

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université de Constantine 1
Faculté des Sciences de la
Technologie



Thèse
Présentée en vue de l'obtention du Diplôme de
Doctorat en Sciences en Electronique

Option : Composants Electroniques

THEME

**EFFETS DES RADIATIONS ELECTROMAGNETIQUES
SUR LE CORPS HUMAIN**

Par : MOUMEN CHERIF

Jury :

Président	BOUCHEMAT Mohamed	Professeur	Université de Constantine 1
Rapporteur	BENSLAMA Malek	Professeur	Université de Constantine 1
Examineur	CHAABI Abdelhafid	Professeur	Université de Constantine 1
Examineur	BENATIA Djamel	Professeur	Université de Batna
Examineur	FORTAKI Tarek	Professeur	Université de Batna

ANNEE 2014

Remerciements

- *Tous d'abord je dois remercier Dieu qui m'a donné la santé et la volonté durant la réalisation de cette thèse.*
- *Je voudrai aussi remercier mon Directeur de thèse M. Malek BENSLAMA; Professeur à l'Université de Constantine1 de m'avoir accueilli au sein du laboratoire, et pour ses conseils et son aide dans l'accomplissement de cette thèse.*
- *Je remercie le Professeur BOUCHEMAT Mohamed pour avoir accepté de présider le jury, d'avoir accepté d'évaluer mon travail et pour les remarques qu'il a fait.*
- *Je remercie les Professeurs : CHAABI Abdelhafid, BENATIA Djamel et FORTAKI Tarek d'avoir accepté d'évaluer mon travail, d'avoir participé au jury et pour les remarques qu'ils ont fait.*
- *Je remercie l'e Professeur MASSAI Abderraouf et le Dr. SKANDER Aris, avec eux, je suis en dette pour ces aides, sans lesquels, je n'aurais pas pu être possible l'accomplissement de ce travail.*
- *Je remercie l'ensemble de l'équipe de Kuala Lumpur : Le Professeur Bachir SOUALHI (International Islamic University of Malaysia) et le Professeur BERGHOUT Abdelaziz vice recteur de (International Islamic University of Malaysia), et bien particulièrement le Professeur Saad Mekhilef (Université of Malaya - Malaysia), avec ses aides précieuses qui ont éclairé mon chemin vers le succès et la réussite du travail.*
- *A toute ma famille (Fatma, Aicha, Mekj, Rabah, Ahcene et Fateh), et surtout : ma chère mère et mon cher père, qui m'ont entouré et soutenu pendant les années de mes études.*

Je dédie ce travail à ma fille

MOUMEN Hayat.

Qui nous a quittés à jamais pour la sainte Miséricorde divine, le 27 / 05 / 2004.

Laisant derrière lui un très grand vide que personne ne pourra combler.

*Tu es et tu resteras toujours présent dans nos cœurs et nos pensées,
et le temps ne nous fera jamais oublier, ta geste de Bay-Bay.*

Nous ne t'oublierons jamais.

Pour nous, tu es la meilleure fille au monde.

*En ce triste, merveilleux souvenir,
ta mère, ton père demandent à tous ceux qui t'ont connu et aimé, d'avoir une pieuse pensée à ta
mémoire.*

Repose en paix, chère fille.

Nous ne t'oublierons jamais.

*Puisse Dieux, le Tout-Puissant, lui accorder Sa Sainte Miséricorde et l'accueillir en Son vaste
Paradis.*

Je dédie ce travail à ma chère femme, mes filles Tasnim et Yara.

Et je te dis :

Je t'aime ma femme.

Je t'aime ma fille Tasnim.

Je t'aime ma fille Yara.

Merci beaucoup.

Table des matières

<i>Notations</i>	i
<i>Résumé</i>	ii
<i>Introduction Générale</i>	01
 <i>Chapitre I : Effets des champs électromagnétiques sur la santé</i>	
I.1. Introduction	07
I.2. Rappel de quelques notions d'électromagnétisme	07
I.2.1. Notion d'onde	07
I.2.2. Onde électromagnétique	08
I.2.3. Spectre électromagnétique	10
I.2.4. Modèle corpusculaire	11
I.3. Caractéristiques des téléphones mobiles et stations de base	11
I.3.1. Structure d'un réseau de télécommunication mobile cellulaire	13
I.3.2. Technique de fonctionnement	14
I.3.3. Les téléphones mobiles	15
I.3.4. Les stations de base	15
I.3.5. Propagation des ondes des stations de base des télécommunications mobiles	16
I.3.6. Les propriétés des champs électromagnétiques de la télécommunication mobile	16
I.4. Niveaux des champs rayonnés	18
I.5. Rayonnements non ionisants	19
I.5.1. La lumière	19
I.5.2. Les micro-ondes et radiofréquences	20
I.5.3. Les ondes sonores	20
I.6. Effets des champs sur la santé	21
I.6.1. Définitions	21
I.6.2. Effets biologiques des champs électromagnétiques	22
a- Effet thermique	22
b- Effet athermique	23
I.6.3 Effets à court terme	23
I.6.4 Effets à long terme	24
I.7. Etude épidémiologique	27
I.7.1 Etude épidémiologiques chez l'homme	27
I.7.2 Etude épidémiologiques chez l'animal	27
I.8. Méthode de calculs	28
I.9. Etat d'avancement des sciences et de la recherche	28
I.10. Bibliographie	30

Chapitre II : Propagation de l'Energie Electromagnétique à Travers un Milieu Biologique

II.1.	Introduction	33
II.2.	Sources d'exposition	33
II.3.	Téléphones mobiles et stations de base	34
II.4.	Mécanisme d'interaction	34
II.4.1.	Répartition des charges électriques	35
II.5.	Propriétés diélectriques du tissu	36
II.6.	Expressions des champs électromagnétiques dans le corps humain	37
II.6.1.	Coefficients des atténuations	38
II.7.	Propagation de l'énergie RF a travers la tête humaine	39
II.7.1.	Modèle de la tête humaine	39
II.7.2.	La puissance incidente	40
II.7.3.	La puissance réfléchie	41
II.7.4.	La puissance transmise	41
II.7.5.	La puissance absorbée à $z = 0$	41
II.7.6.	La puissance absorbée à $z \neq 0$	42
II.8.	La profondeur de pénétration	43
II.8.1.	La longueur d'onde détermine la profondeur de pénétration de l'onde	44
II.9.	Conclusion	44
II.10.	Bibliographie	46

CHAPITRE III : MODELISATION DES RADIATIONS E/M ENTRE MOBILE, ANTENNE ET LE CORPS HUMAIN

III.1.	Introduction	49
III.2.	Téléphone mobile : fonctionnement et aspects techniques	50
III.2.1.	Puissances d'émission (limites)	50
III.2.2.	Régulation automatique de la puissance	51
III.2.3.	Quand un téléphone mobile émet-il ?	51
III.2.3.	Un mobile émet-il également en mode veille ?	52
III.2.4.	Importance des fréquences utilisées	52
III.2.5.	Ondes pulsées basses fréquences et champs magnétiques	52
III.3.	Gain d'une antenne	53
III.4.	Surface équivalente à une antenne	54
III.5.	Radiations électromagnétiques incidentent sur le corps humain	54
III.5.1.	La puissance rayonnée par l'antenne absorbée par le corps humain	55
III.5.2.	La puissance rayonnée par le mobile absorbée par le corps humain	56
III.6.	Calcul du champ total rayonne	57
III.7.	Le champ total absorbe par le corps humain	59
III.8.	Le SAR du corps humain causer par la station de base	59
III.9.	Le sar du corps humain causer par le mobile	60
III.10.	Profils thermiques de la tête humaine	61
III.10. 1.	L'énergie thermique générée	61
III.10. 2.	Puissance perdue par l'onde traversant le tissu	62
III.10. 3.	L'énergie thermique déposée	62
III.10. 4.	La chaleur de l'énergie perdue	62
III.10. 5.	Principe de conservation de l'énergie	63
III.10. 6.	Solution de l'équation de transfert de bio-chaleur	64
III.11.	Conclusion	65
III.12.	Bibliographie	66

CHAPITRE IV : Distribution de la température dans la tête humaine

IV.1.	Introduction	69
IV.2.	Formulation du problème	72
IV.3.	Méthodes et modèle	72
	IV.3.1. Le modèle physique	72
	IV.3.2. Analyse de l'équation de l'onde électromagnétique propageant	74
	IV.3.3. Les conditions aux limites	75
	IV.3.4. Interaction entre l'onde électromagnétique et le tissu humain	76
	IV.3.5. Les équations pour l'analyse de transfert de chaleur	77
	IV.3.6. Les conditions aux limites pour analyser le transfert de chaleur	78
IV.4.	Discussion des résultats	79
	IV.4.1. Procédures de calculs	79
	IV.4.2. Distribution du champ électrique.....	81
	IV.4.3. Comparaison de la distribution du SAR et la distribution de la température dans le tissu humain	83
IV.5.	Effet de la distance entre le téléphone mobile et la tête humaine comparaison	86
IV.6.	Conclusion	88
IV.7.	Bibliographie	89

CHAPITRE V : CONCLUSION GENERALE

<i>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</i>	91
--	----

<i>ANNEXES</i>	96
-----------------------------	----

NOTATIONS

<i>CEM</i>	<i>Champ électromagnétique</i>
<i>GSM</i>	<i>Global System for Mobile Communication</i>
<i>SAR</i>	<i>Taux d'Absorption Spécifique ou (Specific Absorption Rate)</i>
<i>RF</i>	<i>Radiofréquence</i>
\vec{E}	<i>Champ électrique (V/m)</i>
\vec{D}	<i>Induction électrique</i>
\vec{H}	<i>Champ magnétique (A/m)</i>
\vec{B}	<i>Induction magnétique (Tesla)</i>
<i>f</i>	<i>Fréquence (Hz)</i>
λ	<i>Longueur d'onde(m)</i>
ε	<i>Permittivité (F/m)</i>
ε_0	<i>Permittivité dans le vide</i>
ε_r	<i>Permittivité relative</i>
μ	<i>Perméabilité (H/m)</i>
μ_0	<i>Perméabilité magnétique dans le vide</i>
μ_r	<i>Perméabilité magnétique relative</i>
\vec{J}	<i>Densité de courant (A/m²)</i>
σ	<i>Conductivité électrique (S/m)</i>
ρ	<i>Densité de charge (kg/m³)</i>

RESUME

Le corps humain est de plus en plus exposé à une pollution électromagnétique résultant de l'utilisation croissante de la téléphonie cellulaire et leurs stations de base, bien que les conséquences sur la santé ne soient pas clairement établies, peu de gens savent que lorsqu'ils utilisent leur téléphone cellulaire, ils subissent au niveau de la tête, des champs électromagnétiques s'élevant jusqu'à 50 ou 100 Volts/m. la différence c'est que le rayonnement de l'antenne est reçu faiblement sur l'ensemble du corps, alors que le portable irradie principalement la tête avec une énergie beaucoup plus grande, la plus part de cette énergie de rayonnement est absorbé par le corps humain.

Ce travail de thèse est consacré à la modélisation de transmission de l'énergie électromagnétique à travers un milieu biologique (la tête humaine), par l'observation des propriétés diélectriques de tissu humain, leurs évolutions suivant les variations de la fréquence GSM (0.9 et 1.8 GHz), la résolution des équations de Maxwell afin de déterminer; les expressions des champs électromagnétiques dans le corps humain et la capacité de diffusion de l'énergie (RF) dans les couches de la tête humaine la plus exposée à ces rayonnements (la peau, le muscle, l'os et le cerveau), ceci par le calcul de la puissance absorbée par les tissus de la tête humaine.

Par la suite, nous aborderons en détail la superposition des rayonnements électromagnétiques incidentent sur le corps humain provenant des téléphones mobiles et de leurs antennes sur notre système biologique, et par conséquent sur notre santé. Ceci par le calcul de : champ total absorbé par le corps humain, l'affaiblissement de liaison et le SAR provenant par l'antenne et le mobile. Ainsi que l'évolution des profils thermiques de la tête humaine, après l'exposition à une puissance incidente, l'évolution de cette température dans la tête humaine est calculée en utilisant l'équation bio-chaleur.

Nous avons obtenu des bons résultats mettent en évidence certaines contraintes liées aux conditions d'exposition, à la présence des obstacles et aux caractéristiques du corps humain. Puis une formulation unifiée est développée, et permet de prendre en compte l'exposition simultanée aux champs électromagnétiques provenant du mobile et de l'antenne. Nous sommes certains qu'une quantité de cette énergie est absorbée par le corps humain.

ABSTRACT

The human body is more and more exposed to the electromagnetic pollution due to increasing usage of cellular phone and their antennas. Although the consequence of human health have not been clearly established. Few people know that when they use their cell phone, they undergo at the head, electromagnetic fields up to 50 or 100 Volts/m. The difference is that the radiation of the antenna is received weakly at the whole body, while the cellular phone radiates mainly the head with a much larger energy, most of the energy of this radiation is absorbed by the human body.

This thesis is devoted to the modeling of transmission of electromagnetic energy through a biological medium (human head), Through observation of the dielectric properties of body tissue, their progress according to the variations of the GSM frequency (0.9 GHz and 1.8 GHz), solving Maxwell's equations to determine; expressions of electromagnetic fields in the human body and diffusing capacity of the energy (RF) in the layers of the human head most exposed to this radiation (skin, muscle, bone and brain), this by calculating the power absorbed by the tissues of the human head.

Thereafter, we discuss in detail the superposition of incident electromagnetic radiation on the human body from mobile phones and their antennas on our biological system, and therefore our health. This by calculating:

the total field absorbed by the human body, weaker link and SAR from by the antenna and mobile. And the evolution of thermal profiles of the human head, after exposure to an incident power, the evolution of the temperature in the human head is calculated using the bio-heatequation.

We obtained good results highlight some constraints exposure conditions, in the presence of obstacles and features of the human body. Then a unified formulation is developed, and allows taking into account the simultaneous exposure to electromagnetic fields from mobile and antenna. We are certain that this amount of energy is absorbed by the human body.

ملخص

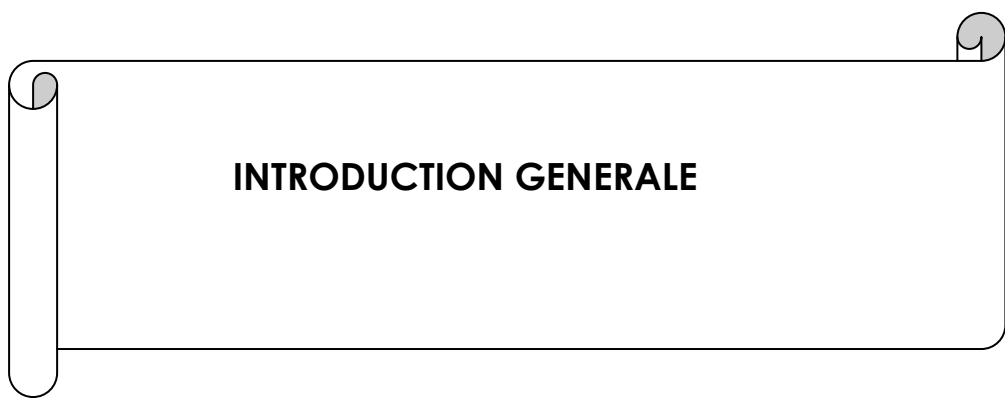
جسم الإنسان أكثر تعرضاً للتلوث الكهرومغناطيسي الناجم عن تزايد استخدام الهواتف المحمولة ومحطاتها القاعدية، على الرغم من أن العواقب الصحية ليست محددة بوضوح، قلة من الناس تعرف أنه عند استخدام هواتفهم المحمولة، فإنه م يتعرضون على مستوى الرأس، لحقول كهرومغناطيسية تصل إلى 50 أو 100 فولت / متر. والفرق يكمن في أن إشعاع الهوائي يصل جسم الإنسان ضعيفا، في حين يشع الهاتف المحمول بالخصوص الرأس بطاقة أعلى بكثير، معظم هذه الطاقة يمتصها جسم الإنسان.

هذه الأطروحة خصت لنمذجة (تصميم) انتقال الطاقة الكهرومغناطيسية في وسط بيولوجي (رأس الإنسان)، من خلال رصد خصائص الأنسجة البشرية العازلة، تغيراتها تبعاً لتردد جي أس أم GSM (0.9 غيغاهرتز و 1.8 غيغاهرتز)، حل معادلات ماكسويل (Maxwell) لتحديد، صيغة أو معادلة الحقول الكهرومغناطيسية داخل جسم الإنسان و قدرة انتشار الطاقة (RF) داخل

طبقات رأس الإنسان (الجلد، العضلات، العظام و المخ) الأكثر تعرضا لهذه الطاقة، و هذا عن طريق حساب الطاقة التي تمتصها أنسجة رأس الإنسان.

بعد ذلك، وسوف نناقش بالتفصيل تراكم الإشعاع الكهرومغناطيسي القادم من الهواتف المحمولة و الهوائيات القاعدية المتناقص على نظامنا البيولوجي، و بالتالي على صحتنا. هذا عن طريق حساب : الحقل الإجمالي الممتص من طرف جسم الإنسان، تناقص الرابط، و SAR المتسبب من الهاتف المحمول و الهوائي . وتطور التغيرات الحرارية في رأس الإنسان ، بعد التعرض للإشعاع الكهرومغناطيسي، ويتم احتساب تطور درجة الحرارة في رأس الإنسان باستخدام المعادلة البيولوجية للحرارة.

حصلنا على نتائج جيدة تضع في الحسبان بعض الصعوبات المرتبطة بظروف التعرض للطاقة الكهرومغناطيسية، وجود عقبات و خصائص جسم الإنسان. تم وضع صيغة موحدة، تسمح بالأخذ بعين الاعتبار التعرض للحقول الكهرومغناطيسية الصادرة من الهاتف المحمول و الهوائي في وقت واحد. و كما تم التأكيد من أن كمية من هذه الطاقة الكهرومغناطيسية امتصت من طرف جسم الإنسان.



Introduction Générale

Les rayonnements électromagnétiques étaient présents avant notre naissance, bien avant en fait. Pour dire vrai, ils seraient apparus après la création de l'univers. Dans notre vie quotidienne, nous sommes envahis par une gigantesque quantité de rayonnement, certains venants du soleil, d'autres de nos téléphones portables. Aujourd'hui, ils sont utilisés dans un nombre considérable de domaines ; de la télécommunication à la médecine en passant par la cuisine, ils nous entourent, tout ça pour dire que le rayonnement électromagnétique n'est pas une invention des scientifiques. Donc l'immense majorité des rayonnements de notre environnement est d'origine artificielle.

L'homme est exposé à une pollution électromagnétique qui résulte de l'utilisation toujours croissante de l'énergie électromagnétique provenant de téléphone cellulaire, téléphone sans fil, WiFi, Bluetooth. Quand les fils disparaissent, les ondes prennent le relais. Les antennes s'installent un peu partout, Omniprésents dans notre environnement, tant domestique que professionnel. Qui opèrent avec les deux fréquences 0.9 GHz et 1.8 GHz, on considère généralement qu'un champ électromagnétique (champ électrique E et/ou magnétique H) induit des micro-ondes dans le corps humain.

Les rayonnements électromagnétiques suscitent de multiples questions sur leurs effets potentiels sur la santé, à court et à longs termes, depuis une quinzaine d'années, moment où est apparu le téléphone cellulaire, les effets potentiels des ondes utilisées préoccupent les gents et les chercheurs. Et face à la profusion de ces étranges rayonnements venus de nos moyens de communications, nous nous sommes demandés quels étaient leurs effets sur le vivant et en particulier la tête humaine. Peuvent-elles nuire au système biologique ? Lorsqu'une entité biologique est soumise à des champs électromagnétiques, une interaction se produit avec les charges électriques du tissu ou de la cellule. Le résultat de l'interaction peut produire un effet biologique. L'être humain vit dans un « environnement électromagnétique ». Bien que les effets à court terme d'une telle exposition soient assez bien connus, la communauté scientifique n'est pas unanime en ce qui concerne les effets à long terme sur la santé.

ORGANISATION DE LA MEMOIRE :

Ce mémoire contient plusieurs chapitres :

- **Le premier chapitre :** Dans le premier chapitre, afin de bien situer le contexte de nos travaux, nous avons effectué des études bibliographiques sur « les effets des champs électromagnétiques sur la santé », à l'étude des interactions entre le champ électromagnétique et le corps humain pour les deux fréquences (0.9 GHz et 1.8 GHz), et à une présentation rapide de quelques notions d'électromagnétisme et des méthodes numériques utilisées en général pour calculer les phénomènes induits dans le corps humain (cf. annexe I).
- **Le deuxième chapitre :** Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié et mis en œuvre la modélisation de la propagation de l'énergie électromagnétique à travers un milieu biologique par l'étude des propriétés diélectriques de tissu humain et leurs évolutions suivant les variations de la fréquence, ainsi que la résolution des équations de Maxwell afin de déterminer les expressions des champs électromagnétiques dans le corps humain, ainsi la capacité de diffusion de l'énergie (RF) dans les couches de la tête humaine la plus exposée à ces rayonnements, ceci par l'observation de la variation de la puissance absorbée par les tissus de la tête humaine.
- **Le troisième chapitre :** Dans le troisième chapitre, nous avons développé une méthodologie basée sur une formulation couplée (ou unifiée). Cette formulation permet de prendre en compte simultanément les effets inductifs et capacitifs, des rayonnements électromagnétiques provenant des téléphones mobiles et de leurs antennes sur notre système biologique, et par conséquent sur notre santé. Ceci par le calcul de : champ total absorbé par le corps humain, l'affaiblissement de liaison et le SAR causaient par l'antenne et le mobile.
Ainsi qu'une étude sur les profils thermiques de la tête humaine, après l'exposition à une puissance incidente. Le tissu humain absorbe une partie de l'énergie qui est convertie en chaleur, l'évolution de cette température dans la tête humaine est calculée en utilisant l'équation bio-chaleur.

- **Le quatrième chapitre :** Dans le dernier chapitre, nous avons analysé le taux d'absorption spécifique (SAR) et la distribution de température dans le modèle de la tête humaine exposée aux rayonnements du téléphone mobile à 900 MHz et à 1800 MHz. Les effets de la fréquence de fonctionnement et la distance entre le téléphone mobile et la tête humaine sur les distributions de débit d'absorption spécifique et le profil de température à l'intérieur de la tête humaine sont systématiquement étudiés. Cette étude met l'accent sur chaque tissu de la tête humaine le SAR et la distribution de la température dans les différents tissus de la tête humaine exposés à des radiations de téléphone mobile, sont obtenues par la solution numérique de deux équations la propagation des ondes électromagnétiques et le transfert de bio-chaleur, pour les deux fréquences (900 MHz et 1800 MHz). Enfin comparé les résultats obtenus avec ceux issus d'autres études théoriques et pratiques. Enfin nos méthodes de calcul ont été utilisées pour simuler un cas réaliste d'exposition à un rayonnement électromagnétique provenant du mobile et de l'antenne.

Les travaux présentés dans cette thèse ont donné lieu à quatre communications.

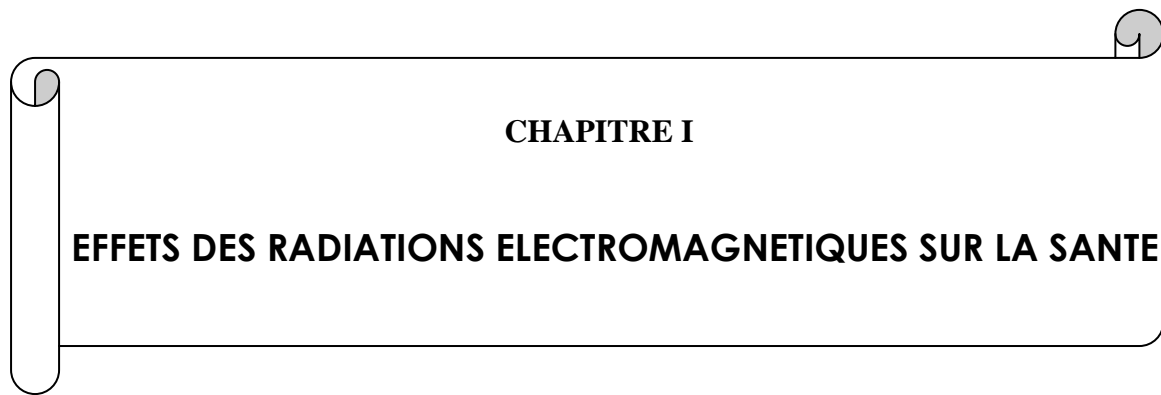
- I-** Effets des radiations électromagnétiques générées par des antennes mobiles sur le cerveau humain: **Sciences & Technologie B - N°37**, (Juin 2013), pp 9-13.
- II-** Effects of Electromagnetic Radiations Generated by Mobile Antennas on the Human Brain: **2013 IEEE International RF and Microwave Conference. On December 9 - 11, 2013 at Baywiew Beach Resort, Penang Malaysia.** Et d'une communication invitée à la conférence **RFM 2013**.
- III-** Modelling Radiation Electromagnetic Between Mobile, Antenna and the Human Body in the Calculation of SAR: **2013 International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering. On December 4 - 5, 2013, Kuala Lumpur, Malaysia.** Et d'une communication invitée à la conférence **ICEESE 2013**.

- IV-** Effets des Radiations Electromagnétiques Générées par des Antennes Mobiles sur le Cerveau Humain: **6th International Summer School on Signal Processing and its Applications and Worksshop on Signal and Image Processing. On October 04 - 08, 2009, University of SSciences and Technology of Oran, Algérie.** Et d'une communication invitée à la conférence **ISPAS 2009.**

- V-** Cryptography of Medical Images: **Progress in Electromagnetics Research Symposium. On March 27 - 30, 2012, Kuala Lumpur, Malaysia.** Et d'une communication invitée à la conférence **PIERS 2012.**

- VI-** Slotted Aloha Game for Decreasing Transmission Delay and Packet Loss Ratio in Wireless Data Networks: **International Conference on Communication and Computer Engineering (iCoCoE 2014). On 20-21 May 2014 at Kings Green Hotel, Melaka, Malaysia.**

- VII-** Slotted Aloha Game for Decreasing Transmission Delay and Packet Loss Ratio in Wireless Data Networks: **Australian Journal of Basic and Applied Sciences, ISSN: 1991-8178, (December 2014), pp 30-35.**



CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

I.1. INTRODUCTION :

L'être humain vit dans un « environnement électromagnétique ». Bien que les effets à court terme d'une telle exposition soient assez bien connus, la communauté scientifique n'est pas unanime en ce qui concerne les effets à long terme sur la santé. Quelques recherches réalisées suggèrent l'existence d'une corrélation entre l'exposition au champ électromagnétique et la santé humaine, et plus en particulier en ce qui concerne l'utilisation de la GSM chez l'homme.

Ce premier chapitre est consacré à l'étude de quelques notions d'électromagnétisme indispensables à la compréhension de ce travail, caractéristique des réseaux de téléphonie mobile, effets des champs électromagnétique sur le corps humain en particulier. En quelque sorte est une introduction générale, pour mieux comprendre et entamé l'étude de transmission de l'énergie électromagnétique à travers un milieu biologique (la tête humaine), par l'observation des propriétés diélectriques de tissu humain et leurs évolutions suivant les variations de la fréquence GSM (0.9 et 1.8 GHz), et je termine cette partie par une présentation rapide des méthodes numériques utilisées en général pour calculer les phénomènes induits dans le corps humain.

