



BLAISE PASCAL
PT 2019-2020

Ondes électromagnétiques

Au programme

Extrait du programme officiel : partie 4 « Électromagnétisme », bloc 5 « Propagation ».

Le bloc 5, articulé autour de la propagation des ondes électromagnétiques, est l'occasion d'illustrer l'efficacité du formalisme local des équations de Maxwell en insistant sur les aspects qualitatifs et sur la variété des applications qui en découlent. Si le modèle de l'onde plane est présenté dans le cadre de l'espace vide de courant et de charge, l'étude des ondes électromagnétiques dans un milieu ohmique permet d'enrichir les compétences des étudiants sur les phénomènes de propagation en abordant l'effet de peau. La réflexion d'une onde électromagnétique sur un métal parfait et son confinement dans une cavité permettent aux étudiants d'approfondir leurs connaissances sur les ondes stationnaires et de découvrir des savoir-faire spécifiques permettant leur étude efficace. La notion de densité de courant surfacique est introduite, mais le calcul de l'intensité à travers un segment ne relève pas du programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Équations de propagation des champs dans une région vide de charges et de courants.	Établir les équations de propagation à partir des équations de Maxwell.
Onde plane dans l'espace vide de charge et de courant. Onde plane progressive et aspects énergétiques.	Citer les solutions de l'équation de d'Alembert à une dimension. Décrire la structure d'une onde plane et d'une onde plane progressive dans l'espace vide de charge et de courant.
Onde plane progressive monochromatique.	Expliquer le caractère idéal du modèle de l'onde plane monochromatique. Citer les domaines du spectre des ondes électromagnétiques et leur associer des applications.
Exemple d'état de polarisation d'une onde plane progressive et monochromatique : polarisation rectiligne. Polariseurs.	Reconnaître une onde plane polarisée rectilignement. Mettre en évidence une polarisation rectiligne.
Propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu ohmique en régime lentement variable. Effet de peau.	Établir et interpréter l'expression de la grandeur caractéristique d'atténuation de l'onde électromagnétique dans un milieu ohmique.
Réflexion sous incidence normale d'une onde plane, progressive et monochromatique polarisée rectilignement sur un plan conducteur parfait. Onde stationnaire.	Exploiter la nullité des champs dans un métal parfait. Établir l'expression de l'onde réfléchie en exploitant les relations de passage fournies. Interpréter qualitativement la présence de courants localisés en surface. Reconnaître et caractériser une onde stationnaire.
Applications aux cavités à une dimension. Mode d'onde stationnaire.	Utiliser la méthode de séparation des variables. Mettre en œuvre un dispositif permettant d'étudier une onde électromagnétique, dans le domaine des ondes centimétriques.

En **gras**, les points devant faire l'objet d'une approche expérimentale.

Au concours

- ▷ Écrit : épreuve A 2014 et 2017, épreuve de modélisation 2018.
- ▷ Oral : régulièrement

Plan du cours

I Ondes électromagnétiques dans le vide illimité

- I.1 Équation de propagation
- I.2 Ondes planes
- I.3 Ondes planes progressives harmoniques
- I.4 Relation de structure
- I.5 Transport d'énergie
- I.6 Polarisation

II Onde électromagnétique dans un conducteur ohmique

- II.1 Cadre de l'étude : régime lentement variable
- II.2 Équation de propagation
- II.3 Effet de peau

III Réflexion sur un conducteur parfait

- III.1 Réflexion sur un plan conducteur
- III.2 Confinement d'une onde électromagnétique entre deux plans conducteurs

Exercices de cours

Exercice C1 : Onde plane progressive et équation de d'Alembert

On considère une onde électromagnétique plane progressive de la forme $\vec{E}(x, t) = f(x - ct)\vec{e}_y$. Montrer par un calcul explicite des dérivées qu'elle vérifie l'équation de d'Alembert.

Exercice C2 : Relation de dispersion et équation de d'Alembert

On considère une OPPH de la forme

$$\vec{E}(x, t) = E_0 \cos(\omega t - kx)\vec{e}_y.$$

Dans quelle direction et quel sens se propage-t-elle? En calculant explicitement les dérivées, montrer à partir de l'équation de d'Alembert que ω et k sont reliés.

Exercice C3 : Exemples d'ondes polarisées rectilignement

Pour les champs électriques ci-dessous, identifier la direction de propagation et la direction de polarisation de l'onde. Exprimer le champ magnétique associé.

