

*Modélisation des mécanismes des interactions des rayonnements électromagnétiques avec les êtres vivants*

*Rakotomananjara D. F.<sup>1</sup>, Randriamitantsoa P. A.<sup>2</sup>*

Laboratoire de Recherche Télécommunication, Automatique, Signal et Images  
(LR-T.A.S.I.)

École Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation  
(ED – STII)

Université d'Antananarivo

BP 1500, Ankatso – Antananarivo 101 – Madagascar

<sup>1</sup> *davidfitiana76@gmail.com*, <sup>2</sup> *rpauguste@gmail.com*

**Résumé**

Les interactions des ondes électromagnétiques avec le corps humain sont complexes et dépendent de plusieurs nombres de facteurs liés aux caractéristiques de l'onde incidente (sa fréquence, son intensité et polarisation), du tissu rencontré (sa géométrie, ses propriétés électromagnétiques : permittivité diélectrique et conductivité) et du type de couplage entre le champ et le corps exposé. Le champ irradiant génère des courants à l'intérieur du corps, ainsi qu'une absorption d'énergie dans les tissus. A un certain niveau du champ irradiant, ces courants peuvent provoquer un échauffement des tissus et organes cibles, cet effet est bien connu sous le nom d'effets thermiques. Un autre effet dit non thermique désigne le fait que des effets biologiques peuvent exister en dessous des niveaux qui produisent les effets thermiques. Dans cet article nous allons détailler les mécanismes d'interactions des ondes électromagnétiques

avec le corps humains à partir des sources aux effets biologiques correspondants.

**Mots clés** : Milieux biologiques, Couplage, DAS, effets thermiques, effets non-thermique, VGCC

**Abstract**

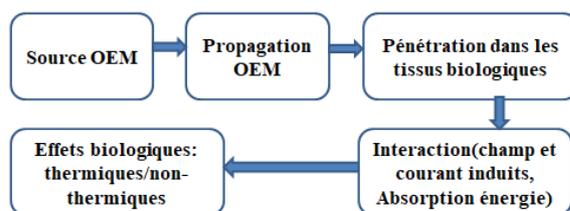
The interactions of electromagnetic waves with the human body are complex and depend on several numbers of factors related to the characteristics of the incident wave (its frequency, its intensity and polarization), of the tissue encountered (its geometry, its electromagnetic properties: dielectric permittivity and conductivity) and the type of coupling between the field and the exposed body. The irradiating field generates currents inside the body, as well as energy absorption in the tissues. At a certain level of the irradiating field, these currents can cause heating of target tissues and organs; this effect is well known as thermal effects. Another so-called non-thermal effect refers to the fact that

biological effects can exist below the levels which produce the thermal effects. In this article we will detail the mechanisms of interactions of electromagnetic waves with the human body from sources with corresponding biological effects.

**Keywords:** biological media, coupling, cell membrane, thermal effects, non-thermal effects, VGCC

## 1. Introduction

Lorsqu'une entité biologique est exposée à un rayonnement électromagnétique, des interactions se produisent avec les charges électriques des tissus ou cellules. Ces interactions peuvent provoquer des effets biologiques qui ne sont nécessairement pas nocifs à la santé. La complexité de ces phénomènes est due à plusieurs facteurs, en particulier les caractéristiques de l'onde incidente: sa fréquence, polarisation et intensité.



**Figure 1.01 :** Mécanisme d'interaction des OEM avec les êtres vivants

Cet article est organisé en suivant le processus d'interaction des ondes avec les êtres vivants comme le montre la figure 1.01. Nous commencerons par une description des

sources de champs électromagnétiques auxquelles nous sommes exposés chaque jour, puis nous caractériserons la propagation et la zone d'exposition à partir des sources (antennes). Dans les parties 3 et 4, nous expliquerons les modèles mathématiques qui régissent la pénétration des champs électromagnétiques dans les tissus et l'interaction entre eux. Enfin, dans la cinquième partie, nous détaillerons les mécanismes des effets thermiques et l'hypothèse des effets non thermiques.

## 2. Ondes et spectre électromagnétiques

L'humanité a toujours été exposée à des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques, à la fois de source naturelle et artificielle:

- Le champ électrique permanent issu de la différence de potentiel de 300 kV entre le sol et l'ionosphère
- Le champ magnétique qui encercle la Terre, du pôle Nord au pôle Sud
- rayons infrarouges rayonnés par toutes les sources de chaleur, lumière, rayons ultraviolets,
- Champs électromagnétiques provenant de l'énergie électrique, des télécommunications, des appareils médicaux (comme Imagerie par résonance Magnétique)... etc.

*Le spectre du rayonnement électromagnétique* représente la répartition des ondes

électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie. Il s'étend de 0 Hz à l'infini. Il est important de bien distinguer que l'onde électromagnétique est un modèle utilisé pour représenter les rayonnements électromagnétiques qui sont le phénomène étudiés. Les rayonnements électromagnétiques sont une forme de transport de l'énergie sans support matériel.

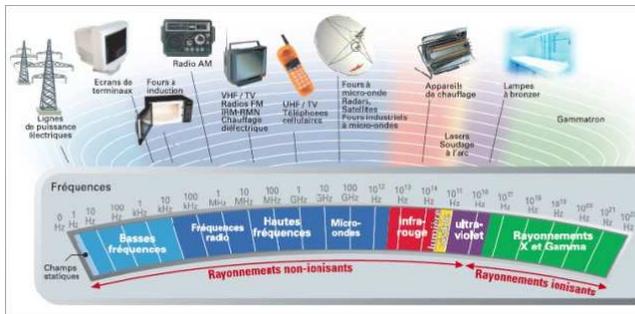


Figure 1.02 : Spectre électromagnétique [1]

L'énergie des ondes électromagnétiques est quantifiée avec le quantum d'énergie (en joules), chaque photon transporte ainsi un quantum d'énergie proportionnel à la fréquence de l'onde électromagnétique considérée comme décrite par la relation 2.02; cette énergie est d'autant plus grande que la fréquence est élevée.

$$E = hf \quad (1.02)$$

Avec

$E$  : énergie de l'onde électromagnétique [J],  $h$  Constante de Planck ( $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J s) et  $f$  : fréquence de l'onde (Hz)

