plan du cours de propagation d'ondes électromagnétiques dans le vide

RÉFLEXION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES ; PROPAGATION GUIDÉE

I) RÉFLEXION D'UNE ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE PLANE PROGRESSIVE SINUSOÏDALE SUR UN PLAN CONDUCTEUR :

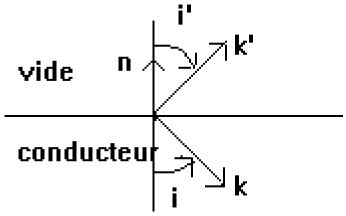
1) Lois de la réflexion :
L'expérience montre que, si une onde électromagnétique plane progressive monochromatique se propageant dans le vide (ou dans milieu LHI) arrive sur la surface de séparation avec un conducteur idéal, alors il existe une onde électromagnétique réfléchie électromagnétique plane progressive monochromatique

caractéristiques de l'onde réfléchie :
1) la pulsation de l'onde réfléchie est égale à celle de l'onde incidente
2) les composantes tangentielles des vecteurs d'onde des ondes incidente et réfléchie sont égales : $k'_T = k_T$

définition : le plan contenant le point M, point de la surface du conducteur où arrive l'onde incidente, et les vecteurs n, vecteur unitaire normal en M au conducteur et dirigé vers l'extérieur du conducteur, et k, vecteur d'onde de l'onde incidente, s'appelle plan d'incidence

lois de la réflexion (lois de Descartes) :

première loi : le vecteur d'onde de l'onde réfléchie est dans le plan d'incidence
deuxième loi : l'angle de réflexion est opposé à l'angle d'incidence : i' = - i



2) Etude de l'onde réfléchie dans le cas d'une incidence normale :

a) Etude du champ électrique :
sous incidence normale, à la surface du conducteur, le champ électrique E_r de l'onde réfléchie est opposé au champ électrique E_i de l'onde incidente (on dit encore que la réflexion se fait avec un déphasage de π pour le champ électrique)

remarque : la densité surfacique de charge du plan conducteur est nulle : $\sigma = 0$

b) Etude du champ magnétique :

sous incidence normale, à la surface du conducteur, le champ magnétique B_r de l'onde réfléchie est égal au champ magnétique B_i de l'onde incidente (on dit encore que la réflexion se fait sans déphasage pour le champ magnétique)

remarque : il existe sur le plan conducteur une densité surfacique de courant : $j_s = \frac{1}{\mu_0} n \wedge B$

c) Schéma récapitulatif

3) Superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie :

a) Champs électrique et magnétique résultants :

si u_x est le vecteur unitaire normal sortant du conducteur, alors on a, par superposition de l'onde incidente (se propageant parallèlement à u_x dans le sens de ($-u_x$)) et de l'onde réfléchie (se propageant parallèlement à u_x dans le sens de u_x), les champs :

$$E_y = 2.E_0.\sin(k.x).\cos(\omega.t+\pi/2) = -2.E_0.\sin(k.x).\sin(\omega.t)$$

$$B_z = (2.E_0/c).\cos(k.x).\cos(\omega.t+\pi) = -(2.E_0/c).\cos(k.x).\cos(\omega.t)$$

b) Visualisation de l'onde résultante : onde stationnaire :

α) étude du champ électrique :

plans nodaux de E : $x= n.\lambda/2$ (en particulier: la surface du conducteur) (n entier naturel)

plans ventraux de E : $x = (n+1/2).\lambda/2$ (n entier naturel)

ß) étude du champ magnétique :

les plans nodaux de B sont les plans ventraux de E

les plans ventraux de B sont les plans nodaux de E

γ) étude de la densité volumique d'énergie électromagnétique

δ) étude du vecteur de Poynting

ε) vérification expérimentale

II) PROPAGATION GUIDÉE :

1) Position du problème :

il s’agit d’étudier la structure des champs électrique et magnétique d’une onde astreinte à se propager dans un guide infiniment long, c’est-à-dire à l’intérieur d’une cavité infiniment longue et entièrement entourée, latéralement, d’un conducteur idéal

2) Détermination des champs des modes TE_{n0} :

définition : une onde est dite transverse électrique si, et seulement si la direction de son champ électrique est orthogonale à la direction de propagation de l’onde

on cherche l'expression des champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ de façon que l'on ait un champ $\vec{E}$:
 *monochromatique
 * transverse par rapport à la longueur Oz du guide d'ondes
 * se propageant selon une direction parallèle à la longueur Oz du guide d'ondes
 * polarisé rectilignement
 * vérifiant les équations de Maxwell
 * vérifiant les conditions aux limites imposées par la présence des plans parfaitement conducteurs définissant le guide d'ondes

résultat général : pour un guide d'ondes rectangulaire, infiniment long selon Oz, de largeurs a selon Ox et b selon Oy, les champs électrique et magnétique peuvent avoir la structure suivante :

$$\vec{E} = E_0.\sin\left(n\frac{\pi x}{a}\right).\cos(kz-\omega t)\vec{u}_y \quad \text{et :} \quad \vec{B} = B_x\vec{u}_x + B_z\vec{u}_z$$

avec : $$B_x = -\frac{k}{\omega}E_0\sin\left(n\frac{\pi x}{a}\right).\cos(kz-\omega t) \text{ et : } \quad B_z = \frac{n\pi}{a\omega}E_0\cos\left(n\frac{\pi x}{a}\right).\sin(kz-\omega t)$$

