

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Université Badji Mokhtar - Annaba-



Faculté des Sciences  
Département de Biologie  
Laboratoire : Écologie des systèmes terrestres et aquatiques



Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Docteur  
Filière : Biologie.  
Spécialité : Biodiversité, Evolution et Ecologie de la Santé.

Etude des effets des ondes électromagnétiques sur la santé  
humaine : impact sur l'efficacité des médicaments

---

**Présentée par :**  
Melle. SAILI Linda

---

**Soutenue publiquement le 22/02/2017 devant le Jury :**

Pr. BAIRI Abdelmadjid  
Pr. BOUSLAMA Zihad  
Pr. Hafedh Abdelmelek  
Dr. LAMARA Ali  
Dr. BELABED Adnene Ibrahim

**Président**  
**Encadreur**  
**Co-encadreur**  
**Examineur**  
**Examineur**

Université Badji Mokhtar – Annaba  
Université Badji Mokhtar – Annaba  
Université de Bizerte – Jarzouna, Tunis  
Ecole Supérieure Vétérinaire d'Alger  
Université Badji Mokhtar – Annaba

2016/2017

*« Dans un domaine de recherche en pleine expansion comme la biologie, on constate que toute avancée des connaissances génère autant d'interrogations qu'elle apporte de réponses. »*

**Pierre Joliot**

## Dédicaces

---

*A ma très chère soeur **Lila** et sa fille **Sérine**.*

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Malgré la distance, vous êtes toujours dans mon cœur. Je vous remercie pour votre hospitalité sans égal et votre affection si sincère. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

*A mes très chers frères **Karim, Nacer, Mohammed, Salah, Lyes et Hamouche**.*

Présents dans tous mes moments d'examens par leur soutien moral et les belles surprises sucrées. Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité. Je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.

*A mes belles sœurs **Karima et Nadia** et leurs petits anges **Mélina, Maya, Rym et Sami**.*

Que dieu protège ces petits anges qui illuminent notre vie.

*A mes chères ami(e)s*

**Nesrine** et ses sœurs, **Imene, Magda, Ibtissem, Manel, Rym, Ines, Souad, Sara, Hadjer**, veuillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection, je vous aime très fort.

## Remerciements

---

### ***A notre directrice de Thèse, Pr. Bouslama Zihad***

En acceptant d'être directeur de thèse, vous m'avez permis de poursuivre dans la voie de la recherche. Je vous suis reconnaissante de la confiance que vous m'accordez depuis plusieurs années et de votre soutien dans mon parcours. Pour tout ce que vous entreprenez, et la passion que vous transmettez, soyez assurée de mon admiration et de mes sincères remerciements.

### ***Au Pr. Hafedh Abdelmelek***

Je vous remercie infiniment d'avoir accepté de diriger ce travail tout au long de ces trois années. Vous m'avez fait découvrir le monde compliqué de la recherche et par vos compétences j'ai beaucoup appris. Votre énergie à monter les projets et votre sagesse m'impressionnent. Soyez assurée de ma reconnaissance pour le temps que vous m'avez consacré et de mes chaleureux remerciements.

### ***Aux membres du jury***

**Pr. BAIRI Abdelmadjid, Dr. LAMARA Ali et Dr. BELABED Adnene Ibrahim**, je vous remercie d'avoir accepté d'être membre de ce jury. Votre expérience et le regard que vous porterez sur ce travail m'apporteront beaucoup. Trouvez ici le témoignage de ma respectueuse considération.

### ***A tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à cette thèse.***

Je remercie mon amie, ma sœur **Amina Azzouz** avec qui j'ai partagé les plus beaux souvenirs à Tunis, à sa tante **Fatma Boulares** qui nous a accueilli tout le long de notre séjour à Bizerte.

Je remercie mon meilleur ami **Amine**, ma sœur **Khansa** et mon ami **Bachir**, je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des frères, sœurs et des amis sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous

avons passés ensemble et nos éclats de rires, je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur que dieu vous protège, je vous aime très fort.

Je remercie toute l'équipe du laboratoire d'Ecologie des Systèmes Terrestres et Aquatiques, pour tous les délires et les bons moments que nous avons partagés ensemble (**Amine, Kenza, Donia, Wassim, Raouf, Akrem, Kamila, Mona, Selma, Souad, Khawla, Moufida, Tahar...**) je vous aime très fort que dieu préserve notre amitié.

***Je remercie toute l'équipe du laboratoire de physiologie intégrée de Bizerte,*** spécifiquement Mr. Azib Bachir à qui j'exprime toute ma reconnaissance. Merci pour votre disponibilité et le temps que vous m'avez consacré.

### ***A ma famille***

A mes parents, ma raison de vivre, je les remercie pour leurs prières qui m'ont toujours protégé, pour leur soutien moral, pour leur présence qui illumine ma vie. Merci de m'avoir toujours soutenue dans mes démarches. Merci pour votre affection et tout ce que vous m'apportez.

## **Etude des effets des ondes électromagnétiques sur la santé humaine : impact sur l'efficacité des médicaments**

### **Résumé :**

De nombreuses craintes sont aujourd'hui formulées quant à l'innocuité des champs de radiofréquences sur la santé. Ce travail de thèse porte à étudier les effets d'une exposition aigue aux ondes WIFI (2,45 GHz/ 1h) sur l'activité cardiaque, la pression artérielle, la glycémie et l'efficacité de certains médicaments. Dans la première partie, nous avons étudié les changements de l'électrocardiogramme et la pression artérielle sous une exposition aigue aux RF (2,45 GHz/ 1h) chez des lapins Albinos. Les antennes de WIFI ont été placées à 25 cm côté droit près du cœur. L'exposition aiguë des lapins au WIFI provoque une augmentation de la fréquence cardiaque (+ 22%) et de la pression artérielle (+ 14%). Par ailleurs, l'analyse de l'ECG a révélé que le WIFI induit une augmentation combinée de l'intervalle P-R et l'intervalle Q-T. En revanche, la même exposition n'a pas réussi à modifier l'amplitude maximale et les ondes P. Après l'injection par voie intraveineuse de la dopamine (0,50 ml/kg) et de l'adrénaline (0,50 ml/kg) sous l'exposition aigue aux RF, nous avons remarqué que le WIFI altère l'action des catécholamines sur le cœur et la pression artérielle. Ces résultats suggèrent pour la première fois, que l'exposition au WIFI affecte le rythme cardiaque, la pression artérielle, et l'efficacité des catécholamines sur les maladies cardiovasculaires ; ce qui indique que les radiofréquences peuvent agir directement et / ou indirectement sur le système cardio-vasculaire. D'autre part, L'exposition aiguë des lapins aux RF (2,45 GHz/ 1h) induit un état de diabète-like. En outre, après l'injection d'insuline par voie intraveineuse (0,1 ml/kg) sous exposition aiguë aux RF nous avons constaté que, le WIFI modifie l'action physiologique de l'insuline par rapport aux témoins. Ces résultats suggèrent pour la première fois, que WIFI altère l'efficacité de l'insuline.

**Mots clés :** WIFI, La fréquence cardiaque, La pression artérielle (PA), Électrocardiogramme (ECG), L'efficacité des catécholamines, dopamine, adrénaline, insuline.

## **Abstract**

Many fears are expressed today about the safety of the radio frequencies on health. This thesis deals with studying the effects of acute exposure to WIFI signals (2.45 GHz /1h) on cardiac activity, blood pressure, blood glucose and effectiveness of some medications. In the first part, Electrocardiogram and arterial pressure measurements were studied under acute exposures to WIFI (2.45 GHz) during one hour in adult male rabbits. Antennas of WIFI were placed at 25 cm at the right side near the heart. Acute exposure of rabbits to WIFI increased heart frequency (+22%) and arterial blood pressure (+14%). Moreover, analysis of ECG revealed that WIFI induced a combined increase of P-R and Q-T intervals. By contrast, the same exposure failed to alter maximum amplitude and P waves. After intravenously injection of dopamine (0.50 ml/kg) and epinephrine (0.50 ml/kg) under acute exposure to RF we found that, WIFI alter catecholamines (dopamine, epinephrine) action on heart variability and blood pressure compared to control. These results suggest for the first time, as far as we know, that exposure to WIFI affect heart rhythm, blood pressure, and catecholamines efficacy on cardiovascular system; indicating that radiofrequency can act directly and/or indirectly on cardiovascular system. Furthermore, acute exposure of rabbits to RF (2.45GHz/1 h) induced a diabetes- like status. Moreover, after intravenously injection of insulin (0.1 ml/kg) under acute exposure to RF we found that, WIFI alter the physiological action of insulin compared to controls. These results suggest for the first time, as far as we know, that WIFI alter the efficacy of insulin.

**Keywords:** WIFI, heart rate (HR), Arterial pressure (PA), Electrocardiogram (ECG), Efficacy of catecholamines, Dopamine, Epinephrine, Insulin.

## المخلص

في الآونة الاخيرة أعرب عن العديد من المخاوف بشأن تأثير الموجات الكهرومغناطيسية على صحة الانسان. تتضمن هذه الاطروحة دراسة تأثير التعرض الحاد لموجات الواي فاي (2.45 GHZ) على نشاط القلب، ضغط الدم، التحلون وفعالية بعض الادوية. في الجزء الاول قمنا بدراسة تغيرات تخطيط القلب و ضغط الدم لدى الارانب البيضاء المعرضة بشكل حاد للموجات الكهرومغناطيسية حيث وضعت هوائيات الواي فاي على بعد 25 سم من الجانب الايمن للحيوان، ف سجلنا زيادة في معدل ضربات القلب (+22%) و ارتفاع في ضغط الدم (+14%) كما ان تحليل نتائج تخطيط القلب تحت التعرض لموجات الواي فاي سمح لنا بتسجيل زيادة في كل من زمن المجالين Q-T و P-R بينما لم نسجل اي تغيير في الموجة P. بعد الحقن الوريدي لكل من الدوبامين (0.50 مل/كغ) و الادرينالين (0.50 مل/كغ) تحت التعرض لأشعة الواي فاي لاحظنا ان هذه الاخيرة تؤثر على فعالية هذه الكاتيكولامينات على نشاط القلب و ضغط الدم. تشير هذه النتائج للمرة الاولى ان التعرض لموجات الواي فاي يؤثر على معدل ضربات القلب و ضغط الدم وفعالية الادوية مشيرا الى ان الطاقة تؤثر بطريقة مباشرة / او غير مباشرة على نظام القلب والاعوية الدموية. من جهة اخرى التعرض الحاد للترددات اللاسلكية (2.45GHZ) يؤدي الى حالة مشابهة لداء السكري كما ان الحقن الوريدي للأنسولين (0.1 مل/كغ) تحت التعرض لهذه الموجات الكهرومغناطيسية يؤدي الى تثبيط عمل للأنسولين.

**الكلمات المفتاحية:** الواي فاي، تخطيط القلب، ضغط الدم، التحلون، فعالية الادوية، الادرينالين، الدوبامين، الأنسولين.

## Liste des Figures

<b>Figure 1 :</b>	Représentation des champs constitutifs d'une onde électromagnétique (cas d'une onde plane) .....	19
<b>Figure 2 :</b>	Illustration du spectre électromagnétique.....	20
<b>Figure 3 :</b>	Exemple d'estimation de DAS par FDTD, sur un rat soumis à un champ de 1800 MHz.....	27
<b>Figure 4 :</b>	Exemple de différents types de thérapies utilisées dans le domaine médical avec leurs fréquences et/ou longueurs d'ondes respectives... ..	31
<b>Figure 5 :</b>	Pénétration des ondes électromagnétiques dans le corps humain en fonction de leur fréquence (d'après Roger Santini) .....	33
<b>Figure 6 :</b>	Comportement électrique de la membrane cellulaire.....	44
<b>Figure 7 :</b>	Modèle biologique utilisé dans cette étude ( <i>lapin Albinos</i> ) .....	51
<b>Figure 8 :</b>	Représentation du système d'exposition WIFI.....	52
<b>Figure 9 :</b>	Représentation de dispositif d'enregistrement de la fréquence cardiaque.....	54
<b>Figure 10 :</b>	Représentation de l'enregistreur graphique de la pression artérielle (BD11 enregistreur flatbed 1 voie) .....	56
<b>Figure 11 :</b>	Les effets de l'exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h) sur l'intervalle R-R ( $\Delta t$ R-R) et ( $\Delta t$ R-R WIFI) .....	60
<b>Figure 12 :</b>	Les effets de l'exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h) sur les intervalles P-R ( $\Delta t$ P-R) et ( $\Delta t$ P-R WIFI), intervalles Q-T ( $\Delta t$ Q-T) et ( $\Delta t$ Q-T WIFI) .....	61
<b>Figure 13 :</b>	Les effets de l'exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h) sur l'onde P de l'électrocardiogramme chez le lapin ( $\Delta t$ P) et ( $\Delta t$ P WIFI)... ..	61
<b>Figure 14 :</b>	Effets d'une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h) sur : (A) les BPM du groupe témoins et les BPM du groupe WIFI, (B) Max témoins et Max WIFI .....	62
<b>Figure 15 :</b>	Effets d'une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h) sur : la pression artérielle PA du lot témoins et PA du lot WIFI.....	63
<b>Figure 16 :</b>	Effets d'une injection unique de dopamine sur les composantes de l'électrocardiogramme chez le lapin sous une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1h) .....	68
<b>Figure 17 :</b>	Effets de l'injection de la dopamine sur les battements par minute (BPM) et de l'amplitude maximale (max) chez des lapins exposés aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h) .....	68
<b>Figure 18 :</b>	Effets d'une injection unique de la dopamine sur la pression artérielle après une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz/1h). .....	69
<b>Figure 19 :</b>	Effets d'une injection unique d'adrénaline sur les composantes de l'électrocardiogramme chez le lapin sous une exposition aiguë au WIFI (2,45 GHz, 1 h) .....	70

<b>Figure 20 :</b>	Effets de l'injection d'adrénaline sur les battements par minute (BPM) et de l'amplitude maximale (Max) chez des lapins sous WIFI (2,45 GHz, 1 h) .....	71
<b>Figure 21 :</b>	Effets d'une injection unique de l'adrénaline sur la pression artérielle après une exposition aigue aux ondes WIFI (2,45 GHz/1h) .....	71
<b>Figure 22 :</b>	Effets d'une exposition aigue aux ondes WIFI (2, 45 GHz pendant 1 h) sur la glycémie. ....	76
<b>Figure 23 :</b>	Effets d'une unique injection d'insuline sous l'exposition aigue aux ondes WIFI (2,45 GHz, pendant 1 h).....	76
<b>Figure 24 :</b>	Schéma de synthèse de l'altération de l'efficacité thérapeutique des médicaments par les OEM (WIFI).....	84

#### **Liste des tableaux**

<b>Tableau 1 :</b>	La classification des fréquences du spectre électromagnétique.....	22
<b>Tableau 2 :</b>	Niveau d'exposition aux rayonnements électromagnétiques dans le domaine des Hyperfréquences.....	29