1 - $\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - kx)\vec{e}_y$

2 - $\vec{E} = E_0 e^{i(\omega t - kz)} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \vec{e}_x + \frac{1}{\sqrt{2}} \vec{e}_y \right)$

3 - $\vec{E} = -E_0 \exp\left(-\frac{(x + ct)^2}{a^2}\right) \vec{e}_z.$

Exercice C4 : Nœuds et ventres d'une onde stationnaire

On considère le champ électrique créé par la réflexion d'une OPPH sur un plan conducteur parfait situé en $x = 0$: pour $x \leq 0$,

$$\vec{E} = 2E_0 \sin(\omega t) \sin(kx)\vec{e}_y.$$

- 1 - Représenter le champ électrique à différents instants.
- 2 - Définir les nœuds de vibration, et déterminer leurs positions.
- 3 - Même question pour les ventres.

Documents

Document 1 : Spectre électromagnétique

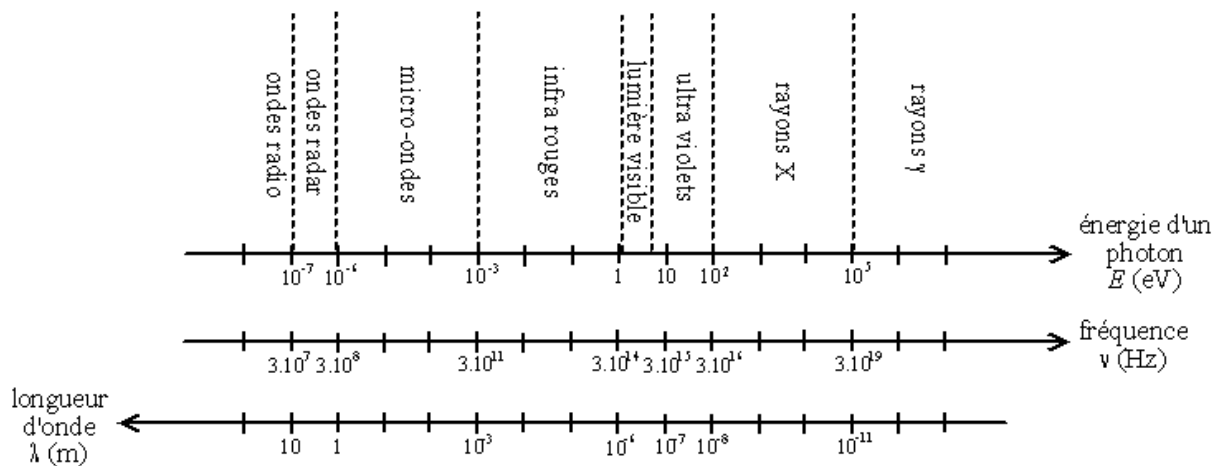


Figure 1 – Spectre électromagnétique. Figure extraite de Wikipédia.

Le domaine des télécommunications fait largement usage des ondes électromagnétiques. Les choix de bande de fréquences affectée aux diverses applications sont d'une part historiques, puisqu'un nouveau système ne doit pas perturber un dispositif déjà existant, mais résultent également de critères techniques. En particulier, la longueur d'onde joue un rôle critique dans le fonctionnement des systèmes utilisant des antennes. Notons que l'affectation d'une bande de fréquence à un type d'application est du ressort de la loi, car elle est considérée comme un partage du domaine public. Par exemple,

- ▷ le transport des signaux radiophoniques utilise des ondes radio, dont la fréquence porteuse est de l'ordre de la centaine de mégahertz pour la bande FM : la fréquence « 107.7 » de Autoroute Info indique une porteuse de fréquence 107,7 MHz ;
- ▷ la TNT exploite un domaine spectral de fréquences supérieures, comprises entre 470 et 790 MHz ;
- ▷ la téléphonie mobile utilise des ondes de fréquences encore plus élevées, de l'ordre du gigahertz (10^9 Hz) ;
- ▷ le réseau WiFi (« wireless fidelity », par analogie avec HiFi) repose lui sur l'utilisation de deux bandes de fréquences, la première autour de 2,4 GHz et la deuxième à un peu plus de 5 GHz.

Les rayons X et rayons γ sont qualifiés de rayonnements ionisants, c'est-à-dire à même d'arracher un électron à un atome. L'emploi de rayons X est l'une des principales techniques d'imagerie médicale, également utilisée pour l'étude de la matière à l'échelle atomique (structure cristalline, etc). Les rayons γ sont produits par la désintégration de noyaux radioactifs. Ils sont également exploités en imagerie médicale et en spectroscopie, mais peuvent provoquer de graves lésions (cancers, altération de l'ADN, etc.)

