O 5

Ondes et électromagnétisme

5.1 Énoncés

▶ Exercice 5.1 : Questions de cours

1. Énoncer les équations de Maxwell dans le vide ainsi que les relations de passage à la traversée d'une interface.
2. Établir l'équation de propagation (équation de d'Alembert) pour le champ électrique $\overrightarrow{E}$ dans le vide dans une région sans charge ni courant.
3. Donner la relation entre $\overrightarrow{E}$ et $\overrightarrow{B}$ pour une onde plane progressive se propageant dans le vide. Exprimer le vecteur de Poynting.
4. Démontrer la relation traduisant le bilan local de l'énergie électromagnétique :

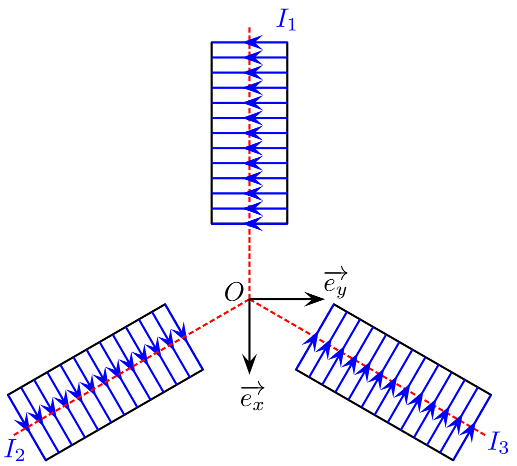
$$div\,\overrightarrow{\Pi} + \overrightarrow{j}\cdot\overrightarrow{E} + \frac{\partial w_{em}}{\partial t} = 0$$

▶ Exercice 5.2 : Champ tournant

On dispose 3 solénoïdes identiques coplanaires comme sur le schéma ci-contre. On fait passer dans les bobines les courants :

$$I_1 = I_0\,\cos(\omega\,t)$$
$$I_2 = I_0\,\cos\left(\omega\,t + \frac{2\,\pi}{3}\right)$$
$$I_3 = I_0\,\cos\left(\omega\,t + \frac{4\,\pi}{3}\right)$$

La contribution en O d'une bobine parcourue par le courant I_0 vaut B_0.
Calculer le champ magnétique en O créé par les trois solénoïdes en supposant que les courants sont enroulés comme ci-contre.



▶ Exercice 5.3 : Champ dans une cavité

Un conducteur cylindrique infini de rayon R et d'axe Oz est percé d'une cavité cylindrique parallèle de rayon r et d'axe Az. La densité de courant $\overrightarrow{j}$ est uniforme dans le conducteur.
Déterminer le champ magnétique à l'intérieur de la cavité. On mettra ce champ sous la forme d'un produit vectoriel faisant intervenir $\overrightarrow{j}$.

▶ Exercice 5.4 : Onde plane monochromatique

Une onde plane monochromatique polarisée rectilignement de pulsation ω se propage dans le vide dans la direction et le sens de l'axe Oz.

1. Calculer la densité volumique moyenne d'énergie électromagnétique en un point de l'espace ainsi que la valeur moyenne du vecteur de Poynting.
2. Quelle est l'énergie électromagnétique localisée en moyenne dans une tranche d'espace plane perpendiculaire à Oz, d'épaisseur dz et de surface S ?
3. En déduire la vitesse à laquelle se propage l'énergie électromagnétique.

▶ Exercice 5.5 : Balance électromagnétique

On considère une balance électromagnétique constituée par :

- un long solénoïde $\mathcal{C}_1$ fixe, d'axe horizontal, comprenant N_1 spires enroulées régulièrement sur une longueur ℓ_1,
- une bobine plate $\mathcal{C}_2$, d'axe vertical, comprenant N_2 spires, de surface S_2, fixée à l'extrémité B du fléau d'une balance mobile autour de l'axe horizontal passant par O.