## Liste des abréviations

**AFSSET** : Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail.

**CEM** : Champs Electromagnétiques.

**CEM** : Champs électromagnétiques.

**CEM-EBF** : Champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences.

**CMS** : Camps Magnétique Statique.

**DAS (SAR)** : Débit d'absorption spécifique.

**ECG** : Electrocardiogramme.

**ELF**: Extremely low frequency.

**EMF** : Electromagnetic Field.

**EMW** : Electromagnetic Wave (Ondes électromagnétiques).

**FC** : fréquence cardiaque.

**GSM** : Global System for Mobile Communications.

**HF** : Hyperfréquences.

**HSP** : Heat Shock Proteins.

**Hz** : Hertz.

**ICNIRP** : Commission internationale de protection contre les rayonnements ionisants.

**IEEE** : Institutes of Electrical and Electronics Engineers.

**INRS** : Institut National de Recherche et de Sécurité.

**IV** : Intraveineuse.

**OEM** : Ondes Electromagnétiques.

**OMS (WHO)** : Organisation Mondial de la Santé.

**PA** : Pression Artérielle.

**RBC** : Red Blood Cell.

**RF** : Radiofréquences.

**SMF** : Static magnetic field.

**T** : Tesla.

**WI-FI** : Wireless Fidelity.

**WiMAX** : Worldwide Interoperability for Microwave Access.

**WLAN** : Wireless local area network

## Sommaire

<b>Dédicaces</b>	
<b>Remerciement</b>	
<b>Liste des figures</b>	
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Liste des Abréviations</b>	
<b>Résumés</b>	
<b>Introduction générale</b> .....	16
<b>Chapitre I : Synthèse bibliographique</b> .....	19
<b>Partie 1 : Caractéristiques des ondes électromagnétiques</b> .....	19
1. Le champ électromagnétique.....	19
1.1. Généralités .....	19
1.2. Le spectre électromagnétique.....	20
1.3. Sources d'exposition aux champs électromagnétiques.....	21
2. Définition et caractéristiques du WIFI.....	23
2.1. Définition.....	23
2.2. Caractéristiques techniques.....	24
2.3. Applications et usages du WIFI.....	24
2.4. Technologies WIFI internet par rapport à la téléphonie mobile.....	25
3. Paramètres importants.....	25
3.1. Le débit d'absorption spécifique (DAS).....	25
3.1.1. Evaluation du débit d'absorption spécifique.....	26
a. Technique numérique.....	26
b. Technique expérimentale .....	27
3.2. Puissance et mode d'exposition.....	27
4. Normes d'exposition aux champs hyperfréquences.....	28
<b>Partie 2 : Interaction des ondes électromagnétiques avec le vivant</b> .....	30
1. interactions entre onde et matière.....	30
1.1. Les effets thermiques .....	31
1.2. Les effets non thermiques.....	31
2. Pénétration des ondes électromagnétiques dans un système biologique....	32
3. Les effets biologiques des ondes électromagnétiques.....	33
3.1. Effets sur le comportement et la mémoire .....	33
3.2. Effets sur la fonction endocrinienne .....	35
3.3. Effets sur le métabolisme .....	37
3.4. Effets sur l'activité cardiaque et la pression artérielle .....	38
3.5. Effets sur la reproduction et la fertilité .....	39
3.6. Effets sur la fonction immunitaire.....	40
3.7. Effets sur la neurochimie .....	40
3.8. Effet sur le sommeil et la sécrétion de mélatonine.....	41
3.9. Effets sur les cellules du sang .....	42
3.10. Effets sur le système cellulaire et moléculaire.....	43
3.11. Radiofréquence et protéine de stress.....	45
3.12. Effets sur le stress oxydant et l'ADN.....	45
4. Hypersensibilité électromagnétique.....	47

5. Etudes réalisées sur des plantes .....	48
<b>Chapitre II : Matériel et méthodes .....</b>	<b>51</b>
I. Matériel et Méthodes.....	51
I.1. Model biologique.....	51
I.2. Système d'exposition au WIFI.....	51
I.3. Mode opératoire.....	53
I.4. Etude des effets des ondes WIFI sur l'activité cardiaque, la pression artérielle et l'efficacité des catécholamines (Dopamine et Adrénaline) .....	55
I.4.1. Exposition et traitement des animaux .....	55
I.4.2. Etude de l'effet de l'administration des catécholamines sur la pression artérielle sous un environnement WIFI chez le lapin.....	55
a. Dispositif expérimental et principe de la méthode.....	53
I.4.3. Enregistrements de la fréquence chez le lapin .....	56
a. Dispositif expérimental.....	55
I.5. Etude des effets des ondes WIFI sur la glycémie et l'efficacité de l'insuline.....	57
I. 5.1. Traitement des animaux.....	57
I.5.2. Etude de la variation de la glycémie chez le lapin.....	57
a. Dispositif expérimental et principe de la méthode.....	57
II. Etude statistique.....	58
<b>Chapitre III : Etude des effets d'une exposition aiguë aux ondes WIFI sur la variabilité du rythme cardiaque et de la pression artérielle.....</b>	<b>59</b>
1. Introduction.....	59
2. Objectifs .....	60
3. Résultats.....	60
3.1. Effets d'une exposition aiguë au WIFI (2,45 GHz, 1 heure) sur l'ECG chez le <i>lapin Albinos</i> .....	60
3.1.1. Effet de l'exposition aux ondes WIFI sur l'intervalle R-R .....	60
3.1.2. Effet de l'exposition aux ondes WIFI sur les intervalles P-R et Q- T.....	60
3.1.3. Effet de l'exposition aux ondes WIFI sur l'onde P .....	61
3.2. Effets d'une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 heure) sur les battements du cœur et le maximum d'amplitude .....	62
3.3. Effets d'une exposition aiguë aux ondes WIFI sur la pression artérielle....	62
4. Discussion .....	63
5. conclusion.....	65
<b>Chapitre IV : Effets de l'exposition aiguë aux ondes WIFI sur l'efficacité des catécholamines (Dopamine, Adrénaline) .....</b>	<b>66</b>
1. Introduction .....	66
2. Objectifs.....	67
3. Résultats.....	67
3.1. Effets de l'administration de la dopamine sur l'activité cardiaque et la pression artérielle sous un environnement magnétique (WIFI).....	67
3.1.1. Effets d'une injection de dopamine sur les composantes de l'ECG sous un environnement magnétique (WIFI, 2,45 GHz/1h) .....	67
3.1.1.1. Effets d'une injection de dopamine sur les battements du cœur par minute et le maximum amplitude sous un environnement magnétique (WIFI)...	67
3.1.2. Effets d'une injection de dopamine sur la pression artérielle sous l'exposition aux ondes WIFI (2,45 GHz/heure) .....	69

3.2. Effet de l'administration de l'adrénaline sur l'activité cardiaque et la pression artérielle .....	69
3.2.1. Effets d'une injection de l'adrénaline sur les composantes de l'ECG sous l'exposition aux ondes WIFI (2,45 GHz/heure) .....	69
3.2.1.1. Effets d'une injection de l'adrénaline sur les battements cardiaque par minute et le maximum amplitude sous un environnement WIFI chez le lapin.....	70
3.2.2. Effets d'une injection de l'adrénaline sur la pression artérielle sous l'exposition aux ondes WIFI (2,45 GHz/heure) .....	70
4. Discussion .....	72
5. Conclusion.....	73
<b>Chapitre V : Effets des ondes électromagnétiques (WIFI) sur la glycémie et l'efficacité de l'insuline .....</b>	<b>74</b>
1. introduction.....	74
2. Objectifs.....	75
3. Résultat .....	75
3.1. Effets de l'exposition aigue aux ondes WIFI (2,45 GHz, pendant une heure) sur la glycémie chez le lapin.....	75
3.2. Effets d'une exposition aigue aux ondes WIFI (2,45 GHz, pendant une heure) sur l'efficacité de l'insuline chez le lapin.....	75
4. Discussion.....	77
5. Conclusion.....	78
<b>Discussion générale.....</b>	<b>79</b>
<b>Conclusion et perspectives.....</b>	<b>85</b>
<b>Référence.....</b>	<b>87</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>111</b>
<b>Article .....</b>	<b>119</b>

## Introduction générale

Les technologies sans fil font aujourd'hui partie de notre quotidien et évoluent sans cesse. Elles constituent à la fois un progrès social, eu égard aux nombreux services rendus, et une source d'inquiétude concernant leur impact sur notre environnement ou notre santé.

Si l'exposition aux champs électromagnétiques a toujours existé de part leurs sources naturelles (champ magnétique terrestre, rayonnement cosmique,...), c'est depuis les années 1900, avec la généralisation et l'expansion des usages de l'électricité que l'homme est exposé à de nombreux champs électromagnétiques artificiels, dans son environnement général (transport de l'électricité, transports en commun, appareils électroménagers,...) et dans ses activités professionnelles (procédés industriels, usages énergétiques,...) ce qui a conduit à l'apparition d'une nouvelle forme de pollution qui est la pollution électromagnétique (Santini et al., 2003).

Parmi les ondes électromagnétiques, caractérisées par leur fréquence et leur longueur d'onde, on distingue les rayonnements ionisants des rayonnements non ionisants, comprenant les ultraviolets, la lumière visible, les rayonnements infrarouges, les radiofréquences, les champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences (EBF) et les champs statiques.

La prévalence de l'ère de communication sans fil ne cesse de se développer avec l'essor de nouvelles technologies telles que le WIFI (Wireless-fidelity), dans les foyers, les écoles, les lieux de travail et les lieux publics. Cette technologie permet la transmission des données à travers un champ d'hyperfréquence de 2,4 GHz (Valberg et al., 2007).

En effet, parallèlement aux craintes générées par l'utilisation de la téléphonie mobile, un climat de suspicion face à d'éventuels risques sanitaires touche à présent les technologies WIFI : les appareils WIFI sont ils réellement sans danger pour la santé ?

Barnothy (1964) a réalisé une revue des travaux portant sur l'évaluation des effets biologiques des champs électromagnétiques. D'autres revues plus récentes, notamment Presman (1970), Adey (1993), Blank (1995a), Binhi (2002), Stavroulakis

(2003), portent sur des modèles biologiques extrêmement diversifiés, allant des organismes unicellulaires (Algues, bactéries...) aux mammifères, en passant par les invertébrés.

Plusieurs questions ont été proposées concernant les risques liés à l'exposition aux champs radiofréquences. En réponse aux préoccupations du public sur ces questions l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) a financé en 1996 un important projet international sur les CEM (Champs Electromagnétiques) au sein d'une coopération des groupes de travail, des chercheurs et des experts de différents pays du monde visent à évaluer les effets sanitaires et environnementaux liés à l'exposition aux champs électromagnétiques (WHO, 2006a).

Les résultats des recherches ont été publiés à la fois dans les littératures scientifiques et dans les rapports de L'OMS (WHO, 2006d). De même, l'OMS a publié également un certain nombre de rapports d'information concernant ce domaine (WHO, 2001, 2005a, b, 2006b, c).

Plusieurs études ont suggéré des effets biologiques possibles des champs magnétiques sur la santé humaine, quelques recherches ont démontré que l'exposition à des champs électromagnétiques 900 MHz diminue le nombre de neurones et provoque une altération neuronale dans le cortex, noyaux gris centraux, l'hippocampe et le cervelet chez les animaux (Mausset et al., 2001 ; Salford et al., 2003 ; Brillaud et al., 2007 ; Ammari et al., 2008).

Des troubles du sommeil ont été démontré chez certaines personnes vivant dans un environnement contenant des dispositifs WIFI (Santini et al., 2003 ; Abdel-Rassoul et al., 2007). D'autres publications ont mis en cause les RF (Radiofréquences) dans les étiologies du cancer (Lonn et al., 2004 ; Sadetzki et al., 2008), dans les perturbation d'immunité (Elekes et Thiroczy, 1995) et aussi les troubles cardiovasculaires (Gmitrov, 2007). De même Blank et Goodman (2004) ont montré que l'exposition aux ondes électromagnétiques (OEM) augmente le taux de sécrétion des hormones de stress.

Creasey et Goldberg (1993) ont montré une augmentation de la fréquence cardiaque chez les personnes qui travaillent autour des trains électriques (26 kV / m). En outre, Braun et al. (1998) ont rapporté que l'exposition à des signaux GSM pendant 35 min augmente la pression artérielle (+ 10%) chez des volontaires. Cai et al. (2006)

ont signalé que l'exposition des soldats au radar augmente le taux de changements de l'ECG. D'autres études ont montré que l'exposition aux champs magnétiques statiques cause l'hyperglycémie (Gorczyńska et Wegrzynowicz, 1989 ; Chernysheva, 1990).

Ben Salah et al. (2013) ont montré une perturbation dans le métabolisme glucidique après une exposition à des signaux WIFI conduisant à une installation d'un état de diabète-like. De nombreuses études ont montré une baisse de l'insuline plasmatique après l'exposition au champ magnétique (Sakurai et al., 2004 ; Chater et al., 2006 ; Elferchichi et al., 2010). Ainsi, les divers synthèses et rapports démontrent la nécessité de nouvelles connaissances afin de mieux appréhender les risques potentiels pour la santé des populations. La revue de la littérature montre des carences dans le domaine d'évaluation de l'interaction OEM/ Xénobiotiques et plus particulièrement OEM/ Médicaments.

Ce mémoire de thèse s'organise en trois grandes parties :

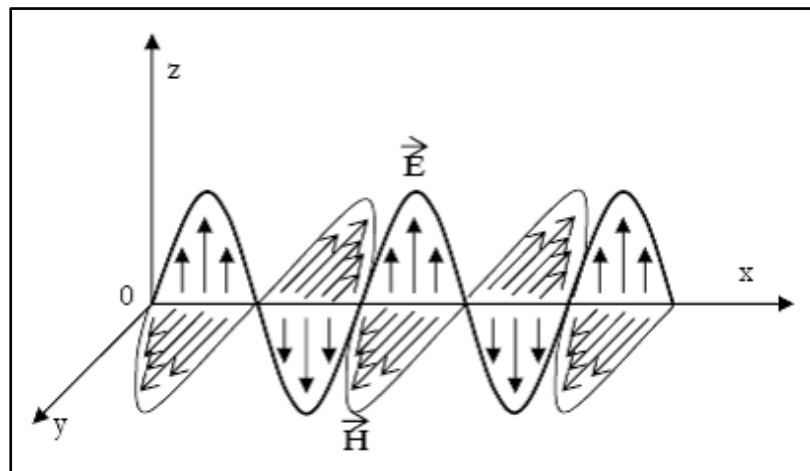
- Un chapitre synthèse bibliographique qui comprendra un état de l'art sur les interactions ondes électromagnétiques- cellules végétales et animales.
- Une présentation en quatre grands chapitres des résultats expérimentaux obtenus au cours de ce travail. Le deuxième chapitre consistera en un matériel et méthodes, qui permettra d'avoir une vue d'ensemble des méthodes techniques utilisées. Celui-ci s'accompagnera de la caractérisation du système d'exposition aux ondes WIFI. Ensuite, suivra un chapitre dédié à l'étude des effets des ondes WIFI sur l'activité cardiaque et la régulation de la pression artérielle. Dans le quatrième chapitre, nous avons étudié l'éventuelle altération de l'efficacité des catécholamines par les ondes électromagnétiques. Puis nous avons étudié les effets de l'exposition aigue aux radiations WIFI (2,45 GHz/1 heure) sur la glycémie et sur l'efficacité de l'insuline chez des *lapins Albinos* que nous allons présenter dans un cinquième chapitre.
- La dernière partie correspondra à la discussion générale de ces résultats, ainsi que les perspectives.

## Partie 1 : Caractéristiques des ondes électromagnétiques

### 1. Le champ électromagnétique

#### 1. 1. Généralités :

Une onde électromagnétique (EM) (**Figure 1**) peut être perçue comme une « vague » en mouvement, constituée de champs électrique et magnétique oscillants et perpendiculaires l'un à l'autre (Ahlbom et al., 2004).



