

Dans ce chapitre, nous présentons un certain nombre de concepts et des notions scientifiques qui seront utilisés dans notre étude. Dans cette partie qui constitue un support théorique pour notre mémoire, nous présentons des notions générales sur les polymères conducteurs composites, le champ électromagnétique, la compatibilité électromagnétique et les ondes électromagnétiques. Cette partie, une précieuse aide pour mieux comprendre le phénomène du blindage électromagnétique.

1. MATERIAUX COMPOSITES

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances sont supérieures à celles des composants pris séparément [1]. Ce matériau est l'association d'au moins deux constituants, un renfort et une matrice [2].

De façon courante un matériau composite est constitué d'une ou plusieurs phases discontinues dispersées dans une phase continue. La phase continue est appelée la matrice, la phase discontinue est appelée le renfort (figure 1).

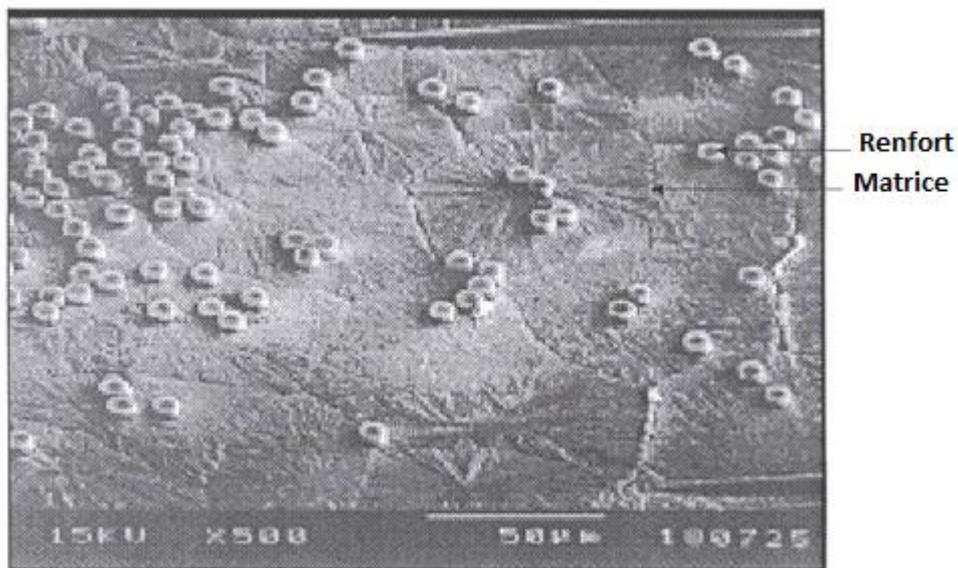


Figure 1. Analyse microstructure du composite PEAK/fibre de carbone [3].

1.1. Composants des matériaux composites

1.1.1. Matrice

La matrice permet de lier les particules du renfort entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des particules renfort, généralement, c'est un polymère ou une résine organique [1].

1.1.2. Renfort

Le renfort est le squelette supportant les efforts mécaniques. Il peut se présenter sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif [4].

Les matériaux de renfort confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques (rigidité, résistance, à la rupture, dureté etc.)[5].

1.2. Classification des matériaux composites

Parmi les composites, on distingue deux types : les composites à grandes diffusions (GD) et les composites à hautes performances (HP).

- Les matériaux composites dits de grande diffusion dont les propriétés mécaniques sont plus faibles mais d'un coût compatible avec une production en grande série [6]. Ces matériaux, représentent environ 95% des matériaux composites utilisés dans le monde. Ce sont des plastiques renforcés et dont la fraction volumique du matériau de renfort avoisine 30% [7].

- Les matériaux composites dits à hautes performances, présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un coût unitaire important. Ce sont les plus employés en aéronautique et dans le spatial [6]. Ce type de matériaux est renforcé par des fibres longues dont la fraction volumique est supérieure à 50%. Les propriétés mécaniques de ces matériaux (résistance mécanique et rigidité), sont supérieures à celles des métaux classiques [8].

2. POLYMERES CONDUCTEURS COMPOSITES

Les composites polymères conducteurs sont des matériaux hétérogènes élaborés en associant un ou plusieurs polymère (s) à une ou plusieurs charge (s) pour obtenir des fonctions spécifiques ou intelligentes. Cependant ces polymères conducteurs sont des matériaux sensibles, adaptifs et évolutifs. Ils possèdent des fonctions qui lui permettent de se comporter comme un capteur (détecteurs des signaux), un actionneur (effectuer une action sur son environnement) ou parfois comme un processeur (traiter, comparer, stocker des informations) [9]. Ces matériaux sont capables de modifier spontanément leurs propriétés physiques (forme, conductivité et viscosité) en réponse à des excitations naturelles ou provoquées venant de l'extérieur ou l'intérieur du matériau (variations de la température, contrainte mécanique, champ électrique ou magnétique) [10]. Le matériau va donc adapter sa réponse, signaler une modification apparue dans l'environnement et dans certains cas, provoquer une action de correction [9].

Les polymères conducteurs composites sont constitués d'une matrice polymérique isolante dans laquelle sont noyées des particules conductrices, leur conductivité électrique dépend de la concentration et de la nature de ces particules renforts [11].

Dans ces polymères conducteurs composites, le régime de conduction passe brusquement de l'état isolant (faible conductivité électrique) à l'état conducteur (haute conductivité électrique) pour une concentration critique en grains conducteur dite seuil de percolation [12,13].

Pour des faibles fractions volumiques, les inclusions conductrices sont suffisamment espacées et le polymère conducteur composite est donc isolant. Au fur et à mesure que la fraction volumique augmente, la distance entre les inclusions conductrices décroît, entraînant une augmentation de conductivité électrique. Cette augmentation se manifeste subitement au seuil de percolation. Au dessus du seuil de percolation, la conductivité électrique varie sensiblement avec l'augmentation de la fraction volumique des inclusions conductrices (figure 2).