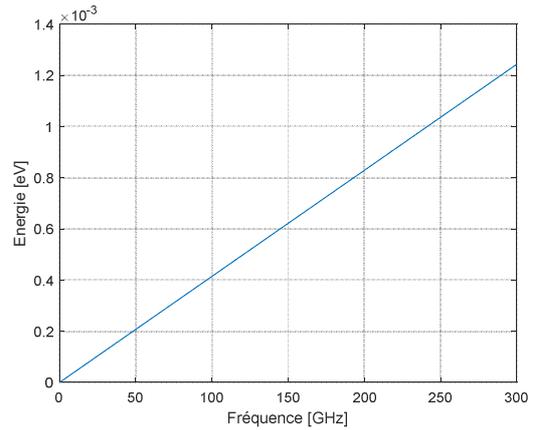


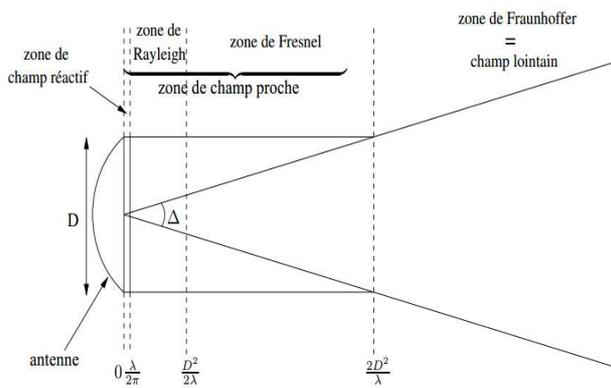
Figure 1.03 : Énergie de l'onde électromagnétique de 0 Hz à 300 GHz

L'ionisation est l'action qui consiste à enlever ou ajouter des charges à un atome ou une molécule. Le potentiel d'ionisation ou énergie d'ionisation d'un atome ou d'une molécule est l'énergie qu'il faut fournir à un atome neutre pour arracher un électron (le moins lié) à l'état gazeux et former un ion positif. Généralement, le potentiel d'ionisation est de l'ordre de 10 eV. Par exemple pour l'atome d'hydrogène, le potentiel d'ionisation est de 13.6 eV. La figure 1.03 montre que même les ondes électromagnétiques allant jusqu'à 300 GHz n'ont que des énergies faibles pour créer une ionisation. [2]

### 3 Propagation des ondes électromagnétiques à partir d'une source

Les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière et dans une direction vers l'extérieur par rapport à leur origine. Ce processus est appelé rayonnement. Une source

de rayonnement électromagnétique rayonne des champs électriques et magnétiques dont la configuration spatiale et les amplitudes diffèrent selon la distance existant entre l'antenne et le point d'observation. En général, comme illustré dans la figure 1.04, on prend en considération deux zones distinctes : la zone des champs proches (zone de Fresnel) et la zone des champs lointains (zone de Fraunhofer). Ces zones sont définies par rapport à la longueur d'onde utilisée. [2]



**Figure 1.04 :** Différentes zones de rayonnements autour d'une antenne émettrice

La zone de champ proche est composée de trois petites zones :

- Zone réactif : La zone de champ réactif est une zone est très "mince" qui se situe à une distance de l'antenne inférieure à  $\frac{\lambda}{2\pi}$ . Dans cette zone, les ondes sont évanescences et les phénomènes de propagation sont

négligeables devant les phénomènes radiatifs

- La zone de Rayleigh se situe à des distances de l'antenne comprises entre  $\frac{\lambda}{2\pi}$  et  $\frac{D^2}{2\lambda}$ , D étant la plus grande dimension de l'antenne électromagnétique est confinée dans un cylindre autour de l'ouverture rayonnante
- La zone de Fresnel est une zone intermédiaire située entre  $\frac{D^2}{2\lambda}$  et  $\frac{2D^2}{\lambda}$

La zone de Fraunhofer se situe au-delà de  $\frac{2D^2}{\lambda}$  et constitue ce qu'on appelle la zone de champ lointain de l'antenne. L'énergie rayonnée est confinée dans un faisceau conique et les ondes sont localement quasiment planes; c'est-à-dire que le champ électrique et le champ magnétique sont en phase et que le rapport de leurs amplitudes est constant. En outre, le champ électrique et le champ magnétique sont en angle droit l'un par rapport à l'autre et sont situés dans un plan perpendiculaire au sens de la propagation. Dans le vide le champ magnétique H (A/m) et électrique E (V/m) sont reliés par la relation 1.03

$$H = E/Z_0 \tag{1.03}$$

$Z_0 = 377\Omega$  étant l'impédance caractéristique de l'espace libre

#### 4. Pénétration des ondes électromagnétiques dans les tissus biologiques

Dans [3], nous avons vu que les milieux biologiques se situent entre le diélectrique et conducteur. Les bases de toute interaction électromagnétique avec les matériaux ont été élucidées depuis très longtemps par les équations de Maxwell, cependant la difficulté réside dans leur application avec les systèmes vivants. Les organismes vivants sont extrêmement complexes et ont de multiples niveaux d'organisation

##### 4.1 Équation de Maxwell

Tous les phénomènes électromagnétiques peuvent être décrits par les équations de Maxwell. Ces équations permettent de relier le champ électromagnétique aux sources qui lui ont donné naissance. En fait, ces quatre équations se scindent en deux groupes de deux équations: le premier groupe traduit des propriétés intrinsèques du champ (indépendamment des sources) et le second renseigne réellement sur la dépendance de celui-ci vis-à-vis des sources. [4]

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \quad (1.04)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.05)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (1.06)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} \quad (1.07)$$

Avec

- $\vec{E}$  : champ électrique [V/m]
  - $\vec{D}$  : champ de déplacement électrique [ $C/m^2$ ]
  - $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  [C/V m] la permittivité du vide,  $\epsilon_r$  la permittivité relative du diélectrique
  - $\epsilon$  : permittivité absolue [C/Vm]
- $$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon \vec{E} \quad (1.08)$$
- $\vec{B}$  : champ d'induction magnétique [ $Wb/m^2$ ]
  - $\vec{H}$  : champ magnétique [A/m]
- $$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (1.09)$$
- $\mu$  : perméabilité absolue magnétique
  - $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m : perméabilité du vide,  $\mu_r$  perméabilité relative d'un matériau
  - $J$  : densité de courant (A/m<sup>2</sup>)
  - Densité de charge (C/m<sup>3</sup>)

Les relations 1.08 et 1.09 introduit les caractéristiques des matériaux dans le problème. En effet, la permittivité électrique fournit une description de l'interaction macroscopique entre le vecteur d'intensité du champ électrique et le matériau diélectrique, alors que la perméabilité magnétique décrit l'interaction du matériau avec le champ magnétique. Pour une analyse exhaustive du problème électromagnétique défini par une source rayonnante et un corps exposé, nous allons devoir résoudre les équations Maxwell.