I.2. RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS D'ELECTROMAGNETISME :

I.2.1. Notion d'onde :

Une première question nous vient alors à l'esprit : Qu'est-ce qu'une onde ? Prenons l'exemple d'un plan d'eau ; lorsqu'on y laisse tomber un galet, on peut observer des vagues qui forment des cercles concentriques autour du point d'impact. On observe aussi que la perturbation s'étend plus ou moins rapidement. On appelle cette perturbation une **onde**. On peut définir cette onde par trois paramètres : sa vitesse de propagation, qui dépend du milieu qu'elle traverse, son amplitude, qui est la hauteur de la vague et sa longueur d'onde, ou sa fréquence.

Une onde est une perturbation d'un support (l'eau dans notre exemple) qui se produit de manière répétée les vagues. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, c'est un transfert d'énergie sans transfert de matière [I.1], [I.2].

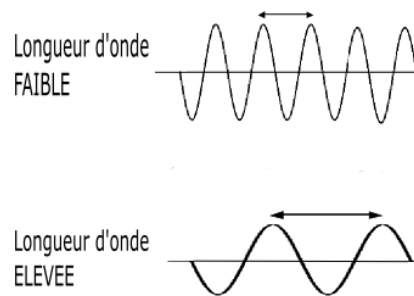


Figure 1 : Représentation d'ondes de longueurs d'ondes différentes.

I.2.2. Onde électromagnétique :

Jusqu'au début du XXe siècle, les physiciens étaient persuadés que les rayonnements électromagnétiques étaient des ondes, comme celles produites par un caillou tombant dans l'eau. Cette onde est définie par deux paramètres : son amplitude et sa longueur d'onde (λ). On peut faire le parallèle avec une onde sonore, où l'amplitude représente le volume du son et la longueur d'onde sa tonalité, c'est à dire s'il est aigu ou grave. Pour les rayonnements électromagnétiques, l'amplitude représente la quantité de rayonnement émise et la longueur d'onde sa position sur le spectre électromagnétique. Cet état ondulatoire des rayonnements électromagnétiques a été mis en évidence par l'expérience de Young.

L'onde électromagnétique est décomposée en deux composantes : le champ électrique (E) et le champ magnétique (H). Nous savons tous que des particules chargées électriquement s'attirent ou se repoussent mutuellement conformément à la loi de Coulomb;

- **Le champ électrique** : est un objet physique qui permet de définir ou de mesurer l'influence exercée à distance par des particules chargées électriquement.

- **Le champ magnétique** : est quant à lui un objet physique qui permet de définir l'influence d'un aimant, d'un électroaimant ou d'un déplacement d'électrons sur un autre corps.

On représente dans ce cas le rayonnement électromagnétique par un champ magnétique alternatif perpendiculaire au champ électrique. Ces deux ondes étant en phase (cf. Fig. I.2). Les variations du champ électrique et magnétique sont liées par les équations de Maxwell.

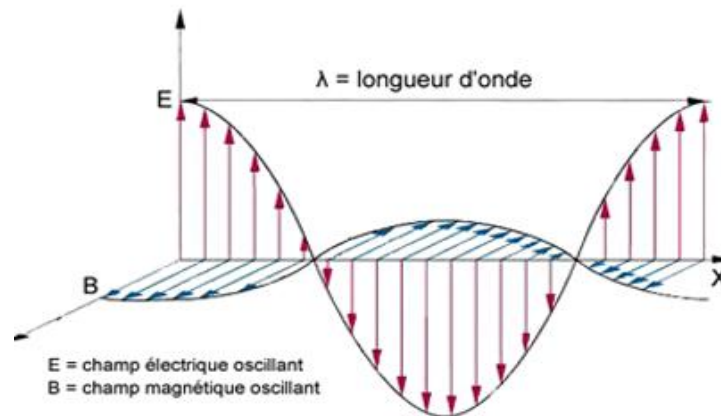


Figure I.2 : Représentation d'une onde électromagnétique

- **Le champ électromagnétique** : comprend les deux composantes champs électriques et champs magnétiques, sur l'ensemble de la gamme de fréquences entre 0 Hz et 300 GHz, champs susceptibles d'interagir, d'une façon ou d'une autre, avec les organismes vivants, donc avec l'homme exposé à leur présence.

- **Rayonnement** : signifie simplement le processus d'émission d'énergie sous forme d'ondes ou de particules.

- **RF : Radiofréquence ou fréquence radioélectrique** : Rayonnement électromagnétique à des fréquences utilisées pour la radio et les téléphones mobiles, ce terme s'applique généralement aux fréquences qui se situent entre 300 Hz et 300GHz.

- **Puissance transportée par une onde ou vecteur de Poynting** : les ondes planes transportent de l'énergie qui se propage parallèlement au plan d'onde. Le vecteur de Poynting représente la densité de puissance de l'onde, c'est-à-dire la puissance par unité de surface en W/m^2 ou, de façon plus pratique, en mW/cm^2 .

- **Fréquences et longueurs d'ondes** : la plupart des champs varient sinusoïdalement à une fréquence f , exprimée en Hz, kHz, MHz ou GHz. Dans un milieu donné, caractérisé par sa permittivité ϵ et sa perméabilité μ , les ondes électromagnétiques se propagent à une vitesse v , qui est égale à la vitesse de la lumière c dans le vide et aussi pratiquement dans l'air. La

longueur d'onde λ est liée à la fréquence par la relation : $\lambda = \frac{c}{f}$. Quelques **fréquences**

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

caractéristiques et leur **longueur d'onde** associée sont rappelées, à titre d'exemples, dans le tableau I.1 [I.3], [I.4].

Fréquence f	Source d'émission	Longueur d'onde λ
50 Hz	Secteur	6 000 km
1 MHz	Emetteurs, fours à induction...	300 m
27 MHz	Emetteurs, presses à haute fréquence (HF)...	11.1 m
900 MHz	Téléphones mobiles	0.33 m
1 800 MHz	Téléphones mobiles	0.166 m
2 450 MHz	Fours à hyperfréquences	12,2 cm
10 GHz	Radars	3 cm

Tableau I.1 : Quelques fréquences caractéristiques et longueur d'onde associée

I.2.3. Spectre électromagnétique :

Selon le modèle ondulatoire du spectre lumineux, chaque couleur représentée sur le spectre correspond à un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde précise ; par exemple la couleur bleue à une longueur d'onde de 300 nanomètres, alors que la couleur rouge à une longueur d'onde de 700 nanomètres.

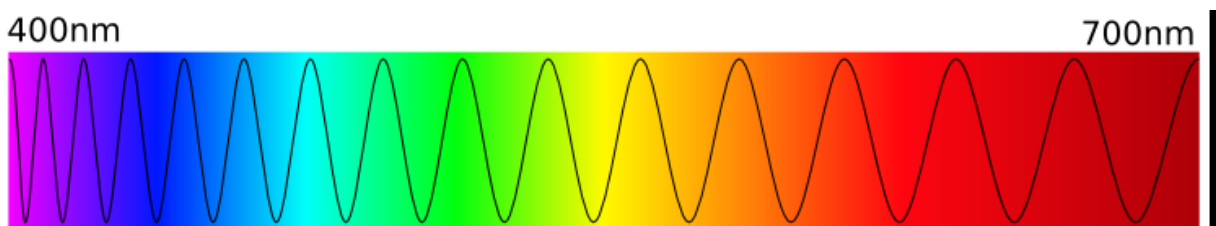


Figure I.3 : Le spectre visible.

Et bien en fait nous n'avons représenté ici que ce qu'on appelle le spectre visible, c'est à dire que ce sont les seules longueurs d'ondes auxquelles nos yeux sont sensibles. Les autres ne sont pas détectés par les cônes de nos yeux. Mais, il continue donc à gauche et à droite. Par longueur d'onde décroissante, on voit apparaître les ondes radio, les micro-ondes, les ondes radar, le rayonnement infrarouge, le fameux rayonnement visible, l'ultraviolet et les rayons gammas ; on a ici un spectre à peu près complet des rayonnements électromagnétiques.

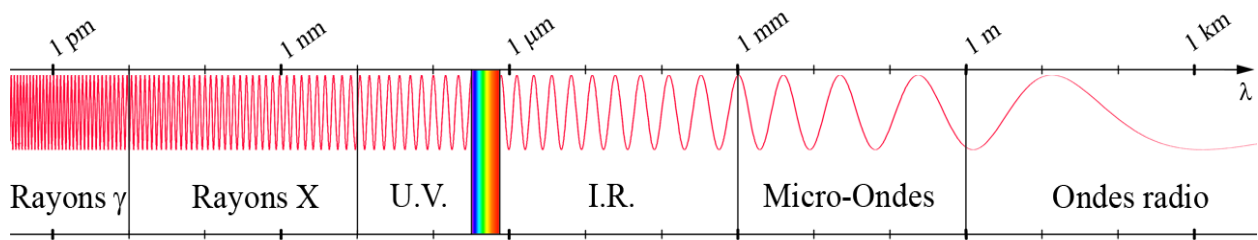


Figure I.4 : Le spectre électromagnétique

I.2.4. Modèle corpusculaire :

La théorie corpusculaire affirme que les rayonnements sont des minuscules grains appelés *photons*, qui seraient des particules d'énergie pure dépourvue de masse. On peut assimiler le niveau d'énergie d'un photon à la longueur d'onde dans le modèle ondulatoire. Quant à l'amplitude de l'onde, elle est déterminée par la quantité de photons émis ; plus celle-ci est élevée, plus l'amplitude de l'onde sera importante. On voit donc que l'amplitude de l'onde ne peut pas prendre n'importe quelle valeur. La longueur d'onde et l'amplitude d'un rayonnement dans le modèle ondulatoire ou son niveau d'énergie et le nombre de photons considérés dans le modèle corpusculaire sont donc quantifiées. Il s'agit de deux manières de représenter une seule et même chose (un rayonnement électromagnétique).

- **Conditions de propagation du rayonnement électromagnétique** : Celui-ci se propage relativement lorsque le relief est plat et si l'espace est dégagé. La portée d'une antenne GSM 900 peut atteindre, en théorie, 10 Km si la propagation ne rencontre aucun obstacle (terrain plat et téléphone portable à l'extérieur); par contre, il subit une atténuation importante en zone urbaine ou boisée ou lorsque le relief est accidenté.

I.3. CARACTERISTIQUES DES TELEPHONES MOBILES ET STATIONS DE BASE :

Depuis leur découverte à la fin du 19^{ème} siècle, les ondes électromagnétiques ont été utilisées pour leur capacité de transmettre des signaux (sons, images, données,) à distance. Leur application dans le domaine des télécommunications s'est surtout développée après la seconde Guerre mondiale. Le tableau I.2 donne une liste non exhaustive des principales utilisations des fréquences inférieures à 10 GHz; on notera que certaines applications existent depuis plusieurs

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

dizaines d'années. L'exposition chronique, à des champs de radiofréquence de faible intensité, de populations vivant près d'antennes, n'est donc pas un phénomène nouveau, contrairement à certaines affirmations. Par contre, que l'usage, à une large échelle, de sources telles qu'un téléphone portable, lequel expose son utilisateur à des radiations électromagnétiques relativement intenses, est un phénomène récent, puisque la téléphonie mobile a commencé à se développer au début des années nonante.

Utilisations	Bandes de fréquences
Radiodiffusion en ondes longues et moyennes	130 KHz à 1.6 MHz
Radiodiffusion en ondes courtes	Plusieurs bandes
C. B	27 MHz
Radiodiffusion en fréquence modulée	88 à 108 MHz
Services d'urgence (police, pompiers, ambulances) et réseaux privé et réseaux privés	70 à 170 MHz
Réseau ASTRID (Police fédérale et polices locales)	400 MHz
Emetteurs TV	50 à 840 MHz
GSM 900	900 MHz
DCS 1800 (GSM 1800)	1800 MHz
Téléphones sans fil (normes CT1 et CT2)	900 MHz
Téléphones sans fil (norme DECT)	1900 MHz
Fours à micro-ondes	2400 MHz
UMTS	1900 à 2300 MHz
Militaires	Plusieurs bandes

Tableau I.2 : Principales utilisations des fréquences inférieures à 10 GHz.

Les réseaux de téléphonie mobile GSM 900 et DCS 1800 fonctionnent sur le même principe, la seule différence est la bande de fréquence qui se situe autour de 900 MHz pour le GSM 900 et 1800 MHz pour le DCS 1800; ces deux réseaux offrent les mêmes fonctions. Dans la plupart des pays, chaque opérateur a reçu une licence pour émettre dans les deux bandes, celle du DCS 1800 n'étant utilisée que dans les zones à forte concentration d'abonnés où le réseau GSM 900 est saturé. Ces deux réseaux sont avant tout destinés au public, même s'ils constituent, parfois localement, un des moyens de communication utilisés par des services d'urgence.

En ce qui concerne le réseau GSM 900, la bande de fréquences comprise entre 880 et 915 MHz est utilisée pour la transmission du portable vers l'antenne-relais, tandis que la bande comprise entre 925 et 960 MHz est utilisée dans le sens inverse. La transmission du portable vers l'antenne-relais est appelée "voie montante" ou "up-link"; la transmission de l'antenne-relais vers le portable est, quant à elle, appelée "voie descendante" ou "down-link". De manière

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

similaire, les voies montante et descendante du DCS 1800 utilisent respectivement les bandes comprises entre 1710 et 1785 MHz, d'une part, et entre 1805 et 1880 MHz, d'autre part.

I.3.1. Structure d'un réseau de télécommunication mobile cellulaire.

Bien qu'elles aient été découvertes il y a seulement un peu plus d'un siècle, les ondes électromagnétiques ont toujours influencé la perception humaine du monde. D'un point de vue physique, tout ce que notre œil peut reconnaître est composé d'ondes électromagnétiques – de lumière naturelle comme artificielle. Mais les ondes électromagnétiques ne sont pas toutes visibles, loin de là. Cela dépend de leur fréquence, car, outre les ondes lumineuses, il existe, dans des gammes de fréquences étendues, des champs électromagnétiques que nos sens ne peuvent pas percevoir.

Chaque fréquence correspond à un nombre précis d'oscillations par seconde d'une onde électromagnétique. Elle est exprimée en hertz (Hz). C'est dans les gammes de fréquences de 900 et 1800 MHz, mais aussi bientôt dans les 2000 mégahertz (MHz), que fonctionnent les télécommunications mobiles en Suisse. Les opérateurs de réseaux sont légalement tenus d'assurer une couverture globale de tout le pays en matière de télécommunication mobile. Plus le nombre d'antennes utilisées pour ce faire est faible, plus leur puissance doit être élevée. Et plus leur capacité à transmettre voix et données est donc limitée. Si le nombre d'antennes est faible, les téléphones portables doivent eux aussi être nettement plus puissants. En outre, en fonction de certains facteurs tels que la hauteur des immeubles, des collines ou des montagnes gênant la propagation des ondes électromagnétiques, les mailles des réseaux mobiles doivent être resserrées et les stations de bases installées à proximité immédiates les unes des autres. Les secteurs où les utilisateurs de portables sont très nombreux sont donc dotés d'une multitude de petites cellules et d'émetteurs de faible puissance. Ce procédé est le seul à être suffisamment fiable pour satisfaire les besoins croissants de notre société moderne. Il est également le seul à permettre le maintien à un faible niveau de la puissance d'émission des diverses antennes – et donc de l'intensité des champs électromagnétiques.

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

Que se passe-t-il lorsque j'établis une communication avec mon mobile vers un autre portable ou un poste fixe ? Les signaux de la station de base sont reçus par la cellule concernée, pour être ensuite transmis au central le plus proche par le réseau de câbles souterrains. Chaque central gère un nombre défini de cellules. La communication est alors transmise vers le poste fixe désiré ou vers le central de la station de base qui se trouve le plus près de la personne que je veux atteindre. Plus un téléphone mobile est proche de la station de base, plus la puissance de rayonnement des deux appareils est faible. Lorsque le signal de réception est de bonne qualité, la puissance d'émission de l'antenne et du portable se réduit automatiquement jusqu'à atteindre le minimum nécessaire.

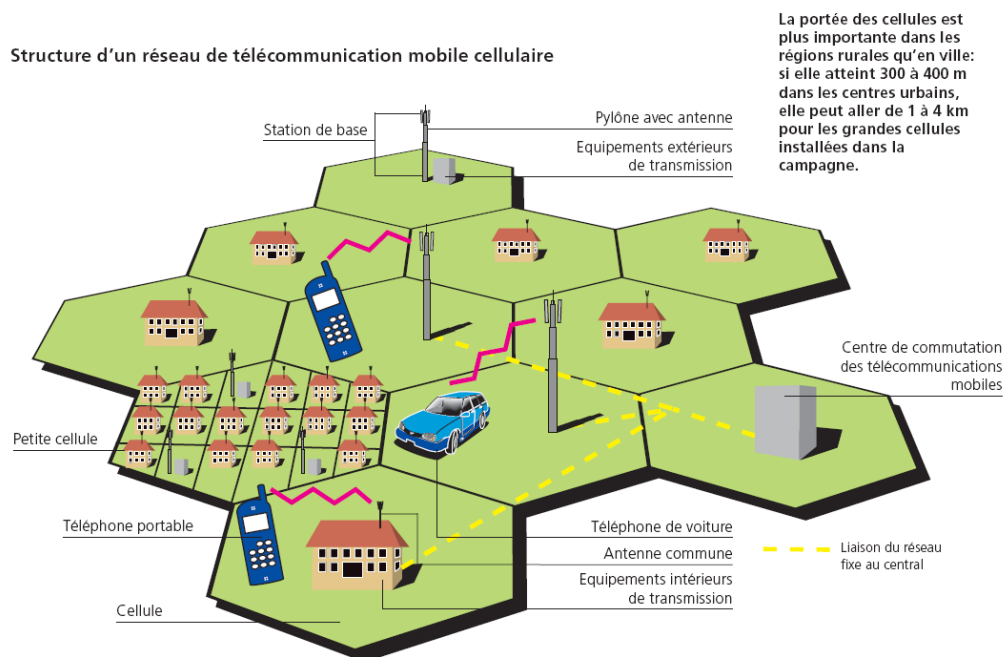


Figure I.5 : Structure d'un réseau de télécommunication mobile cellulaire.

I.3.2. Technique de fonctionnement.

La téléphonie mobile, qui fait partie intégrante des moyens modernes de communication, met en œuvre des téléphones mobiles, aussi appelés téléphone cellulaires ou portables, et des stations de base.

La téléphonie mobile se répartit actuellement en trois réseaux :

1. Le réseau GSM 900.
2. Le réseau DCS 1800.
3. Le réseau UMTS ou 3G.

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

Les fréquences de ces trois réseaux sont récapitulées dans le tableau I.3 ci-dessus.

Normes	Voies	Bandes de fréquences (MHz)
GSM 900	Montante	880 - 915
	Descendante	925 - 960
DCS 1800	Montante	1710 - 1785
	Descendante	1805 - 1880
UMTS	Montante	1885 - 2025
	Descendante	2110 - 2220

Tableau I.3 : Bandes de fréquences des réseaux GSM 900, DCS 1800 et UMTS.

I.3.3. Les téléphones mobiles.

Avec des puissances variables, fonction du type de réseau et du niveau de réception de la station de base (tableau I.4). Certains téléphones mobiles permettent de se connecter sur l'un des deux réseaux au choix (bi-band). En veille, le téléphone mobile émet régulièrement à raison d'environ une impulsion par heure vers la station de base, pour garder le contact.

	GSM	DCS	UMTS
Puissance maximale d'émission du mobile	2 W	1 W	250 mW

Tableau I.4 : Puissance d'émission des téléphones mobiles.

I.3.4. Les stations de base.

Émettant de façon continue avec une puissance pouvant aller de quelques Watts à plus de 100 W, selon la taille de la cellule ou zone de couverture d'une station de base, qu'elles desservent.

Deux types de stations de base existent :

- Les types (ou sites) macro cellulaires dont les antennes (antennes panneaux dites sectorielles) se trouvent au-dessus du niveau des toits en milieu urbain et sur des pylônes de l'ordre de 35 m en milieu rural.

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

- Les stations (ou sites) micro cellulaire dont les antennes (antennes perches de 20 à 75 cm de hauteur) se trouvent au-dessous du niveau des toits en milieu urbain et à une hauteur variant entre 8 et 20 mètres par rapport au sol.

I.3.5. Propagation des ondes des stations de base des télécommunications mobiles.

Les antennes envoient leurs signaux – c'est-à-dire leurs ondes électromagnétiques – par faisceaux selon un angle délimité. La direction d'émission est définie de façon extrêmement précise. Les antennes sont montées de telle manière que leur rayonnement maximal soit dirigé au-dessus des lieux où séjournent les personnes et les animaux. C'est essentiellement le rayonnement résiduel – nettement plus faible –, sous l'antenne, qui est utilisé pour les télécommunications mobiles.

Lors de la planification de la capacité d'une cellule, on tient compte du nombre d'utilisateurs possibles, de la topographie locale et des axes routiers éventuels. Il convient dans tous les cas de faire en sorte que les utilisateurs prévus disposent d'une qualité de communication suffisante, même à la périphérie de la zone de couverture. La puissance engagée pour une communication dépend de la distance entre le téléphone portable et la station de base. Plus ils sont rapprochés, plus la puissance d'émission est réduite. Et comme tous les usagers ne téléphonent pas au même moment à la limite de la zone de couverture, la charge réelle de la cellule est bien inférieure à sa capacité maximale. Lorsqu'elles ne sont pas utilisées – pendant la nuit, par exemple, quand le nombre de communications et d'échanges de données est peu élevé –, les antennes ne génèrent que peu d'ondes électromagnétiques. On peut donc dire que d'un point de vue global, les champs magnétiques produits par les antennes de télécommunications mobiles est très faibles.

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

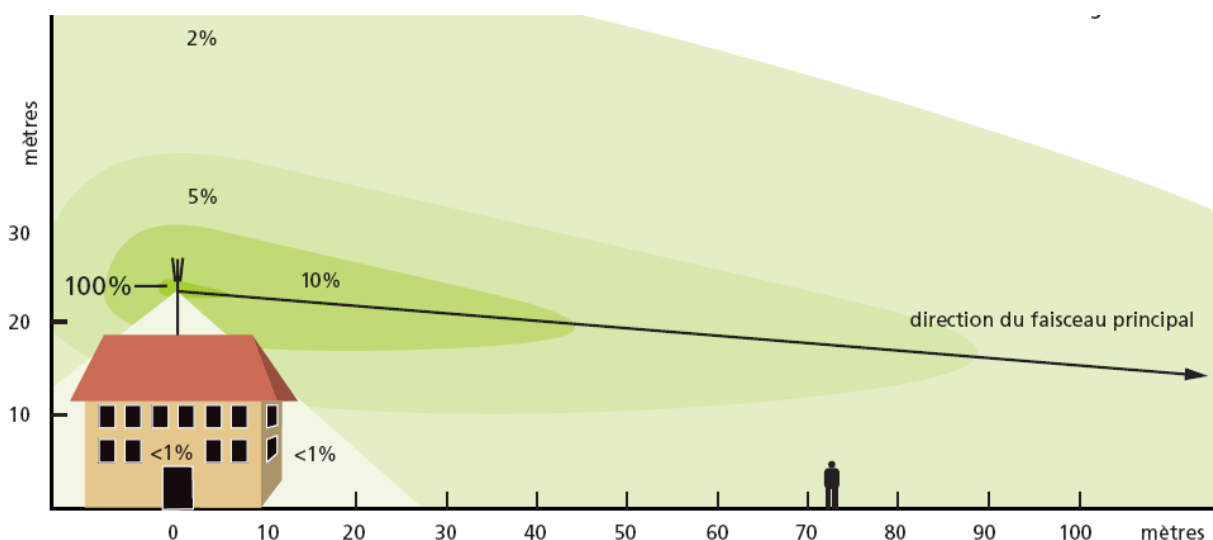


Figure I.6 : Propagation des ondes des stations de base des télécommunications mobiles.

I.3.6. Les propriétés des champs électromagnétiques de la télécommunication mobile.

Pour la transmission sans fil de signaux, les gammes de fréquences de 900, 1800 et 2000 MHz sont optimales. Les champs électromagnétiques des portables et des antennes de télécommunications mobiles possèdent leurs propres caractéristiques, qui doivent être prises en compte lors de la planification d'un réseau et de la définition des valeurs limites:

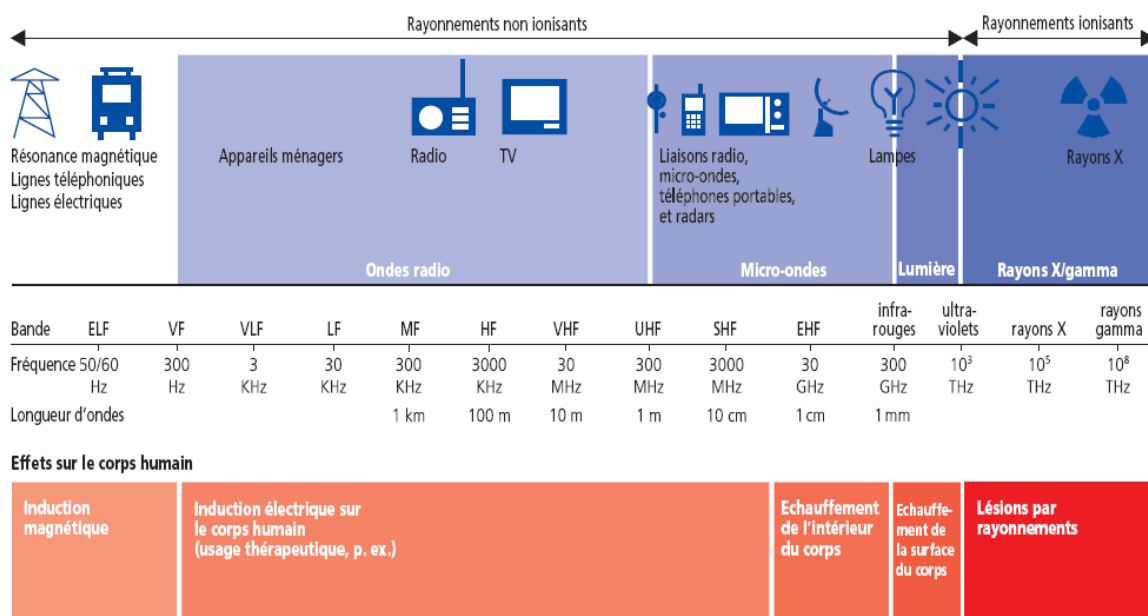


Figure I.7 : Le spectre des champs électromagnétiques.

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

- L'intensité des champs (le rayonnement) dépend de la puissance d'émission. Plus la réception est de bonne qualité, plus la puissance requise entre le portable et l'antenne est faible. L'adaptation est automatique et se réduit, en cas de réception optimale, jusqu'à un millième de la valeur nominale. Ce qui diminue le rayonnement à un strict minimum et économise en outre les batteries du portable.
- Selon la distance de l'émetteur, l'intensité de champ diminue rapidement: pour un éloignement deux fois plus important, elle n'est que de la moitié et pour une distance multipliée par dix, elle n'atteindra plus qu'un dixième de la valeur initiale.
- L'intensité des champs est affaiblie par les matériaux les plus divers. Aussi un mur en béton réduit-il cette intensité à une petite fraction de ce qu'elle était à l'origine.
- Comme la lumière d'un phare, les champs issus d'une antenne sont réunis en faisceaux et envoyés concentrés. En dessous de l'antenne et à proximité du faisceau principal d'émission, le rayonnement diffusé, bien que faible, suffit à l'établissement de communications mobiles.
- Les champs électromagnétiques sont invisibles mais ils peuvent être mesurés avec exactitude.