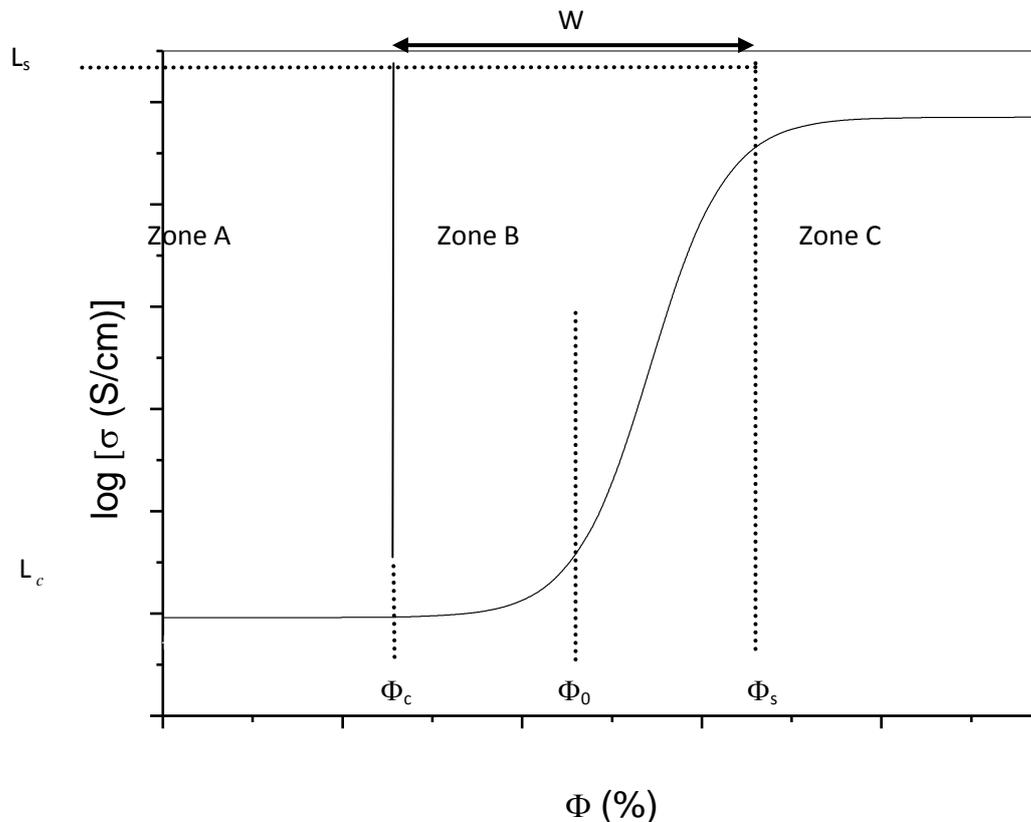


Figure 2. Allure générale de la variation de la conductivité électrique d'un polymère conducteur composite en fonction de la fraction volumique des inclusions conductrices.

Zone A : domaine d'isolant,

Zone B : domaine de percolation,

Zone C : domaine de haute conduction.

3. CHAMP ELECTROMAGNETIQUE

Les champs électromagnétiques sont une combinaison de champs de force électriques et magnétiques invisibles. Ils sont générés par des phénomènes naturels, mais aussi par les activités humaines, principalement lors de l'utilisation d'électricité [14]. Il est défini à partir des composantes de la force électromagnétique s'appliquant sur une particule chargée avec une charge q se déplaçant dans un référentiel galiléen à la vitesse v , cette force s'exprime par :

$$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{H}) \quad (1)$$

Où \vec{E} est le champ électrique et \vec{H} est le champ magnétique.

3.1. Champ électrique

Le champ électrique est la force qui résulterait de l'action à distance de particules électriquement chargées sur une particule test de charge unité au repos dans le référentiel d'étude. C'est donc la force subie par la particule au repos divisée par la charge de cette particule. Il s'agit d'un champ vectoriel qui à tout point de l'espace associe une direction, un sens, et une grandeur (amplitude). C'est un champ qui dépend de la tension [15].

En physique, on désigne par champ électrique un champ créé par des particules électriquement chargées. Un tel champ permet de déterminer en tout point de l'espace la force électrique exercée à distance par ces charges.

3.2. Champ magnétique

Le champ magnétique est une grandeur caractérisée par la donnée d'une intensité et d'une direction, définie en tout point de l'espace, et déterminée par la position et l'orientation d'aimants, d'électroaimants et le déplacement de charges électriques. La présence de ce champ se traduit par l'existence d'une force agissant sur les charges électriques en mouvement (dite force de Lorentz), et divers effets affectant certains matériaux (paramagnétisme, diamagnétisme ou ferromagnétisme selon les cas). La grandeur qui détermine l'interaction entre un matériau et un champ magnétique est la susceptibilité magnétique [16].

On peut définir le champ magnétique comme une quantité vectorielle dirigée dans l'axe force nulle [17].

4. COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE

La compatibilité électromagnétique, est l'aptitude d'un appareil ou d'un système électrique ou électronique à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement.

- Par appareils il faut entendre : tous les appareils électriques et électroniques ainsi que les équipements et les systèmes qui contiennent des composants électriques et/ou électroniques.
- Par perturbation électromagnétique il faut entendre : tout phénomène électromagnétique, notamment un bruit électromagnétique, un signal non désiré ou une modification du milieu de propagation lui-même, susceptible de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système. Donc la compatibilité électromagnétique est une nécessité pour le fonctionnement satisfaisant de tous les systèmes, équipements et sous ensembles d'une installation [18].

4.1. Vecteur de propagation

La transmission d'une perturbation entre la source et le système à protéger fait intervenir un ou plusieurs phénomènes physiques que l'on appelle des couplages. Selon les phénomènes en question, sur lesquels nous reviendrons, on parle de couplage par impédance commune, de couplage capacitif, de couplage inductif et de couplage électromagnétique. Ceci dit, la compatibilité électromagnétique fait une première classification entre les vecteurs en distinguant:

- Les perturbations conduites : celles qui se propagent par les câbles de liaison et en particulier les câbles d'alimentation,
- Les perturbations rayonnées : celles qui n'empruntent pas de voie matérielle, mais agissent par l'intermédiaire de champs magnétique, électrique et électromagnétique,
- Les décharges électrostatiques consécutives à la mise en contact d'un conducteur chargé électriquement ou à un amorçage par ionisation de l'air,
- L'impulsion électronucléaire: elle évoque le rayonnement électromagnétique ravageur qui serait provoqué par l'explosion en altitude d'une charge nucléaire et qui pourrait

mettre hors d'usage une partie importante des matériels électriques exposés [19].

4.2. Susceptibilité électromagnétique

On appelle niveau de susceptibilité d'un appareil le niveau de perturbation auquel l'appareil présente un dysfonctionnement. On appelle niveau d'immunité le niveau auquel l'appareil a été soumis lors des essais et pour lequel il doit fonctionner normalement.

Si la compatibilité électromagnétique est ignorée ou incorrectement traitée, les conséquences peuvent aller d'une simple nuisance à une grave interruption de service; voire des dommages sérieux aux biens ou aux personnes. Les simples gênes sont celles d'un parasitage sur la radio, sur la télévision ou sur un téléphone, un rapport signal / bruit dégradé sur une chaîne analogique, des ratés sur un allumage électronique d'automobile, etc. [20].

Dans la liste des incidents graves, qui malheureusement s'allonge, on peut citer le blocage complet d'un processus de fabrication industrielle, la manœuvre involontaire d'un pont roulant ou d'un robot dans un hall d'usine, l'impossibilité de basculer de normal à secours le réseau électrique d'un hôpital entier, la destruction d'un système par les effets indirects de la foudre, la mise à feu inopinée d'un dispositif pyrotechnique, etc.

Enfin, un secteur particulier, l'anti-compromission concerne la défense contre l'espionnage ou le piratage électronique par la capture de signaux électromagnétiques, conduits ou rayonnés [20].

Une bonne compatibilité électromagnétique dicte que chaque équipement ne soit ni perturbateur, ni perturbé. Cette cohabitation implique des précautions pour maîtriser à la fois les émissions électromagnétiques des appareils et leur susceptibilité aux perturbations ambiantes [20].

Comme il n'est pas économiquement et techniquement réaliste de construire des équipements qui n'émettent rien et qui résistent à tout, il existe des règles, sous forme de limite standard, qui permettent de gérer les cohabitations en fonction des principales catégories d'environnement [20].

Ces limites régissent:

- les émissions de signaux indésirables par conduction et rayonnement,
- l'immunité à des perturbations reçues par conduction et rayonnement.