1. À l'autre extrémité A du fléau est suspendue un plateau ($OA = \ell$).
   Lorsque aucun courant ne circule dans $\mathcal{C}_1$ et $\mathcal{C}_2$, un contrepoids permet de réaliser l'équilibre mécanique de façon que le fléau soit horizontal. On fait alors passer un même courant I dans $\mathcal{C}_1$ et $\mathcal{C}_2$. On doit placer une masse m sur le plateau pour rétablir l'équilibre.
   Calculer I en fonction de m et des données.
   Application numérique : $\ell_1 = 1{,}00\,m$, $\ell = 25{,}0\,cm$, $N_1 = 1000$, $N_2 = 100$, $S_2 = 5{,}00\,cm^2$, $g = 9{,}81\,m.s^{-2}$, $m = 2{,}42\,g$, $\mu_0 = 4\,\pi.10^{-7}\,H.m^{-1}$.
2. À l'extrémité A du plateau, on suspend maintenant un plateau circulaire de surface S, constituant une des armatures d'un condensateur à air. Lorsque aucun courant ne circule dans $\mathcal{C}_1$ et $\mathcal{C}_2$, la distance entre les armatures du condensateur est e.
   On fait alors passer le courant I précédent dans $\mathcal{C}_1$ et $\mathcal{C}_2$.
   Calculer la tension U qu'il faut établir entre les armatures du condensateur pour rétablir l'équilibre.
   On donne $S = 100\,cm^2$, $e = 10{,}0\,,mm$ et $\varepsilon_0 = \dfrac{1}{36\,\pi.10^9}\,F.m^{-1}$.
3. Définir la sensibilité et la calculer pour les deux dispositifs destinés à mesurer l'intensité I.

▶ Exercice 5.6 : Moteur synchrone

Par un montage convenable de bobines parcourues par des courants alternatifs de pulsation ω_0, on produit dans un certain volume un champ magnétique $\overrightarrow{B}$ tournant dans un plan (Π) autour d'un axe $z'z$ perpendiculaire à (Π) avec la vitesse angulaire constant ω_0.
Par ailleurs, une pièce mobile autour de l'axe $z'z$ porte un moment magnétique $\overrightarrow{\mathcal{M}}$ permanent, perpendiculaire à $z'z$ et tournant donc, comme $\overrightarrow{B}$ dans le plan (Π). On appelle α la valeur de l'angle $\widehat{\overrightarrow{\mathcal{M}}, \overrightarrow{B}}$ à l'instant $t = 0$.

1. On suppose que la pièce mobile portant $\overrightarrow{\mathcal{M}}$ est animée d'un mouvement de rotation uniforme autour de $z'z$ à la vitesse angulaire ω.

   (a) Calculer la valeur instantanée et la valeur moyenne au cours du temps du couple exercé sur la pièce mobile.

   (b) À quelle condition ce couple est-il moteur ?

2. La pièce mobile est soumise de la part des machines qu'elle entraîne et du fait des frottements à un couple résistant Γ_r.

   (a) La pièce mobile étant lancée avec une vitesse angulaire ω, étudier son mouvement ultérieur.

   (b) Déterminer la vitesse de rotation en régime permanent.

   (c) Étudier la stabilité du fonctionnement.

▶ Exercice 5.7 : Le mascaret

Le mascaret est une vague qui remonte l'estuaire de certains fleuves lorsque la marée est montante. Sa hauteur dépend du fleuve, du coefficient de marée et, dans certains cas, cette vague peut être particulièrement destructrice.

1. On considère que le mascaret est une onde mécanique se propageant à la célérité $v = 18{,}0\,km.h^{-1}$. Quelle est la nature de cette onde ?
2. L'aspect de la surface de l'eau est représenté ci-dessous : vue en coupe le long du fleuve à une date $t_0 = 0$ (les abscisses positives sont orientées vers la source du fleuve).