**Figure 1** : Représentation des champs constitutifs d'une onde électromagnétique (cas d'une onde plane). E : variation spatiale du champ électrique à un instant donné. H : variation spatiale du champ magnétique à un instant donné. L'axe OX représente la direction de propagation de l'onde (Ahlbom et al., 2004).

Les ondes électromagnétiques s'étendent sur un ensemble continu de fréquence appelé spectre électromagnétique (**Figure 2**) et sont caractérisées par :

- leur longueur d'onde ( $\lambda$ , exprimée en mètre) : distance qui sépare les deux points correspondants d'oscillation qui se suivent. Elle caractérise en particulier la distance entre deux nœuds ou deux ventres d'une onde.
- leur fréquence ( $f$ , exprimée en Hertz) : définit le nombre d'oscillations en un point donné au cours d'une seconde.

La fréquence et la longueur d'onde sont reliées par la relation :

$\lambda = v/f$  avec  $\lambda$  = longueur d'onde (m),  $v$  = vitesse de propagation dans le milieu (m/s) et  $f$  = fréquence (Hz).

Suivant cette relation, plus la fréquence est élevée et plus la longueur d'onde est courte. Par exemple pour un four micro-ondes fonctionnant à 2,45 GHz,  $\lambda$  onde électromagnétique = 12,2 cm.

A toute onde électromagnétique est associée une particule, appelée photon, dont l'énergie est liée à la longueur d'onde par la relation :

$E = h f = h c/\lambda$  avec  $h$  = constante de Planck ( $6,62 \times 10^{-34}$  Joules seconde).

Les ondes électromagnétiques sont classées en deux catégories, en fonction de leur énergie et de leur fréquence : les rayonnements ionisants (rayons X, rayons  $\gamma$ , qui peuvent rompre les liaisons moléculaires) et les rayonnements non ionisants (ultraviolets ou UV, infrarouges ou IR, radiofréquences, basses fréquences). La limite entre ces deux rayonnements est  $\lambda = 10$  nm (quand  $\lambda < 10$  nm, les rayonnements sont dits ionisants).

### 1.2. Spectre électromagnétique

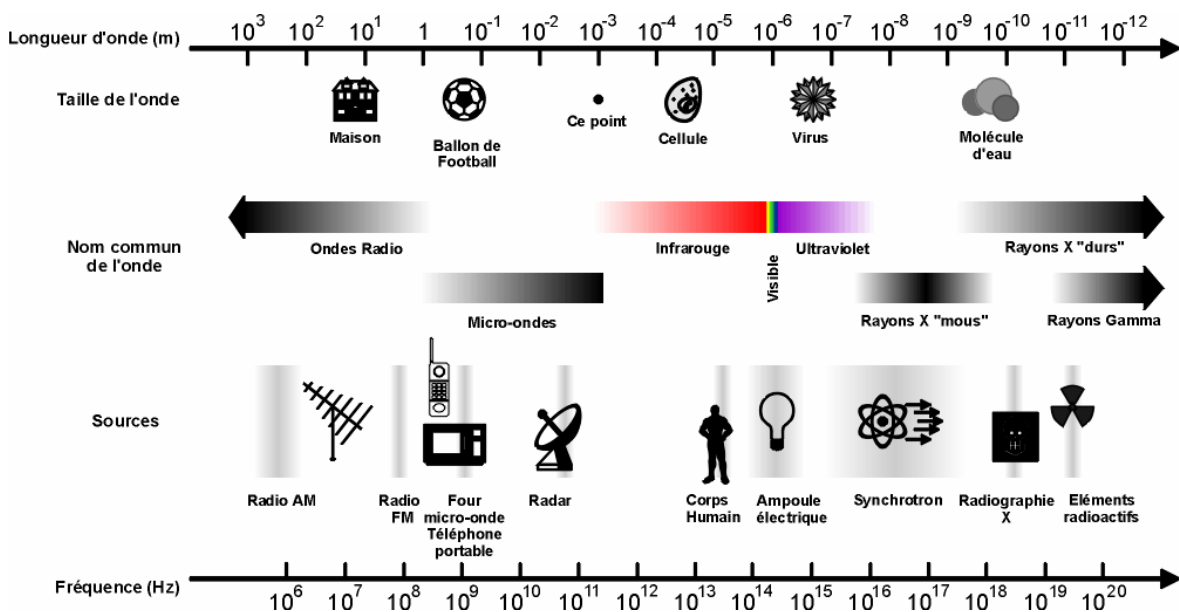


Figure 2 : Illustration du spectre électromagnétique (Crouzier, 2006).

Les champs de basses fréquences sont produits par les lignes électriques ainsi que les appareils électriques domestiques utilisés au quotidien (50 ou 60 Hz suivant les pays). Sur le spectre EM, on distingue ensuite les radiofréquences (RF), comprises entre 30 kHz et 300 GHz, terme global regroupant les RF à proprement parler (30 kHz à 300 MHz) ainsi que les micro-ondes (comprises entre 300 MHz et 300 GHz).

On considère en général que les RF (terme global) permettent la transmission des informations à distance. Elles sont à la base des communications sans fil. Les RF regroupent la plupart des applications radiotélévisées (bande AM, FM), la téléphonie mobile (GSM 900 MHz ou 1,8 GHz), les fours à micro-ondes (2,45 GHz) dont la fréquence est partagée par le WIFI mais pas à la même puissance. Toutes les RF dont la fréquence est supérieure à 300 MHz appartiennent à la famille des micro-ondes. Dans cette famille, les ondes sont rangées en catégories selon leurs longueurs d'ondes respectives. On évoque ainsi des ondes dites :

- Décimétriques entre 300 MHz ( $\lambda = 10$  dm) et 3 GHz ( $\lambda = 1$  dm)
- Centrimétriques entre 3 GHz ( $\lambda = 10$  cm) et 30 GHz ( $\lambda = 1$  cm)
- Millimétriques (MM) entre 30 GHz ( $\lambda = 10$  mm) et 300 GHz ( $\lambda = 1$  mm) (Combes, 1997).

À des fréquences plus élevées, on distingue les ondes infrarouges (IR), la lumière visible, puis les rayons ultraviolets (UV), X et  $\gamma$  (**Figure 2**).

Le tableau 1 représente la classification des fréquences du spectre électromagnétique.

### 1. 3. Sources d'exposition aux champs électromagnétiques

Au quotidien, les êtres vivants sont soumis à des champs électromagnétiques, certains étant d'origine naturelle, d'autres non. Les êtres vivants évoluent en permanence sur un aimant géant, puisqu'il existe un champ magnétique terrestre statique et relativement constant, de l'ordre de  $40 \mu\text{T}$ , qui sert notamment aux oiseaux et aux poissons pour s'orienter (Kato, 2006).

**Tableau 1** : la classification des fréquences du spectre électromagnétique (Crouzier, 2006).

Fréquence ou longueur d'onde	Gamme	Exemple d'applications
0 Hz	Champs statiques	Electricité statique
50 Hz	Extrêmement basses Fréquences	Lignes électriques et courant domestique
20 kHz	Fréquences intermédiaires	Ecrans vidéo, plaques à induction culinaires
88 - 107 MHz	Radiofréquences	Radiodiffusion FM
<b>300 MHz - 300 GHz</b>	<b>Hyper fréquences ou Micro-ondes</b>	<b>Téléphones analogiques (400-800 MHz) GSM (900-1800 MHz) UMTS (1900-2200 MHz) Four à micro-ondes (900-2450 MHz) Radar (3-100 GHz)</b>
300 GHz-10 <sup>5</sup> GHz	Infra-rouges	Détecteur anti-voil, télécommandes
10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup> GHz = 0,8-0,4 μm	Visible	Lumière, lasers
0,4-0,01 μm	Ultra-violets	Soleil, photothérapie
10 <sup>-1</sup> -10 <sup>-2</sup> μm	Rayon X	Radiologie
<10 <sup>-2</sup> μm	Rayon γ	Physique nucléaire

De manière plus ponctuelle, les éclairs produits lors des orages ainsi que les aurores boréales constituent une source d'exposition naturelle, mais sont relativement peu fréquents.

En plus de ces sources dites « terrestres », il existe une source d'exposition environnementale à des champs « extra-terrestres », lesquels proviennent des activités solaire et lunaire (Kato, 2006). Certaines bandes de fréquence, dont la lumière visible et les ondes radio, sont transmises à travers l'atmosphère, tandis que d'autres bandes sont totalement absentes, en raison d'un phénomène d'absorption des molécules de l'atmosphère à certaines fréquences.

Les nombreuses découvertes et avancées technologiques du XX<sup>ème</sup> siècle ont provoqué une multiplication des expositions à des sources artificielles. Elles sont retrouvées dans les circuits de distribution du courant (50 ou 60 Hz), les appareils électriques utilisés lors de la vie quotidienne (grille pain, aspirateur, sèche-cheveux, réfrigérateurs, plaques de cuisson électriques, etc...), les ondes radiotélévisées (80-

800 MHz), la téléphonie mobile (900 MHz et 1,8 GHz), les fours à micro-ondes (2,45 GHz), les communications sans fil (DECT : 1,8 GHz, WIFI : 2,45 GHz, sans oublier le Bluetooth, le WiMax), les systèmes radar (fréquences supérieures à 10 GHz : applications militaires, systèmes de transport intelligent), ainsi que dans les dispositifs de localisation et de détection (technologie RadioFrequency Identification).

Depuis une dizaine d'années environ, les réseaux locaux sans fil sont en pleine expansion. Ils offrent la possibilité à toute personne de pouvoir bénéficier d'un accès à l'information en étant mobile. De nombreuses entreprises, lieux publics (gares ferroviaires, bibliothèques, aéroports, universités) ont adopté ce type de réseaux.

Aujourd'hui, la majorité des réseaux locaux sans fil proposés aux usagers fonctionne dans la bande de fréquence de 2,45 GHz (technologie WIFI). Source de progrès, cette technologie atteint cependant ces limites, notamment en termes de débit proposé aux usagers.

L'essor des technologies de l'information et de la communication entraîne des besoins en débit toujours plus importants (télévision par internet en haute définition) et les fréquences employées ne permettent plus de répondre aux besoins des consommateurs. Aussi, pour faire face à ce problème et répondre à une demande toujours plus importante, les industriels sont en train de développer des appareils sans fil fonctionnant dans de nouvelles bandes de fréquences, autour de 60 GHz. Dans notre étude nous nous sommes intéressés uniquement aux ondes WIFI.

## **2. Définition et caractéristiques du WIFI**

### **2.1. Définition**

Le WIFI est une technique de réseau informatique sans fil mise en place pour fonctionner en réseau interne, devenu un moyen d'accès à haut débit à internet. Il est basé sur la norme IEEE 802.11 (ISO/CEI 8802.11) correspondant au standard international décrivant les caractéristiques d'un réseau local sans fil (WLAN).

La norme initiale IEEE 802.11 a fait l'objet de nombreuses évolutions. Les normes 802.11 a/b/g/h sont celles actuellement utilisées. Le WIFI peut fonctionner sur deux bandes de fréquences : la bande des 2,4 GHz, la plus utilisée en France, et celle des

5 GHz. La marque déposée « WIFI » correspond initialement au nom donné à la certification délivrée par la Wireless Ethernet Compatibility (WECA).

## 2.2. Caractéristiques techniques

Le WIFI permet de relier des ordinateurs portables, des machines de bureau, des assistants personnels, des objets communicants ou des périphériques à une liaison haut débit sur un rayon de plusieurs dizaines de mètres en intérieur. Dans un environnement ouvert, la portée peut atteindre plusieurs centaines de mètres voire dans des conditions optimales plusieurs dizaine de kilomètres.

Les fournisseurs d'accès internet irriguent des zones à forte concentration d'utilisateurs (gares, aéroport, train, bibliothèque, université...) avec des réseaux sans fils connectés à internet. Ces zones ou point d'accès sont appelés bornes WIFI ou point d'accès WIFI et en anglais « hot spot ».

Le WIFI utilise les antennes suivantes pour son réseau :

- ❖ Antennes à gain directionnelles ou omnidirectionnelles destinées à la « plus longue portée ».
- ❖ Antennes panneaux et paraboliques : uniquement directionnelles, elles favorisent une direction privilégiée (plus au moins ouverte) (Adlcofer, 2004).

## 2.3. Applications et usages du WIFI

Les téléphones WIFI utilisant la technologie Vo IP sont en plein expansion.

L'Accès Sans Fil à Internet (ASFI en français ou WIA en anglais) est l'utilisation la plus courante du WIFI :

- ❖ Réseaux sans fils personnel WPAN (Wireless Personal Area Networks) : Bluetooth, Infrarouge.
- ❖ Réseaux sans fils locaux WLAN (Wireless Local Area Networks): WIFI, Hyperlan.
- ❖ Réseaux sans fils métropolitains WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks) : BLR (Boucle Locale Radio), WiMax.
- ❖ Réseaux sans fils Nationaux WWAN (Wireless Wide Area Networks) : GSM, GPRS, UMTS (3G) (Adlcofer, 2004).

## 2.4. Technologies WIFI internet par rapport à la téléphonie mobile

Les ondes émises par les équipements WIFI diffusent dans l'ensemble de l'environnement. La fréquence de ces ondes est relativement élevée (2.4 GHz). De ce fait, elles traversent mal les murs.

La puissance émise par les équipements WIFI (~30 mW) est vingt fois moindre que celle émise par les téléphones (~600 mW). Le téléphone est généralement tenu à une proximité immédiate du cerveau, ce qui n'est pas le cas des équipements WIFI, à une dizaine de centimètres, la densité de puissance du signal est déjà fortement atténuée.

Cependant, certains scientifiques font remarquer que les ondes WIFI sont des ondes pulsées qui utilisent la même fréquence que celle utilisée dans les fours micro-ondes (qui fait rentrer en résonance les molécules d'eau). De ce fait, les risques encourus ne devraient pas être évalués uniquement selon leurs effets thermiques (proportionnés à la densité de puissance), mais également selon leurs effets non thermiques à moyen et long terme (comme les effets génotoxiques) (Adlcofer, 2004).

## 3. Paramètres importants

### 3.1. Le débit d'absorption spécifique (DAS)

D'une manière générale, toutes les ondes électromagnétiques sont susceptibles d'interagir avec la matière. Lorsqu'une onde électromagnétique est interceptée par un tissu biologique, une partie de l'énergie est renvoyée sous forme d'onde réfléchie et l'autre partie est transmise et absorbée. Cette dernière est à l'origine des interactions rayonnement/tissu. Selon leur densité d'énergie ( $J/m^2$ ) et leur densité de puissance ( $W/m^2$ ), les ondes électromagnétiques peuvent être inoffensives pour les objets et les tissus vivants ou au contraire destructrices et mortelles.