5. ONDES ELECTROMAGNETIQUES

Une onde électromagnétique est la combinaison de deux perturbations ; l'une est électrique, l'autre est magnétique. Maxwell étudia les rapports entre les deux champs, établissant des équations connues sous le nom d'équations de Maxwell.

Ces deux perturbations, qui oscillent en même temps mais dans deux plans perpendiculaires se déplacent à la vitesse de la lumière dans le vide. Une onde électromagnétique peut donc se concevoir comme une perturbation électrique de la matière qui se propage (figure 3) [21].

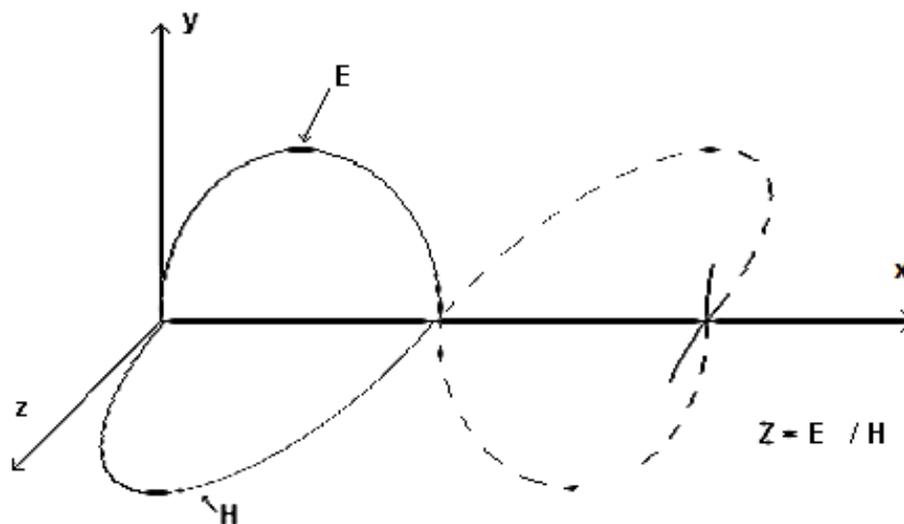


Figure 3. Composition d'une onde électromagnétique

5.1. Propriétés physiques des ondes électromagnétiques

a- vitesse de déplacement

L'onde électromagnétique se propage en ligne droite dans un milieu homogène; sa vitesse est $C=3. 10^8$ m/s dans le vide ou $v= C/n$ dans un milieu autre que l'espace et dont l'indice de réfraction est n .

b- fréquence et longueur d'onde

La fréquence d'une onde électromagnétique est la fréquence des champs électriques et magnétiques qui la composent.

La longueur d'onde λ est définie comme le trajet parcouru par une onde après une période d'oscillation.

c- polarisation du champ rayonné

La polarisation d'une onde électromagnétique est déterminée par la direction de son champ électrique \vec{E} . Si le champ électrique garde une direction constante en un certain point quel que soit le temps, on dit que la polarisation est rectiligne; le plus souvent elle est contenue soit dans un plan horizontal (polarisation horizontale) soit dans un plan vertical (polarisation verticale).

5.2. Spectre d'onde électromagnétique

Le spectre électromagnétique, est la décomposition du rayonnement électromagnétique selon ses différentes composantes en fonction de sa longueur d'onde, ou de manière équivalente, de sa fréquence.

Ce spectre, s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio). La télédétection utilise plusieurs régions du spectre électromagnétique.

Les plus petites longueurs d'onde utilisées pour la télédétection se situent dans l'ultraviolet. Ce rayonnement se situe au-delà du violet de la partie du spectre visible. Certains matériaux de la surface terrestre, surtout des roches et minéraux, entrent en

fluorescence ou émettent de la lumière visible quand ils sont illuminés par un rayonnement ultraviolet (figure 4) [22].

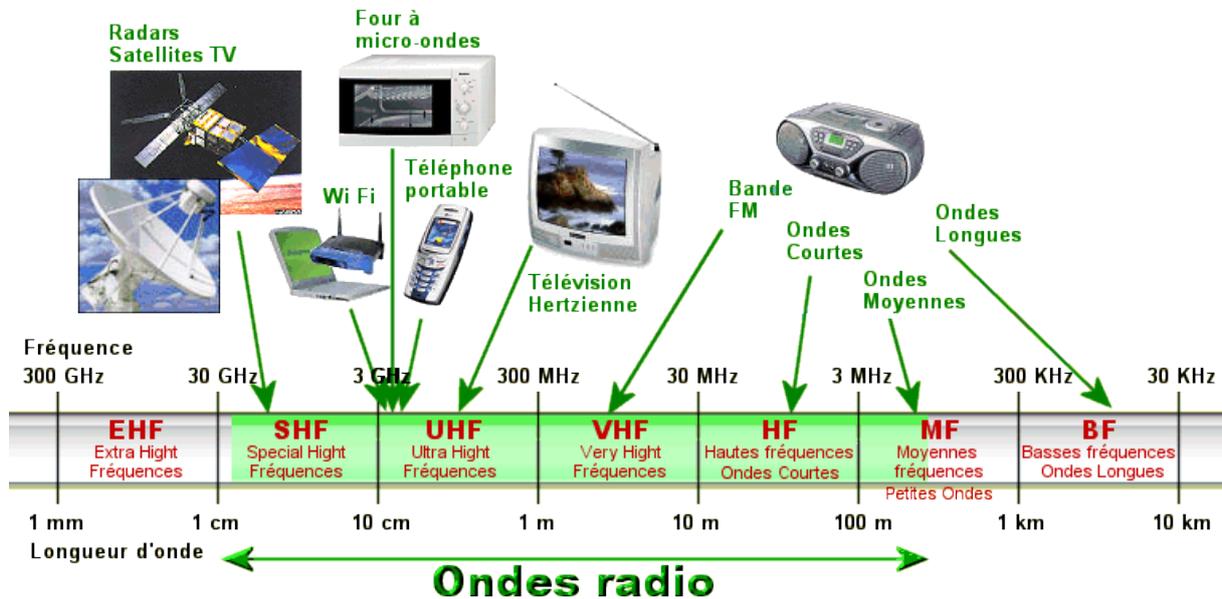


Figure 4. Différents types d'ondes électromagnétiques

Le spectre électromagnétique est continu mais les scientifiques l'ont divisé d'une façon artificielle pour des raisons de commodité. Les divisions ont surtout été établies à l'aide des techniques utilisées pour détecter les différentes longueurs d'onde. Par exemple, les limites du domaine de la lumière visible sont définies par ce que nos yeux peuvent détecter. La lumière visible n'est qu'un cas particulier d'onde électromagnétique [23].

5.3. Caractéristiques des ondes électromagnétiques

Les caractéristiques des ondes électromagnétiques sont différentes selon la distance à la source et selon leur nature qui est définie par la valeur de leur impédance. On précise ci-dessous ces différentes notions [24].

5.3.1. Impédance des ondes électromagnétiques

L'impédance d'onde électromagnétique est une notion importante pour l'étude des ondes électromagnétiques guidées. Elle influe en particulier au niveau de l'interfaçage des éléments, en jouant sur la proportion d'ondes réfléchies à une interface [25].