## 4.2 Caractéristiques de propagation dans les milieux biologiques

### 4.2.1 Longueur d'onde

Dans un milieu biologique la longueur d'onde du signal est donnée par la relation 1.10.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\frac{\varepsilon^*}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2}} + 1 \right]}} \quad (1.10)$$

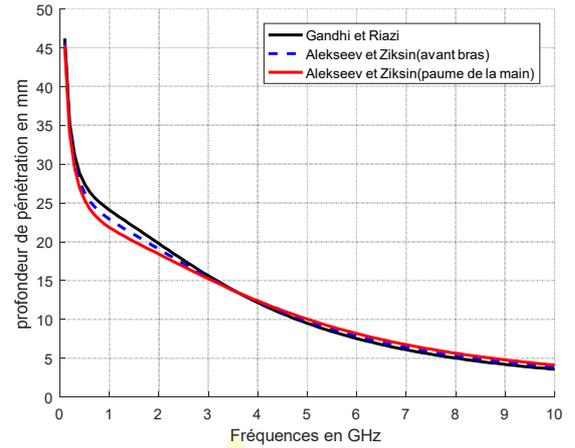
$\lambda_0$  étant donné la longueur d'onde dans le vide.

### 4.2.2 Profondeur de pénétration

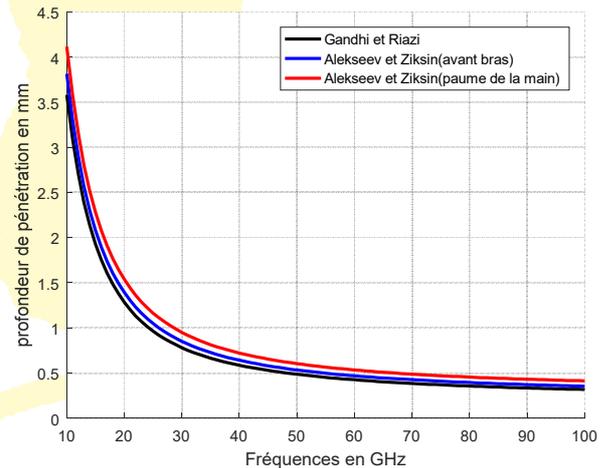
Lorsque' un matériau est exposé à un champ électromagnétique, il est soumis à une densité de courant due au mouvement des charges. Les matériaux biologiques ne sont pas de bons conducteurs. En effet, ils conduisent un courant, cependant les pertes peuvent être significatives, ils ne peuvent pas être décrit comme sans perte. Cela est dû au fait que le champ électromagnétique ne pénètre que très superficiellement à l'intérieur d'un conducteur.

La profondeur de pénétration est donnée par la relation 1.19

$$\delta = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\varepsilon \mu_0}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2}} - 1 \right]}} \quad (1.11)$$



**Figure 1.05 :** Profondeur de pénétration 100 MHz à 10 GHz



**Figure 1.06 :** Profondeur de pénétration 10 à 100 GHz

Les figures 1.05 et 1.06 montrent respectivement les profondeurs de pénétration dans la gamme 100 MHz à 10 GHz et 10 à 100 GHz. Nous pouvons voir que plus on monte en fréquence plus l'onde n'arrive pas à pénétrer en profondeur. À partir de 10 GHz la profondeur de pénétration diminue

rapidement avec l'augmentation de la fréquence.

**Tableau 1.01:** Paramètres de permittivité de la peau [6]

Auteur	$\epsilon_h$	$\epsilon_l$	$\tau$	$\sigma_s$
Gandhi et Riazi	4	42	6.9 ps	1.4 S/m
Alekseev et Ziskin (avant-bras)	4	36.4	6.9 ps	1.4 S/m
Alekseev et Ziskin (paume)	4.52	31.7	6.9 ps	1.4 S/m

### 4.3 Énergie absorbé dans les tissus biologiques

La dosimétrie consiste à établir la relation entre une distribution de champ électromagnétique à l'espace libre et les champs induits à l'intérieur des tissus biologiques ou généralement le corps humain. En d'autre terme c'est la quantification de l'énergie dans un milieu exposé à un champ électromagnétique en évaluant le débit d'absorption spécifique (DAS ou SAR en anglais) dans le milieu, qui est donné par la relation

$$DAS = \frac{\sigma}{\rho} E^2 \quad (1.12)$$

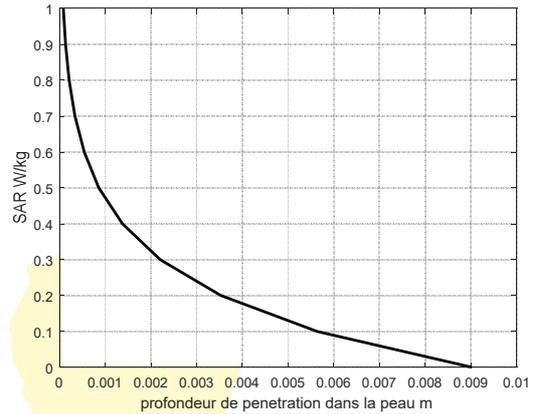
Avec

- $\sigma$  : la conductivité du tissu
- $\rho$  : la densité du tissu
- $E$  : amplitude du champ électrique

Pour une densité de puissance donnée de l'onde incidente à un tissu, le DAS peut être calculé à partir de la relation [6] :

$$DAS(0) = \frac{2D(1 - R^2)}{\rho\delta} \quad (1.13)$$

$$DAS(x) = DAS(0)e^{-\frac{2x}{\delta}} \quad (1.14)$$



**Figure 1.07 :** Atténuation du DAS dans la peau

La figure 1.06 montre l'atténuation du DAS dans la peau, on voit clairement qu'il n'y a que très peu d'énergie qui est absorbé et la plupart est absorbé dans l'épiderme (0.2 mm).