En ce qui concerne leur puissance et leur direction, les champs électromagnétiques de la télécommunication mobile peuvent être dirigés de manière particulièrement précise – exactement là et là seulement où ils sont requis. Etant donné leur base physique claire, il est possible de calculer l'intensité des champs d'un réseau mobile dans l'environnement, dès la phase de planification des installations.

I.4. NIVEAUX DE CHAMPS RAYONNES :

Les champs électromagnétiques se composent de deux champs : le champ électrique E et le champ magnétique H. Dans la vie quotidienne, nous vivons toujours dans un environnement électromagnétique, créé par des sources naturelles et artificielles. Les champs électromagnétiques naturels sont souvent des champs statiques. Des valeurs communes de champ électrique « naturel » sont de l'ordre de 100 - 200 (V.m⁻¹), mais elles peuvent monter jusqu'à 10 (kV.m⁻¹) pendant des orages. Le champ magnétique terrestre est d'environ 50 (μT) [I.5] (figure I.8. En revanche, les champs électromagnétiques artificiels sont pour la plupart alternatifs.

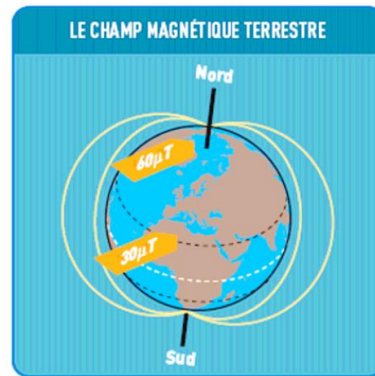


Figure I.8: Champ magnétique terrestre

Le champ magnétique est généré par le passage de courant et le champ électrique provient de l'accumulation de charge électrique, dans l'environnement quotidien. Les réseaux de communications (mobiles et antennes) constituent l'un des principales sources des champs électromagnétiques qui rayonnent le corps humain [I.6].

I.5. RAYONNEMENTS NON IONISANTS :

Les sources de rayonnements non ionisants sont nombreuses dans les ateliers et les laboratoires : machines tournantes et vibrantes, certains appareils électriques, postes de soudure, générateurs d'ultra-violets, etc. Les risques généraux peuvent résulter :

- de l'exposition directe du corps humain ;
- de l'interaction de ces rayonnements avec les dispositifs techniques qui peuvent réagir sous leur influence. Les effets sur le corps humain sont souvent conjugués, liés à l'intensité et à la durée d'exposition.

I.5.1 La lumière :

Les effets résultent de la dose (énergie communiquée) ; ils peuvent se manifester dès qu'un seuil est dépassé, par exemple « coups de soleil » (UV), brûlures (UV et IR) et vieillissement de la peau. Des effets différés sans seuil quantifiable peuvent également être observés sous forme de cancérisation de la peau. Parmi les mesures de protection :

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

- Pour les générateurs d'UV, système d'extinction automatique lorsqu'on pénètre dans la pièce ou l'enceinte stérile ; masquer la source de manière à limiter la zone d'exposition si l'extinction complète n'est pas possible.
- Dans tous les cas, protéger les yeux (port de lunettes adaptées à la longueur d'onde) et la peau (masque facial, manches de vêtements non relevées, gants...)

I.5.2. Les micro-ondes et radiofréquences

Le risque est lié à la densité de puissance du faisceau émis par l'appareil. Les effets sont de diverses natures : lésions thermiques, effets cellulaires, effets cardiovasculaires...

Parmi les mesures de prévention :

1. suppression des fuites ;
2. protection par écrans réfléchissants ou absorbants ;
3. balisage par obstacles dans les zones dangereuses

Les fours à micro-ondes sont nombreux dans les laboratoires ; par construction, ils sont en principe étanches à condition que le joint de la porte soit tenu en bon état. Rappelons qu'il ne faut jamais y introduire d'objets métalliques (agitateurs magnétiques par exemple), ni des flacons fermés de façon étanche : l'explosion du four ou la surfusion du produit sont probables, avec des conséquences graves.

I.5.3. Les ondes sonores

Elles correspondent à des variations de pression engendrées dans l'air par une source ; du point de vue physiologique, elles sont caractérisées par l'amplitude (niveau de pression sonore), la fréquence, et la durée de perception. Le niveau de pression sonore s'exprime en décibel (db) ; dans l'échelle des fréquences, on trouve les infrasons (au dessous de 20 Hz), les fréquences audibles (entre 20 et 20 000 Hz), et au-delà les ultrasons.

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

L'oreille n'étant pas également sensible aux différentes fréquences, on introduit une unité, le décibel A (db A), qui prend en compte cette pondération. Les risques des fréquences audibles, liés au niveau sonore, à la durée d'exposition, à la composition spectrale et au type de bruit peuvent aller de la fatigue auditive et nerveuse jusqu'à une surdité partielle définitive. Les infrasons ont des actions physiologiques différentes : oppression, fatigue, nausées ; on les trouve auprès des compresseurs ou plus généralement auprès des machines vibrantes ; ils peuvent se transmettre à longue distance par les structures.

Les ultrasons sont fréquemment utilisés dans les laboratoires (nettoyage, broyage de cellules) ; leur effet biologique varie beaucoup avec l'intensité ; on peut constater des brûlures importantes à la suite d'une exposition directe à la source. Parmi les mesures de prévention générales :

- ne jamais enlever les capots et les écrans prévus par le constructeur ;
- veiller au bon état des amortisseurs pour les appareils vibrants ;
- porter si nécessaire un casque antibruit ou des bouchons d'oreille, s'il est impossible d'agir sur les sources de bruit ;
- se soumettre à la surveillance médicale.

I.6. EFFETS DES CHAMPS SUR LA SANTE :

I.6.1 Définitions : Il s'agit de définitions générales de physique appliquées au caractère spécifique des effets des champs sur l'Homme.

- **Absorption spécifique (AS) :** énergie absorbée par unité de masse de tissus biologiques. Elle s'exprime en joules par kilogramme (J/kg).

- **Débit d'absorption spécifique (DAS ou SAR en anglais) :** débit avec lequel l'énergie est absorbée par unité de masse de tissus biologiques. Il s'exprime en watts par kilogramme (W/kg).

I.6.2 Effets biologiques des champs électromagnétiques :

Les effets des CEM sont habituellement classés en deux catégories :

- L'effet thermique qui produit une élévation de la température du corps; il nécessite un champ relativement intense;
- Les effets athermiques qui, selon certains scientifiques, apparaîtraient à des niveaux de CEM nettement plus faibles que ceux produisant un échauffement.

Si le premier effet est bien connu depuis de nombreuses années, l'existence d'effets athermiques est loin de faire l'unanimité parmi les scientifiques.

a- Effet thermique :

L'échauffement des tissus sous l'action des CEM (principalement au-dessus de quelques centaines de kHz) est bien connu et est utilisé, depuis longtemps, dans les fours à micro-ondes et dans certaines applications médicales. Le principe de base de cet effet est illustré à la figure I.9; il résulte de la forte teneur en eau de la plupart des tissus constituant le corps humain. La molécule d'eau étant de type polaire (l'atome d'oxygène constituant un pôle négatif et les deux atomes d'hydrogène deux pôles positifs), son orientation dépend de celle du champ électrique auquel elle est soumise. Lorsque le champ est nul, les molécules sont orientées de manière désordonnée. Inversement, lorsqu'un champ est présent, toutes les molécules s'orientent dans la même direction.

Dans le cas d'un champ alternatif, son sens varie constamment et l'orientation des molécules tend à suivre celui du champ électrique, ce qui produit des frottements intermoléculaires, d'où une élévation de température.

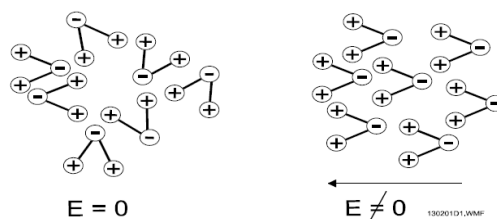


Figure I.9: Principe de l'effet thermique.

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

Lorsqu'un organisme vivant est exposé à un CEM, on n'observe une élévation de température que pour des intensités relativement élevées, car l'apport de chaleur est neutralisé, jusqu'à une certaine limite, par le mécanisme de thermorégulation (circulation sanguine). Des données expérimentales indiquent que dans le cas d'une exposition totale d'un être humain (c'est-à-dire de la tête aux pieds), il faut absorber une puissance de 4 W/kg pour que la température augmente de 1°C. La durée d'exposition doit être suffisamment longue pour que l'augmentation soit stabilisée ; en pratique, on considère que c'est le cas après 6 minutes.

b- Effet athermique :

Les effets athermiques résulteraient d'une interaction directe avec les tissus et auraient, entre autres, une influence sur le système nerveux. Sont souvent cités, des symptômes subjectifs, tels que : problèmes de concentration, irritabilité, troubles du sommeil, fatigue, ... Des expérimentations animales, ainsi que des études épidémiologiques menées chez des opérateurs radar, ont mis en évidence des effets sur l'œil, (dégénérescence tissulaire de la rétine, de la cornée et de l'iris). Plusieurs scientifiques font également état d'effets sur les systèmes de reproduction, cardio-vasculaire, immunitaire, hormonal, ainsi que sur le matériel génétique (ADN). Selon certaines études, de nombreux effets apparaîtraient pour des niveaux d'exposition nettement plus faibles que ceux produisant un échauffement significatif [I.7].

I.6.3 Effets à court terme :

Lorsque le corps humain est exposé aux champs électriques, les champs électriques externes induisent à la surface du corps exposé une charge superficielle. Ce phénomène se traduit à l'intérieur du corps par l'apparition de courants, nécessaires pour déplacer les charges électriques à la surface du corps. Lorsque le corps humain est exposé aux champs magnétiques alternatifs, l'interaction physique champs magnétiques - corps humain crée des champs électriques induits, et provoque un courant induit à l'intérieur du corps humain.

L'exposition à un champ électrique peut amener les sujets exposés à percevoir ce champ, du fait de la vibration des poils provoqués par la charge électrique alternative induite à la surface du corps. La plupart des gens sont capables de percevoir des champs électriques de 50/60 Hz d'intensité supérieure à 20 kV.m⁻¹ et seule une infime minorité peut percevoir des champs d'intensité inférieure à 5 kV.m⁻¹ [I.8].

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

Les courants induits par des champs magnétiques alternatifs (pour les valeurs d'exposition usuellement rencontrées) sont de faible intensité et ne sont pas perceptibles. Par contre, l'exposition à des champs magnétiques intenses peut provoquer des perceptions immédiates. Les seuils de perception en fonction de la densité de courant induit, et en fonction de champs magnétiques retenus par l'OMS se trouvent dans le tableau I.5.

L'exposition à des champs électriques et magnétiques combinés (9 kV.m^{-1} , $20 \text{ }\mu\text{T}$) provoque une légère modification de la fonction cardiaque. Au repos, le rythme cardiaque était légèrement modifié mais significativement réduit (de 3 à 5 battements par minute) pendant ou immédiatement après l'exposition. Mais cette réaction n'était pas observée lors de l'exposition à des champs plus forts (12 kV.m^{-1} , $30 \text{ }\mu\text{T}$) ou plus faible (6 kV.m^{-1} , $10 \text{ }\mu\text{T}$).

Champ magnétique (mT)	Densité de courant induit (mA/m²)	Le seuil de perception
0.5 - 5	1 - 10	Effets biologiques mineurs.
5 - 50	10 - 100	Effets bien établis sur le système nerveux et la vision
50 - 500	100 - 1000	Stimulation des tissus excitables et des dommages possibles sur la santé
> 500	> 1000	Fibrillation ventriculaire et des extrasystoles - Effets aigus

Tableau I.5 : Le seuil de perception du champ magnétique

Le principal mécanisme d'interaction entre l'énergie des radiofréquences et le corps humain est l'échauffement des tissus. Aux fréquences utilisées par les téléphones mobiles, la majeure partie de l'énergie est absorbée par la peau et les autres tissus superficiels, ce qui se traduit par une augmentation négligeable de la température dans le cerveau ou tout autre organe du corps.

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

Un certain nombre d'études ont recherché les effets des champs de radiofréquences sur l'activité électrique du cerveau, les fonctions cognitives, le sommeil, le rythme cardiaque et la pression artérielle des volontaires examinés. À ce jour, la recherche n'a apporté aucun élément de preuve significatif d'effets néfastes pour la santé provoqués par l'exposition aux champs de radiofréquences à des niveaux inférieurs à ceux qui induisent un échauffement des tissus. En outre, la recherche n'a pu fournir de données étayant une relation de cause à effet entre l'exposition aux champs électromagnétiques et des symptômes rapportés par l'utilisateur, ou une «hypersensibilité électromagnétique» [I.9], [I.10].

- Les champs électromagnétiques produits par les téléphones portables sont classés par le Centre international de Recherche sur le Cancer dans la catégorie des cancérrogènes possibles pour l'homme.
- Des études visant à évaluer plus complètement les effets potentiels à long terme de l'utilisation des téléphones portables sont actuellement en cours.

I.6.4 Effets à long terme :

Les effets à long terme des champs électromagnétiques sur la santé font l'objet de nombreuses recherches. La question posée de manière récurrente est : « Le champ électromagnétique est-il un agent cancérogène ? ». Les études menées jusqu'à présent peuvent se classer en deux catégories principales : études épidémiologiques chez l'homme, et études d'exposition de longue durée chez l'animal.

La recherche épidémiologique qui examine les risques potentiels à long terme de l'exposition aux radiofréquences a essentiellement recherché un lien entre les tumeurs cérébrales et l'utilisation du téléphone portable. Toutefois, du fait que de nombreux cancers ne peuvent être décelés que de nombreuses années après les interactions qui ont conduit à la tumeur, et que les téléphones mobiles étaient peu utilisés avant le début des années 1990, à l'heure actuelle, les études épidémiologiques ne sont en mesure d'évaluer que les cancers qui apparaissent dans un laps de temps plus court.

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

Plusieurs études épidémiologiques multinationales de grande envergure ont été menées à bien ou se poursuivent, y compris des études de cohorte prospectives examinant un certain nombre de paramètres sanitaires chez les adultes. La plus grande étude à ce jour, INTERPHONE, coordonnée par le Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC), a été conçue pour déterminer s'il existe des liens entre l'utilisation des téléphones portables et les cancers de la tête et du cou chez l'adulte. À partir de l'analyse internationale regroupant les données recueillies dans treize pays participants, aucune augmentation du risque de gliome ou de méningiome n'a pu être établie en relation avec l'utilisation du téléphone portable sur une période supérieure à 10 ans.

Il existe quelques signes d'un risque accru de gliome pour les 10% d'utilisateurs dont le nombre d'heures cumulées d'utilisation était le plus élevé, bien qu'aucune tendance systématique de risque accru n'ait été établie pour une plus longue durée d'utilisation. Les chercheurs ont conclu que les biais et les erreurs limitent la validité de ces conclusions et ne permettent pas une interprétation de causalité. Se fondant en grande partie sur ces données, le CIRC a classé les champs électromagnétiques de radiofréquence dans la catégorie des cancérigènes possibles pour l'homme.

Tandis que les données tirées de l'étude INTERPHONE ne permettent pas d'établir qu'il existe un risque accru de tumeurs cérébrales, l'augmentation de l'utilisation des téléphones mobiles et l'absence de données concernant cette utilisation sur des périodes dépassant 15 ans justifient que de nouvelles recherches soient menées sur l'utilisation des téléphones mobiles et les risques de cancer du cerveau. En particulier, compte tenu de la popularité récente du téléphone mobile chez les jeunes, et par conséquent d'une durée potentielle d'exposition plus longue au cours de la vie, l'OMS a encouragé de nouvelles recherches pour ce groupe d'âge. Plusieurs études portant sur les effets potentiels sur la santé des enfants et des adolescents sont en cours [I.9], [I.11], [I.12].

I.7. ETUDE EPIDEMIOLOGIQUES :

I.7.1. Etudes épidémiologiques chez l'homme

Les études épidémiologiques chez l'homme sont effectuées sur des groupes de personnes qui, par leur travail ou par leur habitude de vie, sont exposées à des niveaux similaires de champ. Les taux de cancer de ces groupes sont comparés entre eux, ou avec un groupe de référence (le témoin). L'intérêt de ces études est d'analyser des populations dans les conditions de vie réelles. En revanche, dans ce type d'étude, il est impossible de maîtriser l'exposition aux champs électromagnétiques sur une longue période. De plus, il est également impossible de séparer les effets reproductibles aux seuls champs, des effets de tout autre facteur auxquels la population est exposée dans la vie courante, comme des facteurs familiaux (hérédité génétique...), l'habitude de vie (régime alimentaire, tabagisme, ...) et d'autres facteurs liés à l'environnement (pollution, utilisation de produits chimiques ...) [I.13].

Le cancer chez l'enfant est une maladie très grave et particulièrement difficile à accepter. D'une manière générale, le cancer évolue plus rapidement chez l'enfant, en raison du taux de division cellulaire, qui est plus élevé que chez les personnes adultes. Plusieurs facteurs sont considérés comme étant à l'origine de cette maladie : anomalies génétiques, certains rétrovirus, produits chimiques, pollution... Certaines hypothèses suggèrent l'existence d'une association entre le champ magnétique et le cancer chez l'enfant, et en particulier certaines formes de leucémie, qui sont parmi les cancers les plus fréquents chez l'enfant.

I.7.2. Etudes épidémiologiques chez l'animal

Les études de longue durée chez l'animal sont effectuées sur des animaux en laboratoire. Dans ce cas, on peut contrôler parfaitement les niveaux d'exposition, et minimiser tout autre « facteur de perturbation » qui pourrait jouer un rôle dans le développement de cancers. Cependant, il est impossible de transposer directement à l'homme les résultats obtenus chez les animaux ; mais, ces études nous donnent des idées sur l'interaction entre « matière vivante » et les champs électromagnétiques.

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

I.8. METHODE DE CALCULS :

La méthode F.D.T.D (Finite Difference Time Domain) ou la méthode des différences finies dans le domaine temporel est une approche numérique permettant la résolution des équations différentielles dans le domaine temps. Elle a l'avantage de permettre une caractérisation dans une large bande de fréquence d'une structure en une seule simulation, il nous est possible de déterminer les paramètres de propagation.

L'application de cette méthode aux équations de Maxwell dans l'espace libre a été introduite pour la première fois par Yee en 1966, la méthode consiste à approcher les dérivées ponctuelles spatiales et temporelles qui apparaissent dans les équations de Maxwell par des différences finies centrées. Le schéma proposé par Yee permet de surmonter la difficulté due à la dépendance simultanée des champs électrique E et du champ magnétique H entre eux, en effet, on obtient un schéma numérique explicite permettant le calcul du champ électromagnétique dans tout le volume d'étude en fonction du temps (cf annexe I) [I.14], [I.15], [I.16], [I.17].

I.9. ETAT D'AVANCEMENT DES SCIENCES ET DE LA RECHERCHE :

Quelques recherches réalisées suggèrent l'existence d'une corrélation entre l'exposition au champ électromagnétique et la santé humaine, et plus en particulier en ce qui concerne la leucémie chez l'enfant [I.18], et la leucémie et le cancer du cerveau chez les travailleurs des métiers de l'électricité [I.19], [I.20]. D'autres recherches plus récentes [I.21], [I.22], [I.23] fournissent des résultats discordants, et ne permettent pas de tirer une conclusion sur l'association entre le champ électromagnétique et ces maladies.

Les recherches sur l'intensité des ondes électromagnétiques à partir de laquelle ils peuvent être nocifs pour la santé sont légion. Les valeurs limites en vigueur s'appuient d'ailleurs sur les résultats avérés de ces études. Les recherches actuelles ont pour principal objectif de découvrir si les télécommunications mobiles peuvent entraîner d'autres conséquences.

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

Les scientifiques s'interrogent depuis déjà une dizaine d'années pour savoir si, dans la gamme de fréquences des télécommunications mobiles, des effets athermiques – c'est-à-dire ne reposant pas sur l'échauffement – pourraient provoquer, dans certaines circonstances, des perturbations du sommeil, des difficultés de concentration, des maux de tête, voire d'autres troubles physiologiques. Mais les études scientifiques dans ce domaine sont très complexes. Il faut en effet non seulement éliminer tous les autres facteurs d'influence – ce qui se révèle particulièrement difficile – mais également faire en sorte que les résultats obtenus soient reproductibles.

Les chercheurs ne se sont cependant pas laissés décourager et, jusqu'à ce jour, les milliers d'études approfondies réalisées d'un bout à l'autre de la planète sont quasiment toutes parvenues à la même conclusion : dans la limite des valeurs légales en vigueur, les télécommunications mobiles n'ont aucun effet nocif sur la santé pouvant être scientifiquement démontré. Autrement dit : la technologie des télécommunications mobiles peut être utilisée sans crainte d'effets nocifs sur la santé.

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

I.10. BIBLIOGRAPHIE:

- [I.1] N. Micallef and al, "Effets des ondes électromagnétiques sur le vivant", Culture libre, sciences ouvertes, 2008.
- [I.2] W. Pirard, "Champs électromagnétiques et téléphonie mobile", ISEP, juin 2003.
- [I.3] J. P. Vautrin, "Mesurage de l'exposition humaine au champ électromagnétique", Les Sélections Techniques de l'Ingénieur, 2013.
- [I.4] F. Brucciani, "Champs électromagnétiques et santé", Note de synthèse no 05/2001, PE n° 297.563, février 2001.
- [I.5] R. Scorretti, "Caractérisation numérique et expérimentale du champ Magnétique B. F. Généré par des Systèmes Electrotechniques en vue de la modélisation des courants induits dans le corps humain", Le 11 dec 2003.
- [I.6] L. H. Hoang, "Contribution à la modélisation tridimensionnelle des interactions champ électromagnétique - corps humain en basses fréquences", Thèse de Doctorat, ECL, 2007.
- [I.7] J. L. Phillips and al, " Electromagnetic fields and DNA damage", Elsevier, Pathophysiology 2009.
- [I.8] ICNIRP, "Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques", Cahiers de notes documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail - No182, 1er trimestre 2001.
- [I.9] "Champs électromagnétiques et santé publique : téléphones portables", Aide-mémoire N°193, Juin 2011.
- [I.10] L. Hardell, C. Sage, "Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards" ScienceDirect Biomedicine &Pharmacotherapy 62 (2008) 104 - 109.
- [I.11] V. I. T. Ahmed and al, "Effect of mobile phone radiation on heart rate variability", Elsevier, Computers in Biology and Medicine 38 (2008) 709-712.
- [I.12] A. L. galeev, "The effects of microwave radiation from mobile telephones on human and animals", Neuroscience and Behavioral Physiology, Vol. 30, No. 2, 2000.
- [I.13] R. Vignal and al, "Effects of mobile phones and radar radiofrequencies on the eye", Elsevier Masson, Pathologie Biologie 57 (2009) 503-508.
- [I.14] P. C. Miranda and al, "The electric field induced in the brain by magnetic stimulation: A 3-D Finite-Element Analysis of the effect of tissue heterogeneity and anisotropy", IEEE transactions on Biomedical Engineering, vol. 50, No. 09, September 2003.
- [I.15] A. Hafiane, "Etude du couplage d'antennes imprimées par la méthode des différences finies et extraction du modèle électrique", Thèse de Doctorat, Université de Marne la Vallée, 2003.
- [I.16] S. C. Hagness, "Two-Dimensional FDTD analysis of a pulsed microwave confocal system for breast cancer detection: fixed-focus and antenne-array sensors", IEEE transactions on Biomedical Engineering, vol.45, No. 12, December 1998.
- [I.17] C. Marylene, "Contribution à la modélisation multiphysique, électromagnétique, thermique et hydrodynamique, appliquée à la dosimétrie des systèmes d'exposition aux rayonnements électromagnétiques non ionisants", Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2007.
- [I.18] N. Wertheimer, E. Leeper, "Electrical wiring configurations and childhood cancer", American Journal of Epidemiology 109, 273 - 284.

CHAPITRE I - Effets des Radiations Electromagnétiques sur la Sante

- [I.19] G. Goldberg, M. Miller, "Occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in ontario and Quebec, Canada, and France", 1970-1989. American Journal of Epidemiology, Vol 139, No 6, P 550 - 572, 15 mar 1994.

CHAPITRE II

**PROPAGATION DE L'ENERGIE ELECTROMAGNETIQUE A
TRAVERS UN MILIEU BIOLOGIQUE**

II.1. INTRODUCTION :

Depuis sa création, les réseaux de téléphonie mobile et les réseaux de communications ont tellement évolués qu’ils sont devenus un outil essentiel de communication, Quand les fils disparaissent, les ondes prennent le relais, cependant cette communication met de plus en plus en jeux de problèmes d’effets sur la santé. Le champ RF est l’association d’un champ électrique et d’un champ magnétique qui varient dans le temps et se propagent dans l’espace, ces champs sont susceptibles de déplacer des charges électriques, et sont caractérisés par plusieurs propriétés physiques dont les principales sont : la fréquence, la longueur d’onde, l’intensité et la puissance [II.1], [II.2].

Donc toute matière vivante contient des charges électriques (ions, molécules ...) et des matériaux isolants ; c’est donc un milieu faiblement conducteur (appelé diélectrique). Suivant la position du téléphone portable par rapport à la tête humaine, le tissu (couches de la tête) est soumis à un champ RF, une partie du champ est réfléchi, et l’autre pénètre dans l’organisme. Le rayonnement produit par cette interaction doit être quantifié, car il peut être à l’origine d’effets biologiques. Le champ qui pénètre à l’intérieur des tissus peut être calculé à l’aide de modèles électromagnétiques, et la dose d’énergie absorbée par transformation en chaleur est quantifiée par la puissance absorbée par unité de masse de matière biologique exposée. Elle est définie par le débit d’absorption spécifique (SAR) [II.3], [II.4].

Lorsqu’une entité biologique est soumise à des champs électromagnétiques, une interaction se produit avec les charges électriques du tissu ou de la cellule. Le résultat de l’interaction peut produire un effet biologique. La complexité des phénomènes posés tient à de multiples facteurs, en particulier la diversité des paramètres physiques indépendants : la fréquence, la puissance et la modulation des champs électromagnétiques [II.5], [II.6].

II.2. SOURCES D’EXPOSITION :

Compte tenu du nombre considérable d’utilisateurs de téléphones mobiles, il est important de rechercher, de comprendre et de surveiller tout effet potentiel sur la santé publique. La communication par téléphone mobile se fait par transmission d’ondes radio grâce à un réseau d’antennes fixes appelées stations de base. Les téléphones portables sont des transmetteurs de

CHAPITRE II – Propagation de l'Energie E/M à Travers un Milieu Biologique

radiofréquences de faible énergie, opérant à des fréquences situées entre 450 et 2700 MHz, l'émission maximale se situant entre 0,1 et 2 watts [II.7].

II.3. TELEPHONES MOBILES ET STATIONS DE BASE :

Les principales sources d'exposition sont les téléphones mobiles et les stations de base, qui émettent des rayonnements RF. Dans les deux cas, les niveaux d'exposition diminuent généralement à mesure que l'on s'éloigne de la source. Pour les téléphones mobiles, c'est principalement le coté de la tête qui est exposé lorsque l'utilisateur tient son combiné à la main; lors d'une utilisation en mains libres, ce sont les parties du corps les plus proches du téléphone qui sont exposées. S'agissant des émissions des stations de base, l'exposition de la population dans son ensemble touche tout le corps mais, normalement, à des niveaux d'intensité nettement inférieurs à ceux des postes à combinés [II.8].