La nature d'une onde électromagnétique est définie par la valeur de son impédance Z . Ainsi, de même qu'en électricité où on mesure l'impédance d'un circuit par le rapport U/I , on exprime l'impédance Z d'une onde électromagnétique par le rapport E/H . cette impédance d'onde définit la nature de l'onde. Elle s'exprime en ohms [26]. L'impédance d'onde définie par le rapport entre les modules du champ électrique E_T traverse et de l'excitation magnétique traverse H_T :

$$Z_{onde} = \left| \frac{E_T}{H_T} \right| \quad (2)$$

L'énergie emmagasinée par le champ électrique E vaut [27]:

$$W_E = \varepsilon_0 \frac{E^2}{2} \quad (3)$$

Où,

ε_0 : $8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m constante diélectrique du vide.

L'énergie créée par le champ magnétique H vaut [27] :

$$W_H = \mu_0 \frac{H^2}{2} \quad (4)$$

Où,

μ_0 : $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m perméabilité magnétique du vide.

Dans la zone du rayonnement, l'impédance d'onde est calculée par [27] :

$$\frac{E}{H} = Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi \approx 377\Omega \quad (5)$$

• **L'impédance du métal:**

La valeur de l'impédance du métal dépend des propriétés du matériau utilisé. La relation qui permet de calculer cette impédance est la suivante [28]:

$$Z_m = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (6)$$

Pour le métal ou $\sigma \gg \omega\epsilon$ (bon conducteur), on peut écrire:

$$Z_m = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \quad (7)$$

• Pour un isolant la conductivité est très faible, on retrouve:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377\Omega \quad (8)$$

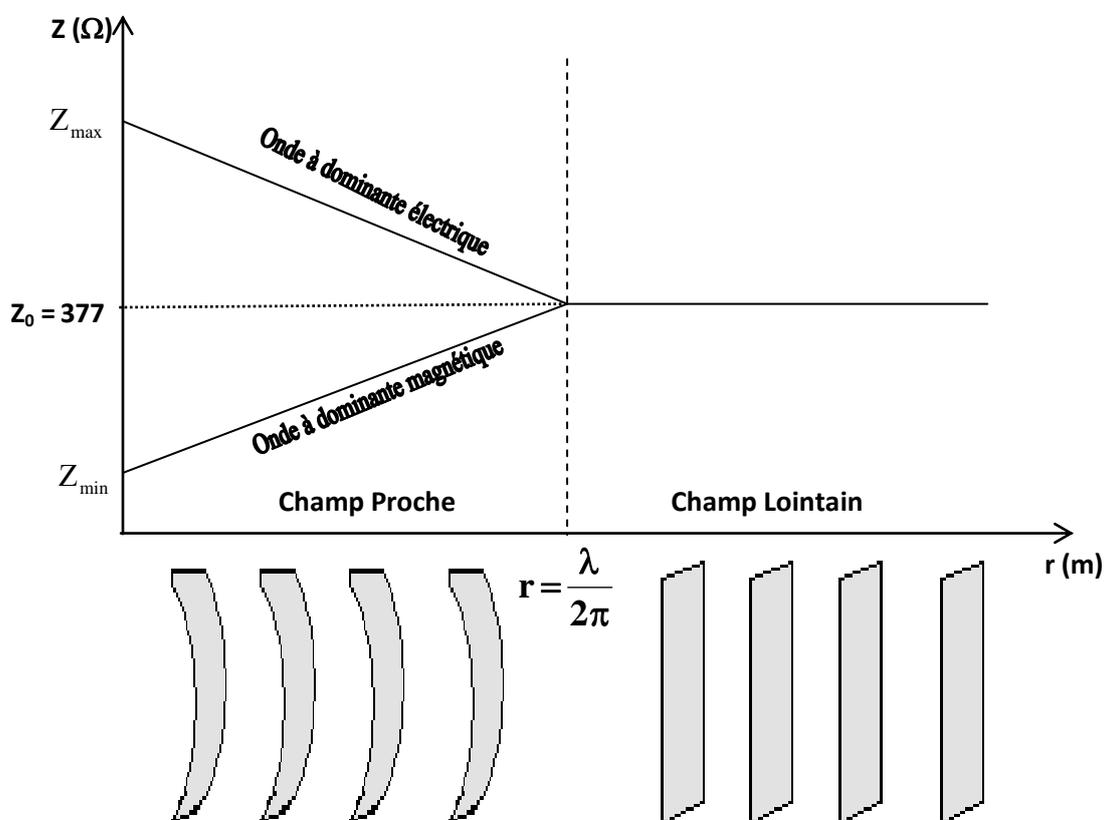


Figure 5. Evolution de l'impédance Z en fonction de la distance r .

Donc à partir de la distance $r = \frac{\lambda}{2\pi}$ les champs sont dits couplés et l'onde électromagnétique est dite plane.

Il existe une valeur singulière qui sépare le domaine des champs proches et des champs lointains:

$r < \lambda / 2\pi$: champ proche,

$r > \lambda / 2\pi$: champ lointain.

Avec λ et r , sont respectivement la longueur d'onde et la distance à la source.

5.3.2. Champ proche

Vis à vis des ondes électromagnétiques. Les champs électrique et magnétique ne sont considérés en tant que tels qu'à proximité immédiate des composants. On parle alors de champ proche.

La situation est très différente en champ proche :

- Si $E \gg H$, $Z \gg 1$, on parlera d'une onde à dominante électrique. Ce type d'onde correspond, également, à des sources à impédance élevée donc à courant faible et tension élevée.
- Si $E \ll H$, $Z \ll 1$, on parlera d'une onde à dominante magnétique. Ce type d'onde correspond à des sources à impédance faible donc à courant fort et basse tension, la (figure 5) montre l'évolution de l'impédance d'onde Z avec la distance à la source.

Dans cette région, les champs électrique et magnétique sont indépendants l'un par rapport à l'autre.

5.3.3. Champ lointain

En champ lointain, les valeurs de champs électrique et magnétique sont identiques et indépendantes de la source de rayonnement ou les champs électrique et magnétique sont couplés et l'onde est dite plane. L'impédance qui caractérise la nature des ondes vaut dans ce cas 377Ω .

Elle est donc constante et indépendante de la nature des sources. Si l'on mesure le champ magnétique, on peut déduire le champ électrique et réciproquement [24].

6. ZONES DE RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE

En fonction de la distance à une source de rayonnement électromagnétique, nous définissons deux zones : la région de rayonnement proche laquelle est divisée en deux espaces (la zone Rayleigh et la zone de Fresnel) et la région de rayonnement lointain (Zone de Fraunhofer) (figure.6) [27].