Néanmoins, il est très difficile d'établir une relation significative entre une simple mesure et les effets biologiques observés. La quantité d'énergie absorbée par les tissus semble être le paramètre le plus significatif pour étudier l'interaction de l'onde avec les tissus. Pour pouvoir quantifier la dissipation d'énergie dans la matière, le débit d'absorption spécifique (DAS, ou, pour les anglo-saxons, SAR « specific absorption rate ») a été officiellement désigné comme paramètre dosimétrique de référence en

1981 par le « National Council on Radiation Protection and Measurements » (NCRP). Le DAS est défini comme la quantité de puissance absorbée par unité de masse et s'exprime en watt par kilogramme (W/kg).

$$\text{DAS} = dW/dm$$

$$\text{DAS} = \sigma E^2/\rho$$

$$\text{DAS} = C_p \partial T/\partial t$$

Avec  $W$  = puissance absorbée (W) ;  $m$  = masse (kg) ;  $\sigma$  = conductivité (S/m) ;  $E$  = intensité du champ électrique (V/m) ;  $\rho$  = masse volumique (kg/m<sup>3</sup>) ;  $C_p$  = capacité calorifique du matériau biologique et  $\partial T/\partial t$  = variation de température (°K) au cours du temps (s) (Kato, 2006 ; Zhadobov et al., 2008).

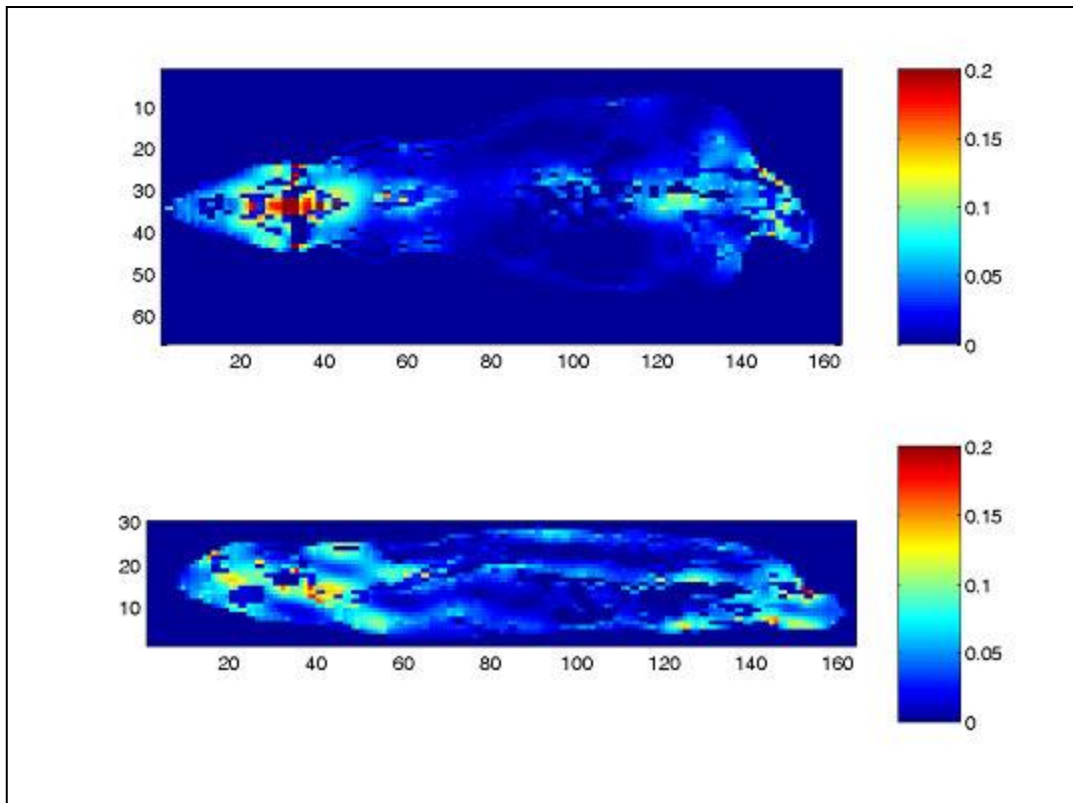
### 3.1.1. Evaluation du débit d'absorption spécifique

L'évaluation du DAS dans un système biologique fait appel soit à des techniques de simulations numériques soit à des mesures expérimentales.

#### a. Technique numérique

Cette technique est basée sur la modélisation du système exposé. L'évaluation numérique du DAS est rendue difficile car les paramètres de modélisation sont très complexes.

En effets, les systèmes biologiques sont des objets hétérogènes et composés de différents tissus aux propriétés diélectriques très différentes. Les modèles peuvent être construits à partir d'images de résonance magnétique (IRM) (Simunic *et al.*, 1996) ; cependant l'évaluation du DAS est plus souvent réalisé grâce à la méthode FDTD (Finite difference time domain). Cette technique permet des calculs dans des milieux anisotropiques complexes.



**Figure 3** : Exemple d'estimation de DAS par FDTD, sur un rat soumis à un champ de 1800 MHz (Crouzier, 2006).

### b. Technique expérimentale

Des estimations de DAS sont également possibles à travers des modèles expérimentaux. Ces techniques reposent sur la mesure de températures ou de champs électriques au sein d'un fantôme aux formes et aux propriétés diélectriques proches de celles du système biologique vivant. Cette technique possède une bonne résolution spatiale (Anderson et Joyner, 1995). La thermographie infrarouge peut également être utilisée, elle permet d'observer la distribution spatiale et l'intensité de l'échauffement (Chou et al., 1992).

### 3.2. Puissance et mode d'exposition

Les effets des micro-ondes sur les systèmes biologiques dépendent non seulement des caractéristiques de l'onde (fréquence, longueur d'onde,...), mais également du mode d'exposition.

En effet, le mode d'exposition peut influencer les interactions entre les micro-ondes et les systèmes biologiques. Les micro-ondes peuvent être appliquées en mode continu ou en mode pulsé (Elder et al., 1989).

#### **4. Normes d'exposition aux champs hyperfréquences**

Des limites d'expositions aux champs électromagnétiques ont été formulées dès les années 1980, par l'International Commission of Non-Ionizing Radiation.

Protection (ICNIRP). A partir de ces recommandations, chaque pays a pu établir ses propres normes et directives.

Ces limites ont été formulées à partir des risques aigus avérés, directement mis en évidence et reproductibles, elles ont donc été formulées à partir des effets thermiques. La valeur limite correspond ainsi à la valeur la plus basse à laquelle apparaît un effet, divisée par un coefficient de sécurité permettant de tenir compte des diverses incertitudes.

D'après l'organisation mondiale pour la santé (OMS), le DAS doit être supérieur à 4 W/kg pour que les effets des champs hyperfréquences soient délétères pour la santé. Dans le cas de ces champs, l'ICNIRP utilise deux marges de sécurité pour formuler ces limites d'exposition en fonction des populations considérées (professionnelles et public) (ICNIRP, 1998).

Pour les personnes travaillant au contact de sources de radiations HF, un facteur 10 est instauré entre la limite d'exposition et le seuil d'apparition des effets nocifs.

Une deuxième marge de sécurité est relative au grand public et instaure dans ce cas un facteur 50 afin de tenir compte de l'absence des contrôles que des personnes non informées ont sur leur environnement et de la possibilité de sensibilité variable entre les individus. La valeur ainsi déterminée pour l'exposition corps entier - 41 - dans le champ d'exposition est de 0,08 W/kg. Cependant des études dosimétriques ont montré qu'à cette limite corps entier, il est possible d'observer des puissances 25 fois supérieures dans certaines zones restreintes de l'organisme. Il a donc été mis en place la notion de DAS local, qui ne doit pas dépasser 1,6 W/kg, (8 W/kg chez les professionnels) pour la zone tête et tronc (localisation des organes vitaux) et 4 W/kg (20 W/kg chez les professionnels) pour les tissus périphériques tel que les membres.

La limite d'exposition locale n'est donc pas fixée en fonctions des effets biologiques, mais à partir d'effets observés à la suite d'une exposition corps entier, selon une extrapolation dosimétrique.

Le DAS n'étant pas facilement accessible à la mesure, il a été nécessaire d'établir à l'aide d'équations de transfert les valeurs de champs électriques ou magnétiques susceptibles de produire dans le pire cas les DAS précédemment définis lorsqu'un individu est soumis à ce champ. Ces valeurs de champs qui peuvent être mesurées sont appelées des normes de références. Comme l'absorption dépend fortement de la fréquence, les valeurs de références varient en fonction de celle-ci. Pour les fréquences de téléphones portables les valeurs de champ électrique susceptible de produire un DAS de  $0,08 \text{ W/m}^2$  sont de 41 et 58 V/m respectivement aux fréquences de 900 et 1800 MHz. Ces champs correspondent à des valeurs de densité de puissance de 4,5 et 9  $\text{W/m}^2$ . Par rapport aux DAS maximaux autorisés, les niveaux de référence incorporent une marge de sécurité de manière à ce que les DAS ne soient jamais dépassés même dans les situations les plus défavorables.

L'OMS a repris ces recommandations de l'ICNIRP, ainsi que le Conseil de l'union européenne qui les a exprimées dans la recommandation 2004/40/CE du 29 avril 2004.

Les restrictions actuellement en vigueur ne sont pas figées, et peuvent évoluer en fonction des recherches scientifiques actuellement en cours.

**Tableau 2 :** Niveau d'exposition aux rayonnements électromagnétiques dans le domaine des hyperfréquences (Crouzier, 2006).

Conditions d'exposition	Limites de SAR (W/kg) (10 kHz à 10 GHz)		Limite de densité de puissance à 1 800 MHz	
	Travailleurs	Public	Travailleurs	Public
Corps entier (moyenne sur corps entier)	0,4	0,08	45 $\text{W/m}^2$	9 $\text{W/m}^2$
Tête, cou, et tronc (moyenne sur 1g de tissus)	10	2		
Membres (moyenne sur 10 g de tissus)	20	4		

## Partie 2 : Interaction des ondes électromagnétiques avec le vivant

### 1. interactions entre onde et matière

En se propageant une onde peut rencontrer différents obstacles. En fonction de sa longueur d'onde et des caractéristiques de la matière rencontrée, différents types d'interactions peuvent se produire :

- La réflexion (ou réfraction), qui se produit quand les milieux sont séparés par une surface très grande dont les irrégularités sont très petites par rapport à la longueur d'onde.
- La diffraction, si les irrégularités ou les dimensions de la surface sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde.
- La diffusion, si l'onde rencontre plusieurs obstacles dont les dimensions sont du même ordre de grandeur ou plus petites que la longueur d'onde.
- L'absorption, quand il y a perte d'énergie dans le milieu traversé (Vaton, 2008).

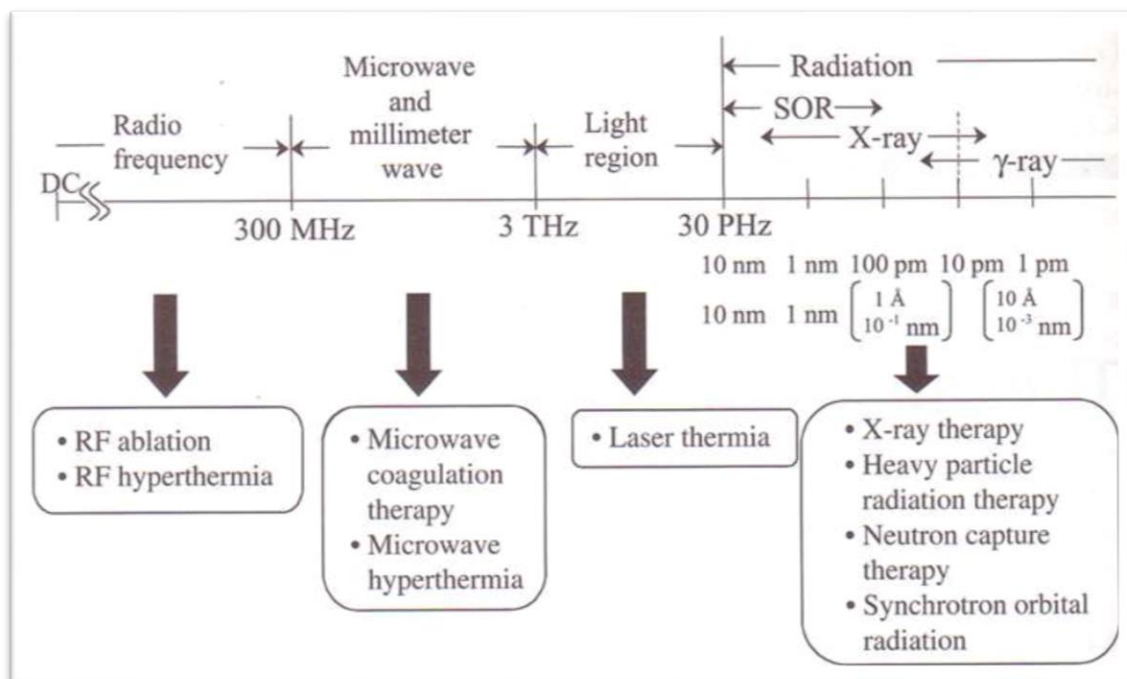
Les recherches scientifiques sont de plus en plus poussées afin de définir les mécanismes par lesquels ces champs magnétiques agiraient sur les tissus et d'identifier les conséquences biologiques de telles interactions (Selmaoui et al., 1996).

Ces interactions sont en fonction du rapport entre la longueur d'onde et la taille de l'objet rencontré par le rayonnement, ainsi que des caractéristiques physiques de cet objet (dimension, forme, position, orientation, propriété électrique...) et la matière vivante, en raison de la structure des membranes cellulaires (bicouche lipidique). Une exposition à des radiofréquences appelées «effet non thermiques », est susceptibles de répondre à d'autres mécanismes d'interaction avec la cellule. Les mécanismes biologiques envisagés comme pouvant être à l'origine de ces effets sont les suivants : génération de radicaux libres de l'oxygène, stress oxydant, génotoxicité, atteintes des cellules du système immunitaire, atteintes de la barrière hémato-encéphalique et sécrétion de mélatonine (SCENIHR, 2009 ; AFSSET, 2009).

### 1.1. Les effets thermiques

Les organes biologiques (le système nerveux central, les testicules...) sont sensibles aux variations thermiques. En effet des études ont montré qu'une élévation de la température des tissus de 1°C au-dessus de la normale peut entraîner des effets biologiques, ces effets seront plus au moins importants en fonction de la durée de l'élévation de la température et de la capacité de l'organisme à rétablir l'équilibre thermique (Ahlbom et al., 2004).

Dans le domaine médical, de nombreuses thérapies reposent sur les effets thermiques des ondes lorsque des rayonnements non-ionisants sont employés (**figure 4**) (Vander Vorst et al., 2006).



**Figure 4** : Exemple de différents types de thérapies utilisées dans le domaine médical avec leurs fréquences et/ou longueurs d'ondes respectives (Vander Vorst et al., 2006).