### 5. Couplage des ondes avec le corps humain

Il existe trois types de couplage avec le corps humains [3] :

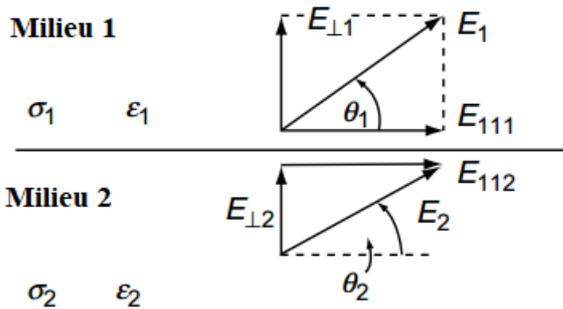
- couplage avec le champ électrique EBF (<100 kHz)
- couplage avec le champ magnétique EBF
- couplage avec le champ électromagnétique RF (100 kHz à 300 GHz)

**5.1 Couplage avec les champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences (EBF)**

Pour les champs EBF, la longueur d'onde est très longue la variation temporelle est très lente, ainsi le champ externe induit un champ de nature quasi-statique dans le corps humain. L'exposition à ces ondes se passe dans la zone de champ proche.

**5.1.1 Couplage avec le champ électrique EBF**

En prenant deux milieux dans la figure 1. 04, caractérisés par  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\epsilon_1, \epsilon_2$  [5]



**Figure 1.08 :** Passage à l'interface du champ E

En notant  $E_p$  et  $E_{\perp}$  respectivement les composantes parallèle et perpendiculaire du champ E. Suite à la conservation de charge sur l'interface, nous avons la relation 1.15 pour les champs EBF et 1.26 pour le champ statique

$$E_{p1} = E_{p2} \tag{1.15}$$

$$\sigma_1 E_{\perp 1} = \sigma_2 E_{\perp 2} \tag{1.16}$$

L'orientation des champs totaux dans les milieux 1 et 2 peuvent être décrite en utilisant la tangente :

$$\tan \theta_1 = \frac{E_{\perp 1}}{E_{p1}} \tag{1.17}$$

$$\tan \theta_2 = \frac{E_{\perp 2}}{E_{p2}} \tag{1.18}$$

Ainsi nous avons

$$\begin{aligned} \tan \theta_1 &= \frac{\sigma_2 E_{\perp 1}}{\sigma_1 E_{p1}} = \frac{\sigma_2 E_{\perp 2}}{\sigma_1 E_{p2}} \\ &= \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \tan \theta_2 \end{aligned} \tag{1.19}$$

En considérant le milieu 1 de l'air dont la conductivité est  $\sigma_1 = 10^{-13} S/m$  et le milieu 2, un tissu biologique dont la conductivité typique est de  $\sigma_2 = 10^{-1} S/m$ .

Nous avons donc

$$\tan \theta_1 = 10^{12} \tan \theta_2 \tag{1.20}$$

Ainsi même si le champ dans le milieu 2 est presque parallèle à l'interface tel que  $\theta_2 \cong 0.5$ . Ainsi un champ électrostatique à l'extérieur doit être pratiquement à l'interface entre les deux milieux.

Pour le champ électrique EBF, nous avons les relations 1.25 et 1.26

$$\sigma_1 E_{\perp 1} - \sigma_2 E_{\perp 2} = -j\omega\rho_s \tag{1.21}$$

$$\epsilon_1 E_{\perp 1} - \epsilon_2 E_{\perp 2} = \rho_s \tag{1.22}$$

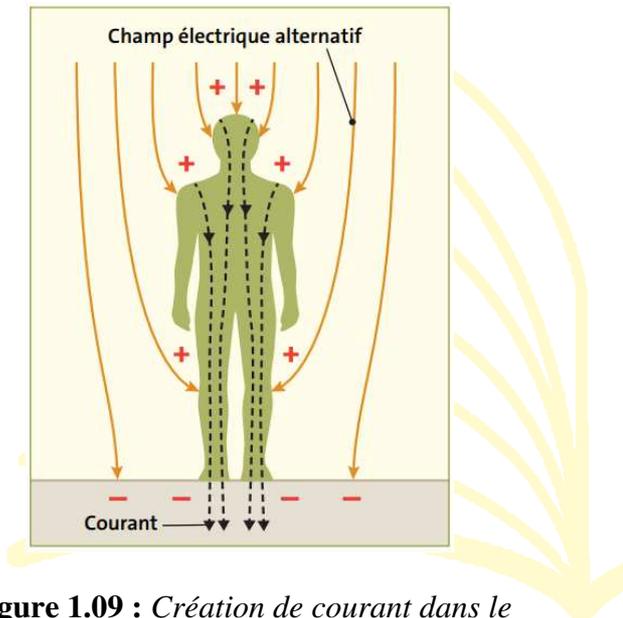
$\rho_s$  étant la densité de courant surfacique

Dans la gamme EBF, la permittivité relative des tissus biologiques peut aller environ à

$10^6$ , donc à partir de l'équation 1.21 et 1.26 nous avons :

$$E_{\perp 1} = \frac{\sigma_2 + j\omega\epsilon_2}{\sigma_1 + j\omega\epsilon_1} E_{\perp 2} \quad (1.23)$$

Ce résultat montre que le champ externe doit être presque perpendiculaire à l'interface du tissu biologique. Les charges électriques présentes dans un organisme seront attirées vers sa surface ou poussées au fur et à mesure que le champ externe alterne.



**Figure 1.09 :** Création de courant dans le corps dû à la présence d'un champ électrique variable [7]

Pour une fréquence 60 Hz,  $\sigma_2 = 10^{-1} S/m$ ,  $\sigma_1 = 10^{-13} S/m$ ,  $\epsilon_2 \approx 10^{-5} F/m$  et  $\epsilon_1 \approx 10^{-11} F/m$

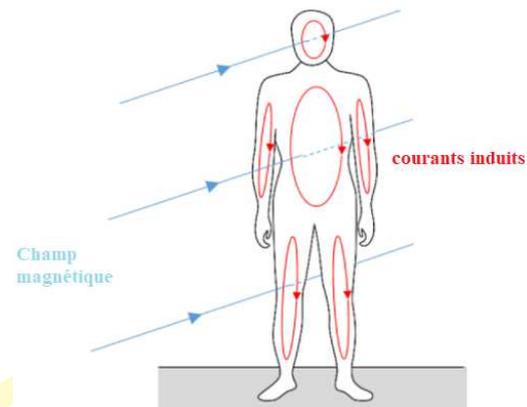
$$E_{\perp 1} = -j(2.5 \times 10^7) E_{\perp 2}$$

