

Titre : Energie électromagnétique

Présentée par : Loïs Dufour

Rapport écrit par : Nathan Vaudry

Correcteur : Gatien Verley

Date : 9/06/2020

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Electromagnétisme : ondes et propagations guidées			
Tout en un de CPGE		Dunod	

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE

Pré-requis :

Différents types d'énergies vues auparavant (cinétique ; pesanteur). Energie électromagnétique un peu moins intuitive.

Première fois : en électrocinétique.

1. L'énergie électromagnétique dans le domaine de l'électrocinétique

1.1 Dans un condensateur

Etude du condensateur plan. Deux armatures séparées par un milieu isolant (vide ou air).

Surface des armatures notée S et armatures distantes de e . Capacité du condensateur $C=q/U=\epsilon_0 S/e$. Or Puissance $P=U \cdot I = CU dU/dt = d(CU^2/2)/dt$. D'où l'énergie stockée dans le condensateur $W=CU^2/2$. En divisant par Se l'on obtient la densité volumique d'énergie électrique stockée égale à $\epsilon_0 E_0^2/2$ avec E_0 le champ électrique du condensateur.

1.2 Dans une bobine

Dans le cas de la bobine on a $\varphi = Li^2$. φ est lié au champ magnétique dans le solénoïde à N spires parcourue par un courant i soit $B = \mu_0 i N / \ell$ et donc $i = B \ell / (N \mu_0)$. Par ailleurs

l'inductance du solénoïde est $L = N^2 \mu_0 S / \ell$. À injecter dans la densité d'énergie magnétique

$u_m = L i^2 / (2 S \ell)$, on trouve immédiatement $u_m = B^2 / (2 \mu_0)$

De même manière l'on obtiendrait une énergie volumique en $u_m = B^2 / (2 \mu_0)$

1.3 Exemples de circuits

Circuit avec résistance et condensateur en parallèle et étude de la décharge d'un condensateur pour prouver que le condensateur stocke de l'énergie.

Circuit LC : échange d'énergie entre la bobine et le condensateur.

Comment assurer le transport d'énergie (exemple du Soleil vers la Terre) ?

2. Transport de l'énergie électromagnétique

2.1 Transport libre : ondes électromagnétiques

2.1.1 Equations d'onde

Equations de Maxwell (rappelées). Opération $\text{rot}(\text{rot}()) = \text{grad}(\text{div}()) - \Delta$. Application au champ électrique E . Pas de densité volumique de charge ni de courant. Obtention d'une équation de d'Alembert pour E . On obtiendrait la même chose pour le champ magnétique B . Mise en évidence de l'onde électromagnétique qui propage de l'énergie.

2.1.2 Vecteur de Poynting

Application de $\text{div}(E \wedge B)$ et obtention de l'équation de conservation de l'énergie du champ magnétique : $d(\epsilon_0 E_0^2/2 + B^2/2\mu_0)/dt + \text{div}(E \wedge B/\mu_0) = -j \cdot E$. L'on pose alors la densité volumique d'énergie $u_{em} = \epsilon_0 E_0^2/2 + B^2/2\mu_0$ et le terme $E \wedge B/\mu_0 = \pi$ le vecteur de Poynting associé au champ électromagnétique (flux du champ électromagnétique en W/m^2). Au sommet de l'atmosphère $1360,8 W/m^2$ (constante solaire) et $4,3 \cdot 10^{-6} J/m^3$

Energie transmise dans toutes les directions. Mais si l'on veut éviter les pertes il faut pouvoir guider cette énergie : guidage des ondes.

2.2 Transport guidé : le câble coaxial

Modèle du câble coaxial. 2 câbles reliés entre eux par condensateur et bobine (caractérisés par Γdx et Λdx). A l'aide de la loi des mailles l'on obtient une équation de d'Alembert pour la tension avec la célérité caractéristique égale à $(\Gamma \Lambda)^{-0.5}$. De plus rapport tension/intensité =

$(\Lambda/\Gamma)^{0,5}=Z_c$. Après calculs l'on obtient $Z_c=50 \Omega$.

3. Conversions de l'énergie électromagnétique

3.1 Conversion thermique : le rayonnement thermique

Modèle du corps noir. Calcul de la densité spectrale d'énergie électromagnétique. Dépend de la température. 2 lois importantes : Stefan $\varphi=\sigma T^4$ avec σ la constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2/\text{K}^4$) et Wien $\lambda_{\max} T = 2,898 \text{ mmK}$ (permet d'obtenir à distance une mesure de la température de certains astres comme le Soleil, mais aussi est la base du procédé des caméras thermiques (humains émettant des infrarouges))

3.2 Conversion mécanique : les moteurs électriques

Moteurs asynchrones, synchrones et à courant continu. Mise en mouvement d'un aimant. L'inverse est aussi possible. Propulsion des trains électriques.

Avancées majeures.