### 1.2. Les effets non thermiques

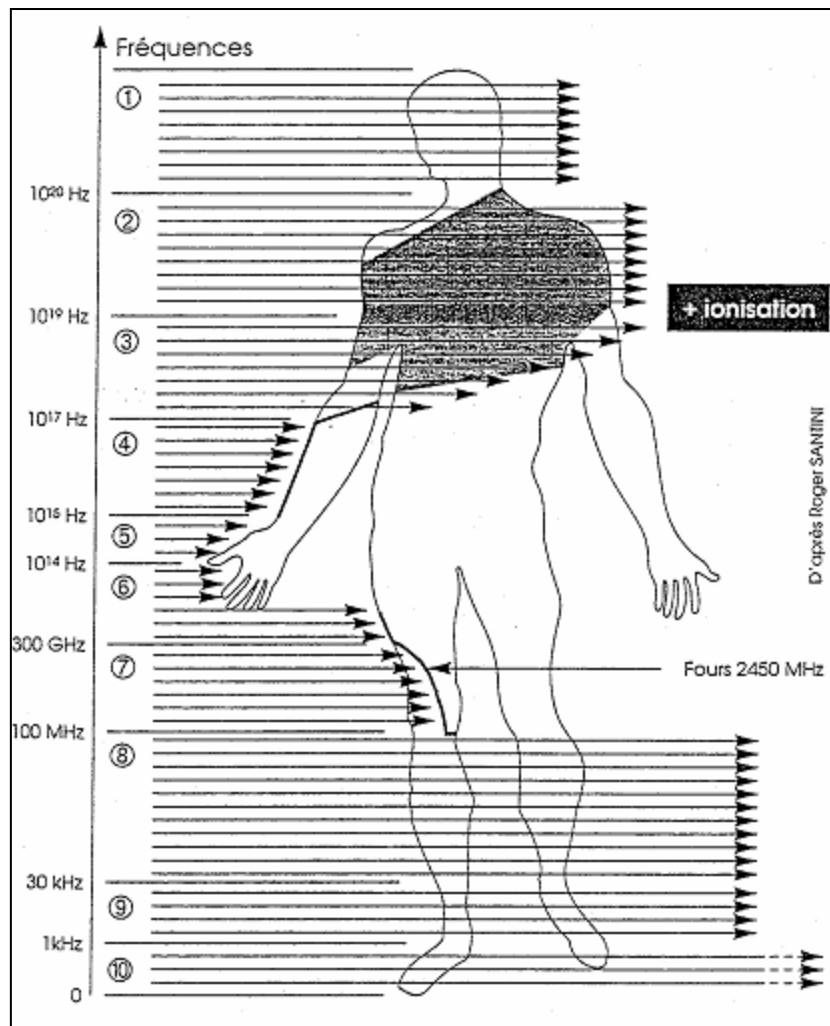
Des recherches ont mis en évidence l'existence possible des effets non thermiques. Les radiofréquences seraient de ce fait responsables de nombreuses pathologies en modifiant les équilibres physiologiques de l'organisme. Elles induiraient l'apparition de certains cancers (tumeurs de cerveau, cancer des parotides, leucémies chez l'enfant

...), aggraveraient l'évolution des maladies neuro-dégénératives (Alzheimer), provoqueraient des troubles du sommeil et dysfonctionnements au niveau des fonctions cognitives. Divers mécanismes biologiques sont avancés pour tenter d'expliquer une éventuelle causalité entre les radiofréquences et l'apparition de certaines maladies (Ahlbom et al., 2004).

## **2. Pénétration des ondes électromagnétiques dans un système biologique**

Lorsqu'un tissu biologique est soumis à un champ HF, seule une partie du champ est absorbée par le système, l'autre étant réfléchi ou transmise. C'est cette partie absorbée qu'il est important de quantifier et qui a priori peut être à l'origine d'effets biologiques. Le rayonnement qui pénètre dans le tissu est absorbé plus ou moins rapidement en fonction des constantes diélectriques (permittivité) de la matière traversée ainsi que de la longueur d'onde du rayonnement. Plus la longueur d'onde est grande plus l'onde pénètre ; plus le tissu a une conductivité électrique importante plus l'onde est réfléchi et moins elle se propage dans le système.

Cependant l'absorption dépend également des dimensions et de l'orientation du grand axe du système par rapport au champ électrique. L'énergie électromagnétique est préférentiellement absorbée pour certaines fréquences, les fréquences de résonances. Pour ces fréquences, la longueur d'onde du champ HF et la longueur du système sont égales ou multiples. Cette particularité est responsable de la sensibilité préférentielle de certains organes pour certaines fréquences, ainsi rétine et cristallin seront plus sensibles à un champ de 9 GHz, les organes creux tel que l'estomac ou l'intestin grêle à un champ de 3 GHz. Quand le champ hyperfréquence a pénétré dans l'organisme, l'hétérogénéité et la structure des tissus rend le comportement de l'onde complexe, il est ainsi possible d'observer des points chauds suite à la focalisation ou à la réflexion du champ.



**Figure 5 :** Pénétration des ondes électromagnétiques dans le corps humain en fonction de leur fréquence (d'après Roger Santini dans Crouzier, 2006).

### 3. Les effets biologiques des ondes électromagnétiques

#### 3.1. Effets sur le comportement et la mémoire

Au début des années 2000, plusieurs études ont évoqué une amélioration de certaines fonctions cognitives avec l'exposition aux radiofréquences, dont l'augmentation de l'attention et de la rapidité. Dans le domaine des hyperfréquences, les principales fonctions cognitives étudiées sont la mémoire et l'attention ainsi que le temps de réaction associé à ces deux fonctions. Les tests et batteries de tests permettant de les apprécier sont nombreux.

La plupart des études réalisées chez l'homme sont des études expérimentales évaluant l'effet de l'exposition à des radiofréquences sur les fonctions cognitives à court terme.

L'échauffement du tissu cérébral est connu pour entraîner des perturbations comportementales et cognitives, plusieurs études ont cependant été réalisées afin de déterminer si les ondes électromagnétiques pouvaient agir autrement que via des mécanismes thermiques.

Certaines études ont démontré des altérations des performances mnésiques chez l'animal suite à une exposition à des champs de radiofréquences. Lai et al. (1994) ont exposé des rats à des champs de 2,45 GHz durant 45 min à 1 Mw/cm<sup>2</sup> soit un débit d'absorption spécifique (DAS) moyen de 0,6 W/Kg. Dans ces conditions, les rats exposés ont montré un retard d'apprentissage dans le teste de labyrinthe radial à 12 bras, caractérisant une altération de la mémoire de travail.

Par la suite Wang et Lai (2000) ont confirmé ces travaux à travers une étude utilisant le test du labyrinthe radial. Dans cette étude les animaux exposés (DAS de 1.2 W/kg) montrent également un ralentissement de l'apprentissage et des perturbations de la mémoire spatiale.

Par contre, Cosquer et al. (2005) ont testé l'effet anxiogène des micro-ondes sur les rats à travers le test de labyrinthe surélevé et n'ont pas montré d'effet. Mis à part les expériences par Lai, qui n'ont pas pu être répliquées, aucune étude n'a pu mettre en évidence des effets sur la cognition ou sur le comportement lorsque les niveaux d'exposition sont non thermiques.

Koivisto et al. (2000) ont recherché des effets des radiofréquences sur les fonctions cognitives. 48 volontaires ont été exposés à un signal GSM 902 MHz modulé 217 Hz, pour une puissance de 0,125 W. les résultats ont mis en évidence une augmentation de la vitesse de réaction ainsi qu'une diminution du temps nécessaire pour la réalisation de test arithmétiques. Cette étude suggère donc que l'exposition aux ondes électromagnétiques améliore légèrement les processus cognitifs.

Hinrichs et Heinz (2004) ont réalisé une étude évaluant l'effet des GSM 1800 sur la mémoire verbale. 12 sujets ont été soumis à la présentation d'une liste de mots, puis

dans une seconde séance, ils doivent distinguer les mots nouveaux de ceux présentés la première fois. Chaque sujet a subi deux sessions, l'une avec exposition au GSM (DAS 0,61 W/kg), l'autre sans exposition. Les auteurs signalent une altération des composantes analysées. L'ensemble de ses résultats tendrait à montrer un effet améliorateur des ondes électromagnétiques sur les performances cognitives et la mémoire.

### **3.2. Effets sur la fonction endocrinienne**

- **Glande pinéale**

Un effet des RF sur la production de mélatonine par la glande pinéale a été suggéré, mais jamais mis en place de façon fiable. Le pinéale est impliqué dans la régulation du rythme circadien et est affectée par la lumière, mais cela est susceptible d'être sur la base de la sensibilité rétinienne, mais pas nécessairement dans les tiges ou des cônes (Thapan et al., 2001). Une étude animale écologique (Stark et al., 1997) plaide contre un effet à des niveaux faibles, tandis qu'une étude expérimentale humaine suggère qu'il n'y a pas d'effet au niveau du combiné de téléphone cellulaire (de Seze et al., 1998).

Cependant, il existe un intérêt continu dans le rôle possible de la prolactine et de la mélatonine dans le cancer du sein humain. Une étude de la Norvège a suggéré une association entre les cancers du sein chez les femmes âgées de 50 ans et plus au travail posté. En comparaison avec toutes les femmes norvégiennes nés en 1935 ou plus tard, le risque relatif était de 1,5 après ajustement pour les facteurs de fécondité (Tynes et al., 1996).

- **Effets sur l'axe hypophysaire : corticostéroïde**

Corticotrophine agit sur le cortex de la glande surrénale et stimule la sécrétion de des hormones stéroïdes ; réponses endocriniennes peuvent être une adaptation à des stimuli environnementaux qui ne sont pas forcément préjudiciable, analogue à une réponse fébrile quand il y a un besoin pour la défense immunitaire de l'hôte. Il y a des preuves fiables que les taux plasmatiques de stéroïdes chez les rats sont augmentés de manière significative par l'exposition à RFEMF.

Lotz et Michaelson (1978) ont observé une stimulation de l'axe surrénale chez des rats exposés aux RFEMF à un DAS de 5 W/kg cette stimulation indique une réponse physiologique à un stimulus stressant. Les augmentations observées dans la fonction surrénale due à l'exposition aux RFEMF est toujours en corrélation avec la hausse de la température colique chez le rat.

La preuve de ces expériences était compatible avec l'hypothèse existante que la stimulation des axes surrénale chez les rats exposés aux RFEMF est un processus systémique due à l'hyperthermie générale de l'hypophyse (Lu et al., 1981). Des recherches ultérieures ont trouvé une augmentation des niveaux de cortisol sérique et une augmentation de la température rectale chez des singes exposés à 1,29 GHz à 3-4 W/kg pendant 4 h mais aucun changement n'a été observé lorsque les animaux ont été exposés pendant la nuit avec une augmentation proportionnelle de la température rectale (Lotz et Podgorski, 1982).

Ils ont conclu que les niveaux plasmatiques de corticostéroïdes chez les rats sont considérablement améliorés par l'exposition au-dessus d'un niveau de seuil défini avec l'augmentation de la durée d'exposition.

- **Croissance et Hormones thyroïdiennes**

L'hormone de croissance agit sur le foie et le tissu adipeux (graisse) et indirectement, favorise la croissance et les contrôles de protéines, de lipides et le métabolisme des glucides.

Michaelson et al. (1975) ont rapporté des diminutions des taux d'hormone de croissance sérique chez les jeunes rats exposés pendant plus de 60 min à 2,45 GHz RFEMF à des niveaux SAR estimés à jusqu'à 7,5 W/kg. La thyroïdostimuline (TSH) agit sur la thyroïde et stimule la sécrétion d'hormones thyroïdiennes. Magin et al. (1977) ont rapporté une augmentation de la thyroxine (T4) et triiodothyronine (T3) lorsque les sécrétions thyroïdiennes des chiens ont été exposées à divers niveaux de 2,45 GHz (58 à 190 W/kg) pendant 2 h.

- **Hormones rénale**

Angiotensines, les hormones formées dans le sang qui ont des effets sur le tissu rénal, jouent un rôle important dans la régulation de la pression artérielle. Le groupe

le plus important de médicaments antihypertenseurs modernes, enzymatiques (IEC) de conversion de l'angiotensine, agit sur le mécanisme de l'angiotensine. Un tel effet pourrait être cliniquement important, mais n'a pas encore été étudié. Cependant, des études sur les effets possibles de l'exposition de RFEMF sur la pression artérielle ne montrent aucune relation (Braune et al., 1998, 2002).

- **Hormones gonadotropes**

Les gonadotrophines, l'hormone lutéinisante (LH) et l'hormone folliculo-stimulante (FSH) sont des glycoprotéines sécrétées par les gonadotrophines, qui représentent environ 10% de l'hypophyse antérieure. Wilson (1994) et Mikolajczyk (1978) ont trouvé une augmentation de LH, mais aucun changement dans les taux de FSH chez des rats exposés à 2,8 GHz RFEMF à 100 W/m<sup>2</sup> pendant 6 h par jour, 6 jours par semaine, pendant 6 semaines.

### **3.3. Effets sur le métabolisme**

Depuis plusieurs années, il n'existe qu'un nombre restreint de recherches consacrées aux effets des ondes électromagnétiques sur le métabolisme (Lotfi et Shahrayar, 2009).

Des études antérieures (Lerchl et al., 2008) ont rapporté que l'absorption de l'énergie des champs électromagnétiques radiofréquences (383 et 900 MHz) peut entraîner des changements métaboliques qui provoquent finalement une augmentation du poids corporel chez les animaux exposés. D'autres études ont montré une augmentation du poids corporel après une exposition chronique aux ondes électromagnétiques (Tsuji et al., 1996 ; Hashish et al., 2007) ; les auteurs ont rapporté que la perte du poids corporel des animaux pourrait être due à la teneur des protéines ou à des changements métaboliques.

En 2008 Magda Havas a révélé que l'exposition à ces ondes électromagnétiques peuvent aggraver le diabète et sont responsables de l'augmentation du taux de glucose chez des sujets diabétiques. De même Ben Salah et al. (2013) ont démontré qu'une exposition aux ondes WIFI provoque des désordres métaboliques qui mènent à une installation d'un état de diabète-like.

### 3.4. Effets sur l'activité cardiaque et la pression artérielle

Braune et al. (1998) ont exposé des volontaires humains aux RF-EMW à 900 MHz pendant 35 minutes, ils ont enregistré une augmentation de la pression artérielle (systolique et diastolique). La pression artérielle a augmenté de 5 à 10 mm/Hg, accompagné d'une importante diminution de la perfusion capillaire due à la vasoconstriction. Ils ont toutefois démontré que les mécanismes autorégulateurs de la pression artérielle étaient intacts, comme le montre la diminution de la fréquence cardiaque afin de compenser l'augmentation de la pression artérielle.

Dans une étude suivante faite par le même groupe pour corroborer leurs conclusions antérieures, une augmentation statistiquement significative de la pression artérielle a été montrée, mais l'analyse de variance a montré que les changements étaient indépendants de l'exposition aux EMW (Braune et al., 2002). Plus tard, Tahvanainen et al. (2004) ont démontré que l'exposition au téléphone cellulaire ne change pas profondément la pression artérielle et la fréquence cardiaque.

Ozguner et al. (2005) ont enregistré une augmentation du stress oxydatif dans le myocarde de rat après une exposition à 900 MHz RF-EMW (30 min / jour, pendant 10 jours). D'Andréa et al. (1980) ont étudié les effets physiologiques d'une exposition prolongée à 915 MHz du corps entier (SAR de 2,5 W / kg) chez le rat pendant 16 semaines et ils n'ont trouvé aucun changement du poids du cœur à la fin de l'exposition.

L'ECG est un signal contenant des informations sur l'état du muscle cardiaque. La forme et l'amplitude du complexe P-QRS-T, et les intervalles de temps entre ses divers pics, etc., peuvent contenir des informations sur la nature de la pathologie cardiaque (Acharya et al., 2002).

Un effet de champ magnétique sur l'ECG a été rapporté par Beischer et Knepton (1964), qui ont observé une nette augmentation de l'amplitude du signal de l'onde T au cours d'une exposition à des champs statiques (2-7 Tesla). Un semblable effet a été rapporté par Togawa et al. (1967) chez des lapins exposés à un champ de 1 Tesla.

Dans une étude de (Bortkiewicz et al, 1997), sur 71 employés d'une station de radiodiffusion, des anomalies de l'électrocardiogramme ont été décelées plus fréquemment chez les personnes exposées que chez des témoins non exposés.