En prenant les tissus biologiques typiques nous avons :

$$\frac{E_{interne}}{E_{externe}} \approx 4.10^{-8} \quad (1.24)$$

### 5.1.2 Couplage avec le champ magnétique EBF

Vu que la perméabilité des tissus biologiques est presque égale à celle du vide, le corps humain ne provoque pas une perturbation du champ magnétique externe qui sera donc égale au champ à l'intérieur du corps. Des courants électriques se produisent dans une boucle perpendiculaire à la direction du champ magnétique, car le corps humain est considéré comme un conducteur à basses fréquences. [3]



**Figure 1.10 :** Courants causés par un champ magnétique EBF normale au plan frontale [3]

### 5.2 Couplage avec les champs électromagnétiques RF (radiofréquence) et microonde

L'exposition aux ondes RF et microonde se passe dans la zone lointain où l'onde peut être assimilé à une onde plane. Pour une onde

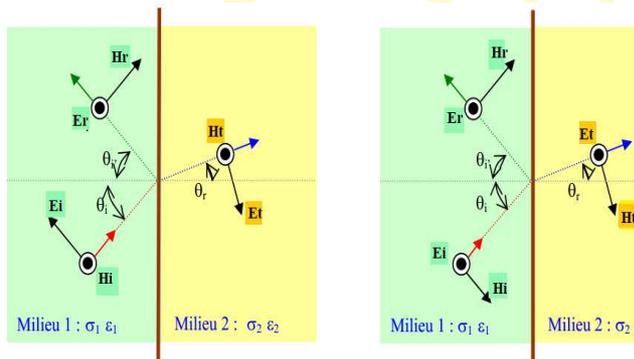
plane traversant un milieu 1 vers un milieu 2, les coefficients de réflexion et de transmissions sont donnés par les relations 25 et 26 pour le cas d'une polarisation parallèle et par les relations 27 et 28 pour la polarisation perpendiculaire.

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{\eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} \quad (1.25)$$

$$T_{\parallel} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} \quad (1.26)$$

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} \quad (1.27)$$

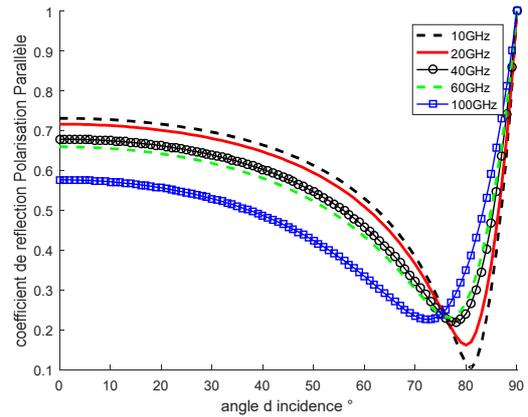
$$T_{\perp} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} \quad (1.28)$$



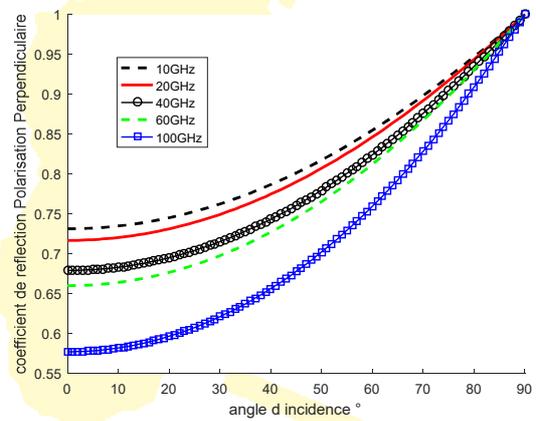
**Figure 1.11 :** Polarisation parallèle et perpendiculaire à l'interface [8]

$\eta$  étant l'impédance intrinsèque du milieu donné par la relation 2.54

$$\eta = \sqrt{\mu/\epsilon} \quad (1.29)$$



**Figure 1.12 :** Variation coefficient de réflexion polarisation parallèle



**Figure 1.13 :** Variation coefficient de réflexion polarisation perpendiculaire

#### 4. Effets biologiques

Les effets biologiques dus à l'exposition aux rayonnements électromagnétiques sont souvent qualifiés de thermiques ou non thermiques. Cependant, cette division est imprécise. L'interaction avec le champ électromagnétique comprend toujours un transfert d'énergie et généralement une élévation de température locale. Cependant, certains effets sont spécifiques à l'énergie

électromagnétique et ne peuvent pas être obtenus au moyen de la chaleur conventionnelle. [9]

#### 4.1 Effets thermiques

L'augmentation de température d'un corps due à l'absorption de plusieurs photons ne peut avoir lieu que dans les régions proches des microondes  $f > 10^9 \text{ Hz}$  et pour des rayonnements intenses dont l'intensité est supérieure à  $1 \text{ mW/cm}^2$ . [10]

D'après le théorème de Kirchhoff, tout corps matériel absorbe du photon dont la longueur d'onde est la même que celle qu'il émit. De plus la distribution de la radiation émise par un corps non noir est le même que celle d'un corps noir pour une même température multiplié par le coefficient d'absorption d'un corps non noir pour une longueur d'onde différente :

$$E_{\lambda_{\text{non noir}}} = \alpha_{\lambda} \cdot E_{\lambda_{\text{noir}}} \quad (1.30)$$

Avec

$$\alpha_{\lambda} = \frac{\text{Puissance absorbée}}{\text{Puissance incidente}} \quad (1.31)$$

$\alpha_{\lambda}$ : coefficient d'absorption (toujours inférieur à 1)

$E_{\lambda}$ : La fonction de distribution de la capacité de radiation A

D'après le théorème de Planck  $E_{\lambda}$

$$E_{\lambda} = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{kT \cdot \lambda}} - 1} \quad (1.32)$$

La capacité de radiation A d'un corps matériel est définie comme le quotient de la puissance rayonnée par le corps divisée par sa surface.

$$A = \frac{P}{S} \quad (1.33)$$

Cette capacité de radiation dépend de la température du corps selon la loi de Stefan-Boltzmann (pour un corps noir):

$$A = \sigma T^4 \quad (1.34)$$

Avec

$$\sigma = 5.672 \times 10^{-5} \text{ erg} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{grad}^{-4}$$

Or nous savons que le corps noir émit dans la partie des infrarouges donc les corps non noir émettent dans la partie de microondes.