II.4. MECANISME D'INTERACTION :

Les CEM provoque des forces de torsion au niveau des molécules, ce qui peut entraîner un déplacement d'ions depuis des positions non perturbées, des vibrations dans les charges liées, ainsi qu'une rotation et une réorientation de molécules dipolaires telles que l'eau. Ces mécanismes ne sont pas capables de produire des effets visibles résultant de l'exposition à des CEM de faible intensité, parce qu'ils sont couverts par une agitation thermique aléatoire. En outre, le temps de réaction du système doit être suffisamment rapide pour lui permettre de réagir pendant la période de l'interaction. Ces deux considérations impliquent qu'il faut un seuil (en deçà duquel aucune réaction observable ne se produit) et une fréquence de coupure (au-delà de laquelle aucune réaction n'est observée) [II.9].

Généralement, l'exposition aux champs électromagnétiques entraîne un dépôt et une répartition extrêmement peu uniformes de l'énergie à l'intérieur de l'organisme. S'agissant de l'absorption de l'énergie par le corps humain, les champs électromagnétiques peuvent être repartis en quatre catégories:

- 1- Les fréquences allant environ de 100 KHz à moins de 20 MHz, dont l'absorption diminue rapidement à hauteur du tronc, alors qu'elle peut rester importante dans le cou et les jambes.

CHAPITRE II – Propagation de l'Energie E/M à Travers un Milieu Biologique

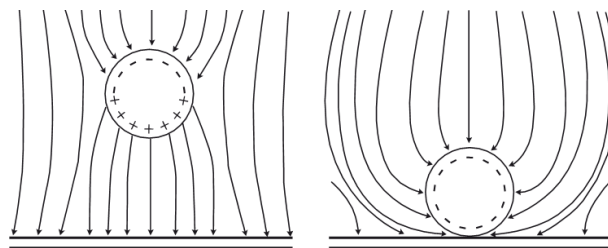
- 2- Les fréquences allant environ de 20 MHz à 300 MHz, dont l'absorption peut être assez élevée dans l'ensemble de l'organisme, et ce jusqu'à des valeurs supérieures si des résonances corporelles partielles entrent en jeu.
- 3- Les fréquences d'environ 300 MHz à plusieurs GHz, auxquelles une importante absorption locale hétérogène intervient.
- 4- Il existe un seul mécanisme d'interaction connu et expérimentalement validé des champs électromagnétiques hautes fréquences avec les organismes biologiques : c'est la conversion dans les tissus de l'énergie électromagnétique en chaleur, appelée en physique « relaxation diélectrique ».

Sous l'effet des champs électromagnétiques radiofréquences, les molécules biologiques polarisées transforment l'énergie électromagnétique du rayonnement en énergie mécanique. Les forces de frottement avec les molécules avoisinantes, liées à la viscosité du milieu, transforment cette énergie mécanique en chaleur dans les tissus biologiques. L'absorption d'énergie est différente selon :

- Sa localisation dans le corps (tête, cou, membres),
- La fréquence du champ électromagnétique : plus la fréquence est élevée, plus l'absorption est superficielle.

II.4.1. Répartition des charges électriques:

Lorsqu'un corps ou un objet conducteur est situé dans un champ électrique statique, il se produit une migration des charges à la périphérie de ce corps tendant à équilibrer les forces électrostatiques du champ incident. La répartition de charges ainsi que leur signe dépend de la forme de l'objet et des lignes de force du champ électrique (cf. figures II.1 et II.2) [II.10].



Figures II.1 et II.2 Déformation des lignes de force d'un champ électrique par un corps conducteur et migration des charges à l'intérieur de ce corps

- 5- Les fréquences supérieures à environ 10 GHz, auxquelles l'absorption d'énergie intervient principalement à la surface du corps.

II.5. PROPRIETES DIELECTRIQUES DU TISSU :

L’onde électromagnétique pénètre dans le tissu dépend des propriétés électriques suivantes [II.11]: la permittivité électrique ϵ , la perméabilité magnétique μ et la conductivité électrique σ de divers tissus, ainsi que l’épaisseur du tissu, la puissance incidente et la fréquence d’opération. Les propriétés électriques des tissus varient avec leur teneur en eau, la teneur en eau dans les tissus gras est beaucoup plus grande que dans les tissus non gras, la biomasse humaine peut être considérée comme un diélectrique :

$$\epsilon = \epsilon_0(\epsilon' - j\epsilon'') = \epsilon_0(\epsilon' - j(\sigma / \omega\epsilon_0)) \quad (\text{II.1})$$

ϵ_0 : Permittivité électrique dans le vide, ϵ' et σ sont dépendants de la fréquence, et cette fréquence a deux valeurs significatives [0.9 GHz et 1.8 GHz] à une température de 37°, comme illustré dans les équations (II.1), (II.2) & (II.3) [II.12] :

$$\epsilon' = 1.71f^{-1.13} + (\epsilon_s^m - 4) / [1 + (f / 25)^2] + 4 \quad (\text{II.2})$$

$$\sigma = 1.35f^{0.13}\sigma_{0.1} + [0.00222(\epsilon_s^m - 4)f^2] / [1 + (f / 25)^2] \quad (\text{II.3})$$

f est la fréquence en GHz, et $\sigma_{0.1} = 0.05$ est la conductivité à 0.1 GHz, $\epsilon_s^m = 8.5$ est la permittivité extrapolée de l’onde électromagnétique [II.13], [II.14].

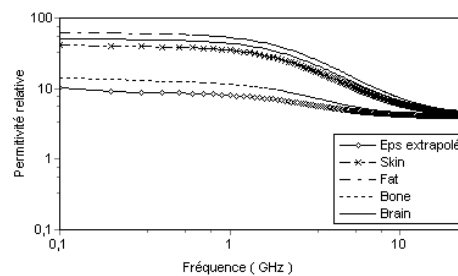


Figure II.3: Permittivité relative en fonction de la fréquence.

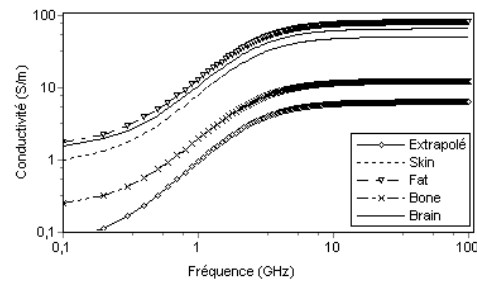


Figure II.4: La conductivité en fonction de la fréquence.

Les figures (II.3) et (II.4) sont identiques par rapport aux mesures pratiques, et la petite variation entre $f = 1$ GHz et $f = 10$ GHz est due à la teneur en eau dans la biomasse.

II.6. EXPRESSIONS DES CHAMPS E/M DANS LE CORPS HUMAIN :

Les expressions des champs électromagnétiques dans le corps humain peuvent être obtenues par la résolution de l'équation de Maxwell en fonction de la fréquence du mobile (0.9 MHz et 1.8 MHz), deux formulations basées sur le découplage des champs électrique E et magnétique H peuvent être appliquées, dans l'hypothèse d'une onde à incidence uniforme et se propageant le long de la direction Z (cf. annexe II).

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.04})$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.05})$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{II.06})$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II.07})$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (\text{II.08})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.09})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.10})$$

CHAPITRE II – Propagation de l’Energie E/M à Travers un Milieu Biologique

La résolution des équations de Maxwell en dessus est représentée par la solution suivante (E_y, H_x) :

$$E_y = E_0 \exp(-\alpha z) \exp(j(\omega t - \beta z)) \quad (\text{II.11})$$

$$H_x = -(K_z / \omega \mu_0) E_y \quad (\text{II.12})$$

$$\text{Avec : } K_z = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}} = \beta + j\alpha \quad (\text{II.13})$$

K_z est la constante de propagation complexe, α représente le coefficient d’atténuation et β est la constante de phase.

II.6.1. Coefficients des atténuations:

La solution (E_y/H_x) des équations de Maxwell conduit à calculer la constante d’atténuation (α), la constante de phase (β), l’impédance intrinsèque de l’onde (η) et la vitesse de propagation V , représentées dans les relations (II.14), (II.15), (II.16) & (II.17) (cf. annexe II).

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon'}} \quad (\text{II.14})$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon'} \left(1 + 0.125 \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2 \right) \quad (\text{II.15})$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon'}} \left(1 + j \frac{\sigma}{2\omega \varepsilon_0 \varepsilon'} \right) \quad (\text{II.16})$$

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon'}} \left(1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon'} \right)^2 \right) \quad (\text{II.17})$$

II.7. PROPAGATION DE L’ENERGIE RF A TRAVERS LA TETE HUMAINE :

Les propriétés de réflexion et de transmission dans les divers tissus sont en fonction des propriétés diélectriques de ces divers tissus : fréquence d’opération, angle d’incidence, type de polarisation et l’épaisseur de chaque couche.

II.7.1. Modèle de la tête humaine :

C’est plus pratique de prendre la tête humaine comme un modèle simple à étudier sous forme de quatre couches : Skin, Fat, Bone et Brain (figure II.5), ainsi que leurs densités et propriétés électriques de ces tissus pour les deux fréquences significatives 0.9 GHz et 1.8 GHz, tableau II.1 [II.15].

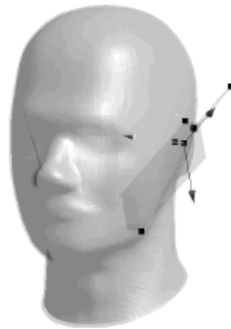


Figure II.5: Position du mobile par apport à la tête humaine

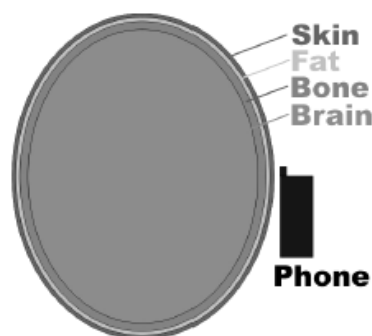


Figure II.6 - A: Modèle simple de la tête humaine

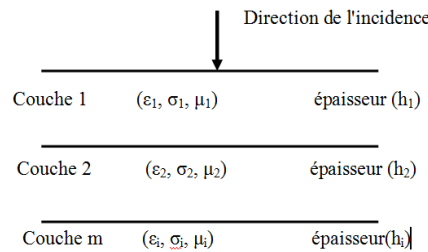


Figure II.6 - B: Modèle simple de la tête humaine

	Fréquence [GHz]	Skin	Fat	Bone	Brain
ϵ_r [-]	0.9	43.74	5.46	12.45	52.73
	1.8	41.36	5.35	11.78	50.08
σ [Sm ⁻¹]	0.9	0.855	0.051	0.143	0.942
	1.8	1.21	0.078	0.275	1.391
k [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	0.9	0.528	0.195	0.528	0.5
	1.8	0.528	0.195	0.528	0.5
C _p [JKg ⁻¹ K ⁻¹]	all	3662	2400	1256	3650
μ_r [-]	all	1	1	1	1
ρ [Kgm ⁻³]	all	1100	920	1850	1050

Tableau II.1: Caractéristiques et propriétés diélectriques des couches de la tête humaine.

Ainsi ϵ_r la permittivité relative, σ la conductivité électrique [Sm⁻¹], μ_r la perméabilité relative, k conductivité thermique [Wm⁻¹K⁻¹], ρ la densité [kgm⁻³], C_p la capacité de chaleur [Jkg⁻¹K⁻¹].

II.7.2. La puissance incidente :

Le flux de la puissance incidente peut être calculé en utilisant le théorème de Poynting, le vecteur de Poynting \vec{p} est égal à la puissance moyenne qui traverse l’unité de surface du plan d’onde, donc le flux de \vec{p} représente une puissance, dans notre cas d’une onde plane de direction Oz, le vecteur \vec{p} n’a qu’une composante p_z qui s’écrit :

$$P(z) = -\frac{1}{2} \text{Re}[E_y H_x^*] \quad (\text{II.18})$$

Donc la puissance incidente s’écrit :

$$P_i(z) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon'}{\mu_0}} \left(1 + 0.125 \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2 \right) E_0^2 \exp(-2\alpha z) \quad (\text{II.19})$$

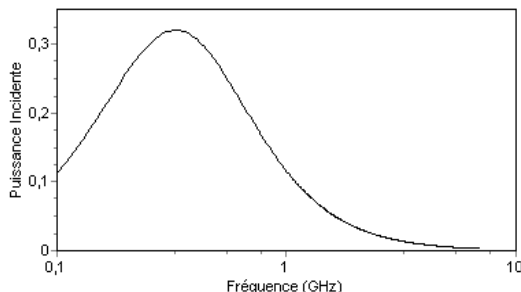


Figure II.7: La puissance incidente en fonction de la fréquence à $z=0$.

La puissance incidente atteint un niveau maximum, puis diminue rapidement suivant l’augmentation de la fréquence.

II.7.3. La puissance réfléchie :

$$P_r = P_i |R_c|^2 \quad (\text{II.20})$$

II.7.4. La puissance transmise :

$$P_t = P_i |T_c|^2 \quad (\text{II.21})$$

$|R_c|$ et $|T_c|$ sont les coefficients de réflexion et de transmission de tissu [II.16], [II.17], pour une onde plane à incidence uniforme ($\theta = 0$).

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}, \quad T = 1 + \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (\text{II.22})$$

ε_1 et ε_2 sont la permittivité du milieu 1 et le milieu 2.

II.7.5. La puissance absorbée à $Z = 0$:

Par l’application du principe de conservation de l’énergie :

$$P_a(0) = P_i - P_r - P_t = 2|R|(1 + |R|)P_i \quad (\text{II.23})$$

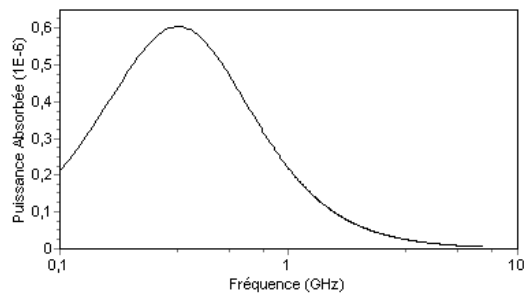


Figure II.8: La puissance absorbée en fonction de la fréq. à $z=0$.

II.7.6. La puissance absorbée à $Z \neq 0$:

$$P_a(Z) = P_a(0)\exp(-2\alpha h) \quad (\text{II.24})$$

h représente l'épaisseur du couche en question.

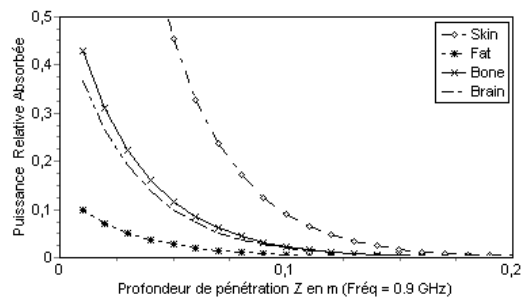


Figure II.9: La puissance absorbée en fonction de la profondeur z pour $f=0.9\text{GHz}$.

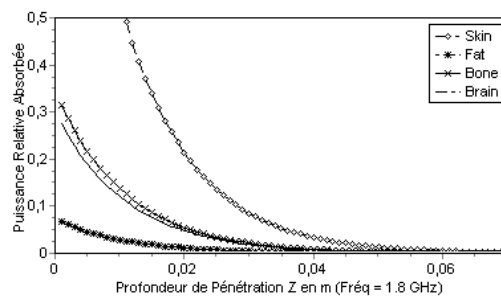


Figure II.10: La puissance absorbée en fonction de la profondeur z pour $f=1.8\text{GHz}$.

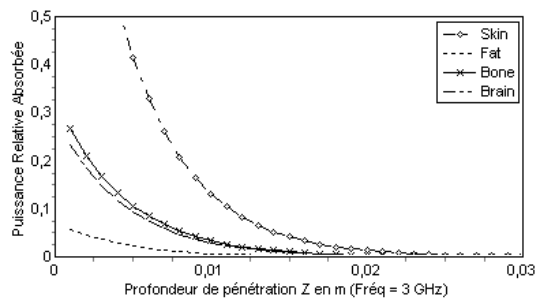


Figure II.11: La puissance absorbée en fonction de la profondeur z pour $f=3\text{GHz}$.

II.8. LA PROFONDEUR DE PENETRATION:

La profondeur de pénétration est définie comme étant la distance pour que la densité de puissance soit réduite à 13% de sa valeur initiale, la distance $z = 1/\alpha$ est appelée profondeur de pénétration SAR représentée sur la figure II.12, [II.18], [II.19], [II.20].

$$SAR = \frac{1}{\alpha} = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{\sqrt{\epsilon'}}{\sigma} \quad (\text{II.25})$$

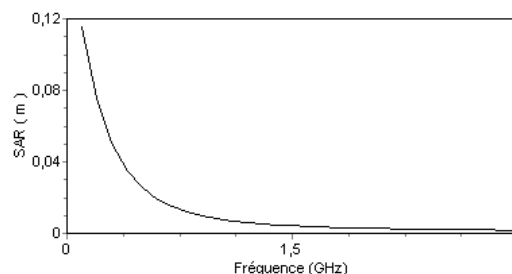


Figure II.12: La profondeur de pénétration en fonction de la fréquence.

Comme l’indique la figure II.12 ci-dessus, le SAR de l’homme dépend de la fréquence d’opération, le SAR diminue rapidement lorsque la fréquence augmente, cela signifie qu’une quantité de l’énergie incidente est absorbée par le corps humain, malgré que le SAR évalué soit inférieur aux limites de protection sanitaire recommandées dans des règlements officiels [II.20].

II.8.1. La longueur d’onde détermine la profondeur de pénétration de l’onde :

Une onde est généralement absorbée de façon efficace par des objets lorsque ces derniers ont à peu près. La même dimension que la longueur d’onde. Ainsi, les infrarouges seront entièrement absorbés dans les premiers millimètres de la peau, d’où la stimulation des récepteurs cutanés et la sensation de chaleur. Les ondes des radiofréquences sont plus longues. Les téléphones cellulaires utilisent principalement deux bandes de fréquence, soit celles voisines de 900 MHz (longueur d’onde de 33 cm) et celles autour de 1,9 GHz (longueur d’onde de 16 cm). Par conséquent, l’énergie se dépose sur un plus long trajet. Selon les fréquences utilisées par les diverses technologies sans fil, la profondeur de pénétration atteindra quelques centimètres (Tableau II.2). L’énergie du rayonnement des téléphones cellulaires est donc distribuée sur une masse de tissus plus grande que celles des infrarouges

	Fréquence	Profondeur de pénétration
Téléphone sans fil résidentiel	5 GHz	< 1 cm
Oreillette « Bluetooth » ; « Wi-Fi »	2,4 GHz	1 cm – 2 cm
Téléphone cellulaire	1,9 GHz	1 cm – 3 cm
Téléphone cellulaire	900 MHz	3 cm – 5 cm
Ondes radio (FM)	100 MHz	> 30 cm
IRM	40 MHz - 100MHz	> 30 cm

Tableau II.2 : Profondeur de pénétration des radiofréquences dans les tissus

II.9. CONCLUSION :

L’effet du rayonnement électromagnétique produit par l’interaction (onde - matière vivante) a été quantifié par le calcul de l’absorption de la puissance (RF) par le corps humain et en particulier dans les couches de la tête humaine.

Sur la base des résultats obtenus, il apparaît que malgré le respect de la limite de protection sanitaire recommandée dans des règles officielles, l’exposition au champ RF peut mener à ce qu’on appelle des hot spots c’est-à-dire que la dissipation de la puissance absorbée se fait localement. Nous pensons ici aux dangers possibles de rayonnement des téléphones portables GSM, qui sont utilisés très près du cerveau.

CHAPITRE II – Propagation de l’Energie E/M à Travers un Milieu Biologique

L’analyse effectuée montre que l’énergie absorbée par la tête humaine est faible, cependant l’interaction onde - matière vivante n’est pas négligeable. Ceci peut induire des changements physiologiques sur le cerveau qui se traduisent par des humeurs désagréables qui sur le long terme peuvent influencer sur le métabolisme au niveau du cerveau. L’aspect de la pollution E/M commence à être posé avec acuité, il pose le problème du comportement humain soumis à une influence électromagnétique de manière claire [II.22], [II.23], [II.24], [II.25], [II.26].

II.10. BIBLIOGRAPHIE :

- [II.1] V. I. T. Ahmed and al, “Effect of mobile phone radiation on heart rate variability”, *Computers in Biology and Medicine* 38 (2008), Elsevier, March 2008, pp. 709-712.
- [II.2] N. Pellieux, "Champs électromagnétiques", INRS, 1^{er} éditions mars 2008.
- [II.3] M. Plante, "Cellulaires et santé", l'électromagnétisme et la santé, le Médecin du Québec, volume 45, numéro 4, avril 2010.
- [II.4] P. Demaret, " Effets biologiques des rayonnements électromagnétiques", INRS, 7^e Conférence Internationale, Malte, 8-12 octobre 2012.
- [II.5] L. Hardell, C. Sage, “Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards”, *Biomedicine & Pharmacotherapy* 62 (2008), Elsevier Masson 31 December 2007, pp. 104 - 109.
- [II.6] C. Sage, D. O. Carpenter “Public health implications of wireless technologies”, *Pathophysiology* (2009), Elsevier, January 2009, N°. of pages 14.
- [II.7] R. Vignal and al, "Effects of mobile phones and radar radiofrequencies on the eye", Elsevier Masson, *Pathologie Biologie* 57 (2009) 503-508.
- [II.8] A. L. Galeev, "The effects of microwave radiation from mobile telephones on humans and animals", *Neuroscience and Behavioral Physiology*, Vol 30, No. 2. 2000.
- [II.9] F. Brucciani, "Champs électromagnétiques et santé", Parlement Européen, Note de synthèse n 05/2001.
- [II.10] Ch. Bisseriex and al, "Champs électromagnétiques", INRS, ED4214, Mars 2008.
- [II.11] R. Khanna, R. Saxena, “Adaptive antennas at the mobile handset for reduced radiation hazards: An analysis”, *IEEE*, Mars 2003, pp.3154-3158.
- [II.12] S. C. Hagness, “Two-Dimensional FDTD Analysis of a Pulsed Microwave Confocal System for Breast Cancer Detection: Fixed-Focus and Antenna-Array Sensors”, *IEEE Trans. Biomedical engineering*, vol. 45, no. 12, Decembre 1998, pp. 1470-1479.
- [II.13] P. Bernardi and al, “SAR Distribution and Temperature Increase in an Anatomical Model of the Human Eye Exposed to the Field Radiated by the User Antenna in a Wireless LAN”, *IEEE Trans. Microwave theory tech*, vol. 46, N° 12, Decembre 1998, pp. 2074-2082.
- [II.14] J. C. Lin, "Microwave propagation in biological dielectrics with application to cardiopulmonary interrogation", *Medical applications of microwave imaging*, IEEE order number: PC01941.
- [II.15] M. Martinez-Burdalo and al, “Comparison of FDTD calculated specific absorption rate in adults and children when using a mobile phone at 900 and 1800 MHz”, *Phys. Med. Biol.* 49 (2004), pp. 345-354.
- [II.16] L. E. Larsen, J. H. Jacobi, “Medical Applications of Microwave Imaging”, *IEEE Press* 1985, pp. 47-58.
- [II.17] H. Hinrikus and al, “Sensitivity of the Brain to Microwave Radiation”, *NBC* 2008, *Proceedings* 20, pp. 558-561.
- [II.18] J. D. Kraus, K. R. Carver, “Electromagnetics”, New York, McGraw-Hill 1973, pp. 445-465.
- [II.19] A. K. Lee and al, "Study on dielectric properties of phantom material for SAR test in human body", *Progress In Electromagnetics Research Symposium 2006 - Tokyo, Japan, August, 2-5*.
- [II.20] T. Wessapan and al, "Specific absorption rate and temperature distributions in human head subjected to mobile phone radiation at different frequencies", Elsevier, *International Journal of Heat and Mass Transfer*

CHAPITRE II – Propagation de l’Energie E/M à Travers un Milieu Biologique

55(2012) 347-359.

- [II.21] T. Wessapan and al, "Specific absorption rate and temperature increase in the human eye due to electromagnetic fields exposure at different frequencies", Elsevier, International Journal of Heat and Mass Transfer 55(2012) 64(2013) 426-435.
- [II.22] Q.H. Mach, M. A. Persinger, "Behavioral changes with brief exposures to weak magnetic fields patterned to stimulate long-term potentiation", Brainresearch 1261, Elsevier, January 2009, pp. 45-53.
- [II.23] A. Balmori, "Electromagnetic pollution from phone masts Effects on wildlife", Path physiology xxx (2009).
- [II.24] A. Alexiou and al, "Interaction Between GSM Handset Helical Antenna and User’s Head: Theoretical Analysis and Experimental Results", The Environmentalist, 25, pp. 215–221, 2005, C 2005 Springer Science + Business Media, Inc. Manufactured in The Netherlands.
- [II.25] E. Keller and al, "Theoretical evaluations of therapeutic systemic and local cerebral hypothermia", Journal of Neuroscience Methods 178 (2009), pp. 345–349.
- [II.26] S. I. Yahya Al-Mously "Design and performance enhancement of cellular handset antennas and assessment of their EM interaction with a human", THESIS, Submitted in Total Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Communication and Microwave Engineering, University of Libyan, August 2009.

CHAPITRE III

**MODELISATION DES RADIATIONS E/M ENTRE MOBILE,
ANTENNE ET LE CORPS HUMAIN**

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

III.1. INTRODUCTION :

La télécommunication mobile fonctionne selon le principe du réseau cellulaire, chaque cellule possède une antenne qui assure la liaison, par ondes Hertziennes, avec le téléphone mobile situé à proximité. Cependant cette communication met de plus en plus en jeux de problèmes d'effets sur la santé. Les ondes électromagnétiques sont caractérisées par plusieurs paramètres physiques indispensables à savoir, la fréquence des ondes leur puissance et la mesure de l'effet biologique sur le tissu [III.1], [III.2]. Exemple dans [III.3] une étude asymétrique caractérisant la communication mobile est bien détaillée, mais sans étude de l'affaiblissement de liaison. Aussi, des études dans ce domaine sont basées sur les effets des radiations électromagnétiques provenant soit du mobile ou de l'antenne [III.4], [III.7].

Dans ce chapitre, nous introduisons un nouveau paramètre (affaiblissement de liaison) à coté du SAR, qui semble plus important pour étudier les interactions avec les tissus. Aussi, nous essayons de modélisé les radiations électromagnétiques entre cellular phone, antenne et la tête humaine par le calcul de champs électromagnétiques absorbé par la tête humaine produit par le cellular phone et l'antenne en même temps, ceci après avoir les calculs en détail des affaiblissements des liaisons entre (antenne + cellular phone) par rapport au corps humain et le champ total absorbé par la tête humaine.

Lorsque le tissu est soumis à un champ RF, une partie du champ est réfléchi, et l'autre pénètre dans l'organisme. Le rayonnement produit par cette interaction doit être quantifié, car il peut être à l'origine d'effets biologiques. Le meilleur indicateur de la puissance est la densité surfacique d'absorption ou DSP qui correspond à la puissance traversant une surface de 1 m^2 , elle s'exprime en W/m^2 . La quantité d'énergie absorbée par le tissu semble être le paramètre le plus important pour étudier les interactions avec les tissus. Ainsi, le débit d'absorption spécifique (DAS ou SAR) a été officiellement désigné comme paramètre de référence par la communauté scientifique. Le DAS est défini comme étant la puissance absorbée par unité de masse, il s'exprime en Watt par kilogramme.

