomment respectivement les puissances  $P_1 = 2000 \text{ W}$  avec un facteur de puissance  $\cos \varphi_1 = 0,6$  et  $P_2 = 3000 \text{ W}$  avec un facteur de puissance  $\cos \varphi_2 = 0,7$ , en parallèle desquels sont branchées des lampes consommant au total une puissance  $P_L = 2000 \text{ W}$ . Les lampes sont assimilées à des résistances.

La tension aux bornes de l'installation est sinusoïdale de fréquence  $f = 50 \text{ Hz}$  et sa valeur efficace est  $230 \text{ V}$ .

**1.** Calculer le facteur de puissance et la valeur efficace du courant consommé par l'installation complète et commenter le résultat obtenu.

**2.** Proposer une solution qui permet de réduire les pertes en lignes, puis faire l'étude du nouveau dispositif et commenter.

### Milieux ferromagnétiques

1. Soit  $\vec{M}$  un moment magnétique soumis à un champ magnétique extérieur  $\vec{B}$ . Rappeler les expressions de 1) l'énergie potentielle d'interaction, 2) la force exercée sur un moment magnétique et 3) le couple exercé sur un moment magnétique. Montrer alors qu'un moment magnétique a tendance à s'orienter dans la direction du champ magnétique et à se diriger vers les zones de champs forts.
2. Dans le modèle semi-classique de Bohr, en supposant la quantification du moment cinétique, montrer que l'atome d'hydrogène a un moment magnétique quantifié. On introduira le quantum de moment magnétique (magnéton de Bohr) et on précisera son expression en fonction des constantes fondamentales de la physique.
3. Introduire l'aimantation volumique et donner sans démonstration l'expression du vecteur densité de courant lié en fonction de l'aimantation volumique. Montrer qu'alors, dans l'ARQS magnétique, l'équation de Maxwell-Ampère peut se réécrire simplement en introduisant l'excitation magnétique. En déduire le théorème d'Ampère pour les milieux magnétiques.
4. Présenter les courbes  $M = f(H)$  et  $B = f(H)$  pour un milieu magnétique quelconque. Commenter avec précision la courbe obtenue. Vous ferez qualitativement le lien entre l'allure de la courbe et le comportement microscopique des moments magnétiques dans la matière. Vous mettrez en évidence l'existence de saturation, de champs rémanents et d'une excitation coercitive.

5. Présenter la différence entre ferromagnétiques doux et durs. Dans le cas des ferromagnétiques supposés infiniment doux, vous présenterez la théorie de la réponse linéaire en traçant  $M = f(H)$  et  $B = f(H)$  dans ce cas. Vous introduirez alors la susceptibilité magnétique  $\chi_m$ .

### Circuits magnétiques

1. Déterminer, pour une bobine à noyau de fer doux et non saturé torique, l'expression du champ magnétique dans le milieu ferromagnétique. Vous préciserez les hypothèses utilisées. En déduire l'expression de l'inductance  $L$ . Comparer à l'inductance d'un solénoïde (supposé infini) à air.
2. Déterminer le champ magnétique dans l'entrefer d'un électro-aimant constitué d'un milieu ferromagnétique doux et non saturé. Vous préciserez les hypothèses utilisées.
3. Expliquer la démarche permettant de déterminer l'expression du champ magnétique dans l'entrefer d'un électro-aimant constitué d'un milieu ferromagnétique réel (présentant un cycle d'hystérésis). Vous proposerez une méthode graphique et mettrez en évidence deux points de fonctionnement possibles (deux valeurs de  $B$  possibles) pour une valeur donnée du courant exciteur  $I$ .
4. Définir la notion de pertes cuivre. Comment peut-on les réduire ?

Définir la notion de pertes fer par courant de Foucault. Comment évoluent-elles avec la conductivité électrique du milieu ferro ? la fréquence ? l'intensité du champ magnétique ? Citez deux moyens de les réduire.

Définir la notion de pertes fer par hystérésis. Montrer que ces pertes peuvent être explicitées, entre autres grandeurs, comme l'aire du cycle d'hystérésis (courbe  $B = f(H)$ ). Comment ces pertes peuvent elles être limitées ?

5. Donner la représentation normalisée d'un transformateur. Expliquer la signification des bornes homologues. Déterminer, dans le cas d'un transformateur idéal, les rapports  $v_2/v_1$  et  $i_2/i_1$  en fonction de  $m = N_2/N_1$ . Comment appelle-t-on  $m$  ? Montrer qu'alors la puissance reçue au primaire est égale à la puissance cédée au secondaire.
6. Transfert d'impédance : supposons un générateur réel de tension sinusoïdale de fem  $e$  et de résistance  $R_1$ . Il est associé, par l'intermédiaire d'un transformateur idéal de rapport de transformation  $m$  à une résistance  $R_2$ . Montrer que, vu du secondaire, le circuit primaire peut être vu comme un généralteur réel de tension sinusoïdale dont vous préciserez la fem et la résistance.
7. Montrer que, pour limiter ses pertes en ligne, EDF a intérêt à transporter l'énergie électrique à haute tension. Pour quelle(s) raison(s) l'utilisateur final doit-il être desservi en basse tension ? En déduire la nécessité d'avoir recours aux transformateurs.