### **3.5. Effets sur la reproduction et la fertilité**

L'infertilité touche environ 15% des couples à l'âge de reproduction, près de la moitié de ces cas résultent de facteur d'infertilité masculine (Thonneau et al., 1991; Sharlip et al., 2002). Un certain nombre de rapports, mais avec des limitations dans la conception de l'étude, suggèrent un lien possible entre l'utilisation du téléphone cellulaire et l'infertilité en ayant des effets sur le système reproducteur et donc sur le sperme.

#### **✚ Effets sur le système reproducteur male**

A des intensités élevées, les rayonnements RF ont des propriétés de chauffage conduisant à des effets thermiques. Une augmentation de la température dans les tissu ou le corps lors de l'exposition aux EMW peut causer des perturbations réversibles de la spermatogenèse (Kandeel et Swerdloff, 1988; Saunders et al., 1991; Jung et Schill, 2000). Wang et al. (2003) ont suggéré, dans leur étude sur des souris, que les cellules de Leydig sont parmi les cellules les plus sensibles aux EMW qui peuvent affecter la spermatogenèse en causant des dommages à ces cellules. Dasdag et al. (1999, 2003) ont observé une diminution du diamètre des tubes séminifères moyen chez des rats exposés à 890-915 MHz 3 min par jour pendant 30 jours. De même Ozguner et al. (2005) ont montré une diminution du diamètre des tubules séminifères et l'épaisseur de l'épithélium après l'application d'un générateur de radio fréquence de 869-894 MHz.

#### **✚ Effets sur la qualité du sperme**

Dans une étude réalisée par Fejes et al. (2005) sur 371 hommes subissant Les évaluations de l'infertilité, suggère que l'utilisation prolongée des téléphones cellulaires pourrait avoir des effets négatifs sur la motilité des spermatozoïdes. Davoudi et al. (2002), dans une petite étude prospective portant sur 13 hommes qui ont un sperme normal, a également constaté que l'utilisation des téléphones GSM pendant 6 h par jour pendant 5 jours a diminué la motilité progressive rapide des spermatozoïdes. De même, Eroglu et al. (2006) ont constaté une diminution de la motilité des

spermatozoïdes dans les échantillons de sperme de 27 hommes exposés à 900 MHz pendant 5 min. Une étude récente, a montré qu'en gardant les téléphones mobiles à proximité du corps diminue la concentration du sperme par rapport aux hommes qui n'utilisent pas les téléphones mobiles (Kilgallon et Simmons, 2005).

### **3.6. Effets sur la fonction immunitaire**

Wiktor-Jedrzejczak et al. (1977) ont exposées des souris à 2,45 GHz à un DAS jusqu'à 14 W/kg. Les résultats de cette étude montrent que les niveaux de RF-EMF thermogénique, par exemple, 14 W/kg, peuvent avoir des effets stimulateurs faibles sur les lymphocytes B spléniques mais aucun sur les lymphocytes T. Dans une autre partie de l'étude, l'exposition à 15 mW/cm<sup>2</sup> (11 W/kg) pendant 5 jours (30 min par jour) n'a pas diminué l'activité cytotoxique des lymphocytes sur les cellules leucémiques injectées après, ou en même temps, de l'exposition (Huang et Mold, 1980).

Les effets de l'exposition des micro-ondes sur le système immunitaire ont été étudiés par Elekes et Thiroczy (1995). Les souris ont été immunisées par les globules rouges de mouton à la deuxième journée d'exposition aux RF (2,45 GHz) ils ont remarqués une augmentation dans la production d'anticorps par les cellules de la rate des souris. Bien que l'exposition à ces micro-ondes a induit une augmentation du poids de la rate chez les souris male mais aucune différenciation dans les cellules immunitaires chez les souris femelles.

### **3.7. Effets sur la neurochimie**

Une action sur les neurotransmetteurs et plus particulièrement sur le système cholinergique a été rapportée par plusieurs études. Tout comme pour les études comportementales, les études neurochimiques proviennent principalement du groupe de Lai. Lai a fait un résumé de ses recherches sur les effets neurologiques des expositions HF (Lai, 1992). Il émet l'hypothèse que les micro-ondes peuvent agir avec le système opioïde endogène (Lai et al., 1991), (Lai et al., 1992) ainsi que sur le système cholinergique central (Lai et al., 1988), (Lai et al., 1989).

Les micro-ondes réduiraient le recaptage de la choline par son transporteur spécifique sodium dépendant au niveau du cortex frontal et des hippocampes. Il a également observé une augmentation compensatoire des récepteurs muscariniques (Lai et Singh, 1995). Ces résultats sont en accord avec les effets observés par ce

groupe sur la mémoire et le comportement. Testylier et al. (2002) décrivent également une diminution significative de la sécrétion d'acétylcholine chez des rats exposés à un 54 -signal de 800 MHz et 2,45 GHz. Cette diminution est due à la perte des variations circadiennes de la sécrétions d'acétylcholine qui reste à son niveau bas.

Maussuet et al. (2001) ont travaillé sur un autre neurotransmetteur au niveau du cervelet, le GABA. Les rats ont été exposés à un champ de 900 MHz durant deux heures, à un DAS de 4 W/kg lorsque le champ est pulsé et à un DAS de 32 W/kg lorsque le champ est continu. Dans les deux cas une diminution de la quantité de GABA est enregistrée, cependant il apparaît vrai semblable pour l'auteur que l'effet constaté à ces forts niveaux d'exposition soit de nature thermique.

### **3.8. Effets sur le sommeil et la sécrétion de mélatonine**

La mélatonine, hormone synthétisée par l'épiphyse en l'absence de lumière, au cours de la nuit, régule le cycle circadien. Ses rôles sont multiples, parmi lesquels la régulation de la sécrétion de nombreuses hormones chez l'homme, un rôle antioxydant et un rôle dans le système immunitaire. Elle pourrait par ailleurs inhiber la croissance des cellules malignes, empêchant ainsi le développement tumoral. Une des hypothèses ("l'hypothèse de la mélatonine"), serait un effet des champs électromagnétiques sur la synthèse de la mélatonine. Une diminution de la mélatonine favoriserait le développement de tumeurs (entre autres le cancer du sein hormono-dépendant). Cependant, une récente revue de 42 études, chez l'animal et 34 études chez l'adulte n'appuie pas cette hypothèse (Touitou et al., 2012).

Reite et al. (1994) ont observé une augmentation significative du sommeil chez des sujets soumis à un rayonnement de 27,12 MHz pour un DAS de 10 W/kg. Il apparaît cependant que ces résultats sont liés à une augmentation de la température au niveau de l'hippocampe et non à effet spécifique des ondes électromagnétiques.

Mann et Roshke (1996) ont travaillé sur des volontaires sains qui ont été exposés à ce même signal durant une nuit de 8 heures. Ils ont observé une baisse du temps passé en sommeil paradoxal, mais aucune modification du sommeil lent.

Borbely et al. (1999) ont également travaillé sur le sommeil et ont exposé des sujets à un signal GSM toutes les 15 minutes, durant 15 minutes sur une nuit pour un DAS

de 1 W/kg. Ils ont pu observer une augmentation du temps de sommeil, ainsi qu'une modification de l'EEG durant celui-ci.

Cook et al. (2002) ont révélé que l'EEG, les potentiels évoqués et certaines tâches cognitives sont modifiées sous exposition aux signaux de la téléphonie mobile. Les auteurs signalent que ces expériences sont difficiles à interpréter.

### **3.9. Effets sur les cellules du sang**

Certains des premiers rapports indiquent que les RF pourraient avoir des effets spécifiques sur les systèmes sanguins et immunitaires des mammifères.

- **Érythrocytes (cellules rouges du sang)**

Un certain nombre d'études ont été dirigées vers les effets des interactions des CEM avec des échantillons *in vitro* des globules rouges (hématies) prélevés des animaux ou des humains. Plusieurs recherches ont été effectuées sur les altérations de la fonction des membranes cellulaires, en particulier des effets sur le mouvement des ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) et les ions potassium ( $\text{K}^+$ ) à travers la membrane.

Les auteurs de plusieurs études européennes de l'Est ont signalé une augmentation d'hémolyse (dégradation cellulaire) et de l'efflux de  $\text{K}^+$  de RBC de lapins exposés à 1 ou 3 GHz à des niveaux aussi bas que 1 mW/cm<sup>2</sup>. Par contre, dans une étude ultérieure des États-Unis (Peterson, 1979), après une exposition des globules rouges de lapin et de l'humain à 2,45 GHz ne montre pas une augmentation d'hémolyse.

Brown et Marshall (1986) ont cherché des effets non thermiques des RF EMF sur la croissance et la différenciation de la lignée cellulaire d'érythroleucémie murine (MEL). Les résultats n'ont montré aucune différence significative dans l'un des trois points d'extrémité entre les cultures de cellules exposées à chaque niveau de RFEMF et leurs cultures de cellules témoins.

Il a été conclu que l'exposition sub-aiguë aux OEM induits des élévations de l'hématocrite, l'hémoglobine et les enzymes tissulaires libérées dans le sang dans une récente étude de Chater et al. (2006).

- **Leucocytes (globules blancs)**

Des études *in vitro* ont été réalisées pour déterminer si l'exposition aux RFEMF peut stimuler les lymphocytes (un type de leucocyte) pour devenir lymphoblastes, qui sont, des cellules actives dans la division cellulaire (mitose). Dans ces études, des échantillons de lymphocytes prélevés chez les humains ont été cultivés, exposés aux RF. Habituellement, ces cellules ont été cultivées avec un mitogène, un agent qui stimule la transformation des cellules en mitose et lymphoblastes. Dans certaines études, des effets plus subtils sur divers types de leucocytes ont été recherchées.

Hamrick et Fox (1977) ont trouvé des différences non significatives entre les cultures de lymphocytes de rat exposées, et les cultures de lymphocytes témoins. Roberts et al. (1983) ont exposé des cultures de leucocytes mononucléaires humains à des RF de 2,45 GHz pendant 2 h à 4 W/kg. Mais les différences entre les groupes n'étaient pas significatives.

### **3.10. Effets sur le système cellulaire et moléculaire**

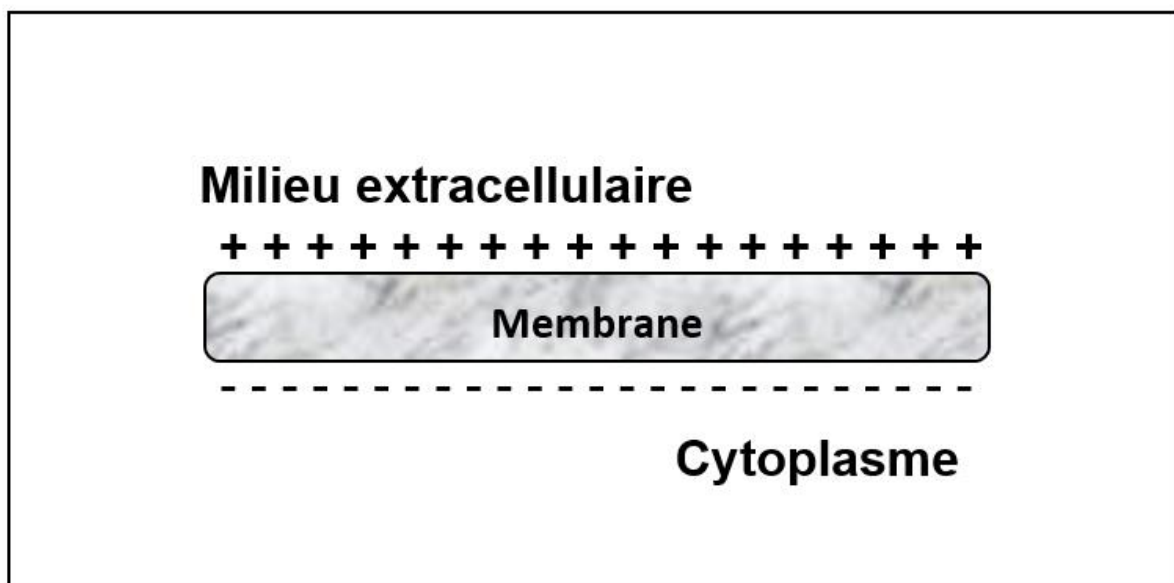
En ce qui concerne les effets biologiques des ondes électromagnétiques sur le système cellulaire, on peut citer plusieurs revus (Blank, 1995b ; Blank, 1995a ; Lacy-Hulbert et al., 1998). Quelques principaux résultats expérimentaux (modulation des flux calciques, de la synthèse d'ARN et ADN, croissance cellulaire...) sont abordés par quelque laboratoire (Conti et al., 1983 ; Byus et al., 1988 ; Fitzsimmons et al., 1989 ; Lefebvre et al., 1992).

L'activité de nombreuses enzymes semble également être modulée par ces ondes. Les systèmes enzymatiques les plus étudiés l'ornithine-décarboxylase, enzyme nécessaire à la réplication de l'ADN ; la Na<sup>+</sup> ATPase, qui joue un rôle clé dans la transmission du potentiel d'action membranaire et les protéines Kinase C jouant un rôle régulateur dans le cycle cellulaire (Byus et al., 1988 ; Fitzsimmons et al., 1989). Dès 1988, Byus et al, avaient noté que l'activité de l'ornithine-décarboxylase doublait lorsque les fibroblastes de souris (L929) en phase proliférative été exposé à des EMF sinusoïdaux de 50 ou 60 Hz, 1 à 100 mT pendant 4h.

Les modulations des activités de l'enzyme Na<sup>+</sup> ATPase ont fait l'objet d'importants travaux (Frey 1993 ; Lacy-Hulbert et al., 1998) les auteurs utilisent soit la cellule entière (globule rouge) soit des préparations (Tsong et al., 1976 ; Blank 1992 ; Tsong et al.,

1992). D'après Tsong et Chang (2003), un champ pourrait directement moduler l'activité enzymatique en induisant un changement conformationnel (Electroconformational Coupling model). Blank quant à lui propose une action indirecte des ondes électromagnétiques via l'accumulation d'ion sur la surface membranaire qui activerait l'enzyme (Blank 1992 ; Blank 1995b).

- La membrane cellulaire semble être la cible la plus intéressante pour les champs électromagnétiques. Elle est constituée d'une bicouche lipidique et elle se comporte électriquement comme un diélectrique (**Figure 6**).



**Figure 6** : Comportement électrique de la membrane cellulaire (Zdnet, 2009)

Les effets des radiofréquences sur la membrane cellulaire ont été étudiés sur des liposomes qui sont des modèles de membranes biologiques. Certaines études ont montré une augmentation de la perméabilité des liposomes après exposition aux radiofréquences (Saalman et al., 1991 ; Bergqvist et al., 1994 ; Ramundo-Orlando et al., 2004).

Une augmentation du taux d'endocytose (environ 1,5 fois) a été observée après exposition en GSM, quel que soit le type cellulaire. Les variations de fréquences n'ont pas d'effet sur la stimulation de l'endocytose en phase fluide d'après Mahrour et al. (2005). Cette étude conclue que le champ électrique serait à l'origine des effets sur la membrane.