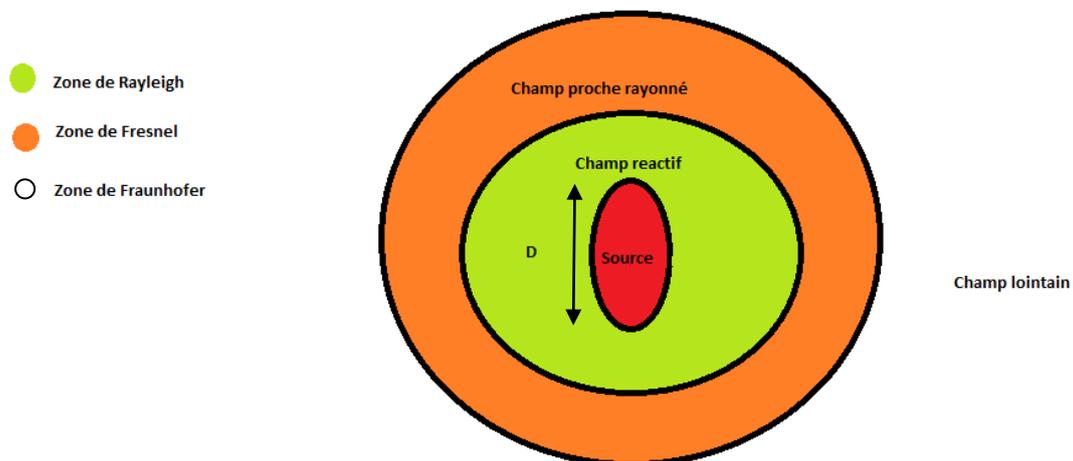


Figure 6. Zones de rayonnement d'une source de perturbation

6.1. Zone de Rayleigh (région de champ réactif)

C'est la zone du champ très proche qui entoure immédiatement la source (Région du champ proche) (figure 6). Le champ contenu dans cet espace est dit réactif, en effet la majorité de l'énergie électromagnétique n'est pas rayonnée, mais plutôt emmagasinée.

6.2. Zone de Fresnel (région de rayonnement proche)

Il s'agit d'une zone intermédiaire entre la zone du champ proche réactive et la zone du champ lointain (figure 6).

6.3. Zone de Fraunhofer (région de champ lointain)

Cette région est située à grande distance de la source ($r > \lambda / 2\pi$) (figures 6 et 7).

Le gain et la distribution angulaire sont essentiellement indépendants de la distance et l'onde électromagnétique est quasiment plane [29].

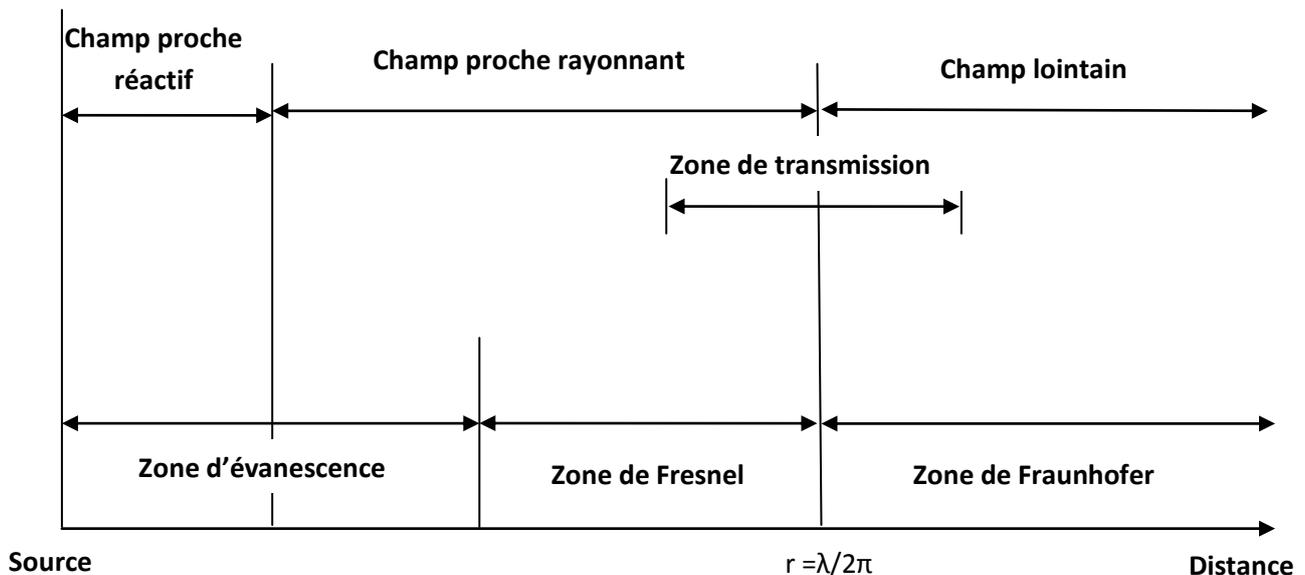


Figure 7. Les zones de champs proche et lointain [27]

7. BLINDAGE ELECTROMAGNETIQUE

Un blindage ou un écran électromagnétique est une enveloppe conductrice qui sépare l'espace en deux régions, l'une contenant des sources de champs électromagnétiques, l'autre non [30].

Le blindage est constitué d'une enveloppe conductrice que l'on met en place autour de composants électriques pour constituer une barrière vis à vis des influences électrostatiques, magnétiques, ou électromagnétiques [19]. La barrière, doit être faite d'un matériau conducteur électrique. Les blindages électromagnétiques, sont principalement utilisés pour protéger des équipements électroniques contre des parasites électriques et des radiofréquences. Le blindage peut réduire l'influence des

micro-ondes, de la lumière visible, des champs électromagnétiques et des champs électrostatiques.

Plus particulièrement, une enceinte conductrice utilisée pour isoler des champs électrostatiques est connue sous le nom cage faraday. En revanche, un blindage électromagnétique ne peut pas isoler des champs magnétostatiques, pour les quels le recours à un blindage magnétique est nécessaire [30].

7.1. But du blindage

Les blindages électromagnétiques ont pour but de protéger des installations électroniques (ou électriques) contre les effets redoutables de certains couplages électromagnétiques.

Un blindage électromagnétique permet d'accroître l'immunité électromagnétique d'un équipement ; cette fonction est aussi réversible puisqu'elle peut réduire l'amplitude de rayonnements indésirables. Face aux phénomènes de perturbations électromagnétiques, le blindage électromagnétique réagit comme une frontière physique, isolant les composants sensibles aux perturbations ou confinant les sources rayonnantes dans un volume restreint. Pour diverses raisons, surtout liées à la nature physique des matériaux qui composent le blindage ainsi qu'aux contraintes technologiques imposées par leur fabrication ou leur installation, cette frontière n'est pas totalement imperméable. Un parasite résiduel peut donc pénétrer dans la zone protégée par le blindage.

Le but d'un blindage est double (voir figure 8) :

- Contenir les émissions rayonnées à l'intérieur de l'enceinte blindée,
- Exclure les émissions rayonnées de sources se trouvant à l'extérieur de l'enceinte [31].