##### 4.1.1 Mécanisme de vibration forcée des ions libres

Les ondes électromagnétiques qui pénètrent dans les tissus biologiques vont provoquer des mouvements ou oscillations des ions. Pour expliquer ce phénomène, nous allons considérer un champ électrique externe défini par la relation 1.35 [10]

$$E = E_0 \sin \omega t \quad (1.35)$$

Ce champ va exercer sur chaque ion qui peut passer à travers la membrane plasmique et les protéines transmembranaires une force périodique (force de Lorentz) donnée par la relation:

$$F_1 = E_0 z q_e \sin \omega t \quad (1.36)$$

Cette force va déplacer l'ion de sa position initiale. De plus en supposant que l'ion est initialement à sa position d'équilibre, cet état va être perturbé à cause de son déplacement du à la force précédente, ainsi il va recevoir une force de restauration proportionnelle à la distance de déplacement  $x$ .

$$F_2 = -Dx \quad (1.37)$$

$D$  étant la constante de restauration

$$D = m_i \omega_0^2 \quad (1.38)$$

Avec  $m_i$  la masse d'un ion et la pulsation  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $f_0$  étant la fréquence propre d'oscillation de l'ion définie comme la fréquence d'un système pour une oscillation spontanée.

Finalement, l'ion en mouvement subit une force d'humidité qui entraîne atténuation de sa vitesse, elle est définie par la relation suivante :

$$F_3 = -\lambda \mu \quad (1.39)$$

$\mu$  étant la vitesse de l'ion

$\lambda$  le coefficient d'atténuation, il dépend de la viscosité des milieux traversés par l'ion (le cytoplasme, le milieu extracellulaire et le canal de protéine) et son rayon  $\alpha$  (l'ion est supposé sphérique).

Ainsi l'ion obtient une accélération  $a$  et son équation de mouvement est donnée par la relation suivante :

$$m_i a = -\lambda \mu - Dx - E_0 z q_e \sin \omega t \quad (1.40)$$

Nous obtenons alors

$$m_i \frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + m_i \omega_0^2 x = E_0 z q_e \sin \omega t \quad (1.42)$$

C'est une équation différentielle linéaire de second ordre à coefficient constante dont la solution particulière est de la forme :

$$x_p = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.43)$$

À partir de 1.35 et 1.36 nous obtenons :

$$A = \frac{E_0 z q_e}{\sqrt{m_i^2 (\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (\lambda \omega)^2}} \quad (1.44)$$

Et

$$\tan \varphi = \frac{m_i (\omega^2 - \omega_0^2)^2}{\lambda \omega} \quad (1.45)$$

La solution générale sera alors la somme de cette solution particulière et la solution de l'équation sans second membre :

$$m_i \frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + m_i \omega_0^2 x = 0 \quad (1.46)$$

La solution de l'équation est de

$$x_0 = C_1 e^{\xi_1 t} + C_2 e^{\xi_2 t} \quad (1.47)$$

Avec  $C_1$  et  $C_2$  sont des constantes que l'on obtient à partir des conditions initiales,  $\xi_1$  et  $\xi_2$  sont les racines de l'équation caractéristique de 1.40

$$m_i \xi^2 + \lambda \xi + m_i \omega_0^2 = 0 \quad (1.48)$$

$$\Delta = \lambda^2 - 4m_i^2 \omega_0^2 \quad (1.49)$$

Et les racines sont

$$\xi_{1,2} = \frac{-\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 4m_i^2 \omega_0^2}}{2m_i} \quad (1.50)$$

Théoriquement la valeur de  $\Delta$  peut être négative positive ou nulle, cependant les résultats expérimentales avec différentes cellules montrent que la valeur de  $\omega_0$  ne dépasse pas de 1 Hz, la plupart montre une valeur entre 0.016 et 0.2 Hz.

Par conséquent, pour les ions typiques comme  $\text{Na}^+$  nous avons :

$$\lambda = 10^{-12} \text{ Kg/sec et } m_i = 3.8 \cdot 10^{-26} \text{ Kg}$$

donc  $\lambda \gg 2m_i \omega_0$  ainsi  $\Delta > 0$

Les racines  $\xi_{1,2}$  sont par conséquent réelles et négatives. La solution de 2.116 tend alors vers 0 quand  $t$  tend vers l'infini.

De plus, la quantité  $m_i(\omega^2 - \omega_0^2)^2$  sera négligeable devant  $(\lambda\omega)^2$ , ainsi dans la pratique la solution particulière aura pour amplitude :

$$A = \frac{E_0 z q_e}{\lambda \omega} \quad (1.51)$$

Aussi nous avons  $m_i(\omega^2 - \omega_0^2) \ll (\lambda\omega)$  pour  $\omega \geq \omega_0$  ainsi  $\tan \varphi \cong 0$ ,  $\tan \varphi \geq 0$  et  $\varphi \cong 0$ , La solution particulière s'écrit alors :

$$x_p = \frac{E_0 z q_e}{\lambda \omega} \cos \omega t \quad (1.52)$$

La solution générale de l'équation 1.36 est donc

$$x_p = \frac{E_0 z q_e}{\lambda \omega} \cos \omega t + C_1 e^{\xi_1 t} + C_2 e^{\xi_2 t} \quad (1.53)$$

Pour une valeur raisonnable de  $v_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 0.1 \text{ Hz}$ , nous avons

$$\xi_1 \cong -1.5 \cdot 10^{-14} \text{ sec}^{-1} \cong 0 \quad (1.54)$$

$$\xi_2 \cong -2.6 \cdot 10^{13} \text{ sec}^{-1} \quad (1.55)$$

Si nous considérons les conditions initiales suivantes :

$$\text{A } t=0 \text{ } x_{t=0} = 0 \text{ et } \left(\frac{dx}{dt}\right)_{t=0} = v_0 \text{ ainsi}$$

d'après l'équation 1.46 nous avons

$$C_1 + C_2 = -\frac{E_0 z q_e}{\lambda \omega} \quad (1.56)$$

$$C_1 \xi_1 + C_2 \xi_2 = v_0 \quad (1.57)$$

Ainsi

$$C_1 \cong -\frac{E_0 z q_e}{\lambda \omega} \quad (1.58)$$

$$C_1 \cong -v_0 \times 10^{-14} \quad (1.59)$$

$$C_2 e^{\xi_2 t} \cong 0 \quad (1.60)$$

On obtient

$$x = \frac{E_0 z q_e}{\lambda \omega} \cos \omega t - \frac{E_0 z q_e}{\lambda \omega} \quad (1.61)$$