# Programme spécifique 5/2

**Mécanique du point matériel : approche énergétique, moment cinétique, forces centrales, particules chargées.**

Questions de cours possibles :

## Energétique

1. Définir la puissance d'une force, son travail élémentaire ainsi que son travail sur un chemin  $\mathcal{C}$  entre  $A$  et  $B$ .
2. Savoir énoncer et démontrer le théorème de la puissance cinétique et de l'énergie cinétique.
3. Savoir énoncer et démontrer les théorèmes de l'énergie mécanique et de la puissance mécanique.
4. Savoir retrouver les expressions des énergies potentielles usuelles (poids, rappel élastique, forces newtoniennes en  $K/r^2$ ).
5. Retrouver par le TPC l'équation différentielle sur  $\theta$  pour le pendule simple non amorti.
6. Pour un problème à un degré de liberté, savoir discuter le mouvement d'une particule en comparant son profil d'énergie potentielle et son énergie mécanique ; Etat lié ou de diffusion. Expliquer l'obtention des positions d'équilibre et leur stabilité sur un graphique  $E_p$  en fonction du degré de liberté du problème. Traduire l'équilibre et sa stabilité en terme de conditions sur la dérivée première et seconde de l'énergie potentielle en fonction du degré de liberté du problème.
7. Savoir réaliser l'approximation harmonique d'une cuvette de potentiel par développement limité. En déduire que tout système décrit par une énergie potentielle présentant un minimum local est assimilable à un oscillateur harmonique.

## Moment cinétique

1. Connaître la relation entre moment cinétique scalaire et moment d'inertie d'un solide. Retrouver ensuite l'expression du théorème du moment cinétique scalaire pour un solide en rotation autour d'un axe fixe orienté (en supposant que le TMC est toujours applicable pour un solide sans démonstration supplémentaire). Connaître la propriété d'une liaison pivot parfaite.
2. Connaître l'expression de l'énergie cinétique d'un solide (en rotation autour d'un axe fixe ou en translation). Donner l'expression de la puissance des forces extérieures pour un solide en rotation autour d'un axe fixe orienté. Énoncer le théorème de la puissance cinétique pour les solides.
3. Savoir refaire l'exemple du pendule pesant avec établissement de l'équation différentielle du mouvement grâce au théorème du moment cinétique scalaire pour un **solide** en rotation.
4. Savoir refaire l'exemple du pendule pesant grâce à une approche énergétique pour un **solide** en rotation.

## Forces centrales

1. Conservation du moment cinétique pour un champ de forces centrales et conséquences : planéité du mouvement et loi des aires.
2. Conservation de l'énergie mécanique pour un champ de forces centrales et savoir retrouver l'énergie potentielle effective. Savoir faire la discussion graphique quant à la nature du mouvement à partir de l'énergie potentielle effective (distinguer le cas des forces répulsive et attractive).
3. Savoir énoncer les 3 lois de Kepler et savoir traiter le cas particulier des satellites en orbite circulaire : mouvement uniforme, période ; 3ème loi de Kepler ; énergie mécanique.
4. Cas particulier des trajectoires elliptiques : connaître l'expression de l'énergie mécanique et les 3 lois de Kepler, identifier périégée et apogée, positionner l'astre attracteur, faire le lien entre  $r_{\min}$ ,  $r_{\max}$  et  $a$ . Quelle est la spécificité de la vitesse à l'apogée et au périégée.

## Particules chargées

1. Action d'un champ électrostatique uniforme sur une particule chargée dans le cas où  $\vec{E}$  et  $\vec{v}_0$  sont colinéaires ; Savoir effectuer un bilan énergétique pour calculer la vitesse de sortie de la particule accélérée par une différence de potentiel  $U$ .
2. Dans le cas d'une particule soumise à un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  et de vitesse initiale  $\vec{v}_0$  orthogonale à  $\vec{B}$ , montrer que
  - (a) le mouvement est uniforme
  - (b) le mouvement est plan
  - (c) le mouvement est circulaire (démonstration réalisée dans le repère de Frenet)

Enfin, retrouver le rayon de la trajectoire ainsi que l'expression de la pulsation cyclotron. Tracer alors l'allure de la trajectoire en fonction de la nature de la charge.