

# ELECTROMAGNETISME

## EM 1 : LE CHAMP ELECTROMAGNETIQUE ET SES SYMETRIES

1. La loi de force de Lorentz : définition du champ électromagnétique  $[\vec{E}, \vec{B}]$ .
2. Propriétés de symétrie du champ électromagnétique  $[\vec{E}, \vec{B}]$ 
  - 2.1. Principe de Curie
  - 2.2. Plans de symétrie et d'antisymétrie pour une distribution de charges et de courants  $[\rho(\vec{r}, t), \vec{j}(\vec{r}, t)]$
  - 2.3. Plans de symétrie et d'antisymétrie pour  $[\vec{E}(\vec{r}, t), \vec{B}(\vec{r}, t)]$
  - 2.4. Géométrie du champ  $[\vec{E}(\vec{r}, t), \vec{B}(\vec{r}, t)]$  sur un plan de symétrie ou d'antisymétrie.
  - 2.5. Exemple
    - Méthode
    - Solénoïde de longueur finie, de section circulaire

### CAPACITES EXIGIBLES :

- Exploiter les symétries et les invariances d'une distribution de charges et de courants pour en déduire les propriétés de  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ .

## EM 2 : CHAMP ELECTRIQUE EN REGIME STATIONNAIRE

1. Les équations locales de l'électrostatique
  - 1.1. Equation de Maxwell-Gauss
  - 1.2. Equation de Maxwell-Faraday de l'électrostatique
  - 1.3. Linéarité des équations : théorème de superposition.
2. Flux de  $\vec{E}$ . Théorème de Gauß.
  - 2.1. Théorème de Gauß
  - 2.2. Quand et comment mettre en œuvre le théorème de Gauß ?
  - 2.3. Exemples fondamentaux.
    - Charge ponctuelle : loi de Coulomb.
    - Sphère uniformément chargée en volume ou en surface
    - Cylindre « infini » uniformément chargé en volume ou en surface
    - Plan « infini » uniformément chargé en surface.
    - Modèle de distribution surfacique de charge.
3. Circulation conservative du champ électrostatique. Potentiel électrostatique.
  - 3.1. Opérateur rotationnel
  - 3.2. Circulation conservative de  $\vec{E}$
  - 3.3. Potentiel électrostatique  $V$
  - 3.4. Potentiel électrostatique créé par une charge ponctuelle ; par une distribution discrète de charges.

- 3.5. *Potentiel électrostatique d'une distribution de charges à symétrie sphérique*
- 3.6. *Energie potentielle électrostatique d'une charge plongée dans un champ extérieur*
  - Application : canon à électrons classique et relativiste

#### **4. Equations de Poisson et de Laplace**

- 4.1. *Equation de Poisson en présence de charges*
- 4.2. *Equation de Laplace. Résolution numérique de l'équation de Laplace.*

#### **5. Topographie du champ électrostatique**

- 5.1. *Lignes de champ. Tubes de champ.*
- 5.2. *Surfaces équipotentiels. Orientation des lignes de champ.*
- 5.3. *Resserrement ou évasement d'un tube de champ*
- 5.4. *Cartes de lignes de champ et d'équipotentiels*

#### **6. Analogies avec la gravitation universelle**

- 6.1. *Les deux lois de force. Grandeurs analogues.*
- 6.2. *Equations locales de la gravitation.*
- 6.3. *Théorème de Gauss gravitationnel. Champ de gravitation d'un astre à symétrie sphérique.*
- 6.4. *Potentiel gravitationnel. Energie potentielle d'une masse plongée dans un champ extérieur.*

#### **CAPACITES EXIGIBLES :**

- Citer les équations de Maxwell-Gauss et Maxwell-Faraday. Particulariser ces équations au régime stationnaire.
- Énoncer et appliquer le théorème de Gauss.
- Établir le champ électrique et le potentiel créés par :
  - une charge ponctuelle,
  - une distribution de charge à symétrie sphérique.
  - une distribution de charge à symétrie cylindrique.
- Utiliser le modèle de la distribution surfacique de charge dans le cas d'une distribution volumique d'épaisseur faible devant l'échelle de description.
- Établir le champ électrique créé par un plan infini uniformément chargé en surface.
- Exploiter le théorème de superposition.
- Relier l'existence du potentiel scalaire électrique au caractère irrotationnel de  $\vec{E}$ .
- Exprimer une différence de potentiel comme une circulation du champ électrique.
- Établir la relation  $E_p = qV$ . Appliquer la loi de l'énergie cinétique à une particule chargée dans un champ électrique.
- Établir l'équation locale du deuxième ordre reliant le potentiel à la densité de charge.
- Associer l'évasement des tubes de champ à l'évolution de la norme de  $\vec{E}$  en dehors des sources. Représenter les lignes de champ connaissant les surfaces équipotentiels et inversement. Évaluer le champ électrique à partir d'un réseau de surfaces équipotentiels.
- Établir un tableau d'analogies entre les champs électrique et gravitationnel.