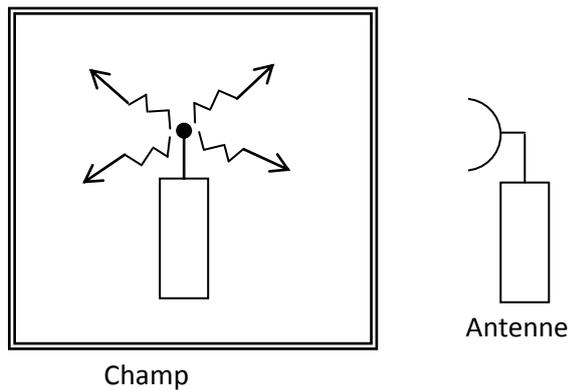


Figure 8a. Enveloppe conductrice contenant les émissions rayonnées

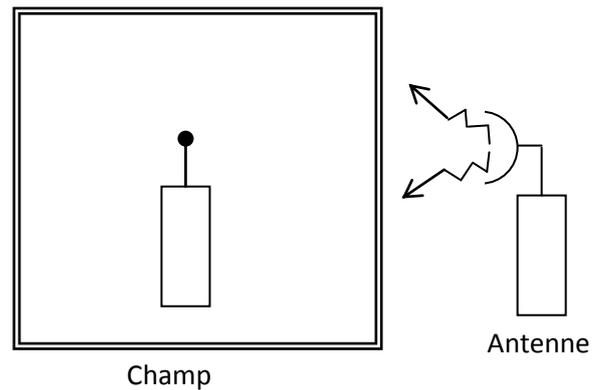


Figure 8b. Enveloppe conductrice excluant les émissions rayonnées

7.2. Matériaux du blindage

Les matériaux les plus utilisés dans le blindage électromagnétique sont les feuilles et les grilles métalliques, les gaz ionisés et les plasmas. Pour assurer le blindage, les trous dans les grilles et les feuilletts doivent être significativement plus petite que la longueur d'onde de la radiation à bloquer. Une autre méthode courante de blindage, surtout, utilisée dans des appareils électroniques à grand public équipés d'un boîtier plastique, consiste à recouvrir l'intérieur du boîtier avec une encre métallique. Cette encre est usuellement constituée d'une dispersion de particules de nickel ou de cuivre dans une solution liquide. L'encre est dispersée à l'aide d'un atomiseur et, une fois sèche, forme une couche conductrice continue lorsqu'elle reliée à la masse de l'appareil, elle forme un blindage efficace [7]. Les matériaux typiques utilisés pour le blindage sont le cuivre, l'aluminium et l'acier [31].

7.3. Fonctionnement du blindage

7.3.1. A haute fréquence

Un champ électromagnétique consiste en un champ électrique et un champ magnétique variable et couplés. Le champ électrique produit une force sur les porteurs de charge électrique des matériaux conducteurs (les électrons). Aussitôt qu'un champ électrique est appliqué à la surface d'un conducteur parfait, il produit un courant

électrique, le déplacement de charge au sein du matériau diminue le champ électromagnétique à l'intérieur du matériau [31].

De la même façon, des champs magnétiques variables génèrent des vortex de courant électrique qui agissent de façon à annuler le champ magnétique. (Un conducteur électrique qui ne serait pas ferromagnétique laisse librement passer le champ magnétique). Le rayonnement électromagnétique est réfléchi entre l'interface d'un conducteur et d'un isolant. Ainsi, les champs électromagnétiques existant à l'intérieur du conducteur n'en sortent pas et les champs électromagnétiques externes n'y entrent pas [31].

7.3.2. A basse fréquence

En basse fréquence, les champs électriques ne posent pas beaucoup de problèmes: ils sont facilement maîtrisables. Il n'en est pas de même des champs magnétiques: en milieu perturbé (par ex. : présence d'un gros transformateur), ils se manifestent notamment sur les écrans de visualisation par des déformations ou des ondulations de l'image. Pour éliminer ce problème, il faut éloigner l'écran de la source de perturbation (plusieurs dizaines de cm) ou utiliser un écran métallique réalisé dans un alliage à forte perméabilité [31].

7.4. Différents types de blindage

7.4.1. Blindage réel

Ce type de blindage laisse passer une partie des champs toutes les ouvertures dégradent l'effet de protection. Un blindage réel ne peut que s'approcher d'un blindage idéal [32].

7.4.2. Blindage magnétique

Le blindage magnétique est constitué d'un matériau capable d'offrir un chemin de réluctance relativement faible aux lignes de force issue d'une source de champ magnétique, et d'en préserver les zones à protéger le tube d'un oscilloscope de l'influence d'un transformateur d'alimentation [32].

7.4.3. Blindage d'un champ électrostatique

Il est possible de blinder un champ électrostatique en utilisant une cage de Faraday. Le blindage électrostatique est créé par le fait que les charges électriques présentes sur la surface conductrice tendent à se distribuer de telle sorte qu'elles éliminent le champ électrique à l'intérieur du matériau conducteur [31]. Par conséquent, un champ électrostatique ne pénètre pas un volume se trouvant à l'intérieur d'une enceinte conductrice. Les charges électriques sont totalement mobiles dans les matériaux conducteurs. Même dans des structures métalliques extrêmement minces, les charges mobiles sont présentes en quantité suffisante pour créer un blindage efficace. C'est la raison pour laquelle la densité du matériau de blindage est plus importante que son épaisseur dans son efficacité contre le champ électrostatique (figure 9.) [31].

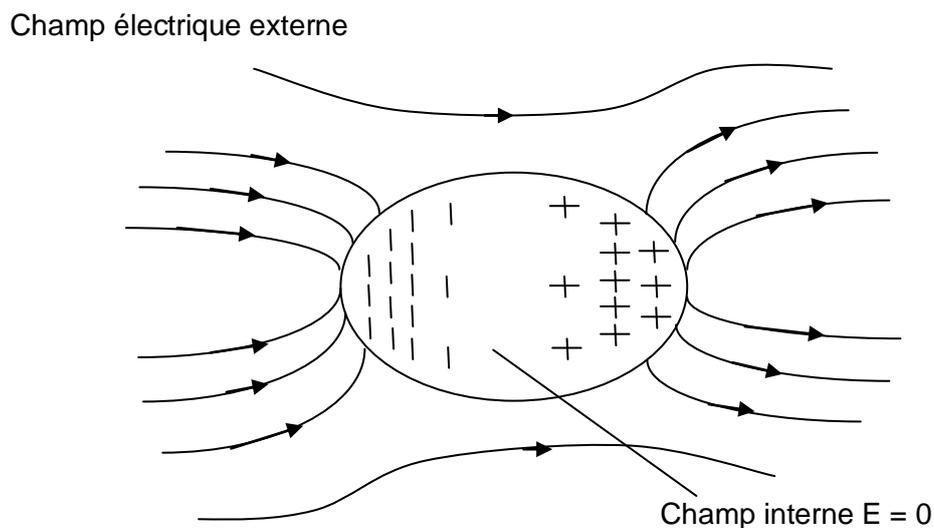


Figure 9. Blindage d'un champ électrostatique [31].

7.4.4. Blindage composite

Ce type de blindage est fait de couches de métal à haute densité/haute résistance et de céramiques plastiques de haute résistance à la chaleur. Les couches non métalliques jouent le rôle de pièges à chaleur ou de réflecteurs, réduisant la

température du jet de gaz beaucoup plus vite que le métal. Cela veut surtout dire que le jet pénètre moins profondément [32].

Habituellement, le blindage composite a une surface extérieure d'acier durci, comme les blindages normaux. Mais en dessous, on trouve des couches successives de métaux et céramiques [32].

7.4.5. Blindage parfait

On conçoit qu'un équipement enfermé dans un caisson métallique intégrale sans la moindre fuite, ne soit ni émetteur ni susceptible. Heureusement, ce concept de cage faraday quasi-parfaite est rarement indispensable, donc ce type de blindage créerait une région complètement dépourvue de champ (voir la figure 9). Alors si le blindage était parfait, il créerait une région complètement dépourvue de champ [10].