### 3.11. Radiofréquence et protéine de stress

Les ondes électromagnétiques pourraient constituer une source de stress environnemental pour les cellules. Pour s'y adapter, celles-ci possèdent un arsenal moléculaire extrêmement varié, caractérisé par la synthèse de protéines dites de « stress », lesquelles appartiennent à la grande famille des protéines de choc thermique, « Heat Shock Proteins » (HSP). Celles-ci, extrêmement sensibles à leur environnement, ont été étudiées en tant que marqueur biologique. La majorité des recherches portant sur les effets potentiels des RF concernent par ailleurs ces molécules. En 2000, De Pomerai et collègues ont démontré l'existence d'effets biologiques non thermiques chez le nématode *Caenorhabditis elegans* (*C.elegans*), se caractérisant par l'induction de HSP16 à la suite d'une exposition à des RF (Pomerai et al., 2000).

En 2001, French et collègues ont émis l'hypothèse selon laquelle l'exposition répétée à des RF pouvait mener à une surexpression des HSP, favorisant à long terme l'apparition de tumeurs (French et al., 2001). Il s'est avéré par la suite que certains travaux, menés à cette époque, furent réalisés dans des conditions expérimentales mal maîtrisées. Dawe et collègues ont ainsi découvert que leur système expérimental précédemment utilisé (Pomerai et al., 2000) provoquait une augmentation de température suffisante pour induire les protéines de stress chez *C. elegans* (Dawe., 2006).

De même, dans leur récente revue portant sur les radiations RF et l'expression génique ou protéique, McNamee et Chauhan pensent que les résultats observés par Weisbrot et collègues en 2003 sont directement liés au système d'exposition (McNamee et Chauhan, 2009). Ces derniers observaient des niveaux d'expression de HSP70 plus élevés chez les drosophiles exposées à des signaux de type GSM-900 ou 1900 MHz (Weisbrot et al., 2003). Ces problèmes, rencontrés par certaines équipes, ont permis de souligner à quel point il est important de contrôler rigoureusement les conditions d'exposition. Depuis, un grand nombre d'études suggère que les expositions à des RF (de faible puissance) n'induisent pas de réponse cellulaire au stress, caractérisée par une altération de l'expression des HSP.

### 3.12. Effets sur le stress oxydant et l'ADN

Les expositions artificielles à des champs EM suscitent en effet de plus en plus d'inquiétude, beaucoup d'études ont montré l'induction du stress oxydatif par ces RF au niveau du cerveau et d'autres tissus (Oktem et al., 2001 ; Irmak et al., 2002 ; Ilhan et al., 2004 ; 2005 ; Ozguner et al., 2005a, b ; Koylu et al., 2006 ; Moustafa et al., Sokolovic et al., 2008). Le stress oxydatif est connu pour être essentielle pour les processus physiopathologiques dans le cerveau, et joue un rôle critique dans l'apoptose cellulaire, l'expression générale et spécifique des gènes, lésions de l'ADN, la prolifération cellulaire, processus d'inflammation et le dysfonction mitochondriale (Lin and Beal, 2006 ; Hayashi et al., 2008).

Les micro-ondes émises par exemple par les téléphones cellulaires et leurs stations de base dans l'environnement peuvent affecter les systèmes biologiques par un excès des radicaux libres, qui peuvent changer l'activité antioxydante de l'organisme, conduit à un stress oxydatif (Mahmoud et Shalaby, 2005).

Les radiations augmentent le taux d'MDA et modifient la concentration du glutathion, des vitamines A, D, E et de la catalase dans le tissu cérébrale des cobayes après 30 jours d'exposition (Meral et al., 2007). La peroxydation lipidique au niveau cérébral pourrait être lié à une concentration très élevée d'acides gras polyinsaturés facilement oxydables dans les membranes de cellules neuronales (Halliwell et Gutteridge, 1984 ; Meral et al., 2007). Les champs électromagnétiques produits par les téléphonies mobiles provoquent un effet neurotoxique par un mécanisme oxydatif.

Il est connu que les propriétés physiques de la molécule d'ADN est la clé pour réaliser sa fonction biologique. Le noyau de la double hélice incarne le code génétique à travers la séquence de paires de bases. Malgré l'absence de tout mécanisme biophysique, des résultats d'expériences ont illustré apparemment des effets des RF sur l'ADN, à savoir ces études ont montré que les rayonnements RF sous certaines conditions d'exposition peuvent entraîner des effets génotoxiques (Verschaeve et al., 2010). Plusieurs chercheurs ont mis en évidence une augmentation de la fragmentation de l'ADN dans une variété de cellules humaines et animales (Lai et Singh, 1996 ; Diem et al., 2005 ; Stronati et al., 2006 ; Panagopoulos et al., 2007 ; Phillips et al., 2009).

Par exemple, Lai et Singh ont rapporté dans une étude, des ruptures de brins d'ADN à partir de faible intensité de micro-ondes dans les cellules du cerveau de rat. Dans leurs études, après 2h d'exposition aux RF 2450 MHz en mode continu et pulsé le rayonnement produit une augmentation dose-dépendante de l'ADN simple et cassures de double brin (Lai et Singh, 1996, 2005). Dans une autre étude, une augmentation des ruptures de brins d'ADN dans les lymphocytes obtenus à partir des utilisateurs de téléphone cellulaire ont été révélés (gandhienne Danita, 2005). Plus récemment, Aitken et al. (2005) ont trouvé du dommage mitochondrial important et du génome nucléaire dans les spermatozoïdes épидидymaires chez des souris exposés à 900 MHz, 12 heures par jour pendant 7 jours. Les spermatozoïdes sont extrêmement vulnérables à l'induction de dommages à l'ADN, car elles perdent leur cytoplasme, qui contient des enzymes anti-oxydantes, et leur capacité à réparer l'ADN après spermiation. Elles sont également différenciées au point qu'ils ne peuvent plus subir l'apoptose en réponse à tout dommage génétique grave (Aitken et al., 2005).

Les approches théoriques ont également été proposées pour élucider le mécanisme derrière la stimulation de la biosynthèse par les EMW (Blank et Goodman, 2008). Blank (2005) a montré que le déplacement des électrons dans l'ADN et les réactions biochimiques peuvent être modulés par les EMW. L'interaction avec les électrons pourrait être expliquée par l'activation de l'ADN par ces EMW de faible fréquence, ainsi que les fréquences énergétiques plus élevées.

#### **4. Hypersensibilité électromagnétique**

Le terme d'hypersensibilité électromagnétique a été utilisé pour décrire des symptômes tels que la fatigue, les maux de tête, les difficultés de concentration, les vertiges, que certaines personnes attribuent à une exposition à des champs électriques ou magnétiques.

L'apparition de ces symptômes en relation avec l'exposition aux téléphones portables ou aux stations de base a été observée dans certaines études épidémiologiques. Cependant la méthodologie des études épidémiologiques sur le sujet est très souvent discutable. De plus, la plupart des études expérimentales menées auprès de personnes hypersensibles concluent qu'elles ne sont pas en mesure de détecter la présence d'un champ électromagnétique. Une méta-analyse de ces études étudiant la capacité à distinguer une exposition aux radiofréquences d'un

champ simulé a montré que les personnes hypersensibles ne détectaient pas mieux la présence ou l'absence de radiofréquences (+ 2 % [- 7 % ; + 10 %]) que les témoins (+ 7 % [- 2 % ; + 17 %]) (Roosli, 2008).

En 2011 une revue de 29 études sélectionnées avec de nombreux critères de qualité méthodologiques ne retrouvait que 5 études mettant en évidence des effets des champs électromagnétiques EBF ou radiofréquences, avec des effets différents, non reproductibles (Rubin et al., 2011). Les auteurs concluaient à l'absence d'éléments permettant de conclure à des réactions physiologiques inhabituelles avec l'exposition aux champs électromagnétiques. On retrouve ces conclusions dans les rapports de l'Afsset en 2009 et 2010, de l'HPA en 2012 et du CIRC en 2013 (Afsset, 2009, 2010 ; IARC, 2013 ; HealthProtectionAgency, 2012).

De plus, l'association entre les symptômes ressentis et la notion "d'hypersensibilité" rapportée étant plus fréquente qu'entre les symptômes et l'exposition, l'évocation d'un effet nocebo est de plus en plus courante. En Suède, ils existent des personnes électro-hypersensibles, ces personnes lorsqu'elles sont exposées aux ondes électromagnétiques présentent une augmentation de la concentration des mastocytes au niveau du derme supérieur.

## 5. Etudes réalisées sur des plantes

Le choix de plantes en tant que modèle d'étude peut s'avérer judicieux. Celles-ci ne nécessitent aucune immobilisation et sont, en outre, particulièrement sensibles aux modifications de leurs conditions environnementales. Dans ce domaine, des travaux ont montré que l'accumulation du transcrite du facteur de transcription *LebZIP1* (*Lycopersicon esculentum basic leucine zipper*), lié au stress, se faisait très rapidement après exposition de plantes de tomates pendant 10 minutes à 900 MHz. Habituellement, il apparaît que ce gène est en général fortement induit lorsque l'intégrité de la plante est touchée. Les ondes pourraient donc avoir un effet proche de celui observé lorsqu'une plante est blessée, bien que les conditions d'exposition permettent d'exclure tout effet thermique potentiel (Vian et al., 2006).

Toujours dans cette idée, les travaux suivants ont confirmé l'accumulation d'autres transcrits (calmoduline-N6, chloroplast mRNA-binding protein (cmbp) et protéinase inhibiteur, (pin2)), connus pour être également induits lors d'une blessure (Roux et al.,

2006). Les réponses systémiques chez les tomates impliquent des hormones ou des signaux électriques ou hydrauliques. Étant donné le caractère extrêmement rapide de l'induction, il se pourrait qu'une réponse systémique soit causée par un signal électrique (Beaubois et al., 2007).

Plusieurs hypothèses sont actuellement à l'étude. L'interaction ondes/plantes de tomates se ferait à l'interface entre la membrane et le cytosol et déclencherait un potentiel d'action. Une autre alternative étudiée est celle selon laquelle il y aurait une activation directe de la voie de signalisation. Enfin, les ondes pourraient moduler directement des canaux calciques puisque le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) est directement impliqué dans la régulation de certains gènes de stress. Quoique les mécanismes exacts ne soient pas encore bien compris, l'hypothèse de la génération d'un signal électrique pourrait être corroborée avec l'observation, après exposition, de la diminution de l'état énergétique des cellules de tomates exposées. Cette modification de l'état métabolique pourrait être liée à une dépense énergétique pouvant servir à générer un signal électrique en réponse à une exposition (Roux et al., 2008).

Ces résultats, obtenus sur les plantes de tomate, ne peuvent cependant en aucun cas être directement extrapolés sur les modèles animaux. Enfin, pour déterminer d'autres gènes cibles, il est possible de réaliser une nouvelle approche expérimentale, dite à haut débit, par la technique de puces à ADN (acide désoxyribonucléique) qui offre la possibilité d'avoir un aperçu des niveaux d'expression de l'ensemble des transcrits du génome après exposition à des ondes.

## Objectifs du travail

Les effets biologiques susceptibles d'être causés par les rayonnements non-ionisants ont été confirmés par les communautés scientifiques depuis plusieurs décennies, en effet peu de recherches se sont intéressées à l'étude des effets des expositions aux radiofréquences sur le métabolisme et plus précisément sur le diabète et les maladies cardiovasculaires.

L'objectif de notre recherche sera :

- ✚ L'étude des effets des ondes électromagnétiques (WIFI) sur la variabilité du rythme cardiaque et la pression artérielle chez les *lapins Albinos*.
- ✚ L'évaluation des effets des ondes électromagnétiques (WIFI) sur la glycémie chez le lapin.
- ✚ Les effets des OEM (WIFI) sur l'efficacité des médicaments : les catécholamines (Dopamine et Adrénaline) et sur l'efficacité de l'insuline.

## I. Matériel et Méthodes

### I.1. Le model biologique

Les animaux utilisés dans cette étude sont des *lapins Albinos* mâles (**Figure 7**) de poids moyen d'environ 2 kg. Ils sont maintenus dans des cages où ils ont accès à l'eau et à la nourriture à volonté (Biscuits Nutrimix, Ezzahra, Tunis). Les biscuits de nourriture sont composés de 7,2% de matières minérales, 2,5% de matière grasses. Ils sont soumis à un cycle de lumière/ obscurité 12h :12h.

Ils sont préalablement acclimatés à une température entre 23 et 24 °C pendant une période de deux à trois jours à l'animalerie de la faculté des Sciences de Bizerte avec une humidité relative de 50%.



**Figure 7** : modèle biologique utilisé dans cette étude (*lapin Albinos*).

### I.2. Système d'exposition au WIFI

Le système d'exposition des animaux au champ des micro-ondes est un équipement WIFI conçu pour un accès sans fil à un réseau internet conforme à la norme américaine IEEE 802.11b/g (D-Link DWL-3200AP et 802.11g) et munie de deux antennes omnidirectionnelles servant pour l'émission de l'énergie électromagnétique sous forme de micro-ondes qui oscillent dans l'espace à une fréquence de 2,45 GHz

et à une densité de puissance de  $23 \text{ Mw/cm}^2$ . Ce système fournit un réseau local interne avec des débits sans fil maximaux pouvant atteindre 108 Mbps. En ce qui concerne la longueur d'onde des rayonnements de ce point d'accès on peut la calculer selon la relation suivante :

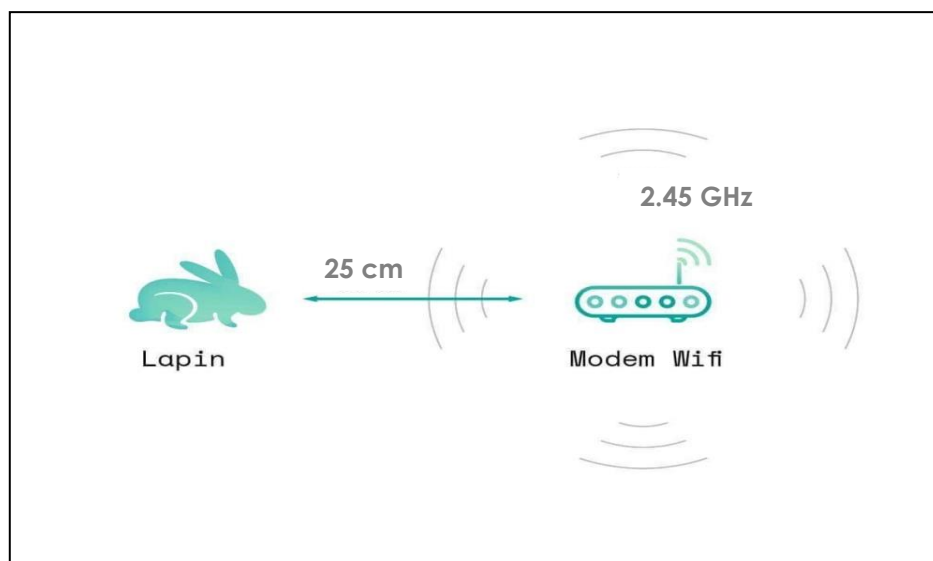
$\lambda = c/f$  « c » est la célérité (vitesse) de la lumière, elle est environ  $c = 300000 \text{ km/s}$

$\text{GHz} = 10^9 \text{ d}$ , ou  $f = 2,40 \text{ GHz} = 2400000000 \text{ cycles/seconde}$

$c = 300000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

$\lambda = 3 \cdot 10^8 / 2.4 \cdot 10^9 = 1,25 \cdot 10^{-1} \text{ m/s}$

Chaque lapin est situé à une distance de 25 cm (Atasoy et al., 2013) par rapport au système WIFI. Les lapins reçoivent une dose des radiations micro-ondes émises par notre point d'accès (**Figure 8**) dans un environnement à peu près fermé.