On remarque que l'ion se déplace d'une distance fixe de  $\frac{E_0 z q_e}{\lambda \omega}$  par rapport à son mouvement de vibration. Cependant ce terme est négligeable devant le terme oscillant ainsi le mouvement de vibration est décrit par l'équation suivante :

$$x = \frac{E_0 z q_e}{\lambda \omega} \cos \omega t \quad (1.62)$$

#### 4.1.2 Modèles de transfert thermique dans les tissus biologiques

La modélisation mathématique de la diffusion thermique dans les tissus biologique est basée sur les travaux de Pennes publié en 1948 [11]. L'équation de Pennes suppose que tout

transfert thermique entre le tissu et le sang se fait dans les capillaires et que la conductivité thermique, le taux de perfusion sanguine et la production de chaleur métabolique sont uniformes, elle prend en compte les la perfusion sanguine. Dans ce modèle la variation de la température créée par l'absorption de l'énergie électromagnétique est donnée décrite par la relation 1.63

$$\rho C_p \frac{\partial T(t)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho \cdot SAR - B(T - T_b) \quad (1.63)$$

$T(t)$  étant la température du tissu à l'instant  $t$ ,  $\rho$ : densité du tissu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $c$ : chaleur spécifique du tissu [ $\text{J}/\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$ ],  $k$ : conductivité thermique du tissu [ $\text{J}/\text{s.m} \text{ } ^\circ\text{C}$ ],  $B$ : perfusion sanguine.

Il existe encore plusieurs modèle de transfert thermique dans les tissus biologiques basé l'amélioration de ce modèle, cependant il reste encore le modèle le plus utilisé à cause de sa simplicité mais relativement précise.

#### 4.2 Effets non-thermiques

*Les effets non thermiques* sont des effets observés sur les systèmes biologiques, alors que la quantité d'énergie absorbée est trop faible pour induire une élévation de la température. Pour expliquer le mécanisme d'interaction des ondes qui provoque ces effets, une approche consiste à se baser sur l'hypothèse qu'un champ oscillant externe exerce une force oscillante sur les ions

libres à l'intérieur et à l'extérieur de la membrane plasmique de la cellule qui peuvent y traverser par les protéines transmembranaires. Cette force provoque une vibration forcée des ions libres

Quand cette force atteint une valeur seuil, les ions en mouvement peuvent donner des fausses informations dans les signaux de commande d'ouverture et fermeture (mécanique ou électrique) des canaux. Cela entraîne le déséquilibre électrochimique du plasma dans la cellule qui provoquera par la suite une perturbation de la fonction de la cellule entière.

D'après [10] [12] [13] un changement de 30 mV du potentiel de la membrane permet de fermer ou d'ouvrir les canaux commandés par tension et un déplacement d'un ion de  $\partial r = 10^{-12} \text{m}$  sur S4 [12] [13] permet d'avoir un tel changement.

En posant  $F$  la force qui agit et  $q$  la charge efficace sur le domaine S4 et en supposant que

$$q = 1.7q_e \quad (1.64)$$

Nous avons d'après la formulation du potentiel membranaire

$$F = \frac{\Delta\psi}{S} q \quad (1.65)$$

Ainsi

$$\Delta F = \frac{q}{S} \Delta\psi \quad (1.66)$$

En prenant  $\Delta\psi = 30 \text{ mV}$  et  $S = 10^{-8} \text{m}$ , nous obtenons 1.67 qui est la force nécessaire pour ouvrir ou fermer le canal ionique commandé par tension.

$$\Delta F = 9.16 \cdot 10^{-13} N \quad (1.67)$$

Le déplacement d'un z-valence cation qui permet d'ouvrir ou de fermer un canal ionique est donné par la relation suivante :

$$\partial r = - \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 \partial Fr^3}{q \cdot zq_e} \quad (1.68)$$

r étant la distance entre l'ion oscillant et la charge efficace du domaine S4. Cette distance peut être considérée comme 1 nm qui est la valeur de la force nécessaire pour ouvrir ou fermer un canal ionique commandé par tension.

$\epsilon_0$  est la constante diélectrique du vide et  $\epsilon$  : la constante diélectrique relative, elle peut avoir une valeur 80 pour les milieux qui partagent les mêmes caractéristiques avec l'eau (cytoplasme ou les espaces extracellulaires). Pour les ions traversant les canaux protéiques, elle peut avoir une valeur très basse comme 4.

D'après la loi de Coulomb la force exercée par un ion à une valence sur la charge efficace d'un domaine S4 est donnée par la relation suivante :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{zq_0q_e}{r^2} \quad (1.69)$$

Ainsi

$$\partial F = -2 \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{zq_0q_e}{r^3} \quad (1.70)$$

- $\partial r \cong 0.8 \cdot 10^{-10}$  m pour  $\epsilon = 80$
- $\partial r \cong 4 \cdot 10^{-12}$  m pour  $\epsilon = 4$
- $\partial r \cong 2 \cdot 10^{-12}$  m pour  $\epsilon = 4$  pour un cation à double valence

Ainsi nous pouvons voir qu'un déplacement d'un cation de quelques pico mètre permet de basculer l'état (ouvert ou fermé) du port des canaux commandé par tension. Les ions libres sont toujours en mouvement du à ces activités thermiques avec de l'énergie cinétique plus grande que celle causé par les champs électromagnétiques externes. Ces mouvements sont d'une façon aléatoire dans toutes les directions possibles pour chaque ion, cela ne provoque pas donc un déplacement du nuage d'ions donc n'atteint pas le basculement de l'état du canal ionique. Tandis que les vibrations forcées des ions causées par un champ électromagnétique externe sont des mouvements cohérents de tous les ions ensemble en phase. Le mouvement dû aux activités thermiques est négligeable devant celle causé par le champ externe et seul ce dernier peut affecter le fonctionnement des cellules décrit précédemment.