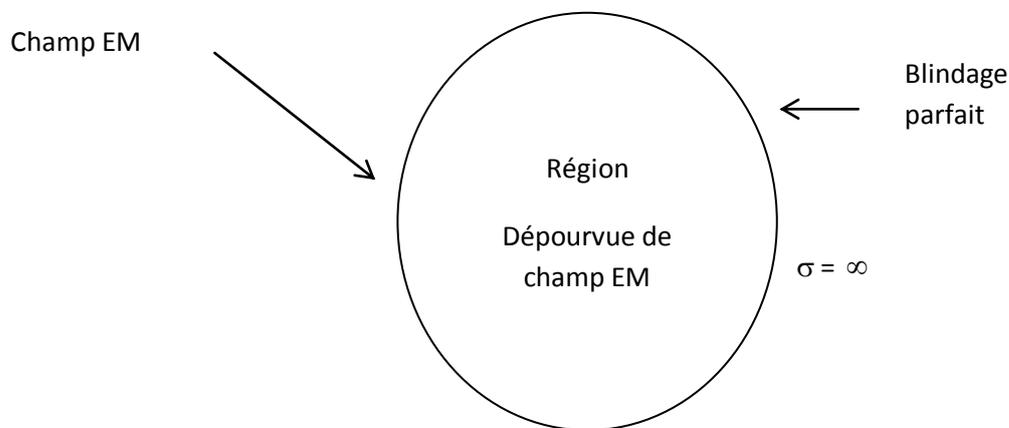


Figure 10. Blindage parfait

Cependant il n'existe pas de matériaux à conductivité infinie qui permettent de créer un blindage parfait. Il y'aura toujours une pénétration de champ électromagnétique à travers les parois par diffusion. De toute manière, aucun blindage ne peut être une enceinte complètement fermée, car il serait absurde d'imaginer l'existence d'un équipement complètement isolé, sans communication avec l'extérieur [31].

7.5. Pénétration d'un champ électromagnétique

Un champ électromagnétique peut pénétrer à l'intérieur d'un blindage de trois manières:

- Par diffusion,
- Par des ouvertures,
- Par conduction.

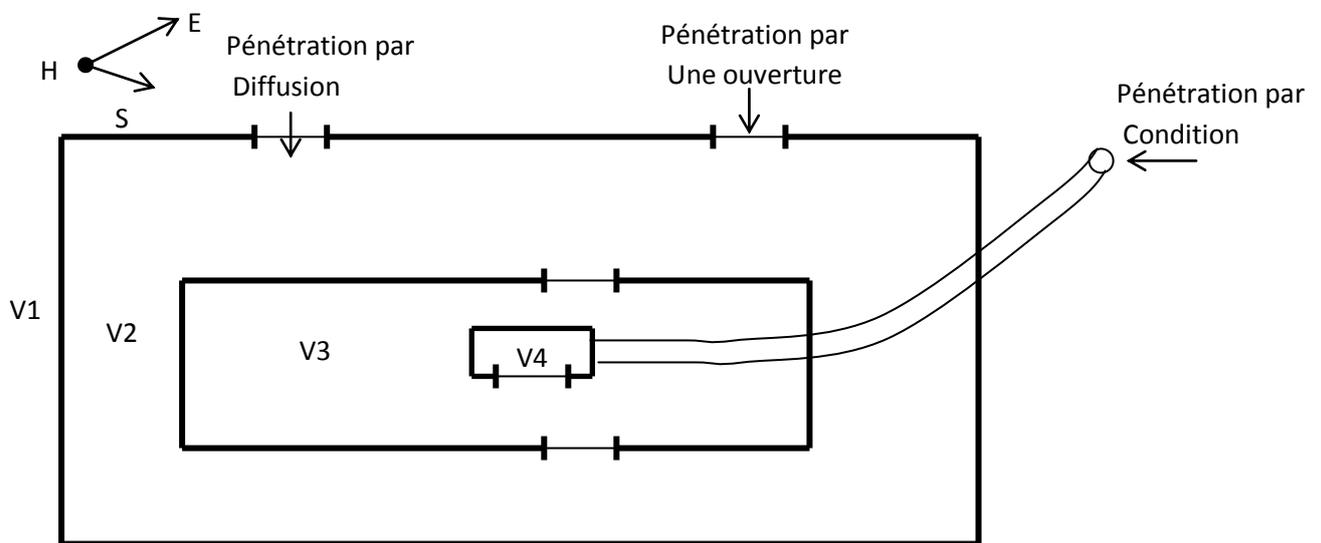


Figure 11. Pénétration d'un champ électromagnétique à travers un blindage

Dans la figure ci-dessus, V_1 représente l'espace externe siège d'un champ électromagnétique perturbateur. Les volumes successifs V_2 , V_3 et V_4 sont séparés de l'espace V_1 non protégé, par des barrières successives qui peuvent toutes être traversées à des degrés différents par le champ électromagnétique externe, par diffusion à travers les parois, par des ouvertures dans chaque barrière ou par un matériau conducteur [31].

7.6. Efficacité d'un blindage

L'efficacité de blindage électromagnétique est la capacité d'un système ou d'un matériau de ne pas laisser passer les ondes électromagnétiques. Cette efficacité est, habituellement, exprimée en décibels. On la calcule à l'aide des expressions suivantes:

$$SE(dB) = 20 \log \frac{E_i}{E_t} \quad (9)$$

$$SE(dB) = 20 \log \frac{H_i}{H_t} \quad (10)$$

$$SE(dB) = 10 \log \frac{P_i}{P_t} \quad (11)$$

Dans les quelles E, H, P représentent respectivement la puissance du champ électrique, la puissance du champ magnétique et la puissance électromagnétique. Les indices i et t concernent les ondes incidentes et transmises (voir figure 12.) [24].

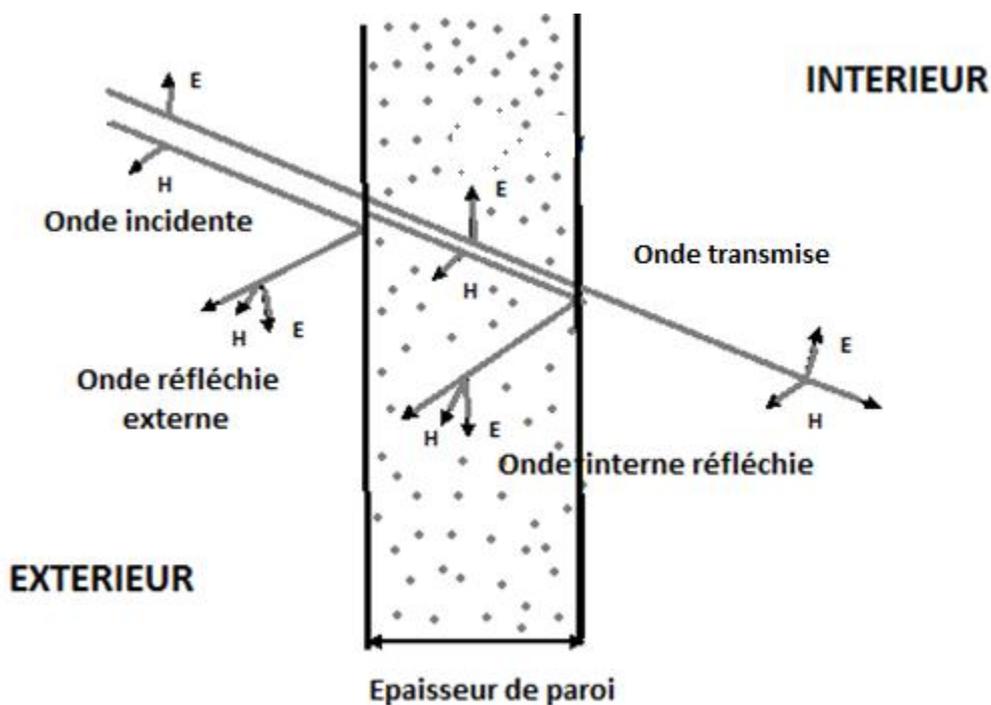


Figure 12. Atténuation d'une onde électromagnétique

L'efficacité SE d'un écran s'exprime par la relation suivante:

$$SE = A + R + M \quad (12)$$

Où A, R et M sont respectivement des termes représentant :