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

III.2. TELEPHONE MOBILE : FONCTIONNEMENT ET ASPECTS TECHNIQUES :

Les téléphones mobiles sont des émetteurs-récepteurs radios qui communiquent avec les antenne-relais. Les fréquences actuellement utilisées se situent dans la gamme des 900 ou 1800MHz (GSM) et 2100MHz (UMTS) sans oublier la gamme des 2400MHz correspondant aux WiFi et Bluetooth pour les accès aux bornes WiFi ou l'utilisation d'accessoires communiquant avec les mobiles en Bluetooth.

La structure du réseau mobile est cellulaire. La capacité des Stations de Base (antennes-relais) étant limitée, la taille des cellules est plus importante à la campagne (plusieurs Km) qu'en ville (quelques centaines de mètres) [III.8], [III.9].

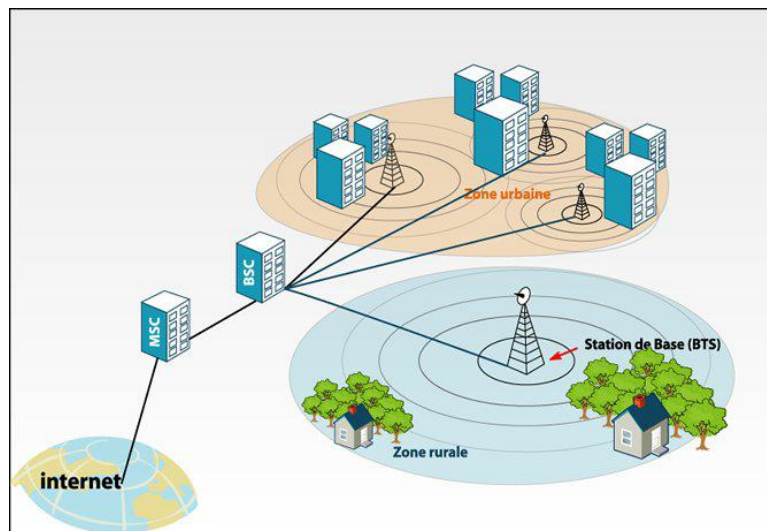


Figure III.1 : l'architecture du réseau de téléphonie mobile

III.2.1. Puissances d'émission (limites)

Si les antennes relais n'ont pas de limites de puissance (les normes définissent le champ électrique maximum sur les lieux de vie), les téléphones mobiles voient leur puissance limitée selon le type : **2W** en **GSM 900**, **1W** en **GSM 1800** et **0,125W** en UMTS 2100. Le WiFi est limité à **0,1W**.

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

III.2.2. Régulation automatique de la puissance :

Les téléphones mobiles ont la capacité d'adapter automatiquement leur puissance d'émission radio aux conditions de réception (dépend principalement de la distance et des obstacles entre le mobile et les antennes). Ceci permet l'économie des batteries, une réduction des interférences mais aussi une réduction des champs électriques émis. En GSM le mobile émet d'abord à fond puis réduit progressivement sa puissance et régule en temps réel (maxi 16 fois par seconde). La réduction peut atteindre théoriquement un facteur 1000 mais dans les faits on constate qu'elle est très modeste. Concrètement **un mobile GSM émet toujours avec une puissance élevée !** (Important à savoir) En 3G (UMTS) le mobile augmente la puissance jusqu'à avoir un niveau satisfaisant, puis elle est adaptée 1500 fois par seconde. Contrairement au GSM la régulation est très efficace et permet dans de bonnes conditions de réception de fonctionner avec des puissances d'émissions extrêmement basses. La puissance remonte lorsque les conditions de réception sont mauvaises ou en déplacement. Elle est plus élevée en mode transfert de données qu'en mode voix.

III.2.3. Quand un téléphone mobile émet-il ?

Le réseau de téléphonie mobile a besoin d'identifier et localiser les mobiles actifs. Les mobiles doivent donc signaler leur entrée dans le réseau, leurs déplacements ainsi que leur sortie dans les circonstances suivantes :

- mise en route du mobile ou passage en mode connecté.
- arrêt du mobile ou passage en mode déconnecté (ou mode avion).
- en déplacement lors du passage d'une cellule à une autre (update location).
- lors d'un envoi ou d'une réception de SMS.
- en début d'appel entrant (avant la sonnerie) ou sortant.

Cette connexion au réseau dure quelques secondes. En mode GSM elle se fait à pleine puissance. Lors des conversations, donc l'émission, est permanente.

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

III.2.3. Un mobile émet-il également en mode veille ?

S'il est en mode connecté il est invité à se manifester à intervalle régulier pour confirmer sa présence (ceci évite le maintien à tort dans les tables de présence d'un mobile arrêté non proprement : panne ou batterie vide). Il y a donc une émission vers le réseau durant quelques secondes et à intervalle régulier. Cet intervalle est variable suivant les pays et les opérateurs. Par ailleurs il est établi que certaines personnes sont sensibles aux circuits électroniques (PC, décodeurs) même hors émission d'ondes, donc aux faibles champs électromagnétiques émis par les circuits électroniques. Les mobiles peuvent en faire partie car il y a en permanence des circuits actifs.

III.2.4. Importance des fréquences utilisées

Les fréquences basses comme le 900 MHz sont plus robustes que les fréquences plus élevées. Elles sont plus pénétrantes (passent plus facilement les murs) et sont donc moins absorbées par les corps traversés.

Les fréquences élevées passent moins facilement les obstacles et sont plus absorbées par les corps exposés. Elles génèrent plus d'énergie et cela se retrouve au niveau du SAR, qui augmente en proportion de la fréquence. Il faut donc baisser la puissance, ce qui explique qu'en GSM on émet 2 fois moins fortes en 1800 qu'en 900 MHz.

III.2.5. Ondes pulsées basses fréquences et champs magnétiques :

L'émission des ondes hyperfréquences en GSM est en mode pulsé (mode tout ou rien) périodiquement (à 217Hz). On peut le visualiser sur la (figure III.2). Au niveau de la batterie cela va générer des appels de courant à la même fréquence (217Hz) et donc produire des champs magnétiques basses fréquences (figure III.3).

La valeur de ces champs magnétiques n'est pas négligeable et peut atteindre à proximité immédiate du mobile de plusieurs mG à plusieurs dizaines de mG. Pour donner une idée du niveau, cela équivaut à se trouver sous une ligne à Haute Tension par exemple. Raison de plus pour utiliser le mobile en mode mains-libres !

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

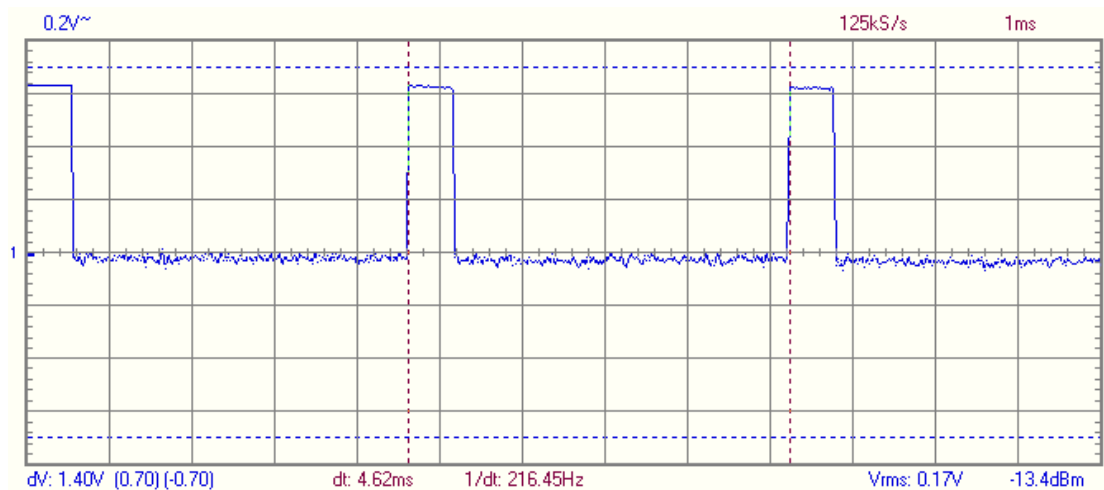


Figure III.2 Emission des ondes hyperfréquences en GSM

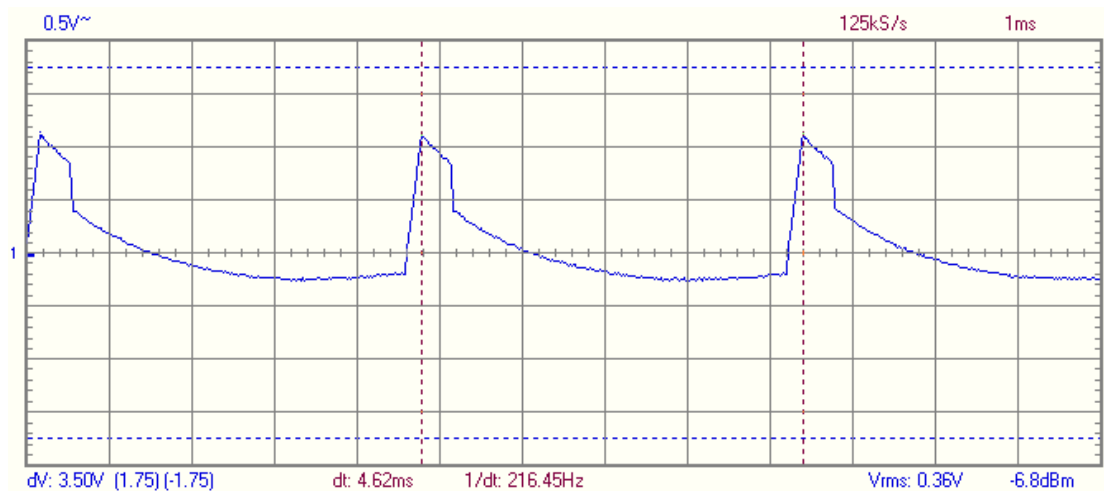


Figure III.3 Champs magnétiques produit en mode pulsé.

III.3. GAIN D'UNE ANTENNE :

Le gain $G(\vec{u})$ d'une antenne dans une direction \vec{u} est le rapport entre la puissance qu'elle rayonne / l'unité d'angle solide dans cette direction et la puissance que rayonnerait par unité d'angle solide de la source isotrope :

$$G(\vec{u}) = \frac{P(\vec{u})}{P_0 / 4\pi d^2} \quad (\text{III.1})$$

$P(\vec{u})$: La densité de puissance, P_0 l'alimentation donc le gain d'une antenne représente le gain dans la direction maximum de rayonnement.

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

III.4. SURFACE EQUIVALENTE A UNE ANTENNE

A la réception une antenne capte une puissance égale au produit de la densité de puissance (w/m^2) à l'endroit où elle se trouve pour un coefficient caractéristique de l'antenne et homogène à une surface que l'on appelle surface équivalente de l'antenne [III.10].

$$\vec{P} = p(\vec{u}).S_e \quad (III.2)$$

P : densité de puissance, S_e : surface équivalente.

Remarque :

Une même antenne peut être utilisée à l'émission ou à la réception, il doit donc avoir une relation entre le gain G et la surface équivalente S_e qui caractérise son fonctionnement à l'émission et à la réception par la relation :

$$G = \frac{4\pi S_e}{\lambda^2} \quad (III.3)$$

III.5. RADIATIONS ELECTROMAGNETIQUES INCIDENTENT SUR LE CORPS HUMAIN :

La puissance rayonnée absorbée par le corps humain est due aux deux facteurs :

- 1- La puissance rayonnée par le mobile.
- 2- La puissance rayonnée par l'antenne, cette dernière est plus faible par rapport aux radiations électromagnétiques produit par le mobile, puisque la distance entre le corps humain et l'antenne est plus grande par rapport à la distance entre le corps humain et le mobile, donc les radiations électromagnétiques incidente sur le corps humain provenant du mobile est plus intense que celle provenant d'une antenne, voir figures (III.4 et III.5).

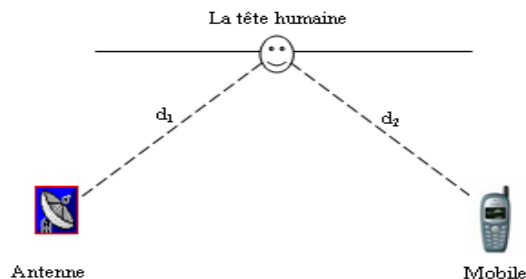


Figure III.4. Position de l'antenne et le mobile par rapport à la tête humaine.

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

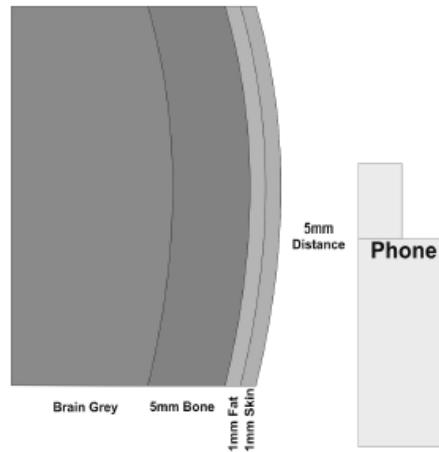


Figure III.5. Position du mobile par rapport à la tête humaine.

La tête humaine est considérée comme la superposition de quatre couches (Skin, Fat, Bone et Gray), et le mobile se trouve à une distance de 5 mm par rapport à la première couche de la tête humaine (Skin).

III.5.1. La puissance rayonnée par l'antenne absorbée par le corps humain :

Cette puissance est donnée par la relation suivante :

$$P_{r,ant} = \frac{P_{t,ant} \cdot G_e \cdot S_e}{4\pi d_1^2} \quad (\text{III.4})$$

$P_{r,ant}$: La puissance rayonnée par l'antenne captée par le corps humain.

$P_{t,ant}$: La puissance transmise par l'antenne.

G_e : Le gain de l'antenne.

d_1 : Est la distance entre l'antenne et le corps humain. La liaison antenne - corps humain présente :

L'affaiblissement total donné par la relation suivante :

$$\alpha_1 = \frac{P_{t,ant}}{P_{r,ant}} = \left(\frac{4\pi d_1}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{1}{G_e} \cdot \frac{1}{G_r} \quad (\text{III.5})$$

G_r : Le gain du récepteur (le corps humain).

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

$$\alpha_{1,db} = 10 \log\left(\frac{P_e}{P_r}\right) = 20 \log\left(\frac{4\pi d_1}{\lambda}\right) - G_e(db) - G_r(db) \quad \alpha_{1,db} : \text{Affaiblissement total de la liaison :}$$

Antenne - corps humain.

$$\text{Avec } A_{f1}(db) = 20 \log\left(\frac{4\pi d_1}{\lambda}\right) \quad (III.6)$$

Affaiblissement dû à la propagation sur la liaison antenne - corps humain à une distance d_1 , (figure III.6).

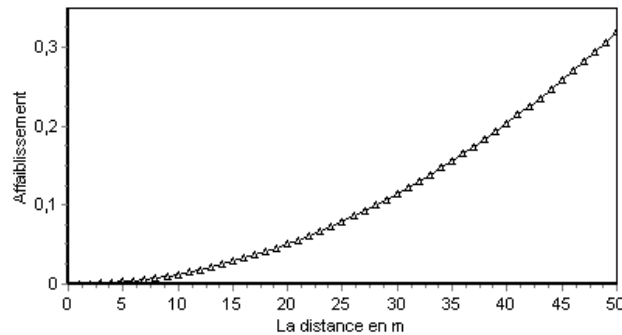


Figure III.6. Affaiblissement de la liaison antenne - corps humain.

III.5.2. La puissance rayonnée par le mobile absorbée par le corps humain :

Cette puissance est donnée par la relation suivante :

$$P_{r,mob} = \frac{P_{t,mob} \cdot G_{e,mob} \cdot S_e}{4\pi d_2^2} \quad (III.7)$$

$P_{r,mob}$: La puissance rayonnée par le mobile captée par le corps humain

$P_{t,mob}$: La puissance transmise par le mobile.

$G_{e,mob}$: Le gain du mobile.

La liaison mobile - corps humain présente un affaiblissement total donné par la relation suivante :

$$\alpha_2 = \frac{P_{t,mob}}{P_{r,mob}} = \left(\frac{4\pi d_2}{\lambda}\right)^2 \cdot \frac{1}{G_{e,mob}} \cdot \frac{1}{G_r} \quad (III.8)$$

G_r : Le gain du récepteur (le corps humain).

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

$\alpha_{2,db} = 10 \log\left(\frac{P_{t,mob}}{P_{r,mob}}\right) = 20 \log\left(\frac{4\pi d_2}{\lambda}\right) - G_{e,mob}(db) - G_r(db)$: Affaiblissement total de la liaison : mobile - corps humain.

Avec $A_{f_2}(db) = 20 \log\left(\frac{4\pi d_2}{\lambda}\right)$ (III.9)

Affaiblissement dû à la propagation sur la liaison mobile - corps humain à une distance d_2 , (figure III.7).

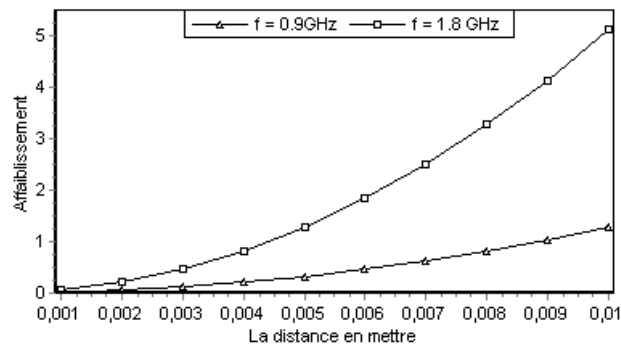


Figure III.7 Affaiblissement de la liaison mobile - tête humaine pour $f = 0.9$ GHz et $f = 1.8$ GHz.

III.6. CALCUL DU CHAMP TOTAL RAYONNE :

Dans notre étude, nous disposons de deux antennes (antenne et le mobile), ces deux antennes influent sur l'utilisateur (corps humain) par ces rayonnements, donc, il faut calculer le champ total de ces rayonnements, la figure III.8, illustre la position de ces deux antennes dans le plan (xyz).

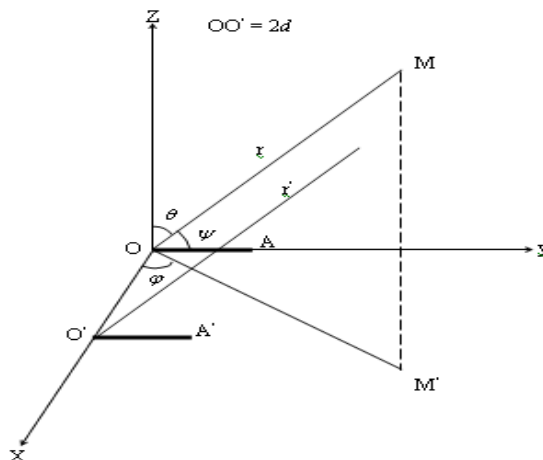


Figure III.8. Position du mobile (OA) et l'antenne (O'A') dans le plan XYZ.

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

L'antenne OA produit le champ E :

$$E = j \frac{z_0}{k\lambda} \cdot \frac{I_m}{r} \cdot \frac{\cos(kL \cdot \cos(\psi)) - \cos(kL)}{\sin(\psi)} \cdot (e^{j(\alpha t - kr)}) \quad (\text{III.10})$$

$$\text{Avec } f(\theta, \varphi) = \frac{\cos(kL \cdot \cos(\psi)) - \cos(kL)}{\sin(\psi)}$$

$$f(\psi) = \frac{\sin(kL \cdot \cos^2(\frac{\psi}{2})) \sin(kL \sin^2(\frac{\psi}{2}))}{\sin \psi} \quad (\text{III.11})$$

$$L = (2m + 1) \frac{\lambda}{4} \Rightarrow kL = (2m + 1) \frac{\pi}{2}$$

$$\text{Donc } f(\psi) = \frac{\cos((2m + 1) \frac{\pi}{2} \cdot \cos(\psi))}{\sin \psi} \quad (\text{III.12})$$

Et pour une antenne demi onde ($\lambda/2$) : $m=0$ et $2L = \lambda/2$.

$$f(\psi) = \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cdot \cos \psi)}{\sin \psi} = f(\theta, \varphi) \quad (\text{III.13})$$

$$\text{Avec : } \cos \psi = \sin \theta \cdot \sin \varphi$$

Donc le champ E produit est de la forme :

$$E = k \cdot f(\theta, \varphi) \cdot [e^{j(\alpha t - kr)}] \quad (\text{III.14})$$

Si le champ rayonne en un point isolé donc l'antenne O'A' produit un champ E' :

$$E' = k \cdot f(\theta, \varphi) \cdot e^{j(\alpha t - kr)} \cdot e^{-j\alpha} \quad (\text{III.15})$$

$$\text{Avec } r = r' - 2d \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) = r' - n$$

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

$$E' = k.f(\theta, \varphi).e^{-j(kn+\alpha)}.e^{j(\alpha t - kr)} \quad (\text{III.16})$$

Le champ total E_T est la somme de deux équations (III.14) et (III.16) :

$$E_T = E + E' = E[1 + e^{-j(kn+\alpha)}] \quad (\text{III.17})$$

$$E_T = 2.E.\cos\left(\frac{kn + \alpha}{2}\right)$$

$$E_T = 2.E.\cos(kd.\sin(\varphi).\cos(\theta) + \alpha / 2)$$

$$E_T = 2k.f(\theta, \varphi).\cos(kd.\sin(\theta).\cos(\varphi) + \alpha / 2) \quad (\text{III.18})$$

III.7. LE CHAMP TOTAL ABSORBE PAR LE CORPS HUMAIN :

Donc la puissance rayonnée totale absorbée par le corps humain est donnée par la relation suivante :

$$P_t = P_{r,ant} + P_{r,mob} \quad (\text{III.19})$$

III.8. LE SAR DU CORPS HUMAIN CAUSER PAR LA STATION DE BASE :

Suite à la longue distance de l'antenne au corps humain ; la distribution de rayonnement sur chaque partie du corps humain est égale. Ainsi, le SAR est la puissance absorbée par unité de poids de l'organisme exposée aux champs électromagnétiques, donc le SAR peut être calculé par l'expression suivante :

$$SAR = \frac{P_{r,ant}}{M} \quad (\text{III.20})$$

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

Suivant la relation (III.4) le SAR s'écrit :

$$SAR = \frac{P_{t,ant} \cdot G_e \cdot S_e}{4\pi d_1^2 \cdot M} \quad (III.21)$$

$P_{r,ant}$: Puissance rayonnée de l'antenne recevait par le corps humain.

M : est le poids de la radiation absorbée par le corps humain entier [III.11], [III.12], [III.13].

III.9. LE SAR DU CORPS HUMAIN CAUSER PAR LE MOBILE :

Les radiations du mobile sur le corps humain est différente à seul de la radiation de l'antenne, à cause de la courte distance entre le corps humain et le mobile, et aussi ; l'affaiblissement rapide de l'intensité des radiations de l'antenne suivant leur position par rapport au corps humain, car l'intensité du rayonnement diminue rapidement quand la distance augmente. Les influences des rayonnements électromagnétiques sur le corps humain se concentraient sur les parties du corps humain les plus proches du mobile (la tête humaine), figure III.9.

$$SAR = \frac{P_{r,mob}}{M} \quad (III.22)$$

Suivant la relation (III.7) le SAR s'écrit :

$$SAR = \frac{P_{t,mob} \cdot G_{e,mob} \cdot S_e}{4\pi d_2^2 \cdot M} \quad (III.23)$$

Le SAR total du corps humain causer par le mobile et l'antenne est donné par la relation suivante :

$$SAR_T = \frac{S_e}{M} \left(\frac{P_{t,ant} \cdot G_e}{d_1^2} + \frac{P_{t,mob} \cdot G_{e,mob}}{d_2^2} \right) \quad (III.24)$$

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

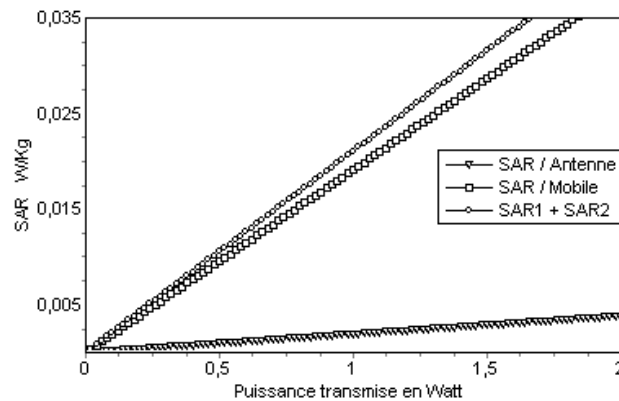


Figure III.9. Le SAR causer par l'antenne et le SAR causer par le mobile.

III.10. PROFILS THERMIQUES DE LA TÊTE HUMAINE :

L'élévation de la température dans une tête humaine causée par la puissance absorbée sous forme de SAR à partir d'un téléphone cellulaire est calculée en utilisant une approche de l'équation bio-chaleur. L'impact sur l'augmentation du SAR et de la température de la tête humaine tenant en compte le téléphone est évalué.

Pour trouver des profils thermiques de la tête humaine, on peut résoudre l'équation bio-chaleur pour un plan semi infini de tissus irradiés par micro-ondes, un tissu exposé à une puissance de micro-ondes absorbe une partie de l'énergie qui est convertie en chaleur [III.14]-[III.27].

III.10. 1. L'énergie thermique générée :

Soit P_i la puissance incidente sur la tête humaine, la densité de puissance à une profondeur z à l'intérieur du tissu est donné par la relation suivante :

$$P_z(z) = P_i e^{-\alpha z} \quad (\text{III.25})$$

α : constant d'atténuation du tissu.

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

III.10. 2. Puissance perdue par l'onde traversant le tissu :

$$dP_z(z) = \frac{\tau \cdot P_i}{L} \cdot dz \quad (\text{III.26})$$

Où $L = 1/\alpha$ = profondeur de pénétration, τ = fraction de l'énergie pénètre dans le tissu.

III.10. 3. L'énergie thermique déposée :

L'énergie thermique équivalente (Q_p) déposée par micro-ondes dans le temps dt en volume du tissu de la section transversale A et une profondeur dz .

$$Q_p \cdot A \cdot dz \cdot dt = \frac{\tau \cdot P_i}{JL} \cdot A \cdot dz \cdot dt \quad (\text{III.27})$$

J = équivalent mécanique de la chaleur dans un petit moment dt la température du tissu dans le volume Adz s'élève par dT en raison de l'énergie thermique absorbée. L'augmentation de l'énergie interne est = mass x Sp. Heat x Temp . Rise

$$= \gamma \cdot A \cdot dz \cdot c \cdot dT = \gamma \cdot A \cdot dz \cdot dt \cdot c \cdot dT / dt \quad (\text{III.28})$$

c = chaleur spécifique de tissu en $\text{Cal/bm}^{-0}\text{C}$

γ = densité du tissu en gm/cm^3

III.10. 4. La chaleur de l'énergie perdue :

La perte de chaleur est due à des raisons suivantes :

a- Conduction thermique :

C'est le processus dans lequel le transfert de chaleur se fait par diffusion moléculaire. L'amont d'énergie thermique par seconde s'écoulant par unité de surface de la section transversale est proportionnel au gradient de température. La quantité d'énergie calorifique perdue par le volume Adz dans l'intervalle dt est :

$$Q_c = -k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \cdot A \cdot dz \cdot dt \quad (\text{III.29})$$

Où k = Conductivité thermique du tissu.

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

b- La circulation du sang :

Le processus de régulation thermique du corps pour maintenir la température du corps humain par l'augmentation du flux sanguin à travers le volume.

$$Q_b = w_b c_b \Delta T Adz . dt \quad (III.30)$$

Où $w_b = \gamma \gamma_b m =$ Le débit massique du sang à travers unité de volume dans gm/cm^3 .