<u>3) Relation de dispersion et pulsation de coupure des modes TE_{n0} :</u>

relation de dispersion du mode n dans le guide : $k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - n^2\frac{\pi^2}{a^2} = \frac{1}{c^2}\left(\omega^2 - \omega_c{}^2\right)$ où : $\omega_c = n\frac{\pi c}{a}$

(n entier naturel non nul)

conséquence : seules des ondes de fréquence supérieure à la fréquence de coupure du mode n : $\nu_c = n\frac{C}{2a}$ peuvent se propager selon le mode n

résultat qualitatif général :
  1) il existe différents modes de propagation
  2) pour chaque mode n, il existe une pulsation de coupure ω_{cn} : seules les ondes de pulsation supérieure à ω_{cn} peuvent se propager selon le mode n
  3) ω_{cn} étant une fonction croissante de n, les ondes de pulsation inférieure à ω_{c1} ne peuvent se propager selon aucun mode dans le guide d'ondes

<u>4) Densités surfaciques de charge et de courant à la surface du conducteur</u>

<u>5) Interprétation des modes TE_{n0} par superposition</u>

<u>6) Propagation de l'énergie associée à l'onde selon le mode TE_{n0}</u>

<u>7) Onde transverse électrique la plus générale polarisée selon Oy :</u>

$$\vec{E} = \sum_{n=1}^{\infty} E_{0n}.\sin\left(n\frac{\pi x}{a}\right).\cos(kz-\omega t)\vec{u}_y$$

$$\vec{B} = B_x\vec{u}_x + B_z\vec{u}_z \text{ où : } B_x = -\sum_{n=1}^{\infty}\frac{k_n}{\omega}E_{0n}\sin\left(n\frac{\pi x}{a}\right).\cos(kz-\omega t) \text{ et : } B_z = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{n\pi}{a\omega}E_{0n}\cos\left(n\frac{\pi x}{a}\right).\sin(kz-\omega t)$$

8) Cas particulier d'une onde stationnaire :

théorème-définition : lorsqu'on a un milieu délimité par deux plans parfaitement conducteurs parallèles distants de a, seules des ondes stationnaires correspondant à certaines pulsations ω_n peuvent exister ; ω_n doit vérifier :

$\omega_n = n\pi\dfrac{c}{a}$ (n entier naturel)

on dit qu'à chaque valeur de n est associé le mode d'onde stationnaire n : $\omega_n = n\pi\dfrac{c}{a}$ ou $\omega_n = n\dfrac{c}{2a}$

interprétation des résultats :

a) première interprétation : pour une onde de pulsation ω donnée, si l'on veut avoir une onde stationnaire entre les deux plans conducteurs, la position relative de ces plans ne peut pas être quelconque : la distance a entre ces deux plans doit être telle que : $a = n.\pi/k = n.\lambda/2$

b) deuxième interprétation : pour une position respective donnée des deux plans conducteurs, c'est-à-dire pour une distance L entre les deux plans conducteurs donnée, si l'on veut avoir une onde stationnaire entre les deux plans conducteurs, la pulsation ω_n de l'onde ne peut pas être quelconque ; on doit avoir : $\omega_n = n\pi\dfrac{c}{a}$

théorème : la solution la plus générale de l'onde électromagnétique pouvant exister entre deux plans parfaitement conducteurs, parallèles et distants de L, est :

$$E = E_0.\sin\left(n\frac{\pi x}{a}\right).\cos\left(n\pi\frac{c}{a}t\right)u_y \quad \text{et} \quad B_x = -\sum_{n=1}^{\infty}\frac{k_n}{\omega}E_{0n}\sin\left(n\frac{\pi x}{a}\right).\cos\left(n\pi\frac{c}{a}t\right)$$

$$B_z = -\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n\pi}{a\omega}E_{0n}\cos\left(n\frac{\pi x}{a}\right).\sin\left(n\pi\frac{c}{a}t\right)$$

III) ASPECT CORPUSCULAIRE DES ONDES : PHOTONS :

1) Relations d'Einstein et de de Broglie :

Postulat : une onde plane progressive de fréquence ν, de pulsation ω, de direction et sens de propagation u, de vecteur d'onde k , est constituée de quanta d'énergie ou photons :

d'énergie W : $W = h\nu = \ \omega$

de quantité de mouvement p : $p = \ k$

2) Pression de radiation :

Définition : la pression de radiation d'une onde électromagnétique sur un conducteur est la pression exercée par les photons sur ce conducteur

théorème : pour une onde plane progressive monochromatique, le champ électrique de l'onde étant E_i arrivant sous incidence normale sur un conducteur idéal, la pression de radiation P est : $P = 2w_i = 2\varepsilon_0 E_{i0}^{\ 2}.\cos^2\omega t$

et, en valeur moyenne temporelle : $< P >= 2 < w_i >= 2\varepsilon_0 < E_i^{\ 2} >= \varepsilon_0 E_{i0}^{\ 2}$