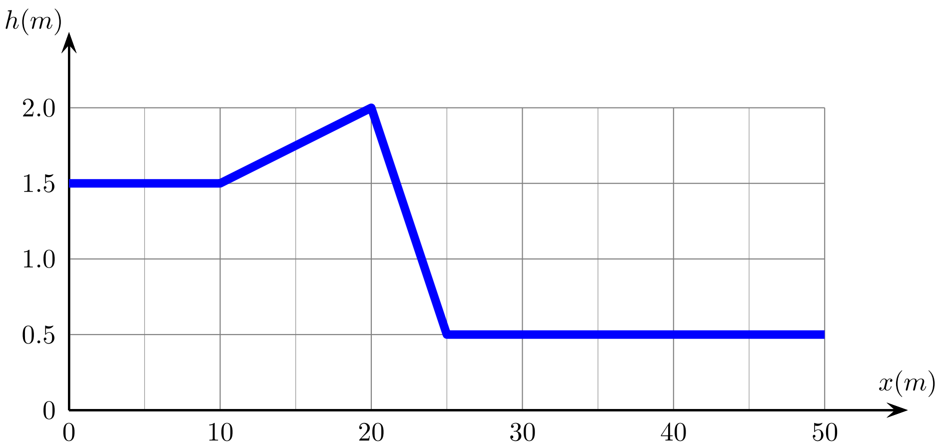


FIGURE 5.1 – Sens de propagation de l'onde $\Rightarrow$

   (a) À quelle date t_1 le front de la perturbation atteint-il le point D ?

   (b) À quelle date t_2 la hauteur d'eau est-elle maximale au point D ?

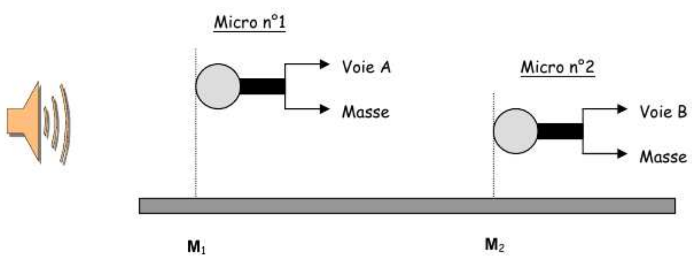
   (c) À partir de quelle date t_3 la hauteur de l'eau est-elle constante au point D ?

   (d) Regrouper les informations précédentes en construisant le graphe représentatif de la fonction hauteur $t \to h(t)$ au point D.

   (e) Représenter l'aspect de la surface de l'eau à la date $t = t_3$ (aucune justification n'est demandée).

▶ Exercice 5.8 : Onde sonore

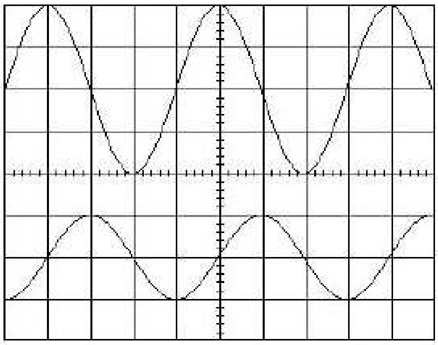
On réalise le montage suivant :



Le haut-parleur est relié à un GBF qui délivre une tension sinusoïdale. Les deux microphones sont reliés aux voies A et B d'un oscilloscope :

- cœfficient de sensibilité horizontale : $k_H = 0{,}50\,ms.div^{-1}$
- cœfficient de sensibilité verticale sur les 2 voies :
  $k_V = 1{,}0\,V.div^{-1}$

On obtient les oscillogrammes ci-dessous :



Remarque : pour faciliter la lecture, les deux courbes ont été décalées par rapport à l'axe médian.

1. Attribuez les deux signaux (haut et bas) aux micros n^{o}1 et n^{o}2. Justifiez votre réponse.
2. Déterminez les période et fréquence des deux signaux. Le son émis est-il audible par l'oreille humaine ? Justifiez votre réponse.
3. Calculez le retard temporel τ entre les signaux reçus en M_1 et M_2.
4. En admettant que la célérité du son est $v = 340\,m.s^{-1}$, quelle est la distance minimale d entre M_1 et M_2 ?
5. En supposant que la distance d précédente est la distance réelle entre les 2 micros, on éloigne un peu le micro n^{o}2 pour obtenir, sur l'écran de l'oscilloscope, deux courbes en phase. Soit M_2' la nouvelle position de ce micro.
   (a) Quel est le retard temporel τ' entre les signaux reçus par les deux microphones ?
   (b) Calculez la distance d' séparant alors M_1 et M_2' ?
   À quelle grandeur physique peut-on associer cette distance ? Justifiez votre réponse.
6. La fréquence de la tension délivrée par le GBF est divisée par deux. Calculez la longueur d'onde de l'onde sonore émise par le haut-parleur.