

ENERGIE ELECTROMAGNETIQUE .

1- Puissance cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charge :

1- Densité volumique de force électromagnétique :

On considère un porteur de charge de charge q et de vitesse \vec{v} dans le référentiel d'étude plongé dans un champ électromagnétique (\vec{E}, \vec{B}) .

Un porteur de charge subit la force :

Un élément de volume dV mésoscopique subit une force égale à la somme des forces s'exerçant sur chaque porteur de charge .

n = nombre de porteurs par unité de volume .

2- Puissance cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charge :

II- Loi d'Ohm locale – Densité volumique de puissance dissipée par effet Joule :

1- Loi d'Ohm locale :

Un conducteur électrique est un milieu comportant des charges libres susceptibles de se déplacer sous l'action d'un champ électrique . Dans les métaux, les charges libres sont des électrons libres, dans les solutions électrolytiques ce sont des anions et des cations .

La loi d'Ohm locale relie la densité volumique de courant en un point M à l'intérieur d'un conducteur au champ électrique en ce point : $\vec{j}(M, t) = \gamma \vec{E}(M, t)$

γ est la conductivité électrique du conducteur , $\gamma > 0$ dépend du matériau et de la température dont on néglige très souvent l'influence .

Ordres de grandeur :

Cu bon conducteur $\gamma = 6.10^7 S.m^{-1}$

Isolant $\gamma \approx 10^{-11} S.m^{-1}$

Eau de mer quelques $S.m^{-1}$

Si semi-conducteur $\gamma = 3,8.10^{-4} S.m^{-1}$

2- Exemple de modèle : modèle de drûde :

Un métal est modélisable par un réseau d'ions positifs fixes dans lequel des électrons de conduction se déplacent librement . La densité d'électrons de conduction est de l'ordre de $n \approx 10^{28} m^{-3}$.

La densité n est élevée, le milieu étant dense, il existe des collisions entre les électrons libres et les ions du réseau cristallin qui freine le mouvement d'ensemble des charges libres . Ce freinage est modélisé par une force de frottement fluide $-\frac{m}{\tau} \vec{v}$, τ étant homogène à un temps .

Appliquons la deuxième loi de Newton à un électron de conduction de masse m du matériau plongé dans un champ électrique \vec{E} .

τ est le temps caractéristique du régime transitoire .

Ordre de grandeur : cas du cuivre

Masse volumique $\mu = 8,96.10^3 kg.m^{-3}$

Masse molaire $M = 63,5 g.mol^{-1}$

Conductivité : $\gamma = 5,96.10^7 S.m^{-1}$

Masse d'un électron : $m = 9,11.10^{-31} kg$

Nombre d'Avogadro : $N_A = 6,02.10^{23} mol^{-1}$

On considère que chaque atome donne un électron de conduction .

3- Densité volumique de charges dans un conducteur ohmique :

4- Puissance volumique dissipée par effet Joule :

Le champ électromagnétique cède de la puissance aux charges (puissance reçue par les charges), cette puissance est ensuite évacuée sous forme d'effet Joule (conversion énergie em en énergie thermique) .

III- Bilan d'énergie électromagnétique :

Micro-onde, condensateur , bobine ... : là où il y a un champ électromagnétique, il y a de l'énergie .

1- Densité volumique d'énergie électromagnétique :

La répartition de l'énergie électromagnétique dans l'espace est donnée par la densité volumique d'énergie électromagnétique $u_{em}(M, t)$ qui est telle que l'énergie électromagnétique contenue, à t , dans un volume dV situé autour du point M :

L'énergie électromagnétique contenue dans un volume (V) à t s'écrit :

On admet que :

2- Vecteur de Poynting :

L'énergie électromagnétique se propage (énergie provenant du soleil) .

Le flux d'énergie transportée par la champ électromagnétique est décrit par le vecteur de Poynting

$$\vec{\Pi}(M, t) .$$

$\vec{\Pi}(M, t)$ est tel que la puissance dP traversant, à t , une surface $d\vec{S}$ centrée en M :

La puissance électromagnétique traversant une surface (S) ou puissance rayonnée à travers (S) est le flux du vecteur de Poynting à travers cette surface .

On admet que :

Ordre de grandeur du flux énergétique moyen :

Laser utilisé en TP $P \approx 1 \text{ mW}$, diamètre du faisceau de l'ordre de 1 mm $\langle \Pi \rangle = 10^3 \text{ W.m}^{-2}$

Flux thermique solaire 1400 W.m^{-2}

téléphone portable

au repos $E \approx 2,4 \text{ V.m}^{-1}$ $\langle \Pi \rangle = 8 \text{ mW.m}^{-2}$

en appel $E \approx 20 \text{ V.m}^{-1}$ $\langle \Pi \rangle = 0,5 \text{ W.m}^{-2}$

3- Bilan global d'énergie :

Soit un volume (V) fixe et indéformable .

L'énergie électromagnétique dans (V) à l'instant t est :

Au cours du temps $U_{em}(t)$ varie car :

→ de l'énergie électromagnétique sort algébriquement de (V) par la surface fermée (S) délimitant (V) .

→ le champ électromagnétique cède de l'énergie aux charges en mouvement contenues dans (V) .

Puissance totale sortant de (S) .

Puissance cédée par les charges en mouvement dans ans (V) :

Bilan global :

Equation locale non exigible mais il faut savoir interpréter chaque terme :

- $\frac{\partial u_{em}}{\partial t}$ traduit la variation de la quantité d'énergie présente : « terme de stockage »
- $\text{div } \vec{\Pi}$ correspond au déplacement d'énergie » terme de transfert »
- $-\vec{j} \cdot \vec{E}$ correspond à la production locale d'énergie : « terme de production »

Remarque :

On a une équation analogue à l'équation de diffusion, à l'équation de conservation de la charge (pas de terme de source) .

IV Exemples :

1- Résistance électrique en régime stationnaire :

2- Condensateur en régime stationnaire :

3- Solénoïde en régime stationnaire :