Document 2 : Exemples d'états de polarisation d'une onde électromagnétique



Animation JAVA permettant de visualiser une OPPH dans différents états de polarisation. Le champ électrique est représenté en rouge et le champ magnétique en bleu. On peut visualiser facilement le champ électromagnétique en un point en choisissant $N = 2$.

- ▷ Polarisation rectiligne : choisir E_y/E_x quelconque et un déphasage nul.
- ▷ Polarisation circulaire : choisir $E_y/E_x = 1$ et un déphasage de 90° .
- ▷ Polarisation elliptique : choisir par exemple $E_y/E_x = 1$ et un déphasage quelconque.

Document 3 : Effet d'un polariseur

La lumière naturelle est non polarisée, c'est-à-dire que la direction du champ électrique fluctue aléatoirement et rapidement. Lorsqu'elle arrive sur le polariseur, voir figure 2, l'onde est absorbée si la direction du champ électrique est parallèle aux barreaux de la grille et transmise si elle est perpendiculaire. Ainsi, en sortie du polariseur, l'onde est dans un état de polarisation rectiligne orthogonale à la grille.

Les polariseurs les plus fréquemment utilisés sont faits en matériaux polymères dont les chaînes moléculaires sont étirées dans une direction privilégiée, jouant un rôle analogue aux barreaux de la grille dans l'exemple ci-dessus.

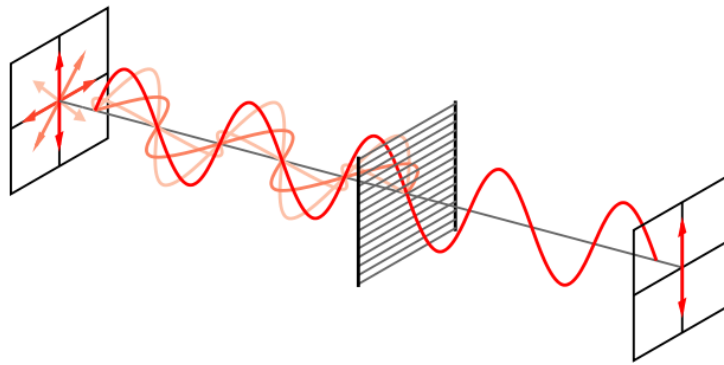


Figure 2 – Principe de fonctionnement d'un polariseur. Figure extraite de Wikipédia.



Animation JAVA permettant de visualiser l'effet d'un polariseur sur une OPPH dans différents états de polarisation. Le champ électrique est représenté en rouge et le champ magnétique en bleu. Elle s'utilise comme celle du document 2.

Document 4 : Onde électromagnétique dans un conducteur ohmique



Animation JAVA permettant de visualiser l'onde électromagnétique à l'interface entre le vide et un conducteur ohmique. L'onde incidente et l'onde réfléchie sont représentées en bleu, l'onde totale en rouge. Les abscisses sont graduées en termes de longueur d'onde dans le vide.

Choisir δ/λ permet de visualiser des conducteurs différents, jusqu'à la limite du conducteur parfait ($\delta \rightarrow 0$). Le coefficient R correspond au coefficient de réflexion en énergie : le rapport des amplitudes des ondes incidente et réfléchie dans le vide vaut \sqrt{R} .

Document 5 : Comparaison entre OPPH et OPSH

	Onde plane progressive harmonique	Onde plane stationnaire harmonique
Expression	$\sim \cos(\omega t - kx)$	$\sim \sin(kx) \cos(\omega t)$
Chrono-photographie	<p>— $t = 0$ - - - $t = T/3$ — $t = T/6$ - - - $t = T/2$</p>	<p>— $t = 0$ - - - $t = T/3$ — $t = T/6$ - - - $t = T/2$</p>
Propagation	Progression de l'onde à la célérité c .	Pas de progression mais vibration sur place.
Déformation	Toutes les points sont soumis, au cours du temps, aux mêmes champs.	Certains points ne vibrent pas (nœuds) alors que d'autres subissent des vibrations maximales (ventres).
Double périodicité	La longueur d'onde λ et la période T sont reliées par la relation de dispersion $\lambda = cT$.	La longueur d'onde λ et la période T sont reliées par la relation de dispersion $\lambda = cT$.