- **Atténuation par absorption**

L'amplitude d'une onde décroît exponentiellement lorsqu'elle traverse un milieu donné (pertes ohmique provoquant une dissipation de chaleur).

$$E(t) = E_0 e^{-t/\delta} \quad (13)$$

Le terme traduisant les pertes par absorption n'est pas important quand la fréquence est faible [27].

- **Atténuation par réflexion**

Ces pertes se produisent en raison des différentes impédances à l'interface entre l'air et l'écran [27].

- **Atténuation due à aux réflexions multiples**

Cette atténuation peut être négligée pour des matériaux de blindage bons conducteurs dont l'épaisseur est beaucoup plus grande que la profondeur δ de l'onde électromagnétique c'est-à-dire $d \geq \delta$.

7.6.1. Efficacité d'un blindage dans le cas du champ proche

Dans cette région, nous sommes donc obligés de calculer séparément l'efficacité de blindage électrique et l'efficacité de blindage magnétique. Nous signalons que le blindage des champs magnétiques est réalisé par des matériaux ferromagnétiques qui ont des perméabilités très élevées, elles sont supérieures à 1000 H/m. De telles valeurs ne peuvent être atteintes par les matériaux polymères composites conducteurs. En effet la perméabilité de ces matériaux composites ne dépasse pas 1H/m. ceci nous conduit à restreindre notre étude à la variation de l'efficacité du blindage électrique.

- Pour des fréquences inférieures à la fréquence critique ($f < f_c$) [33]

$$SE = 20 \log \left(\frac{C}{2 \omega r} Z_0 \sigma d \right) = 20 \log \left(\frac{C}{2 \omega r} \frac{Z_0}{R_S} \right) \quad (14)$$

- Pour des fréquences supérieures à la fréquence de critique ($f > f_c$)

$$SE = 10 \log \left(\frac{C^2 \sigma}{16 \varepsilon \omega (Kr)^2} \right) + 20 \left(\frac{d}{\delta} \right) \log(e) \quad (15)$$

7.6.2. Efficacité d'un blindage dans le cas du champ lointain

Dans ce cas, l'efficacité du blindage électromagnétique s'exprime en fonction de la fréquence de la source d'émission par [33]:

- Pour des fréquences inférieures à la fréquence critique ($f < f_c$)

$$SE = 20 \log \left(1 + \frac{Z_0 \sigma d}{2} \right) = 20 \log \left(1 + \frac{Z_0}{2 R_S} \right) \quad (16)$$

- Pour des fréquences supérieures à la fréquence de critique ($f > f_c$)

$$SE = 10 \log \left(\frac{\sigma}{16 \omega \varepsilon_0} \right) + 20 \frac{d}{\delta} \log(e) \quad (17)$$

Où,

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$: Constante diélectrique du matériau.

Avec

$\varepsilon_r = 1$, dans le cas des matériaux non ferromagnétiques.

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m

$\omega = 2\pi f$: Pulsation de l'onde électromagnétique.

$C = 2.99 \cdot 10^8$ m/s : Vitesse de la lumière.

σ : Conductivité électrique du matériau [S/m].

d : Epaisseur de l'écran

r : Distance entre la source et l'écran.

$Z_0 = 377 \Omega$: Impédance du vide.

$R_s = 1/(\sigma d)$: Résistance du surface.

$K = \frac{2\pi}{\lambda}$: Le module du vecteur d'onde.

- **Épaisseur de peau (δ)**

L'épaisseur de peau est définie comme la distance dans la surface du métal, où la densité de courant diminue jusqu'à 37% de sa valeur au début de la surface (figure 13) [27].

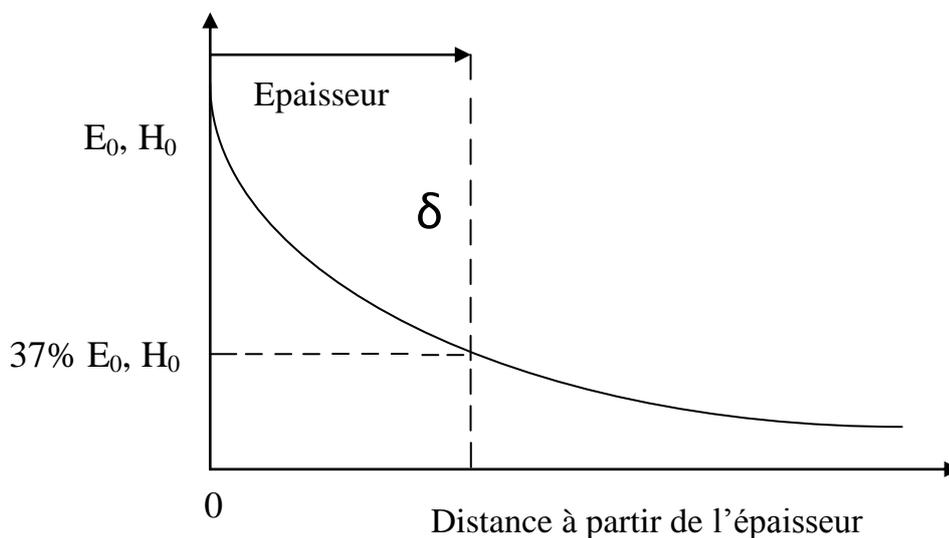


Figure 13. Variation du champ en fonction de l'épaisseur δ

Cette épaisseur de peau détermine la largeur de la zone où se concentre le courant dans un conducteur, il est défini aussi comme étant la profondeur maximale de pénétration d'une onde électromagnétique de fréquence f [34].

La relation entre les propriétés du matériau et la profondeur de la peau du blindage métallique est la suivante:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \mu}} \quad (18)$$

ρ : La résistivité électrique [Ωm].

$\mu = \mu_0 \mu_r$: perméabilité magnétique du matériau.

Avec,

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m perméabilité magnétique du vide.

$\mu_r = 1$, dans le cas des matériaux non ferromagnétiques.

- **Effet de peau**

L'effet de peau ou effet pelliculaire ou effet kelvin est un phénomène électromagnétique qui fait que, à fréquence élevée, le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs [34].

- **Fréquence de coupure (f_c)**

La fréquence à laquelle le signal subit une atténuation de 3 dB (sans résonance) et qui définit une séparation entre les fréquences altérées par le filtre et celles qui ne le sont pas. Les fréquences supérieures seront atténuées pour un filtre passe-bas et les fréquences inférieures seront atténuées pour un filtre passe-haut [34].