## EM 3 : CONDENSATEUR

### 1. Phénomène d'influence électrostatique

- 1.1. *Condition d'équilibre électrostatique d'un conducteur*
- 1.2. *Influence électrostatique de deux conducteurs en équilibre*
- 1.3. *Cas d'un condensateur : influence totale*

### 2. Condensateur plan sans effet de bord

- 2.1. *Modèle du condensateur plan sans effet de bord*
- 2.2. *Champ électrique*
- 2.3. *Capacité*
- 2.4. *Réalisation pratique. Choix de l'isolant*

### 3. Aspect énergétique

- 3.1. *Energie stockée lors de la charge d'un condensateur*
- 3.2. *Continuité temporelle de la charge*
- 3.3. *Densité volumique d'énergie électrique*

### CAPACITES EXIGIBLES :

- **Décrire qualitativement le phénomène d'influence.**
- Exprimer le champ d'un condensateur plan en négligeant les effets de bord. En déduire l'expression de la capacité.
- Prendre en compte la permittivité du milieu dans l'expression de la capacité.
- Citer l'expression de la densité volumique d'énergie électrique.
- Retrouver l'expression de la densité volumique d'énergie électrique dans le cas du condensateur plan à partir de la relation  $E = \frac{1}{2} CU^2$ .

## EM 4 : CHAMP MAGNETIQUE EN REGIME STATIONNAIRE

### 1. Les équations locales de la magnétostatique

- 1.1. *Equation de Maxwell – Ampère de la magnétostatique*
- 1.2. *Equation de Maxwell – Thomson*
- 1.3. *Linéarité : théorème de superposition.*

### 2. Circulation de $\vec{B}$ . Théorème d'Ampère.

- 2.1. *Théorème d'Ampère*
- 2.2. *Quand et comment mettre en œuvre le théorème d'Ampère ?*
- 2.3. *Exemples fondamentaux*
  - Fil rectiligne « infini »
  - Câble rectiligne « infini » épais
  - Bobine torique
  - Solénoïde « infini »
- 2.4. *Quelques ordres de grandeur*

### 3. Flux conservatif du champ magnétique.

- 3.1. Nullité du flux de  $\vec{B}$  à travers une surface fermée
- 3.2. Flux de  $\vec{B}$  à travers une section d'un tube de champ
- 3.3. Interprétation d'un resserrement ou d'un évasement des lignes de champ

### 4. Topographie du champ magnétique

- 4.1. Lignes de champ : orientation ; fermeture.
- 4.2. Visualisation de cartes de lignes de champ : lien avec les symétries.
- 4.3. Comment reconnaître une carte de lignes de champ ?  $\vec{B}$  ou  $\vec{E}$  ?

### 5. Forces de Laplace

- 5.1. Forces de Laplace s'exerçant sur une distribution volumique de courant
- 5.2. Modèle de conducteur filiforme
- 5.3. Cas d'une spire plongée dans un champ uniforme : couple.

### 6. Moment magnétique d'un aimant permanent

- 6.1. Lignes de champ d'un aimant droit et d'une spire circulaire
- 6.2. Notion de moment dipolaire magnétique
- 6.3. Champ magnétique dipolaire
- 6.4. Ordres de grandeur. Magnéton de Bohr.
- 6.5. Actions mécaniques subies par un dipôle magnétique plongé dans un champ extérieur

- Résultante nulle si champ uniforme ; attraction vers les zones de fort champ sinon.
- Couple de rappel : alignement avec le champ.
- Energie potentielle d'interaction avec le champ extérieur. Stabilité des positions d'équilibre.

### **CAPACITES EXIGIBLES :**

- Énoncer les équations de Maxwell-Ampère et Maxwell-Thomson. Particulariser l'équation de Maxwell-Ampère au régime stationnaire.
- Énoncer et appliquer le théorème d'Ampère.
- Établir l'expression du champ magnétique créé par :
  - un fil infini ;
  - un fil épais et infini ;
  - un solénoïde infini en admettant que le champ extérieur est nul ;
  - une bobine torique.
- Exploiter la conservation du flux magnétique et ses conséquences sur les lignes de champ magnétique.
- Exprimer les forces de Laplace s'exerçant sur un conducteur filiforme, sur une distribution volumique de courant.
- À partir d'une formule fournie exprimant le champ d'un dipôle magnétique, décrire le champ créé par un aimant à grande distance et représenter qualitativement les lignes de champ magnétique.