$T_0 =$ Température à laquelle le sang artériel entre dans le volume considéré.

$T =$ Température à laquelle il quitte le corps humain.

$$\Delta T = T - T_0$$

$c_b =$ La chaleur spécifique de sang dans $cal/gm \cdot ^\circ C$

$\gamma_b =$ Densité du sang dans gm/cm^3 .

$m =$ Le débit volumétrique du sang par unité de masse de tissu dans $cm^3 / (gm \cdot sec)$.

III.10. 5. Principe de conservation de l'énergie :

A partir des équations (III.26) - (III.30) on a :

$$Q_p Adz dt = \gamma c \frac{\partial T}{\partial t} Adz dt - k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} Adz dt + w_b c_b \Delta T Adz dt \quad (III.31)$$

Résoudre l'équation ci-dessus

$$\mu \frac{\partial T'}{\partial t} = \frac{\partial^2 T'}{\partial z^2} - \lambda T' + q \quad (III.32)$$

Où $T' = T - T_0 =$ Augmentation de la température différentielle.

$$\mu = \frac{\gamma c}{k} \quad \lambda = \frac{w_b c_b}{k} \quad q = \frac{Q_p}{k}$$

Equation (III.32) représente l'équation de transfert de bio-chaleur.

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

III.10. 6. Solution de l'équation de transfert de bio-chaleur :

La solution de l'équation de transfert de bio-chaleur nécessite la connaissance des propriétés physiques et thermiques des tissus en tant que données dans le tableau III.1.

Tissue	(w _b) Density gm/cm ³	(c _b) Specific heat Cal/gm- ⁰ C	(k) Thermal Conductivity Cal/cm- ⁰ C-s
Skin	1.2	0.83	0.00105
Fat	1.07	0.81	0.00153
Bone	1.25	0.73	0.00344
Brain	1.05	0.81	0.00114

Table III.1 Propriétés physiques et thermiques des tissus de la tête.

Les deux procédés principaux, qui déterminent les profils thermiques de la biomasse sont l'effet de chauffage des micro-ondes incidentes, qui est maximale à la surface et décroît exponentiellement avec la profondeur dans le tissu, et le second est le refroidissement de la surface produite par le rayonnement de la surface par convection et évaporation de la sueur, ce qui diminue avec la profondeur. Par conséquent, l'augmentation de température est le résultat net de ces deux effets qui s'opposent l'un à l'autre. En raison de ces procédés une distribution de température s'accumule dans les tissus, ce qui stabilise quand $t \rightarrow \infty$ et devient constante par rapport au temps. Dans l'état d'équilibre.

$$T'(\infty, t) = 0 \quad (\text{III.33})$$

Conditions de limites de la surface de refroidissement

$$\frac{\partial T'}{\partial z}(z=0, t) = h(T' + T_0 - T_c) \quad (\text{III.34})$$

Où T_c = Température extérieure du tissu. Valeur de h varie avec les conditions de l'environnement. Wessler donne h a valeur de 0.25/cm pour un homme nu à 30⁰C avec une vitesse de vent de 0.6 m/sec. Si la peau est humide, les h augmentent d'un facteur de 5 ou plus.

Dans l'état d'équilibre $\frac{\partial T'}{\partial t} = 0$; et l'équation (III.32) devient à :

$$\frac{d^2 T'}{dz^2} = \lambda T' - q \quad (\text{III.35})$$

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

La solution de l'équation (III.35) avec les conditions aux limites données par (III.32) et (III.33) est :

$$T_i = \frac{h(T_c - T_0)}{h + \sqrt{\lambda}} \text{Exp}[-z\sqrt{\lambda}] \quad (\text{III.36})$$

Où T_i est la température initiale donnée par l'équation (III.36) en l'absence de puissance micro-onde incidente.

III.11. CONCLUSION :

Cet article discute les effets des rayonnements électromagnétiques provenant d'une antenne et un mobile sur le corps humain, par le calcul des SAR de l'antenne et du mobile absorbés par le corps humain.

En tenant compte de la distance entre l'antenne et la tête humaine (50 mètres), et le mobile par rapport à la tête humaine (05 millimètres), on peut avoir les variations du SAR et l'affaiblissement sur les deux liaisons (antenne - corps humain et mobile - corps humain).

L'affaiblissement sur la liaison antenne - corps humain est très faible aux environs de 10 mètres, et devient très important au-delà de 15 mètres, donc les rayonnements peuvent atteindre le corps humain à une distance plus long, avec une intensité moins faible (figure III.6), mais l'affaiblissement sur la liaison mobile - tête humaine est devenu très important au-delà de quelques millimètres (figure III.7).

Malgré que le champ électromagnétique émis par l'antenne est plus forte que seul du mobile, mais on trouve que le SAR causer par le mobile est plus grand que le SAR causer par l'antenne, ceci justifier l'absorption d'une grande quantité de l'énergie émis par le mobile par la tête humaine, cette quantité peut s'ajoutée à l'énergie émis par l'antenne (figure III.9).

Le risque donc est devenu beaucoup plus du mobile que l'antenne, mais il faudra prendre en considération la multiplication des antennes, dans ce cas le risque se multipliera.

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

III.12. BIBLIOGRAPHIE

- [III.1] R. Vignal and al, "Effects of mobile phones and radar radiofrequencies on the eye", Science direct, Pathologie Biologie 57 (2009) 503-508.
- [III.2] C. Sage and al, "Public health implications of wireless technologies", Elsevier, Article in press, Pathophysiology 2009.
- [III.3] W. Wang and al, "Research on Asymmetric Characteristics of Mobile Communications System Based on Electromagnetic Radiation", Progress In Electromagnetics Research Symposium 2007, Prague, Czech Republic, August 27-30, pp. 145 - 149.
- [III.4] A. Rajhl and al, "Analytical calculation of the specific absorption rate from cellular phone in some realistic situations", Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, April 12 – 16, 2010, Beijing, China.
- [III.5] H. Shabani and al, "Development of Analytical Flat Phantom Model for EM Radiation to Evaluate Specific Absorption Rate (SAR) in Human Body", Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering 2008 May 13-15, 2008 Kuala Lumpur, Malaysia.
- [III.6] M. Ahmed, "Investigating Radiation Hazard and Safety Aspects of Handheld Mobile", 2009 Third International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies.
- [III.7] H. Shabani and al, "EM Radiation from Wi-LAN Base Station and Its' Effects in Human Body", 5th International Conference on Electrical and Computer Engineering ICECE 2008, 20-22 December 2008, Dhaka, Bangladesh.
- [III.8] Electrosmog-info, "Téléphones Mobiles et Champs Electromagnétiques", V1, novembre 2010.
- [III.9] Ph. Piolé, "Comment caractériser une antenne", Fiche savoir 0123, 30 juillet 2004.
- [III.10] W. Wang and al, "Research on asymmetric characteristics of mobile communications system based on electromagnetic radiation", Progress In Electromagnetics Research Symposium 2007, Prague, Czech Republic, August 27-30.
- [III.11] T. Wessapan and al, "Specific absorption rate and temperature distributions in human head subjected to mobile phone radiation at different frequencies", ELSEVIER, International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 347–359.
- [III.12] T. Wessapan and al, "Specific absorption rate and temperature increase in the human eye due to electromagnetic fields exposure at different frequencies", Elsevier, International Journal of Heat and Mass Transfer 55(2012) 64(2013) 426-435.
- [III.13] H. Shabani and al, "EM Radiation from Wi-LAN base station and its' effects in human body", 5th International Conference on Electrical and Computer Engineering ICECE 2008, 20-22 December 2008, Dhaka, Bangladesh.
- [III.14] T. Wessapan and al, "Specific absorption rate and temperature distributions in human head subjected to mobile phone radiation at different frequencies", Elsevier, International Journal of Heat and Mass Transfer 55(2012) 347-359.
- [III.15] L. Hardell, C. Sage, "Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards", Biomedicine & Pharmacotherapy 62 (2008), Elsevier Masson 31 December 2007, pp. 104 - 109.

CHAPITRE III – Modélisation des Radiations E/M entre Mobile, Antenne et le Corps Humain

- [III.16] A. O. Rodrigues, J. J. Viana “ Calculation of Temperature Rise Induced by Cellular Phones in the Human Head”, Journal of Microwaves and Optoelectronics, Vol 6, No. 1 June 2007.
- [III.17] V. I. T. Ahmed and al, “Effect of mobile phone radiation on heart rate variability”, Computers in Biology and Medicine 38 (2008), Elsevier, March 2008, pp. 709-712.

CHAPITRE IV

DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE DANS LA TETE HUMAINE

CHAPITRE IV – Distribution de la Température dans la Tête Humain

IV.1. INTRODUCTION :

Ce dernier chapitre est consacré à l'étude de taux d'absorption spécifique (SAR) et les distributions de température dans le modèle de la tête humaine exposée aux rayonnements de la téléphone mobile à 900 MHz et 1800 MHz. dans ce modèle de la tête humaine, les effets de la fréquence de fonctionnement et de la distance entre le téléphone mobile et la tête humaine sur les distributions de débit d'absorption spécifique et le profil de température à l'intérieur sont abordées.

Au cours des dernières années, il y a une préoccupation croissante du public à propos de l'implication de l'utilisation du téléphone mobile dans la santé, à la suite de la croissance rapide de l'utilisation des téléphones mobiles à travers le monde. Bien que les normes de sécurité sont réglementées en termes de taux d'absorption spécifique (SAR) de tissu, l'augmentation de la température dans la tête humaine causée par l'énergie électromagnétique absorbée est une réelle influence qui induise des effets physiologiques indésirables.

La gravité de l'effet physiologique produite par de petites augmentations de la température peut être devrait s'aggraver dans les organes sensibles. En fait, une petite augmentation de la température dans le cerveau environ $3,5^{\circ}\text{C}$ est connu comme une limite qui ne cause pas des dommages physiologiques [IV.1]. En outre, il est rappelé qu'une très faible augmentation de la température dans l'hypothalamus de $0,2-0,3^{\circ}\text{C}$ conduit a altéré la thermorégulation [IV.2]. L'analyse a été généralement réalisée sur la base de pointe SAR qui suit les normes de la régulation standard de sécurité publique [IV.3], [IV.4]. En raison de considérations éthiques, exposant un être humain aux champs électromagnétiques à des fins expérimentales est limitée. Il est plus commode de mettre un modèle de la tête humaine pour simulation numérique. L'analyse numérique de la tête humaine exposée au rayonnement du téléphone mobile a fourni des informations importantes sur l'absorption d'énergie électromagnétique par la tête humaine sous des conditions d'exposition déférentes.

CHAPITRE IV – Distribution de la Température dans la Tête Humain

Récemment, la modélisation électromagnétique de transport de la chaleur dans les tissus humains a été étudiée. La modélisation thermique de tissus humains est un outil important pour étudier l'effet de sources de chaleur externes, ainsi que pour prévoir les anomalies dans le tissu. La plupart des études d'analyse de transfert de chaleur dans tissu biologique ont souvent utilisé l'équation bio-chaleur. L'équation de bio-chaleur de Pennes, introduit par Pennes [IV.5] repose sur l'équation de diffusion de la chaleur, est fréquemment utilisé pour l'analyse de transfert de chaleur dans le tissu biologique. Les études à des températures élevées de tissus impliquera l'utilisation de l'équation bio-chaleur modifiée pour intégrer l'évaporation de tissu interne pendant le chauffage ont été proposées par Yang et al. [IV.6]. Le résultat est identique avec d'autres résultats expérimentaux [IV.7]. Les solutions de l'équation de transfert de bio-chaleur permettront de discuter les caractéristiques communes du transfert de bio-chaleur à tous les organes ou les tissus. Chua et Chou [IV.8] ont développé un modèle de bio-chaleur pour étudier le processus gel dégel thermique de la cryochirurgie. Récemment, des modèles de milieux poreux ont été utilisés pour étudier le transport de bio-chaleur dans les milieux biologiques [IV.9], [IV.10]. De nombreuses études ont été menées à l'aide du modèle couplé de l'équation bio-chaleur et l'équation de Maxwell [IV.11], [IV.12], [IV.13]. Autrefois, les données expérimentales sur la corrélation des niveaux de SAR et l'augmentation de la température de la tête humaine sont rares. La plupart des études précédentes des humains exposés aux champs électromagnétiques ne pas tenir compte du transfert de chaleur provoque une analyse incomplète de résultat. Par conséquent, la modélisation de transport de la chaleur dans les tissus humains est nécessaire pour expliquer complètement le comportement réel des phénomènes de transport dans la tête humaine. Le sujet de l'augmentation de la température dans les tissus humains causés par l'exposition à des ondes électromagnétiques, en particulier ceux rayonnées par téléphones portables, a été d'intérêt pour plusieurs années [IV.14].

Cependant, la plupart des études d'exposition aux ondes électromagnétiques de la tête humaine n'ont pas été envisagé le domaine compliquée de tissus à plusieurs organes, et la validation expérimentale est limitée ou inexistante. Il existe peu d'études sur le domaine thermique et l'interaction du champ électromagnétique dans le modèle physique de la tête humaine en raison de la complexité du problème, même si elle est directement liée à la lésion thermique des tissus. En outre, dans les situations des expositions en champ proche, il est bien connu que les conditions d'exposition telles que la fréquence de fonctionnement et la distance

CHAPITRE IV – Distribution de la Température dans la Tête Humain

d'écartement entre la source électromagnétique et l'objet exposé joue un rôle important pour calculer l'énergie électromagnétique absorbé. Par conséquent, afin de fournir des informations sur les niveaux d'exposition et les effets sur la santé des rayonnements du téléphone mobile de manière adéquate, il est essentiel de simuler à la fois le champ électromagnétique et le transfert de chaleur dans un modèle de tête humaine fondée anatomiquement sous des conditions d'exposition différentes.

Notre travail est de calculer l'augmentation de la température et de SAR dans le corps humain exposés à des ondes électromagnétiques avec différentes conditions de test, à partir d'un ensemble d'équations qui régissent l'utilisation de l'équation bio-chaleur combiné avec l'équation de Maxwell. Les résultats de cette étude démontre que les propriétés diélectrique et thermique des tissus sont deux facteurs qui jeux un rôle important dans le transfert de chaleur dans le corps humain [IV.15].

Dans ce chapitre consiste aux calculs de la distribution SAR et la distribution de température à travers la tête humaine sous un rayonnement électromagnétique. Dans cette étude, un modèle de tête humaine a été utilisé pour simuler la distribution de SAR et la distribution de la température au cours de la tête humaine à des fréquences et distances différentes. La propagation des ondes électromagnétiques dans la tête humaine a été calculé en utilisant les équations de Maxwell. Une analyse de transfert de chaleur chez l'homme tête exposée à une onde électromagnétique a été calculée en utilisant l'équation bio-chaleur. Les effets de fréquences de fonctionnement (900 MHz et 1800 MHz) et la distances entre le téléphone mobile et la tête humaine (0 cm, 1,0 cm et 2,0 cm) sur les distributions de SAR et de la distribution de la température dans la tête humaine sont systématiquement vérifie. Les fréquences de 900 MHz et 1800 MHz ont été choisis pour les simulations de cette étude, car ils ont des longueurs d'onde dans la bande des micro-ondes et sont fréquemment utilisés dans le domaine de téléphone mobile. Afin de compléter les résultats, les valeurs obtenues fournissent une indication de limites qui doivent être pris en considération pour l'augmentation de la température due à l'absorption d'énergie électromagnétique des téléphones mobiles.

CHAPITRE IV – Distribution de la Température dans la Tête Humain

IV.2. FORMULATION DU PROBLEME :

La figure IV.1 représente le rayonnement d'énergie électromagnétique depuis un téléphone mobile sur le modèle de la tête humaine. En raison de considérations éthiques, l'exposition de la tête humaine à des champs électromagnétiques pour des fins expérimentales est limitée. Il est plus pratique de mettre un modèle de tête humaine réaliste grâce à la simulation numérique. La section suivante, une analyse des taux d'absorption spécifique et le transfert de chaleur dans les couches de la tête humaine exposés à des radiations de téléphone portable sont illustrés.

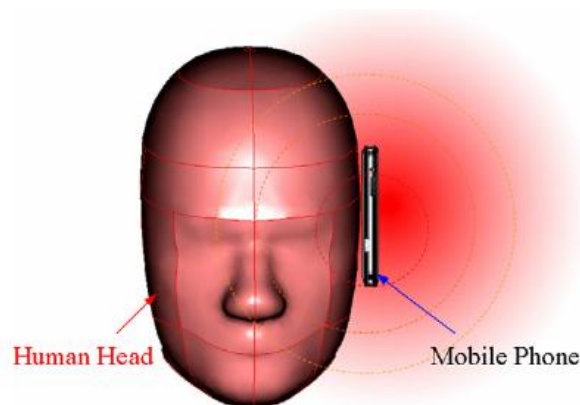


Figure IV.1 : La tête humaine exposée à la radiation du téléphone mobile.

IV.3. METHODES ET MODELE :

La première étape de l'évaluation des effets de certaine exposition au rayonnement dans la tête humaine est la détermination du champ électromagnétique interne induit et sa répartition spatiale. Par la suite, l'absorption d'énergie électromagnétique qui résulte de l'augmentation de la température de la tête humaine et d'autres interactions peut être prise en considération.

IV.3.1. Le modèle physique :

Dans cette étude, une antenne patch d'un téléphone mobile situé à côté gauche d'une tête humaine avec des distances différentes est considérée comme source de rayonnement en champ proche pour le modèle de tête humain. Figure IV.2 (a) montre le modèle de la tête humaine en trois dimensions avec l'antenne patch utilisé dans cette étude à différentes distances d'écart entre l'antenne patch et la tête humaine. Ce modèle comprend 4 types de tissus qui sont la peau, la

CHAPITRE IV – Distribution de la Température dans la Tête Humain

graisse, le crâne et le cerveau. Ces tissus ont des diélectriques et propriétés thermiques différentes. Figure IV.2 (b) donne les dimensions de la tête utilisée dans cette étude [IV.16]. Les propriétés diélectriques et les propriétés thermiques des tissus sont données dans les tableaux IV.1 et IV.2, respectivement.

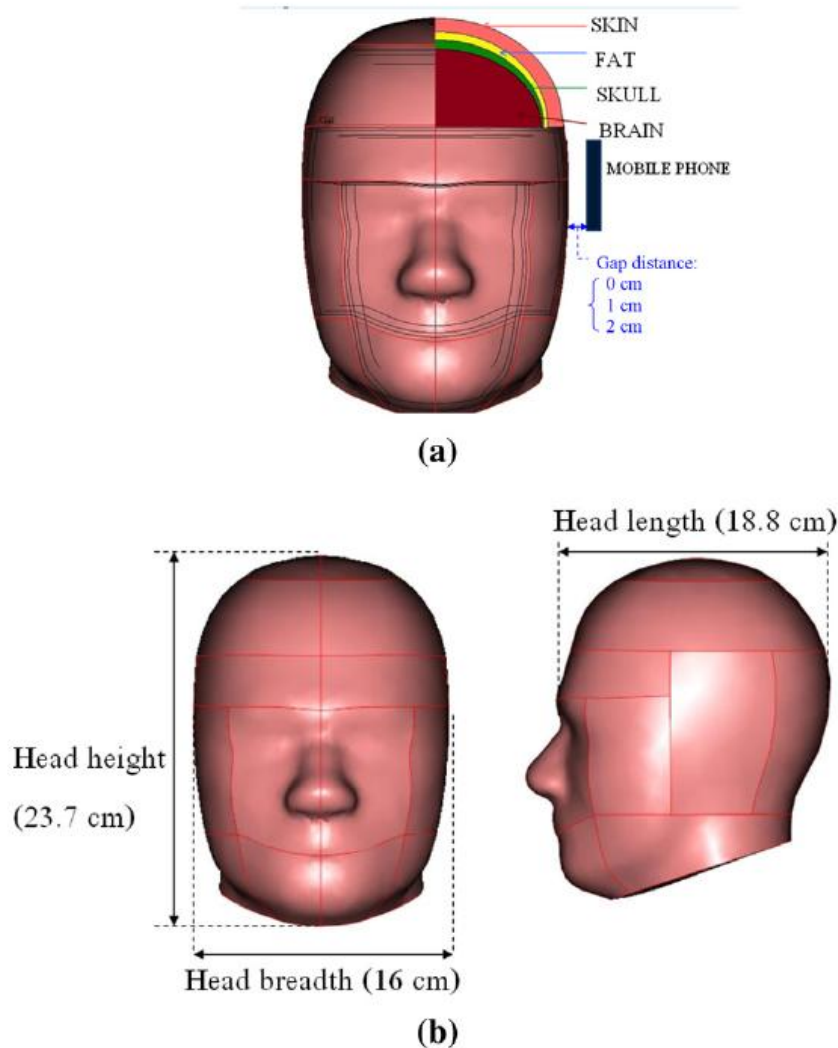


Figure IV.2 : Le modèle de la tête humaine, (a) section du modèle de tête humaine, (b) les dimensions du modèle de tête humaine.

CHAPITRE IV – Distribution de la Température dans la Tête Humain

Type de tissu	900 Mhz		1800 Mhz	
	ϵ_r	σ (S/m)	ϵ_r	σ (S/m)
Skin	41.41	0.87	32.5	0.52
Fat	11.33	0.11	5.35	0.078
Bone	20.79	0.34	8.0	0.16
Brain	45.805	0.765	53.0	1.7

Tableau IV.1 : Propriétés diélectriques de tissus.

Tissus	P (kg/m ³)	K(W/m °C)	C _p (J/kg °C)	Q _{met} (W/m ³)	ω (1/s)
Skin	1125	0.42	3600	1620	0.02
Fat	916	0.25	3000	300	4.58E-04
Bone	1990	0.37	3100	610	4.36E-04
Brain	1038	0.535	3650	7100	8.83E-03

Tableau IV.2 : Propriétés thermiques de tissus.

IV.3.2. Analyse de l'équation de l'onde électromagnétique propageant :

Les modèles mathématiques sont développés pour prévoir le champ électrique et le SAR par rapport à un gradient de température à l'intérieur de la tête humaine. Pour simplifier le problème, les hypothèses suivantes sont faites :

- 1- Propagation de l'onde électromagnétique est modélisé en trois dimensions.
- 2- Les interactions de l'onde électromagnétique et la tête humaine passe dans la région ouverte.
- 3- L'espace libre est tronquée par la diffusion des conditions aux limites.
- 4- Le modèle suppose que les propriétés diélectriques de chaque tissu sont constantes.

La propagation des ondes électromagnétiques dans la tête humaine est calculée en utilisant les équations de Maxwell [IV.17], qui décrivent mathématiquement l'interdépendance des ondes électromagnétiques. La forme générale des équations de Maxwell est simplifiée à démontrer le champ électromagnétique pénètre dans la tête humaine comme nous avons vu dans le chapitre II :

IV.3.3. Les conditions aux limites :

L'énergie électromagnétique est émise par l'antenne et frappe la tête humaine avec une puissance rayonnée particulière. Par conséquent, les conditions aux limites pour résoudre l'onde électromagnétique propageant, comme le montre la Fig IV.3, sont décrites comme suit: Au bas de l'antenne, un simulateur électromagnétique emploie les conditions aux limites du port localise avec la puissance rayonnée spécifique,

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{E_1 l_1}{I_1} \quad (IV.1)$$

Où Z_{in} est l'impédance d'entrée (Ω), V_1 est la tension le long de bords (V), I_1 est l'amplitude du courant électrique (A), E_1 est le champ électrique le long du bord de source (V/m), l_1 est la longueur de bord (m).

Le patch de l'antenne agit à peu près comme une cavité lequel le conducteur électrique parfait sur la surface interne et externe est affectée. Par conséquent, les conditions aux limites parfaites électriques conductrices le long des taches sur l'antenne sont considérées.

$$nx\mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (IV.2)$$

Les conditions aux limites le long des interfaces entre les différents milieux, par exemple, entre l'air et le tissu ou le tissu et le tissu, sont considérées comme conditions aux limites continues.

$$nx(\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = \mathbf{0} \quad (IV.3)$$

CHAPITRE IV - Distribution de la Température dans la Tête Humain

Les faces extérieures du domaine calculé, à savoir, l'espace libre, sont considérées comme condition à la limite de diffusion.

$$nx(\nabla xE) - jknx(Exn) = -nx(E_0 xjk(n - k)) \exp(-jk.r)$$

Où k est le nombre d'onde (m-1), σ est la conductivité électrique (S / m), n est un vecteur normal, $j = \sqrt{-1}$, et E_0 est l'onde plane incidente (V/m).

IV.3.4. Interaction entre l'onde électromagnétique et le tissu humain :

Lorsque les ondes électromagnétiques se propagent à travers les tissus humains, l'énergie d'ondes électromagnétiques est absorbée par les tissus. L'interaction des champs électromagnétiques avec les tissus biologiques peut être définie en termes de débit d'absorption spécifique SAR, le taux d'absorption spécifique est défini comme le taux de dissipation de la puissance normalisé par la densité du matériau [IV.18]. Le taux d'absorption spécifique est décrit par l'équation suivante :

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad (IV.4)$$

Où σ est la conductivité électrique (S / m), et ρ est la densité de tissu (kg / m³).

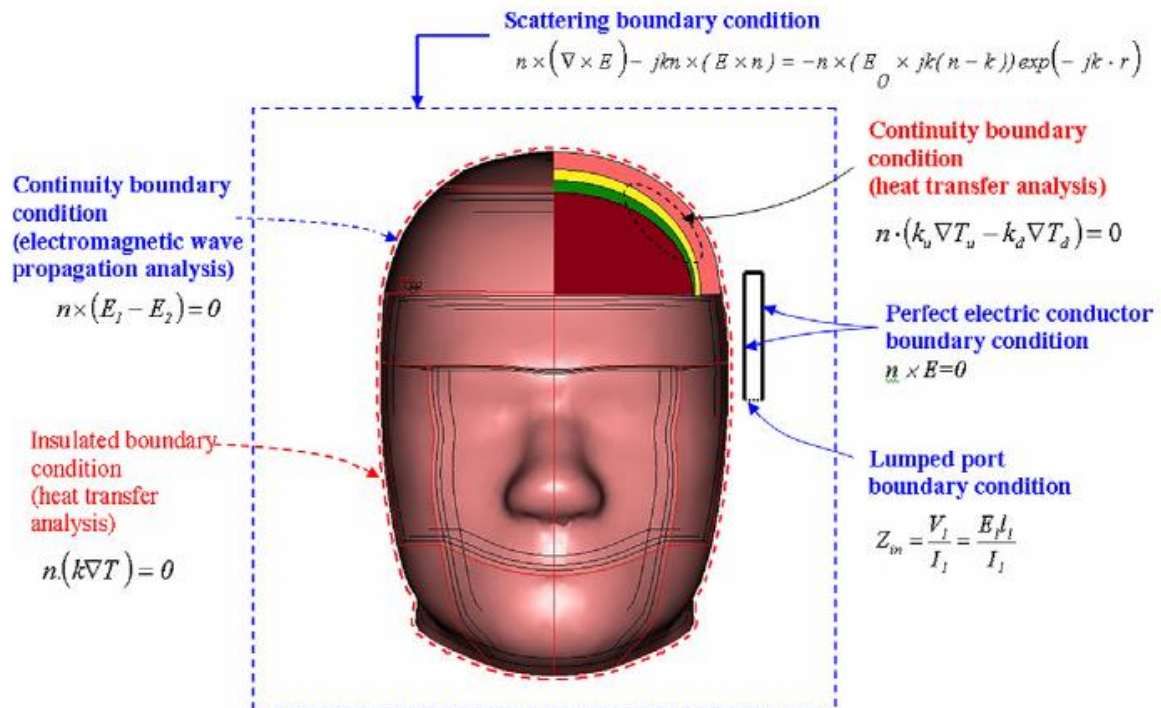


Figure IV.3 : Conditions aux limites pour analyser l'onde électromagnétique et le transfert de chaleur.