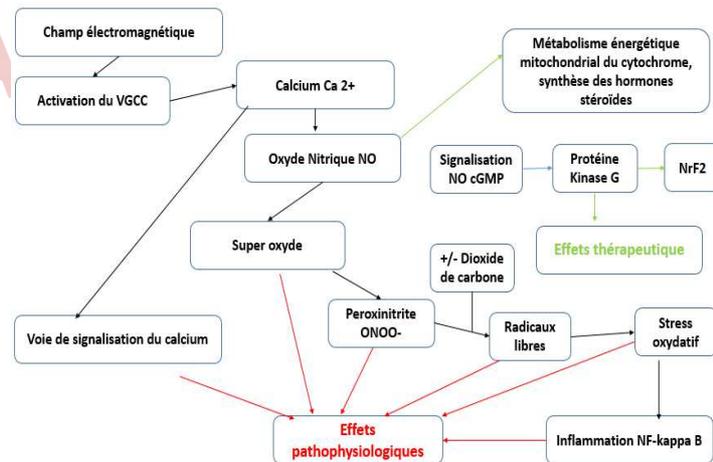


Figure 1.14 : Diverses voies d'action par

*lesquelles les champs électromagnétiques peuvent activer le VGCC et entraîner des effets biologiques*

La figure 1.14 montre les modes d'action possibles suite à la stimulation du VGCC (Voltage-Gated Calcium Channels à partir des champs électromagnétiques). Dans [13] [14], il est rapporté que l'exposition aux fréquences extrêmement basses (y compris les champs statiques) et à la plage de micro-ondes agissent via la stimulation du VGCC. Cette stimulation entraîne une augmentation du calcium intracellulaire, qui peut à son tour stimuler les deux synthèses d'oxyde nitrique dépendantes du calcium / calmoduline et augmenter l'oxyde nitrique. L'augmentation de l'oxyde nitrique peut conduire à des réponses thérapeutiques / potentiellement thérapeutiques et physiopathologiques:

-L'oxyde nitrique par sa principale voie physiologique stimule le cGMP et la protéine kinase G. Cela est supporté par un exemple substantiel comme la stimulation de la croissance osseuse via la stimulation par champ électromagnétique modulé des ostéoblastes, qui semble impliquer une voie d'élévation / oxyde nitrique / protéine kinase G

- L'oxyde nitrique agit en réponse pathologique en agissant comme précurseur du peroxy-nitrite, produisant à la fois un stress oxydatif et des produits de dégradation des

radicaux libres. Par exemple, il semble probable que l'induction électromagnétique de cassures d'ADN monomarque implique une voie  $Ca^{2+}$  / élévation / oxyde nitrique / peroxy-nitrite / radical libre (stress oxydatif).

### 5- Conclusion

En conclusion, les champs électromagnétiques de source artificielle utilisés dans la gamme jusqu'à 300 GHz sont non ionisants. Dans la gamme statique et à très basse fréquence (jusqu'à la fréquence de 100 kHz), les champs électromagnétiques induisent des courants à l'intérieur de notre corps qui peuvent conduire à la stimulation des tissus excitables (système nerveux et muscles). Au-dessus de 100 kHz, l'énergie absorbée par le corps est proportionnelle à l'intensité du champ et elle est quantifiée par SAR qui est en W / kg. L'énergie absorbée est ensuite transformée en chaleur. L'absorption du champ électromagnétique dépend de la fréquence et de leurs propriétés diélectriques des tissus biologiques. Elle est plus importante dans les tissus à forte teneur en eau mais plus la fréquence est élevée, moins le champ peut pénétrer dans les tissus. L'augmentation de la chaleur est souvent modélisée à l'aide de l'équation Bio-chaleur de Pennes qui prend en compte le taux de perfusion sanguine et la production de chaleur métabolique. La chaleur déposée par le rayonnement électromagnétique s'ajoute à

celle produite par le métabolisme de l'organisme. Entre 100 kHz et 10 MHz l'échauffement et la stimulation peuvent coexister. D'autres effets possibles tels que les effets non thermiques font encore l'objet de débats scientifiques tels que la génotoxicité, le risque de cancer, les effets sur la multiplication cellulaire, les changements de perméabilité de la barrière hémato-encéphalique, les perturbations enzymatiques et hormonales.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Moureaux «*Exposition aux champs électromagnétiques*» INRS, www.inrs.com
- [2] E. Conil «*électromagnétique en milieu complexe: du champ proche au champ lointain*», Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005
- [2] E. Conil «*électromagnétique en milieu complexe: du champ proche au champ lointain*», Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005
- [3]. P Staebler “*Human Exposure to Electromagnetic Fields*”, Wiley 2017
- [4] D. M Pozar “*Microwave engineering*”, John Wiley & Sons 2012
- [5] B. Greenebaum and F. Barnes «*Biological and Medical Aspects of Electromagnetic Fields*», CRC Press, 2019
- [6] T. Wu, T. S. Rappaport, Christopher M. Collins “*Safe for Generations to Come*” IEEE microwave magazine, March 2015
- [7] INRS «*les ondes électromagnétiques, actions et effets sur le corps humain*», ED 4350
- [8] J. P ANDRETZKO, «*Contribution à l'optimisation et à la modélisation d'un banc de mesure CEM -Application à la caractérisation de l'immunité des stimulateurs cardiaques*», thèse Université Henri Poincaré, Nancy 2007
- [9] CT Ponne, P. V. Bartels “*Interaction of electromagnetic energy with biological material, relation to food Processing*», Radiat Phys Chem 1995; 45: 591–607
- [10] P. Stavroulakis, «*Biological Effects of Electromagnetic Fields Mechanisms, Modeling, Biological Effects, Therapeutic Effects, International Standards, Exposure Criteria.*» Springer 2003
- [11] H. H. Pennes, “*Analysis of tissue and arterial blood temperature in resting forearm*”, J. Appl. Physiol., vol. 1, pp. 93-122, 1948.
- [12] W. A. Catteral. “*Voltage-Gated Calcium Channels*”, Department of Pharmacology, University of Washington, Seattle, Washington 98195-7280
- [13] M. L Ruiz, R. L. Kraus: “*Voltage-Gated Sodium Channels: Structure, Function, Pharmacology, and Clinical Indications*”
- [14] Martin Pall, “*Massive Predicted Effects of 5G in the Context of Safety Guideline Failures: very high level VGCC Sensitivity to*

*Low Intensity EMFs and Especially to Pulsations” Feb. 25, 2020*

[15]Martin Pall “*Electromagnetic, fields act via activation of voltage-gated calcium channels to produce beneficial or adverse effects”*



**MADA-ETI**