- 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 extérieur.
- Etablir l'expression du magnéton de Bohr dans le cadre du modèle de Bohr.

## EM 5 : ELECTROMAGNETISME DANS L'ARQS MAGNETIQUE

### 1. Les équations de Maxwell

- 1.1. *Les équations locales de Maxwell*
- 1.2. *Les équations intégrales de Maxwell*
- 1.3. *Propriétés et conséquences essentielles*
  - Linéarité : théorème de superposition
  - Invariance de  $c$  par changement de référentiel galiléen
  - Couplage des variations spatiales et temporelles de  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$

### 2. L'équation de Maxwell – Ampère. ARQS magnétique.

- 2.1. *Densité de courant de déplacement et conservation de la charge*
- 2.2. *L'ARQS magnétique*
  - Définition de l'ARQS magnétique
  - Champ magnétique  $\vec{B}(\vec{r}, t)$  dans l'ARQS magnétique
  - Loi des nœuds dans l'ARQS magnétique

### 3. L'équation de Maxwell – Faraday. Induction de Neumann : conducteur fixe dans un champ magnétique variable.

- 3.1. *Loi de Faraday*
- 3.2. *Les équations locales de l'induction (ARQS magnétique)*
- 3.3. *Induction dans un conducteur massif : courants de Foucault. Chauffage par induction.*
- 3.4. *Induction dans un circuit filiforme seul : auto-induction.*
- 3.5. *Induction dans deux circuits filiformes en influence mutuelle : induction mutuelle.*

### 4. Energie magnétique

- 4.1. *Energie magnétique stockée lors de l'établissement du courant dans une bobine*
- 4.2. *Continuité du flux et du courant*
- 4.3. *Densité d'énergie magnétique*
- 4.4. *Energie magnétique stockée lors de l'établissement des courants dans deux bobines en influence mutuelle. Lien avec les champs magnétiques.*
- 4.5. *Couplage partiel, couplage total.*

### 5. Induction de Lorentz : conducteur mobile dans un champ magnétique stationnaire.

- 5.1. *Exemple fondamental des rails de Laplace*
- 5.2. *Bilan de puissance : conversion de puissance électromécanique.*

### **CAPACITES EXIGIBLES :**

- Vérifier que le terme de courant de déplacement permet d'assurer la compatibilité des équations de Maxwell avec la conservation de la charge.
- 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.
- Relier la circulation de  $\vec{E}$  à la dérivée temporelle du flux magnétique, faire qualitativement le lien avec la loi de Faraday vue en première année.
- Dans le cas d'un conducteur cylindrique soumis à un champ magnétique parallèle à son axe, uniforme et oscillant, décrire la géométrie des courants de Foucault, exprimer la puissance dissipée par effet Joule en négligeant le champ propre. Expliquer l'influence du feuilletage.
- Exprimer l'énergie magnétique d'une bobine seule ou de deux bobines couplées en fonction des coefficients d'inductance et des intensités.
- Citer l'expression de la densité volumique d'énergie magnétique. La retrouver dans le cas de la bobine dont on néglige les effets de bord à partir de la relation  $E = \frac{1}{2} Li^2$ .
- Exploiter la continuité temporelle du flux magnétique.
- Dans le cas de deux bobines couplées, établir l'inégalité  $M^2 \leq L_1 L_2$ .

## **EM 6 : ENERGIE DU CHAMP ELECTROMAGNETIQUE**

### **1. Equation locale de Poynting : conservation de l'énergie électromagnétique.**

- 1.1. *Equation locale de Poynting*
- 1.2. *Densité volumique d'énergie électromagnétique et vecteur de Poynting*
- 1.3. *Cas de l'électrostatique*
- 1.4. *Cas de la magnétostatique et de l'ARQS magnétique*

### **2. Bilan intégral d'énergie électromagnétique**

- 2.1. *Bilan intégral sur un volume de contrôle*
- 2.2. *Exemple 1 : conducteur ohmique en régime stationnaire.*
- 2.3. *Exemple 2 : bilan énergétique de l'établissement du courant dans une bobine.*

### **CAPACITES EXIGIBLES :**

- Identifier les différents termes de l'équation locale de Poynting.
- Interpréter le vecteur de Poynting comme le vecteur densité de flux de puissance électromagnétique.