IV.3.5. Les équations pour l'analyse de transfert de chaleur :

Pour résoudre le problème thermique, la répartition de la température dans la tête humaine a été évaluée par l'équation de bio-chaleur qui a été associée avec les équations de Maxwell. La répartition de la température correspond à la vitesse d'absorption spécifique (DAS). En effet, le taux d'absorption spécifique dans la tête humaine est distribué en raison de l'absorption d'énergie. Par la suite, l'énergie absorbée est convertie en énergie thermique, ce qui augmente la température du tissu.

L'analyse de transfert de chaleur dans la tête humaine est modélisée en trois dimensions. Pour simplifier le problème, selon les hypothèses suivantes :

- Tissus humains sont biomatériaux avec une constante thermique.
- Il n'y a pas de changement de phase de la substance dans les tissus.
- Il n'y a pas d'échange d'énergie tout au long de la frontière de modèle de la tête humaine.
- Il n'y a pas de réaction chimique à l'intérieur des tissus.

CHAPITRE IV – Distribution de la Température dans la Tête Humain

La distribution de la température dans le modèle tête humaine est obtenu par résolution de l'équation de bio-chaleur du Pennes' [IV.19] L'équation de bio-chaleur transitoire décrit bien comment le transfert de chaleur se produit dans la tête humaine, et l'équation peut être écrite comme.

$$\rho.C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla.(k\nabla T) + \rho_b C_b \omega_b (T_b - T) + Q_{met} + Q_{ext} \quad (IV.5)$$

Où ρ est la densité de tissu (kg/m^3), C est la capacité calorifique du tissu (J/kg K), k est la conductivité thermique du tissu (W/m K), T est la température de tissu ($^{\circ}\text{C}$). T_b est la température du sang ($^{\circ}\text{C}$), ρ_b est la densité de sang (kg/m^3). C_b est la capacité de chaleur spécifique du sang (J/kg K), ω_b est la vitesse de perfusion sanguine ($1/\text{s}$). Q_{met} est la source métabolisme de chaleur (W/m^3) et Q_{ext} est le terme de source de chaleur externe (la densité de source de chaleur électromagnétique) (W/m^3).

Dans l'analyse, la conduction de la chaleur entre le tissu et le flux sanguin est approchée par l'expression de la perfusion sanguine [IV.20], $\rho_b C_b \omega_b (T_b - T)$.

L'expression de la source de chaleur externe est égale à la chaleur générée résistif par champ électromagnétique (énergie électromagnétique absorbée), qui a défini comme [IV.21], [IV.22], [IV.23], [IV.24].

$$Q_{ext} = \frac{1}{2} \sigma_{tissue} |\vec{E}|^2 = \frac{\rho}{2} .SAR \quad (IV.6)$$

Où $\sigma_{tissue} = 2\pi f \epsilon'_r \epsilon_0$

IV.3.6. Les conditions aux limites pour analyser le transfert de chaleur

L'analyse de transfert de chaleur est considérée uniquement dans la tête humaine, qui ne comprend pas les parties de l'espace environnant. Comme représenté sur la Figue IV.3, la surface extérieure de la tête humaine sont considérés comme condition limite à isolation thermique,

$$n.(k\nabla T) = 0 \quad (IV.7)$$

On suppose que le contact se produit ne pas résistant entre les organes intérieur de la tête humaine. Par conséquent, les limites internes sont supposées être une condition aux limites de continuité,

$$n.(k_u \nabla T_u - k_d \nabla T_d) = 0 \quad (IV.8)$$

IV.4. DISCUSSION DES RESULTATS :

IV.4.1. Procédures de calculs :

Cette étude fournit une méthode de maillage variable pour la résolution du problème, comme illustré sur la Figure IV.4. Le modèle de l'équation bio-chaleur et l'équation de Maxwell sont alors résolu. Tous les calculs sont implémentés à l'aide COMSOLTM multi physique.

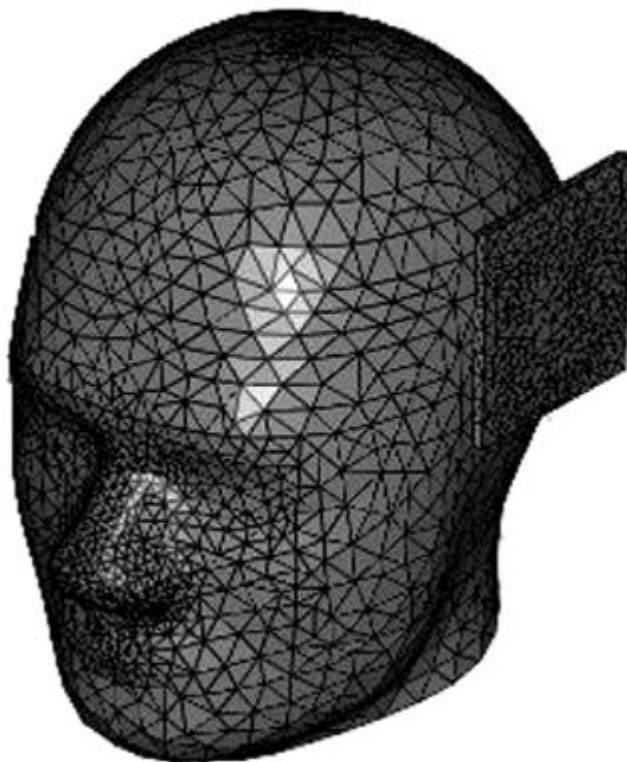


Figure IV.4 : Un maillage éléments finis d'un modèle de la tête humaine.

CHAPITRE IV – Distribution de la Température dans la Tête Humain

La courbe de convergence résultant de la convergence essai est représentée sur la Fig IV.5. Ce test de convergence conduit à la grille avec environ 200 000 éléments. Il est raisonnable de supposer que, à ce nombre d'éléments, la précision des résultats de simulation est indépendante du nombre d'éléments et donc des économies mémoire et de temps de calcul. Un plus grand nombre d'éléments sont non testé en raison d'un manque de mémoire et de calcul de performance.

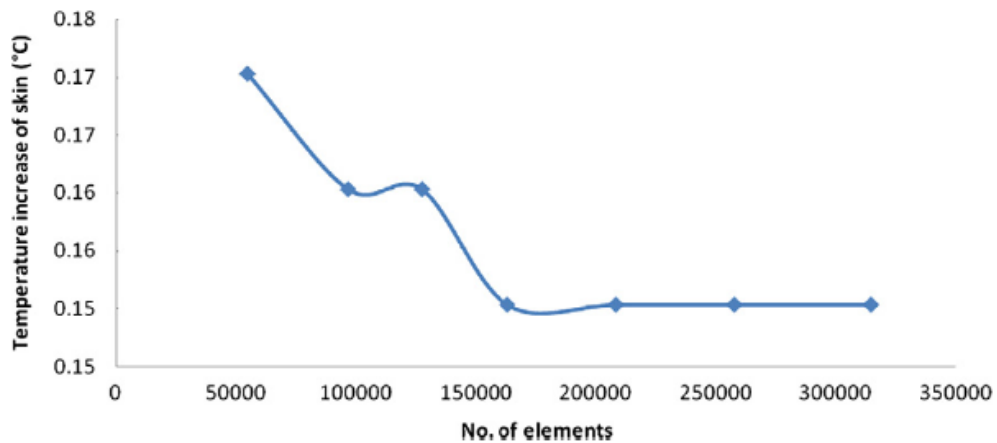


Figure IV.5 : La courbe de convergence de la grille

La distribution SAR en horizontal la section transversale de trois couches de tissus humains comme le montre la Figure IV.6 est utilisé dans le cas de la validation, la densité de courant de fuite exposée à la fréquence de 1300 MHz électromagnétique est 1 MW/cm^2 .

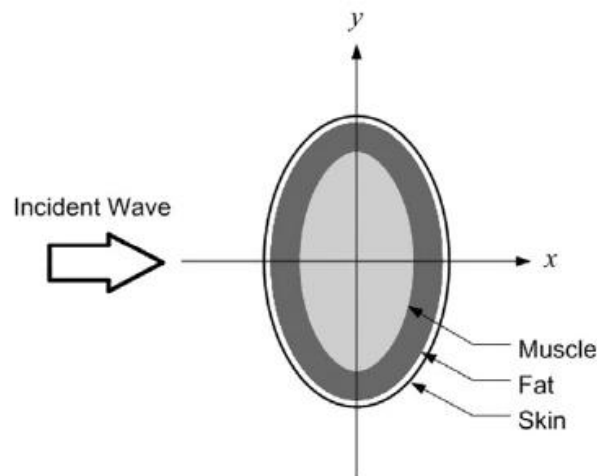


Figure IV.6 : La géométrie du modèle tête humaine.

IV.4.2. Distribution du champ électrique :

Afin d'étudier les effets de la fréquence de fonctionnement, la tête d'un être humain est exposée à la puissance rayonnée de 1 W à la fréquence 900 MHz et 1800 MHz, avec la distance d'espacement fixée à 1 cm pour 30 min. La figure IV.7 représente la simulation de la répartition de champ électrique dans la tête humaine exposée à un rayonnement de téléphone mobile le long de la ligne d'extrusion (figure IV.8) aux deux fréquences.

On peut voir que les valeurs les plus élevées du champ électrique dans les deux cas se produisent dans la zone des parties extérieures de la tête, en particulier dans la peau, et de la graisse. A titre de comparaison, l'intensité de champ électrique maximale dans les parties extérieures de la tête humaine à la fréquence de 1800 MHz présente une valeur plus élevée que de 900 MHz. Les intensités maximales de champ électrique sont 48,11 V/m à la fréquence de 900 MHz et 135,25 V/m à la fréquence de 1,800 MHz. On constate qu'une grande partie de l'onde électromagnétique à 900 MHz peuvent pénétrer dans la profondeur de la tête humaine. Ce champ électrique conduit à une énergie électromagnétique absorbée plus profondément dans les organes de la tête humaine par rapport à la fréquence de 1800 MHz. Grâce à la plus basse fréquence de 900 MHz, une grande partie de l'onde électromagnétique est en mesure de pénétrer dans la tête humaine en raison de sa longueur d'onde a une influence plus forte à la plus élevée valeur de ses propriétés diélectriques (indiqué dans le tableau IV.1) sur la pénétration d'un champ électromagnétique, ce qui correspond à une plus grande pénétration en profondeur. On constate que, à la fréquence de 1800 MHz, le champ électrique diminue dans de petites distances, ce qui conduit à un faible taux d'absorption spécifique dans les organes profonds à l'intérieur de la tête humaine.

Ce phénomène explique pourquoi le champ électrique et donc le taux d'absorption spécifique sont plus grands au niveau de la peau et dégradés fortement le long de la direction de propagation pour une longueur d'onde courte.

CHAPITRE IV – Distribution de la Température dans la Tête Humain

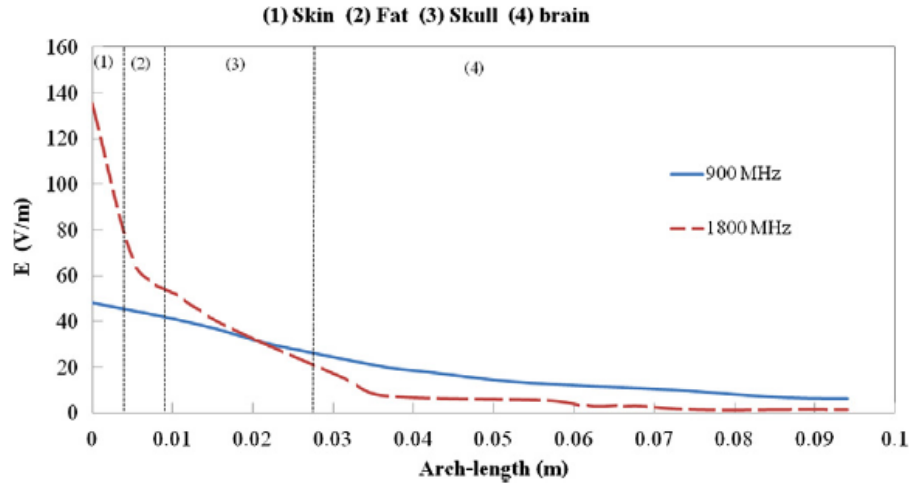


Figure IV.7 : Distribution du champ électrique (V/m) dans la tête humaine exposée au radiation de 1 W pour les fréquences de 900 MHz et 1800 MHz, avec 1 cm de distance.

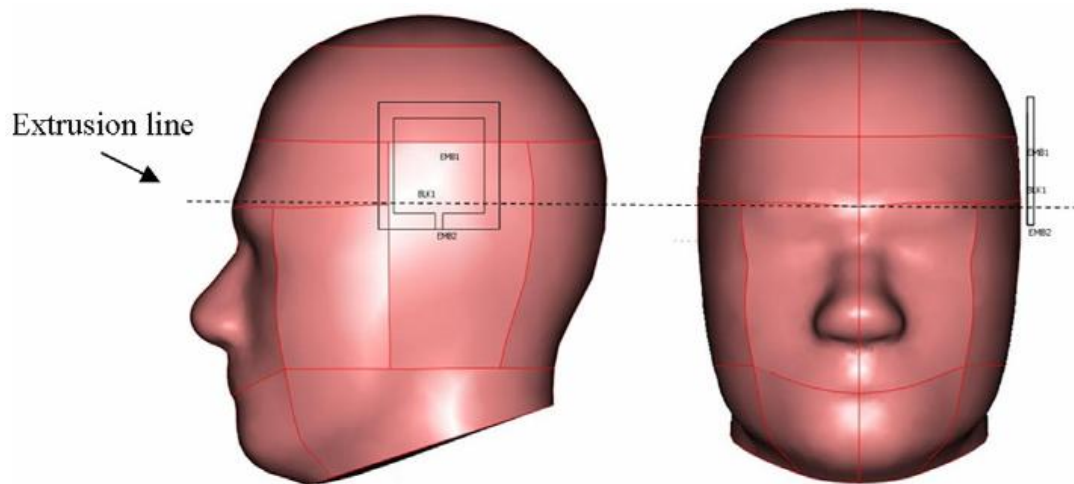


Figure IV.8 : La ligne d'extrusion dans la tête humaine où le SAR et la distribution de la température sont pris en considération.

CHAPITRE IV – Distribution de la Température dans la Tête Humain

IV.4.3. Comparaison de la distribution du SAR et la distribution de la température dans le tissu humain :

Afin d'étudier la comparaison de la distribution du SAR et la température dans la tête humaine, exposé à une puissance de radiation de 1W à la fréquence de 900 MHz et 1800 MHz pour une durée de 30 minutes.

Sur la figure IV.9 montre La distribution du SAR par rapport à la longueur d'arc de la tête humaine exposée à la puissance rayonnée de 1 watt avec 1 cm de distance de l'écart pendant 30 min. avec pénétration dans la tête, les valeurs SAR diminuent rapidement le long de la distance. Cependant, on peut observer une pénétration plus profonde de l'énergie électromagnétique à l'intérieur de la tête humaine à 900 MHz; ce qui correspond à une répartition de champ électrique (Figure IV.7).

Le graphique montre les valeurs du SAR plus élevés à la fréquence 1800 MHz pour la peau, la graisse et le cerveau plus bas. Tandis que dans la région du crâne et du cerveau moyen, la valeur du SAR à la fréquence de 1800 MHz est inférieure à celle de 900 MHz. En effet, à la fréquence de 1800 MHz, le crâne a une conductivité électrique très faible que celle de 900 MHz et l'intensité de champ électrique à 1800 MHz diminue rapidement.

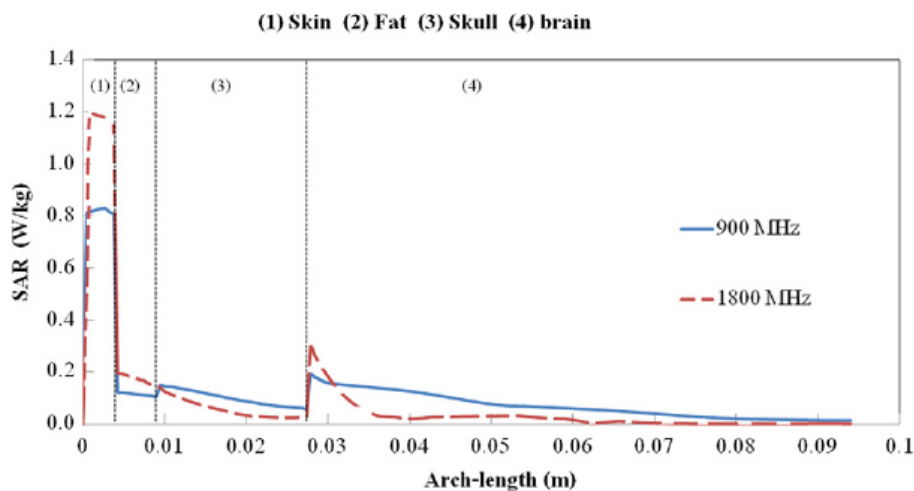


Figure IV.9 : La distribution du SAR par rapport à la longueur d'arc de la tête humaine exposée à la puissance rayonnée de 1 W à 1 cm de distance de l'écart pendant 30 min.

CHAPITRE IV – Distribution de la Température dans la Tête Humain

La distribution SAR sur la figure IV.9 est en corrélation avec la distribution de la température dans la figure IV.10. Cependant, la température maximale de la fréquence de 1800 MHz est jugée plus élevée que celle de la fréquence de 900 MHz, en particulier dans le milieu du cerveau. Ceci est dû à une pénétration plus profonde de champ électrique dans la tête humaine à la fréquence de 1800 MHz. Sur les paramètres thermiques indiqués dans le tableau IV.2, l'effet thermique de conduction provoque une augmentation de la température dans les os à la fréquence de 1800 MHz, même si elle a une valeur SAR inférieure à celle de 900 MHz. Ce comportement est dû au fait que, pour des différentes fréquences de radiation et même puissance rayonnée, la distribution de la température n'est pas la même.

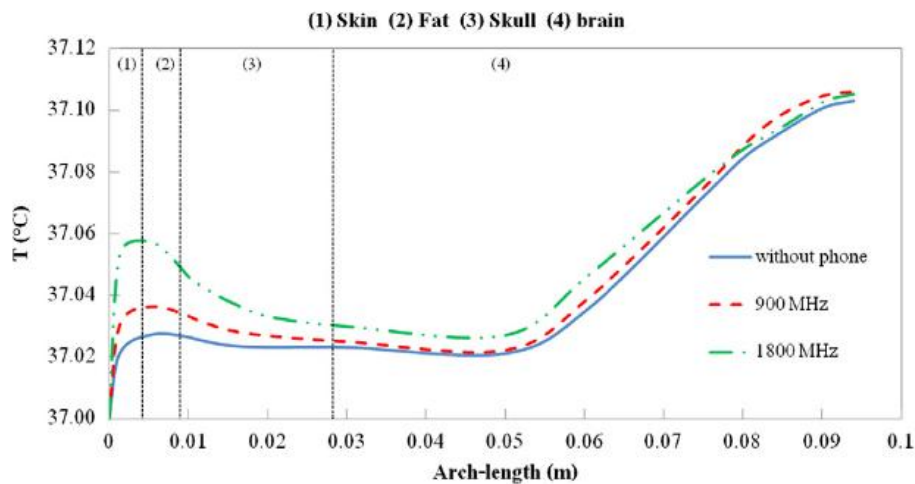


Figure IV.10 : La distribution de la température par rapport à la longueur d'arc de la tête humaine exposée à la puissance rayonnée de 1 watt avec 1 cm de distance de l'écart pendant 30 min.

La figure IV.11 montre les valeurs SAR maximales localisées de la tête humaine exposée à la puissance rayonnée de 1 watt avec 1 cm de distance de l'écart pendant 30 minutes pour les fréquences de 900 MHz et 1800 MHz. Pour la valeur de SAR local pour chaque couche de tissu, on constate que la distribution de SAR correspond à la distribution du champ électrique, ainsi que les propriétés diélectriques de tissus. Pour les deux fréquences, la plus haute valeur de SAR sont présentés pour les tissus de la peau et les tissus du cerveau, respectivement. En outre, la plupart de la SAR localisé pour chaque tissu de la fréquence 1800 MHz est supérieure à celle de la fréquence de 900 MHz à l'exception du tissu osseux. En effet, à la fréquence de 1800 MHz, l'os possède une conductivité électrique très inférieure à celle de la fréquence 900 MHz, alors que les intensités de champ électrique dans l'os sont négligeables entre ces deux fréquences.

CHAPITRE IV – Distribution de la Température dans la Tête Humain

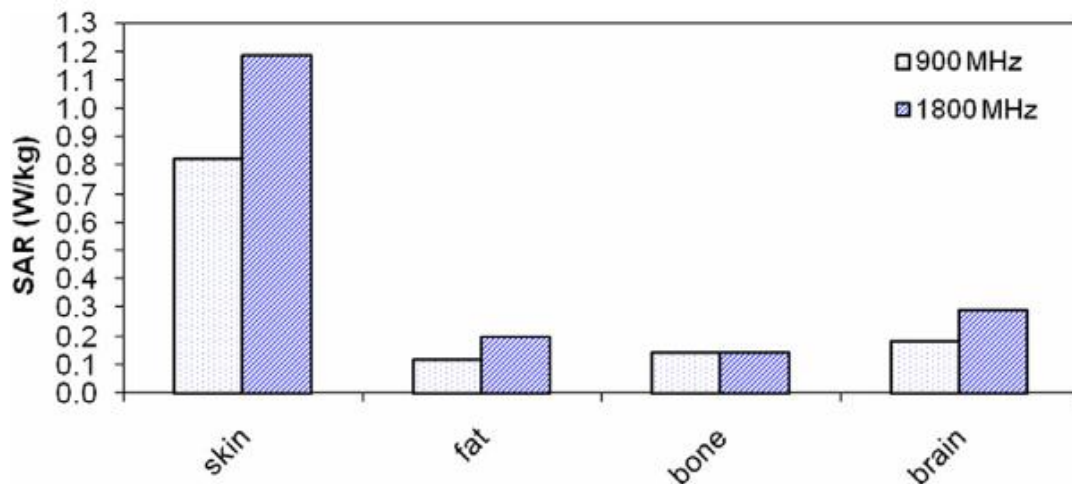


Figure IV.11 : Comparaison de la valeur DAS maximale dans les tissus de la tête humaine exposé à la puissance rayonnée de 1Watt à la fréquence de 900 MHz et 1800 MHz, avec 1 cm de distance de l'écart pendant 30 min.

La figure IV.12 montre que l'augmentation maximale de la température de la tête humaine exposée à la puissance rayonnée de 1 watt avec 1 cm d'écart pendant 30 min pour les fréquences de 900 MHz et 1800 MHz.

La plus forte augmentation de température pour les deux fréquences se produit dans la peau, la graisse, les os et le cerveau, respectivement. On observe que la deuxième plus forte augmentation de température dans les deux fréquences apparaît dans le tissu de la graisse, pas dans le cerveau comme les valeurs SAR le montre Figure IV.12, c'est parce que le tissu graisse a le taux de perfusion sanguine inférieure ($4,58 \times 10^{-4}$ 1/s) que le cerveau ($8,83 \times 10^{-3}$ 1/s) ce qui provoque le transfert de chaleur en raison de la perfusion sanguine est moins efficace en matière grasse. En même temps. En outre, il est constaté que les distributions de température ne sont pas directement liées à la distribution de SAR. Néanmoins, ceux-ci sont également liés à des paramètres tels que : conductivité thermique, propriétés diélectriques, le taux de perfusion sanguine, etc. Il est donc important d'utiliser un modèle fortement couplé de thermique et onde électromagnétique propageant pour évaluer les effets sur la santé de l'exposition aux ondes électromagnétiques rayonnées par le téléphone mobile.

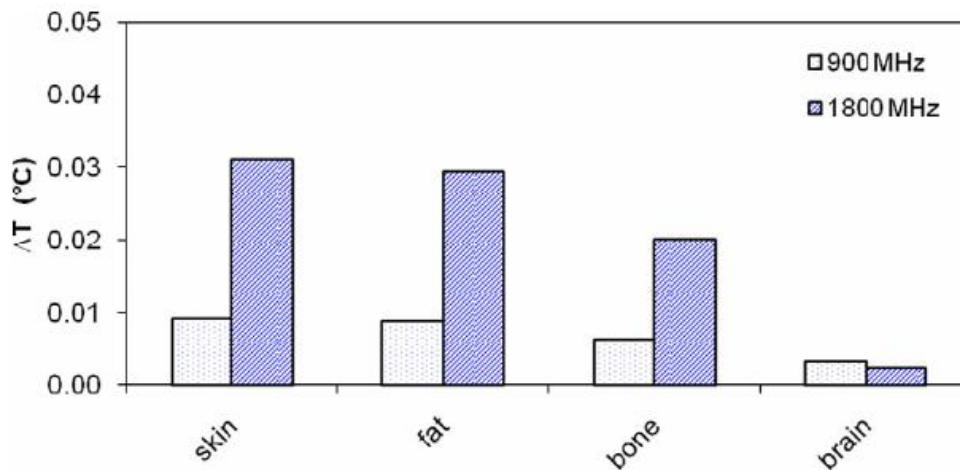


Figure IV.12 : Comparaison de la température augmentée dans les tissus de la tête humaine exposée à la puissance rayonnée de 1 watt avec 1 cm de distance de l'écart pendant 30 min.

IV.5. EFFET DE LA DISTANCE ENTRE LE TELEPHONE MOBILE ET LA TETE HUMAINE COMPARAISON :

L'effet de la distance d'écartement entre le téléphone mobile et la tête humaine a également discuté. La figure IV.13, montre la comparaison de la distribution de SAR dans la tête humaine à des distances différentes avec les puissances rayonnées de 1.0 W à la fréquence de 900 MHz pendant 30 min. Quand la distance diminue, la valeur maximale du SAR dans les tissus de la peau est augmentée. Les valeurs maximales SAR sont de 0.4, 0.8 et 1.6W/kg pour les distances de 2.0, 1.0 et 0 cm, respectivement.

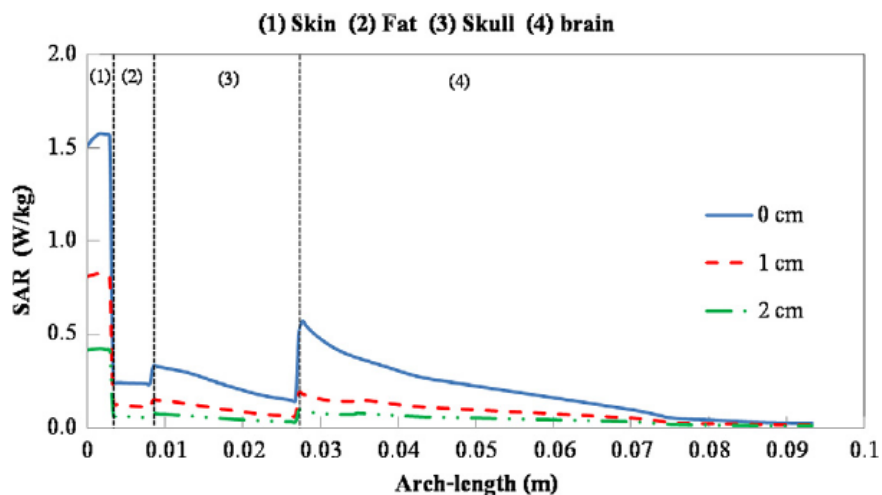


Figure IV.13 : La distribution de SAR par rapport à la longueur de la tête humaine exposé à la puissance rayonnée de 1 W à la fréquence de 900 MHz à différentes distances de l'écart pendant 30 min.