Questions posées par l'enseignant

- Pré-requis : Que sont-ils ? (Pas forcément car vu dans différents niveaux, en réalité électrocinétique, analyse vectorielle et équations de Maxwell)
- Densité d'énergie magnétique dans la bobine (champ magnétique dans un solénoïde infini, cf cours d'induction, puis énergie en $Li^2/2$ que l'on divise par le volume SI.)?
- Equation de conservation pour déterminer le vecteur de Poynting. Que manque-t-il (terme de dissipation qui induit l'effet Joule)? De quel signe est-il (négatif car le champ perd de l'énergie) ?
- Vitesse de propagation des ondes et de l'énergie (valeur numérique de la vitesse de phase) ?
- Dimension d'une densité volumique de courant (intensité surfacique) ? Comment le relier à l'intensité du courant dans un fil ($di=j \cdot dS$) ?
- Je fournis un travail électrique, calcul de l'énergie potentielle et obtention d'un signe opposé. Pourquoi (il faut s'opposer à la force électrostatique) ?
- Pourquoi la force de Laplace ne travaille pas (car orthogonale au déplacement des charges) ?
- Sur une spire où circule un courant, la force de Laplace travaille-t-elle ? (Oui) Y a-t-il un autre effet compensant ce travail ? (Le déplacement du circuit induit une force électromotrice dont l'effet compense la force de Laplace en terme de travail)

-Champ variable. Quelles forces prendre en compte pour obtenir la bonne énergie potentielle via un calcul de travail ?
(force de Coulomb et Neumann, i.e. la force liée à la variation dans le temps du potentiel vecteur. Les travaux des autres forces se compensent.)
-Variables conjuguées pour le premier principe de la thermodynamique faisant apparaître les différents champs (charge et potentiel, courant et potentiel vecteur du champ magnétique) ?

Commentaires donnés par l'enseignant

Bonne idée de faire le lien avec l'électrocinétique (aller de l'électrocinétique à la théorie des champ).

Corps noir : pas forcément un bon modèle pour convertir rayonnement en énergie thermique.

Conversion : implique en général le transfert d'énergie « diluée » vers une énergie « concentrée » malgré de la dissipation et/ou production d'entropie. Ce n'est pas forcément bien le cas avec l'énergie électromagnétique.

Commenter les expressions des différentes densités volumiques d'énergie et dire que c'est quelque chose de général même si elles apparaissent dans un cas spécifique au début de la leçon.

Force de Laplace (sur circuit parcouru par un courant) et de Lorentz (liée au flux à travers la surface balayée par le circuit) se compensent. Force de Neumann (liée à la variation temporelle du potentiel vecteur) et de Coulomb apparaissent et donnent les contributions magnétiques et électriques dans l'énergie potentielle du champ EM.

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)

La leçon a été abordée avec un objectif de simplicité malgré la nature délicate du sujet.

Le plan est bien réfléchi en ce sens et approprié au titre de la leçon et au niveau envisagé. Le caractère transverse de la leçon et les applications évoquées sont des points positifs.

L'ellipse faite pour le calcul de la propagation guidée dans un câble coaxial était appropriée. Les transitions entre parties sont naturelles donnant de la fluidité à la leçon.

Améliorations à envisager :

- calcul de la densité d'énergie du champ magnétique via l'exemple du solénoïde (ajouté dans la leçon ci-dessus)

- partie sur le transport guidé dans un câble coaxial peu convaincante

- aborder les liens avec la thermodynamique (premier principe)

- Corps noir, mieux définir ce qu'est le corps noir, expliquer la notion de densité d'énergie par bande de longueur d'onde (ou fréquence) → intégrale sous la courbe = énergie totale du rayonnement, application : l'ampoule ? Efficacité de la conversion énergie électrique vers énergie lumineuse (délicat car il faut connaître les pertes thermiques, la conductivité en fonction de la température, etc)

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

Fondamental :

- Calcul des densités d'énergie du champ électrique et du champ magnétique,
- Calcul de l'énergie du champ électrique via le travail quasistatique
- Idem pour l'énergie du champ magnétique (plus délicat)
- Variables conjuguées au sens thermodynamique (extensives et intensives)
- vecteur de Poynting et conservation de l'énergie, (avec dissipation Joule dans la matière),
- lien avec l'électrocinétique (soit dans le sens de la leçon de Lois de l'électrocinétique aux champs ou, plus délicat dans l'autre sens, voir ma correction en vidéo pour passer du champ à l'électrocinétique),
- propagation de l'énergie électromagnétique.

Secondaire et transverse : conversion d'énergie, à traiter dans le mode convertisseur travail-travail (sans dissipation) ou dans le mode purement dissipatif (effet Joule, certaines expériences historiques de Joule impliquaient plusieurs effets EM qui l'ont forcé à simplifier son expérience jusqu'à la fameuse «expérience de Joule », cf TP mécanique), la notion de propagation d'onde paraît moins dans le thème si l'on aborde pas au moins rapidement la question de la propagation de l'énergie (vitesse de groupe), surtout ne pas parler uniquement de la vitesse de phase dans ce contexte...

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

- Les expériences proposées par Lois (décharge condensateurs et oscillation circuit LC),
- Mesure thermique de puissance d'un laser
- La machine magnéto-électrique de Zénobe-Gramme : transfert d'énergie d'un générateur de

courant alternatif vers un moteur à courant alternatif (expérience du musée des arts et métiers Paris, voir biblio) pour illustrer le transfert d'énergie d'une forme mécanique vers une forme mécanique, en passant par une conversion impliquant le champ EM et un transfert par conduction électrique.

- Expérience à la maison : la décharge d'un chargeur d'ordinateur équipé d'une LED (ordinateur mac) qui rayonne toujours même lorsque l'on a débranché le cable.

Bibliographie conseillée

J.M. Rax, Électromagnétisme

[Dossier de l'enseignant – L'énergie](#), Musée des arts et métiers de Paris