

1. Distributions de courants et champs magnétiques stationnaires. Action d'un champ magnétique sur un courant : forces de Laplace, selon programme de colles précédent.
2. Mouvements d'une particule dans un champ électrique ou un champ magnétique uniforme.
  - **En question de cours uniquement** : les équations de Maxwell en régime variable.
3. Ajouter en **cours et en exercices** :

## DIPÔLES ÉLECTROSTATIQUE ET MAGNÉTOSTATIQUES

### I. Dipôles électrostatiques

- Doublet de charges électriques  $(P, q)$  et  $(N, -q)$ . Vecteur moment dipolaire électrique  $\vec{p}$  du doublet. Calcul du potentiel et du champ électrique à grande distance, dans l'approximation dipolaire (pas de développement multipolaire : HP).
- Généralisation : définition et propriétés du moment dipolaire  $\vec{p}$  d'une distribution de charges ponctuelles de charge totale nulle.
- Définition d'un dipôle électrostatique.
- Exemple en physique atomique et moléculaire. Dipôles électriques permanents et induits. Unité Debye.
- Action d'un champ électrostatique extérieur  $\vec{E}_{\text{ext}}$  sur un dipôle : énergie potentielle, force résultante et moment des force.

$$\vec{F}_{\text{él}} = \overrightarrow{\text{grad}} \left( \vec{p} \cdot \vec{E}_{\text{ext}} \right) (G) \quad \text{et} \quad \vec{\Gamma}_G = \vec{p} \wedge \vec{E}_{\text{ext}}(G)$$

le moment de la force étant celui relatif au point  $G$ , centre d'inertie du dipôle.

$$E_P^{(\text{él})} = - \vec{p} \cdot \vec{E}_{\text{ext}}(G) \quad \text{et} \quad \vec{F}_{\text{él}} = - \overrightarrow{\text{grad}} E_P^{(\text{él})}(G)$$

Dans le cas particulier où  $\vec{E}_{\text{ext}}$  est uniforme, les actions électriques forment un couple.

$$\vec{F}_{\text{él}} = \vec{0} \quad \text{et} \quad \vec{\Gamma} = \vec{p} \wedge \vec{E}_{\text{ext}}$$

- Positions d'équilibre en orientation du dipôle et stabilité.

### II. Dipôles magnétostatiques

- Définition d'un dipôle magnétique. Champ magnétique créé. Exemples : petite spire, atome, aimant, champ magnétique terrestre.
- Expression du champ magnétostatique créé par un dipôle magnétique admise avec analogie avec celui du dipôle électrostatique.
- Action d'un champ magnétique extérieur  $\vec{B}_{\text{ext}}$  sur un dipôle magnétique. Relation admises par analogie avec le dipôle électrostatique :

$$\vec{F}_{\text{magn}} = \overrightarrow{\text{grad}} \left( \vec{m} \cdot \vec{B}_{\text{ext}} \right) (G) \quad \text{et} \quad \vec{\Gamma}_{m,G} = \vec{m} \wedge \vec{B}_{\text{ext}}(G)$$

le moment de la force étant celui relatif au point  $G$ , centre d'inertie du dipôle.

$$E_P^{(\text{magn})} = - \vec{m} \cdot \vec{B}_{\text{ext}}(G) \quad \text{et} \quad \vec{F}_{\text{magn}} = - \overrightarrow{\text{grad}} E_P^{(\text{magn})}(G)$$

Dans le cas particulier où  $\vec{B}_{\text{ext}}$  est uniforme, les actions magnétiques forment un couple :

$$\vec{F}_{\text{magn}} = \vec{0} \quad \text{et} \quad \vec{\Gamma}_m = \vec{m} \wedge \vec{B}_{\text{ext}}$$

### ÉQUATIONS DE MAXWELL EN RÉGIME VARIABLE

- Les quatre équations de Maxwell en régime variable. Formulation locale et intégrale.

- Compatibilité avec l'équation de conservation de la charge électrique.
- Existence d'ondes électromagnétiques : équation de d'Alembert pour  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  dans le vide.
- Cas particulier du régime quasistationnaire : définition de l'ARQS en un point  $M$ . Zone ARQS, équations de Maxwell dans la zone ARQS.

7. Les quatre équations de Maxwell : formulation locale puis formulation intégrale à démontrer avec les théorèmes d'Ostrogradski et de Stokes.
8. Montrer la compatibilité des équations de Maxwell avec la conservation de la charge électrique.
9. Définir l'ARQS en un point  $M$  et sa condition de validité. Donner les équations de Maxwell dans la zone ARQS.

### QUESTIONS DE COURS :

1. Énoncé du théorème d'Ampère. Application au calcul de  $\vec{B}$  pour un cylindre infini parcouru par  $\vec{j}$  axial et uniforme.
2. Énoncé du théorème d'Ampère. Application au calcul de  $\vec{B}$  pour un solénoïde infini en admettant que  $\vec{B} = \vec{0}$  à l'extérieur.
3. Énoncé du théorème d'Ampère. Application au calcul de  $\vec{B}$  pour une nappe de courant délimitée par deux plans infinis et parcourue par  $\vec{j}$  uniforme.
4. Modèle du doublet de charges  $-q$  et  $+q$ . Expression du potentiel  $V(M)$  à grande distance (on fera tout le développement limité). En déduire le champ électrostatique  $\vec{E}(M)$ .
5. Expression générale du moment dipolaire électrique  $\vec{p}$  pour  $N$  charges ponctuelles de charge totale nulle. Montrer que si la charge totale nulle alors  $\vec{p}_\Omega = \vec{p}$  est indépendant du point  $\Omega$  par rapport auquel on le calcule. Définition des barycentres  $N$  et  $P$  des charges négatives et positives. Relation avec  $\vec{p}$ . Définition d'un dipôle électrostatique.
6. Donner sans démonstration l'énergie potentielle  $E_p^{(\text{él})}$ , résultante des forces  $\vec{F}_{(\text{él})}$  et moment des forces  $\vec{\Gamma}$  exercés sur un dipôle magnétique de moment magnétique  $\vec{m}$  plongé dans un champ extérieur  $\vec{B}_{\text{ext}}$ .