CHAPITRE IV – Distribution de la Température dans la Tête Humain

La figure IV.14 montre la distribution de la température à l'intérieur de la tête humaine à des distances de 0 cm, 1.0 cm et 2.0 cm. Comme la distance d'écart diminue, la température maximale est aussi augmentée, mais la distance de décalage explique le faible influence dans la région du mésencéphale parce que la perfusion artérielle du cerveau joue un rôle important pour maintenir une température basse de la région du mésencéphale.

On constate que la distance entre le téléphone mobile et la tête humaine influe considérablement sur le SAR et les répartitions de la température. Ceci est dû à une plus faible distance d'écartement conduit à des intensités plus élevées de champ électrique, SAR, et la production de chaleur à l'intérieur de la tête humaine, ce qui augmente la température à l'intérieur de la tête humaine.

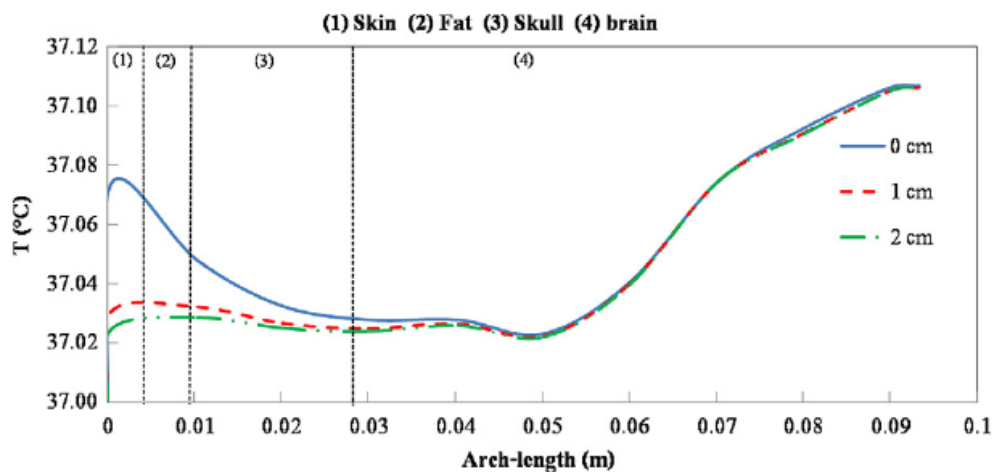


Figure IV.14 : La distribution de température par rapport à la longueur de la tête humaine exposé à la puissance rayonnée de 1 W à la fréquence de 900 MHz à différentes distances d'écart pendant 30 min.

IV.6. CONCLUSION :

Les résultats de cette étude montrent plusieurs caractéristiques importantes de l'absorption d'énergie dans l'organisme tête humain.

Dans tous les cas d'exposition, le SAR le plus élevée dans la tête humaine a eu lieu à proximité de la surface, directement au-dessous du point d'alimentation de téléphone mobile. Reportez-vous à la limite SAR recommandée par le ICNIRP de 2 W / kg.

Dans la tête humaine, l'endroit de l'augmentation de la température maximale n'est pas nécessairement le même que pour le maximum de SAR dû à divers mécanismes de propagation des ondes électromagnétiques et de transfert de la chaleur. Compte tenu du fait que les distributions de température ne sont pas toujours bien corrélées avec les distributions SAR. L'augmentation maximum de la température de peau à la fréquence 1800 MHz est plus élevée que celle de la fréquence de 900 MHz. Bien que le maximum augmentation de la température dans le cerveau à la fréquence 1800 MHz est plus faible que celle de la fréquence de 900 MHz. Dans tous les cas d'exposition, la température calculée dans cette étude est inférieure au seuil pour l'induction de dommages thermiques dans toutes les situations.

IV.7. BIBLIOGRAPHIE

- [IV.1] A.C. Guyton, J.E. Hall, "Medical Physiology", Saunders, Philadelphia, PA, 1996 (ch. 73).
- [IV.2] E.R. Adair and al, "Minimal changes in hypothalamic temperature accompany microwave-induced alteration of thermoregulatory behavior", *Bioelectromagnetics* 5 (1984) 13–30.
- [IV.3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", *Health Phys.* 74, (1998) 494–522.
- [IV.4] IEEE, "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields", 3 kHz to 300 GHz, IEEE Standard C95 1- 1999.
- [IV.5] H.H. Pennes, "Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm (reprint of 1948 article)", *J. Appl. Physiol.* 85 (1998) 5–34.
- [IV.6] D. Yang and al, "Expanding the bioheat equation to include tissue internal water evaporation during heating", *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 54 (8) (2007) 1382–1388.
- [IV.7] J. Okajima and al, "Dimensionless solutions and general characteristics of bioheat transfer during thermal therapy", *J. Therm. Biol.* 34 (8) (2009) 377–384.
- [IV.8] K.J. Chua, S.K. Chou, "On the study of the freeze-thaw thermal process of a biological system", *Appl. Therm. Eng.* 29 (17–18) (2009) 3696–3709.
- [IV.9] A. Nakayama and al, "A general bioheat transfer model based on the theory of porous media", *Int. J. Heat Mass Transfer* 51 (2008) 3190–3199.
- [IV.10] S. Mahjoob, K. Vafai, "Analytical characterization of heat transfer through biological media incorporating hyperthermia treatment", *Int. J. Heat Mass Transfer* 52 (5–6) (2009) 1608–1618.
- [IV.11] A. Sakurai and al, "The radiation element method coupled with the bioheat transfer equation applied to the analysis of the photothermal effect of tissues", *Numer. Heat Transfer Part A* 58 (2010) 625–640.
- [IV.12] O.P. Gandhi, G. Kang, "Some present problems and a proposed experimental phantom for SAR compliance testing of cellular telephones at 835 MHz and 1900 MHz", *Phys. Med. Biol.* 47 (2002) 1501–1518.
- [IV.13] T. Wessapan and al, "Numerical analysis of specific absorption rate and heat transfer in the human body exposed to leakage electromagnetic field at 915 MHz and 2450 MHz", *ASME J. Heat Transfer* 133 (2011) 051101-1–051101-13.
- [IV.14] T. Wessapan and al, "The effects of dielectric shield on specific absorption rate and heat transfer in the human body exposed to leakage microwave energy", *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 38 (2) (2011) 255–262.
- [IV.15] P. Keangin and al, "An analysis of heat transfer in liver tissue during microwave ablation using single and 2 double slot antenna", *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 38 (6) (2011) 757–766.
- [IV.16] J. Wang and al, "Comparison and evaluation of electromagnetic absorption characteristics in realistic human head models of adult and children for 900 MHz mobile telephones", *IEEE Trans. Microw. Theor. Tech.* 51 (2003) 966–971.

CHAPITRE IV - Distribution de la Température dans la Tête Humain

- [IV.17] R.J. Spiegel, "A review of numerical models for predicting the energy deposition and resultant thermal response of humans exposed to electromagnetic fields", IEEE Trans. Microw. Theor. Tech. 32 (8) (1984) 730-746.

Conclusion Générale

Dans un premier temps, nous avons réalisé une étude bibliographique sur les effets des champs électromagnétiques sur la santé en général et sur le corps humain en particulier, à la fréquence GSM 0.9 GHz et 1.8 GHz.

Nous avons présenté une synthèse sur les notions d'électromagnétismes indispensables à la compréhension de ce travail, caractéristique des réseaux de téléphonie mobile et les effets des champs sur la santé et le corps humain à court terme et à long terme. Les conclusions de ces publications sont encore controversées. Les effets nocifs des champs électromagnétiques sur la santé ne sont pas encore confirmés. Sur la base du principe de précaution, des réglementations ou normes visant à limiter l'exposition humaine aux ondes électromagnétiques a été définies, et d'autres études confirment la corrélation entre les champs électromagnétiques et certaines maladies chez l'homme. En quelque sorte est une introduction générale, puisqu'elles représentent la base de cette discipline. Dans ce contexte, il est important d'entamer la modélisation de la transmission de l'énergie électromagnétique à travers un milieu biologique (la tête humaine).

Dans un deuxième temps, nous avons abordés les propriétés diélectriques de tissu humain (la permittivité électrique ϵ , la perméabilité magnétique μ et la conductivité électrique σ) et leurs évolutions suivant les variations de la fréquence figure II.3 et figure II.4, qui sont identiques par rapport aux mesures pratiques, ces propriétés représentent un facteur important dans la précision de la limite de la profondeur de pénétration de l'onde électromagnétique dans le tissu humain avec les autres facteurs: l'épaisseur du tissu, la puissance incidente et la fréquence d'opération.

Nous avons ensuite étudié une formulation plus précise, pour simuler les phénomènes induits dans le corps humain en prenant en compte l'hypothèse d'une onde à incidence uniforme et se propagent le long de la direction Z. La solution (E_y / H_x) des équations de Maxwell conduit à calculer la constante d'atténuation (α), la constante de phase (β), l'impédance intrinsèque de l'onde (η) et la vitesse de propagation V, représentées dans les relations (II.14), (II.15), (II.16) & (II.17).

CONCLUSION GENERALE

En outre, cette étude nous a permis d'une part, d'étudier la propagation de l'énergie RF à travers un modèle simple de la tête humaine sous forme de quatre couches (Skin, Fat, Bone et Brain), en fonction de l'influence des paramètres diélectriques du tissu, la fréquence d'opération, angle d'incidence et l'épaisseur de chaque couche. Cette étude nous a conduites de calculer la puissance incidente à $z = 0$, la puissance absorbée à $z = 0$, la puissance absorbée à $z \neq 0$ et aux résultats et remarques suivantes:

- 1- La puissance incidente à $z = 0$ (c'est-à-dire au niveau de la surface de la tête humaine), peut être calculée par l'application du théorème de Poynting, représenté par la relation II.19 et la figure II.7, qui représente la puissance incidente en fonction de la fréquence, que cette puissance atteint un niveau maximum puis diminue suivant l'augmentation de la fréquence.
- 2- La puissance absorbée à $z = 0$, peut être calculé par l'application du principe de conservation de l'énergie représenté par la relation II.23 et la figure II.8, que cette puissance atteint un niveau maximum puis diminue suivant l'augmentation de la fréquence.
- 3- La puissance absorbée en fonction de la profondeur $z \neq 0$ (c'est-à-dire à l'intérieur de la tête humaine) pour les deux fréquences $f = 0.9\text{GHz}$ et $f = 1.8\text{GHz}$, représenté par la relation II.24 et les figures II.9 et II.10, on remarque lorsque la profondeur de pénétration augmente la puissance absorbée par les différentes couches de la tête humaine diminue.
- 4- La profondeur de pénétration représentée par la relation II.25 et la figure II.12, indique que le SAR de l'homme dépend de la fréquence d'opération et de l'influence des paramètres diélectriques des tissus, et diminue lorsque la fréquence augmente.

Et d'autre part, de mettre en évidence les limites d'application de la formulation diélectrique.

CONCLUSION GENERALE

Dans une troisième temps, nous avons étudié et quantifié les phénomènes induits dans le corps humain résultant de l'exposition à des champs électromagnétiques à la fréquence GSM (0.9 et 1.8 GHz). En unifiant les rayonnements électromagnétiques provenant du mobile ainsi que seul provenant de l'antenne. Cette étude nous a conduit de calculer le champ total absorbé par le corps humain, l'affaiblissement de liaison et le SAR causés par l'antenne et le mobile et aux résultats et remarques suivantes:

- 1- L'affaiblissement sur la liaison antenne - corps humain à une distance d_1 , est représenté par la relation III.6 et la figure III.6, est très faible aux environs de 10 mètres, et devient très important au-delà de 15 mètres, donc les rayonnements peuvent atteindre le corps humain à une distance plus long, avec une intensité moins faible.
- 2- L'affaiblissement sur la liaison mobile - tête humaine à une distance d_2 , est représenté par la relation III.9 et la figure III.7, est devenue très importants au-delà de quelques millimètres.
- 3- Le SAR total du corps humain causé par le mobile et l'antenne est donné par la relation III.24, est représenté par la figure III.9, malgré que le champ électromagnétique émis par l'antenne est plus forte que seul du mobile, mais on trouve que le SAR causé par le mobile est plus grand que le SAR causé par l'antenne, ceci justifie l'absorption d'une grande quantité de l'énergie émise par le mobile par la tête humaine, cette quantité peut s'ajouter à l'énergie émise par l'antenne.
- 4- Une formulation unifiée est développée (relation III.19), et permet de prendre en compte l'exposition simultanée aux champs électromagnétiques reçus par le corps humain.

Les résultats obtenus à partir de cette étude dont le but est de mieux comprendre ce problème et de prévenir aux dangers probables.

Une antenne de téléphonie mobile émet continuellement un signal de base dont l'intensité augmente lorsqu'elle relaie des conversations avec des téléphones portables. Son activité est donc plus forte en journée et en soirée que pendant la nuit. Au départ de l'antenne, la puissance de rayonnement (émission) est bien plus grande que celle d'un téléphone portable. Mais, étant donné son éloignement, les champs électromagnétiques mesurés chez les habitants les plus proches sont très faibles (de l'ordre de 1 à 2 volts/mètre).

CONCLUSION GENERALE

Un téléphone portable est beaucoup moins puissant qu'une antenne, et il émet de manière discontinue. Mais lors d'une conversation, il se trouve directement contre l'oreille de l'utilisateur, si bien que le rayonnement subi au niveau de la tête est bien plus important que celui de l'antenne.

Les téléphones mobiles sont des appareils radio de faible énergie qui transmettent et réceptionnent des rayonnements micro-ondes à des fréquences d'environ 900 MHz à 1800 MHz. une partie de l'énergie contenue dans les ondes radio émises par les téléphones mobiles est absorbée par la tête de l'utilisateur, principalement dans les tissus superficiels. Les directives en matière d'exposition qui concernent les téléphones mobiles font donc appel à la notion d'énergie absorbée par une petite masse de tissus de la tête. La fixation des directives pour le SAR est utile pour indiquer au public quel niveau d'ondes radio ou d'autres ondes électromagnétiques émises par les appareils électriques est sans danger.

Les communications individuelles matérialisées par le succès des téléphones portables Global System for Mobiles (GSM). Ce développement a entraîné directement une augmentation du nombre de personnes exposées, du temps d'exposition moyen, de la gamme de fréquences subie et globalement de la quantité de rayonnements absorbés. L'existence d'un faible risque pour la santé au niveau individuel pourrait alors se traduire par des conséquences non négligeables au niveau d'une population.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié le SAR et de la distribution de la température dans le modèle de la tête humaine exposé à un rayonnement de téléphone mobile à des fréquences de 900 MHz et 1800 MHz avec divers écart distances entre le téléphone mobile et la tête humaine.

Une distance de plus petit écart entre le téléphone mobile et la tête humaine conduit à des intensités plus élevées de champ électrique, SAR et la production de chaleur à l'intérieur de la tête humaine, ce qui augmente la température dans la tête humaine. Par ailleurs, on constate que la distributions de la température à la tête humaine induite par le rayonnement de téléphone mobile ne sont pas directement liés à la distribution de SAR en raison de l'effet de propriétés diélectriques, propriétés thermiques, la perfusion de sang et le profondeur de pénétration de l'énergie électromagnétique.

CONCLUSION GENERALE

Divers études réalisées sur des modèles simples de la tête humaine illustrent les effets des rayonnements électromagnétiques sur le corps humain. Des comparaisons avec les résultats obtenus par d'autres équipes de recherche avec d'autres méthodes de calculs et modèle simple de la tête humaine, apportent une certaine validation en l'absence de résultats expérimentaux.

Annexe I

Méthode des différences finies dans le domaine du temps (FDTD)

La méthode des différences finies dans le domaine de temps a été proposée pour la première fois en électromagnétisme par Kane Yee en 1966, et le terme « méthode des différences finies dans le domaine de temps » (Finite Difference Time Domain - FDTD) est utilisé pour la première fois par Allen Taflove en 1980. A son origine, cette méthode a été conçue pour modéliser des phénomènes de propagation d'onde. Les équations résolues sont les équations de Maxwell complètes :

$$\nabla_x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{I.1})$$

$$\nabla_x \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{I.2})$$

Dans cette méthode, les inconnues sont directement les champs électriques \vec{E} et magnétiques \vec{B} . Le principe consiste à approcher les dérivées spatiales (opérateurs divergence, gradient et rotationnel) et temporelles avec des différences finies en utilisant un schéma explicite : cela signifie que à chaque pas de temps, il est possible de calculer toutes les dérivées sans devoir inverser de matrices. Plus précisément, les dérivées temporelles et spatiales sont approchées avec des différences finies centrées. Les points où E et H sont calculés sont décalés d'un demi - pas, dans l'espace et dans le temps. A chaque demi - pas de temps on met à jour les valeurs de E et de H alternativement, de la manière suivante :

- 1- Calcul de $\vec{H}(t + \frac{1}{2}\Delta t)$ en fonction de $\vec{E}(t)$ et de $\vec{H}(t - \frac{1}{2}\Delta t)$
- 2- Calcul de $\vec{E}(t + \frac{1}{2}\Delta t)$ en fonction de $\vec{E}(t)$ et de $\vec{H}(t + \frac{1}{2}\Delta t)$

ANNEXES

En utilisant une grille uniforme en la coordonnées Cartésiennes : $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$, les indices dans les directions x, y, z sont i, j, k ; le pas de temps est Δt et donc, le temps est: $n.\Delta t$. En appliquant l'approximation des différences centrées, on a :

$$\nabla_x \bar{E}^i = -\mu_0 \frac{\partial \bar{H}^i}{\partial t} \quad (\text{I.3})$$

$$\nabla_x \bar{H}^i = \varepsilon_0 \frac{\partial \bar{E}^i}{\partial t} \quad (\text{I.4})$$

Les paramètres diélectriques ε , μ et sont σ indépendant du temps, donc les deux équations précédentes devient comme suit dans le système (x, y, z).

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (\text{I.5})$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (\text{I.6})$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (\text{I.7})$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (\text{I.8})$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (\text{I.9})$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (\text{I.10})$$

E_x, E_y, E_z et H_x, H_y, H_z sont les composants de \vec{E} et \vec{H} respectivement.

ANNEXES

En utilisant une grille uniforme en la coordonnées cartésiennes: $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$, les indices dans les directions x, y, z sont i, j, k; le pas de temps est Δt et donc, le temps est $n \cdot \Delta t$. En appliquant l'approximation des différences centrées, on a :

$$\frac{\partial E_y(x, y, z, t)}{\partial x} = \frac{E_y^n(i+1/2, j, k) - E_y^n(i-1/2, j, k)}{\Delta x} \quad (\text{I.11})$$

$$\frac{\partial E_y(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{E_y^{n+1/2}(i, j, k) - E_y^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} \quad (\text{I.12})$$

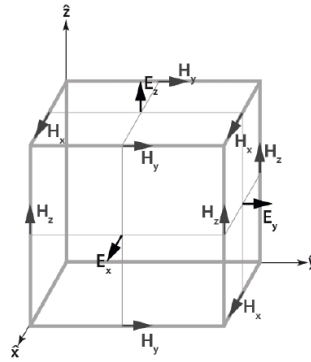
On calcul trois composants de E et de H :

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}(i+1/2, j, k) &= A_{i+1/2, j, k} \cdot E_x^n(i+1/2, j, k) \\ &+ B_{i+1/2, j, k} [H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) - H_z^{n+1/2}(i+1/2, j-1/2, k)] \\ &+ B_{i+1/2, j, k} [H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k-1/2) - H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2)] \end{aligned} \quad (\text{I.13})$$

$$\begin{aligned} H_x^{n+1/2}(i, j+1/2, k+1/2) &= H_x^{n-1/2}(i, j+1/2, k+1/2) \\ &+ \frac{\Delta t}{\mu \delta} [E_y^n(i, j+1/2, k+1) - E_y^n(i, j+1/2, k)] \\ &+ \frac{\Delta t}{\mu \delta} [E_z^n(i, j, k+1/2) - E_z^n(i, j+1, k+1/2)] \end{aligned} \quad (\text{I.14})$$

$$\begin{aligned} \text{Où} \quad A_{i, j, k} &= 1 - \frac{\sigma(i, j, k)}{\varepsilon(i, j, k)} \\ B_{i, j, k} &= \frac{\Delta t}{\varepsilon(i, j, k) \delta} \end{aligned} \quad (\text{I.15})$$

Les autres composantes de E et H sont calculées de manière similaire.



Cellule de Yee, représentant les points où E et H sont calculés.

ANNEXES

Annexe II

Expression des champs électromagnétiques :

Les expressions des champs électromagnétiques dans un milieu à pertes peuvent être obtenir par la résolution des équations de Maxwell :

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.01})$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.02})$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{II.03})$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II.04})$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (\text{II.05})$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II.06})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{II.07})$$

Et la forme du champ \vec{E} est de la forme:

$$\vec{E} = E_0 \cdot e^{j\omega t} \quad (\text{II.08})$$

Avec : $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi 10^9}$ F/m, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m

$$\text{Donc : } \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \sigma \vec{E} + \varepsilon(j\omega)E_0 e^{j\omega t}$$

$$\text{rot } \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega \varepsilon \vec{E} = \sigma \vec{E} + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}$$

$$\text{rot } \vec{H} = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r}\right) \vec{E}$$

$$\text{rot } \vec{H} = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r}\right) \vec{E} \quad (\text{II.09})$$

Et à partir de l'équation (II.1) on a :

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Donc : } \text{rot } .\text{rot } \vec{E} = \text{grad } .\text{div } \vec{E} - \Delta \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \vec{B}$$

$$\Delta \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \vec{B}$$

$$\Delta \vec{E} = \mu \frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \vec{H}$$

à partir de l'équation (II.9) :

$$\Delta \vec{E} = \mu \frac{\partial}{\partial t} \left[j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r} \right) \vec{E} \right]$$

$$\Delta \vec{E} = j\omega \mu \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r} \right) \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\Delta \vec{E} = j\omega^2 \mu \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r} \right) \vec{E}$$

Donc :

$$\Delta \vec{E} - \omega^2 \mu \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(-1 + j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r} \right) \vec{E} = 0 \quad (\text{II.11})$$

$$\text{La solution est de la forme : } f\left(t - \frac{z}{v}\right) = f(t - kz) \quad (\text{II.12})$$

$$\text{Donc : } E(z, t) = E_0 \exp[j(\omega t - kz)] \quad (\text{II.13})$$

$$\text{Avec : } k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r} \right) = \omega^2 \mu \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(-1 + j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r} \right)$$

$$k^2 = j\omega \mu (\sigma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r) \quad (\text{II.14})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0 \left(\varepsilon' - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) = \varepsilon_0 (\varepsilon' - j\varepsilon'') \quad (\text{II.15})$$

ANNEXES

Pour calculer la permittivité complexe é partir de l'équation (II.9):

$$\text{rot } \vec{H} = j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r \left(1 - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_r}\right) \vec{E}$$

On peut écrire :

$$\text{rot } \vec{H} = j\omega\varepsilon_0\varepsilon_d \vec{E} \quad (\text{II.16})$$

à condition de poser:

$$\varepsilon_d = \varepsilon_r \left(1 - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_r}\right) = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (\text{II.17})$$

Le courant de conduction est inclus dans la partie imaginaire de la permittivité complexe qui s'écrit encore:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon' - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (\text{II.18})$$

La partie imaginaire de ε_d proportionnelle à σ rend compte des pertes dans le milieu.

Un paramètre souvent utilisé comme mesure de ces pertes est le rapport de la partie imaginaire sur la partie réelle de l'équation précédente, on tangente de l'angle de perte :

$$\text{tg } \theta_p = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_r} \quad (\text{II.19})$$

L'expression des champs dans l'hypothèse d'une onde plane uniforme linéairement polarisée incident se propage le long de la direction Z.

Il existe deux solutions orthogonales.

$$\frac{E_x}{H_y} \quad \text{et} \quad \frac{E_y}{H_x}$$

à partir de ces dernières, l'expression du champ électrique est donnée par la relation :

$$E_y(z,t) = E_0 \exp[j(\omega t - kz)] \quad (\text{II.20})$$

ANNEXES

Et la constante de propagation est définie comme :

$$k^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(1 - \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r}\right) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \cdot \varepsilon_d \quad (\text{II.21})$$

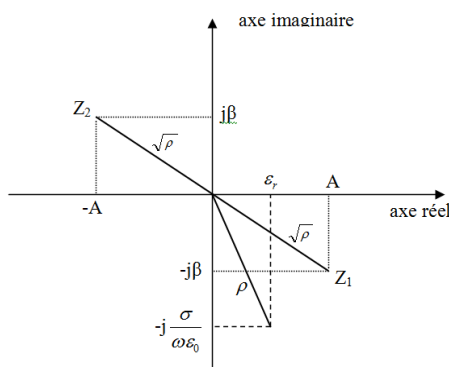
Ici la constante de propagation est complexe comme ε_d

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}} \quad (\text{II.22})$$

$$k = \sqrt{j \omega \mu (\sigma + j \omega \varepsilon)} \quad (\text{II.23})$$

Pour calculer la racine carré d'un nombre complexe Z , il est commode de passer en coordonnées polaires (ρ, θ) comme indiqué sur la figure suivante posons:

$$Z = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (\text{II.24})$$



Le module ρ et l'argument θ sont donnés par les relations :

$$\rho = \sqrt{\varepsilon_r^2 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}\right)^2} \quad (\text{II.25})$$

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (\text{II.26})$$

\sqrt{z} à pour module $\sqrt{\rho}$ et pour argument $\frac{\theta}{2} + n\pi$ on trouve deux racines Z_1 et Z_2 .

$$Z_1 = \sqrt{\rho} \cdot \exp\left(-j \frac{\theta}{2}\right) = A - jB \quad (\text{II.27})$$

ANNEXES

$$Z_2 = \sqrt{\rho} \cdot \exp(-j\frac{\theta}{2} + \pi) = -A + jB \quad (\text{II.28})$$

En déduis deux valeurs possibles pour k.

$$k_1 = \frac{\omega}{c}(A - jB) = B - j\alpha \quad (\text{II.29})$$

$$k_2 = \frac{\omega}{c}(-A + jB) = -B + j\alpha \quad (\text{II.30})$$

La solution $k_1 = \beta - j\alpha$ correspond à l'onde directe, ce que l'on montre en reportant cette valeur dans l'expression du champ électrique:

$$E_y^+(z,t) = E_0 \exp[\omega t - (\beta - j\alpha)z] \quad (\text{II.31})$$

$$E_y^+(z,t) = E_0 \exp(-\alpha z) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad (\text{II.32})$$

La constante de propagation β est égale à la partie réelle de k_1 .

L'amplitude du champ s'amortit exponentiellement, avec un coefficient α égal à la partie imaginaire de k_1 .

Le champ magnétique : pour commodité nous l'écrivons sous la forme :

$$\vec{k} \wedge \vec{E} = \mu_0 \omega \vec{H} \quad (\text{II.33})$$

Le vecteur d'onde possède uniquement une composante k_z . Le développement du produit vectoriel donne :

- pour une solution $\frac{E_y}{H_x}$: $k_z E_y = -\mu_0 \omega H_x$ (II.34)

- pour une solution $\frac{E_x}{H_y}$: $k_z E_x = \mu_0 \omega H_y$ (II.35)