**Figure 8** : Représentation du système d'exposition WIFI (Saili et al., 2015).

### I.3. Mode opératoire

L'animal est anesthésié à l'Uréthane (33%) par une injection intrapéritonéale à raison de 2 ml par kg de poids corporel. Puis on fixe le lapin en décubitus dorsal, sur un support par des lacets passés à chaque patte avec un nœud coulant au-dessus de l'articulation. Ensuite, il faut bien tendre le cou, l'inciser sur une ligne médiane, de quelques centimètres. Après l'incision cutanée du cou, on observe directement de chaque côté une veine appelée la veine jugulaire.

Directement après on réalise le cathétérisme de ladite veine. On fait la ligature de la veine jugulaire du côté céphalique et on prépare une deuxième ligature lâche du côté cardiaque. Nous allons inciser la veine en biseau afin d'introduire une canule à mandrin héparinée en direction du cœur, et on serre la ligature lâche. Ensuite, nous avons injecté 1 ml d'une solution d'héparine directement dans le sang, et on utilise la canule à mandrin comme intermédiaire pour éviter toute coagulation possible du sang au cours de l'enregistrement. Tout au long de cette opération il faut humecter fréquemment le champ opératoire avec du sérum physiologique pour éviter le dessèchement des tissus.

Dans le cadre de l'étude de l'ECG chez le lapin, nous avons placé trois électrodes (**Figure 9**) : une électrode sur chaque avant-bras, la troisième électrode sur la jambe droite. On branche les électrodes sur les câbles, chaque connecteur au bout des câbles s'attache à une électrode spécifique. Les câbles sont de couleurs différentes. Le lapin doit éviter tout contact avec des objets métalliques.

Le lapin doit être convenablement anesthésié pour éviter des secousses violentes pendant l'enregistrement car l'électrocardiographie est très sensible à de petites variations de voltages dues à la contraction des muscles squelettiques.



**Figure 9** : Représentation de dispositif d'enregistrement de la fréquence cardiaque (Saili, 2014).

Deux groupes d'animaux ont reçu des injections intraveineuses (iv) de l'adrénaline à raison de (0,50 ml/kg). On met la dose voulue dans la seringue et on injecte directement dans la veine. De même que l'adrénaline, deux groupes ont reçue des injections intraveineuses (iv) de dopamine (chlorhydrate de dopamine 10 mg/ml, solution pour perfusion, 0,50 ml/ kg).

## **I.4. Etude des effets des ondes WIFI sur l'activité cardiaque, la pression artérielle et l'efficacité des catécholamines (Dopamine et Adrénaline)**

### **I.4.1. Exposition et traitement des animaux**

Les animaux sont repartis en six groupes, chaque groupe est composé d'un effectif de six lapins :

**Groupe1** : groupe d'animaux témoins.

**Groupe2** : groupe d'animaux exposés aux ondes WIFI (2,45 GHz/ 1h).

**Groupe3** : groupe d'animaux traité par l'adrénaline (0,50 ml/kg, iv) dose unique.

**Groupe4** : groupe d'animaux exposés aux ondes WIFI et traité avec l'adrénaline (0,50 ml/kg, dose unique, iv).

**Groupe5** : groupe d'animaux traité avec la dopamine (0,50 ml/kg, dose unique, iv).

**Groupe6** : groupe d'animaux exposés aux ondes WIFI et traité avec la dopamine (0,50 ml/kg, dose unique, iv).

### **I.4.2. Etude de l'effet de l'administration des catécholamines sur la pression artérielle sous un environnement WIFI chez le lapin**

#### **a. Dispositif expérimental et principe de la méthode**

Les mesures et les enregistrements de la pression artérielle ont été effectués à l'aide d'un capteur de pression relié à un enregistreur graphique de type (BD11) (**Figure 10**). L'enregistreur defile le diagramme de papier à une vitesse constante, de la plus lente 0,1 mm/s à la plus rapide 20 mm/s. Les stylets recopient les signaux d'entrée en fonction du temps. La pleine échelle varie de 1 mV à 20 V CC (courant continu).

L'enregistreur est équipé d'un module de commande de défilement de papier et de deux modules de commande indépendants des servo/systèmes. L'écart entre les stylets pour l'enregistreur de deux voies est de 2,5 mm.



**Figure 10** : Représentation de l'enregistreur graphique de la pression artérielle (BD11 enregistreur flatbed 1 voie).

### I.4.3. Enregistrements de la fréquence cardiaque chez le lapin

#### a. Dispositif expérimental

Les enregistrements électrocardiographiques (ECG) ont été obtenues grâce à un dispositif formé d'un logiciel Biopac Student Lab 3.7.1, (MP35/30) avec les câbles associés, transformateur BIOPAC, câbles d'électrode BIOPAC (SS2L), trois électrodes vinyles jetables par sujet (EL503), lotion nettoyante pour la peau, un ordinateur (**Figure 9**).

Six paramètres ont été étudiés de l'ECG : durée de l'onde P, la durée des intervalles R-R, P-R et Q-T et les battements du cœur par minute (BPM) et le Max amplitude.

- L'onde P représente la dépolarisation auriculaire.
- L'intervalle R-R représente la fréquence cardiaque.
- L'intervalle P-R reflète le temps nécessaire pour que l'impulsion électrique se déplace à partir du nœud auriculo-ventriculaire et pénètre dans le ventricule.
- L'intervalle Q-T est un indice de la durée du potentiel d'action ventriculaire (Katz, 1992 ; Seaman et Jauchem, 2004).

## **I.5. Etude des effets des ondes WIFI sur la glycémie et l'efficacité de l'insuline**

### **I.5.1. Traitement des animaux**

Les animaux sont repartis en quatre groupes, chaque groupe est composé d'un effectif de six lapins :

**Groupe1** : groupe d'animaux témoins.

**Groupe2** : groupe d'animaux exposés aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1h).

**Groupe3** : groupe d'animaux traité par l'insuline (0,10 ml/kg, iv) dose unique.

**Groupe4** : groupe des animaux exposés aux ondes WIFI et traité avec l'insuline (0,10 ml/kg, iv) dose unique.

### **I.5.2. Etude de la variation de la glycémie chez le lapin**

#### **a. Dispositif expérimental et principe de la méthode**

La cinétique de la glycémie a été étudiée par un glucomètre de type « Accu chek ® », avant et après l'injection intraveineuse d'insuline à différents moments du temps ( $T_0$ ,  $T_{15}$ ,  $T_{30}$ ,  $T_{45}$  et  $T_{60}$ ). On refait la même expérience sous des ondes électromagnétiques (WIFI).

## II. Etude statistique

Les résultats sont exprimés par la moyenne accompagnée de son erreur standard ( $\pm$  SEM). La comparaison entre les moyennes est faite à l'aide du test t-Student, et de l'analyse des variances (ANOVA et ANCOVA) ; les valeurs pour les (\*)  $P < 0,05$  (\*\*)  $P < 0,01$  (\*\*\*)  $P < 0,001$  ont été considérées comme statistiquement significatives. Les données sont présentées comme moyenne  $\pm$  erreur type de la moyenne (SEM).

## 1. Introduction

Les nouvelles technologies sans fil (les téléphones mobiles, le WIFI), sont devenues omniprésentes et connaissent actuellement un développement explosif, et peuvent présenter des graves conséquences pour la santé publique (Sage et Carpenter, 2009). Ces OEM peuvent provoquer plusieurs effets biologiques qui peuvent affecter le système cardiovasculaire et d'autres fonctions (Zecca et al., 1998 ; Abdelmelek et al., 2006 ; Gmitrov, 2007).

Des données antérieures ont montré des hypertensions chez les opérateurs de la station de télévision en Colombie-Britannique (Israël et Tomov, 2000). De même, des études antérieures de Bortkiewicz (1997) et Szmigielski (1998) ont signalé de légères anomalies de l'ECG sub-clinique, chez les opérateurs de stations 77 AM BC (0.7-1.5 MHz). Szmigielski et al. (1998,1999) ont confirmé les données précédentes (Bortkiewicz, 1997) dans une étude sur 38 travailleurs dans les centres de transmission radio, exposés à des fréquences de 10-30 MHz EMF.

Abdelmelek et al. (2006), ont démontré une hyperactivité sympathique associée avec une augmentation du contenu en noradrénaline dans le muscle squelettique des rats induite par le CMS (128 m T). Pawlak et al. (2013) ont montré que l'exposition des animaux aux champs électromagnétiques augmente la fréquence cardiaque des embryons de poulet à partir de 17 jours d'incubation. Plusieurs études chez différentes espèces montrent des changements dans l'activité cardiaque et la pression artérielle suite à une exposition aux OEM (Gaffey et Tenforde, 1981) chez le rat, (Togawa et al., 1967) chez le lapin, (Gaffey et al., 1980) chez les babouins, (Tenforde et al., 1983) chez le singe, et (Jehensen et al., 1988) chez l'homme.

Dans une étude publiée par Bortkiewicz et al. (1997), sur 71 employés d'une station de radiodiffusion, montre la présence des anomalies de l'électrocardiogramme. Braune et al. (1998) ont montré qu'il y a une augmentation (+10 %) de la pression artérielle chez des volontaires exposés en aveugle à des signaux GSM (35 minutes).

Les chercheurs soviétiques ont signalé que l'exposition à long terme aux RFEMF peut provoquer une bradycardie et une hypotension et évoque parfois des tachycardies mais ces résultats n'ont pas été répliqués ailleurs, chez l'homme. Jauchem et al. (1999a, b)

## 2. Objectifs

L'objectif de ce chapitre est de déterminer les effets des ondes RF émises par une antenne WIFI (2450 MHz, DAS 1.6 W/Kg pendant une heure à une distance de 25 cm) sur la variabilité du rythme cardiaque et de la pression artérielle chez des *lapins Albinos*.

## 3. Résultats

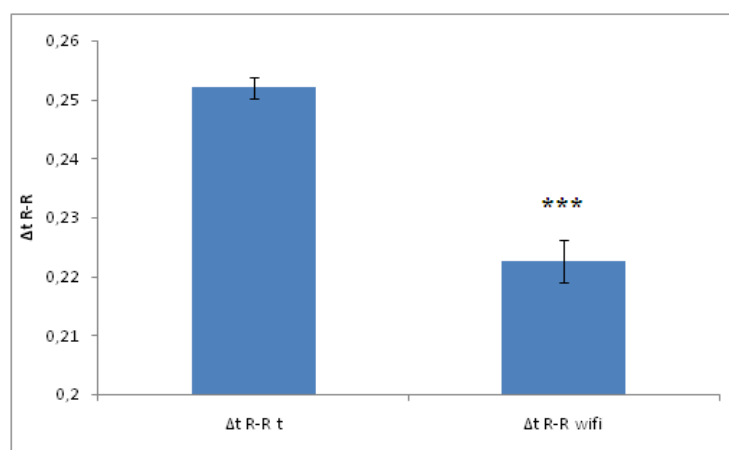
### 3.1. Effets d'une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 heure) sur l'ECG chez le *lapin Albinos*

#### 3.1.1. Effets de l'exposition aux ondes WIFI sur l'intervalle R-R

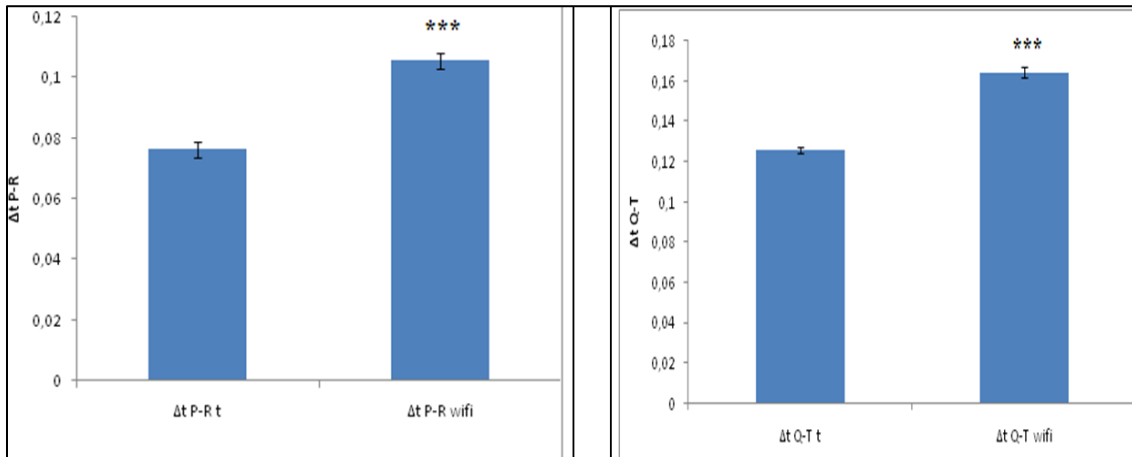
Notre étude a indiqué que l'exposition aiguë au dispositif WIFI (2,45 GHz, 1 h) induit une réduction importante de la durée de l'intervalle R-R comparé aux lapins témoins, ce qui indique une tachycardie (**Figure 11**).

#### 3.1.2. Effet de l'exposition aux ondes WIFI sur les intervalles P-R et Q-T

La **figure (12)** montre une augmentation de la durée des intervalles P-R et Q-T montrant ainsi que les radiations WIFI peuvent influencer l'activité du tissu nodal en particulier les nœuds auriculo-ventriculaires.



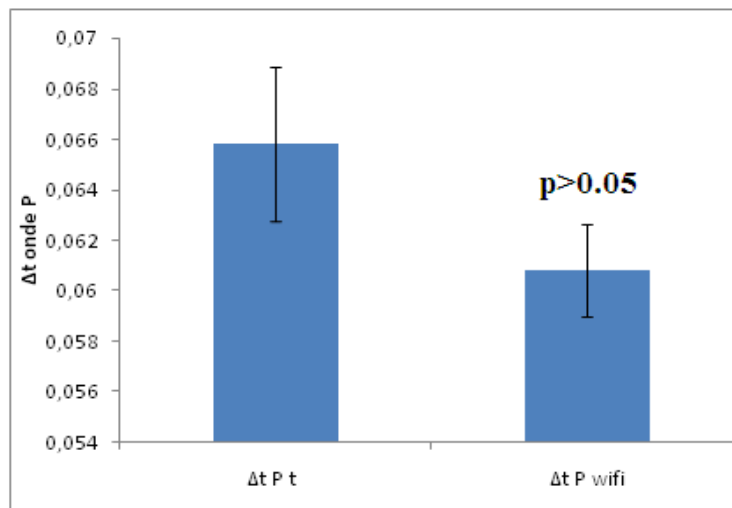
**Figure 11** : Les effets de l'exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h) sur l'intervalle R-R ( $\Delta t$  R-R) et ( $\Delta t$  R-R WIFI). Les valeurs sont exprimées comme la moyenne  $\pm$  écart-type pour des groupes de six animaux. Les lapins exposés aux ondes WIFI ont été comparés aux lapins témoins.



**Figure 12 :** Les effets de l'exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h) sur les intervalles P-R ( $\Delta t$  P-R) et ( $\Delta t$  P-R WIFI), intervalles Q-T ( $\Delta t$  Q-T) et ( $\Delta t$  Q-T WIFI). Les valeurs sont exprimées comme la moyenne  $\pm$  écart-type pour des groupes de six animaux. Les lapins exposés aux ondes WIFI ont été comparés aux lapins témoins.

### 3.1.3. Effet de l'exposition aux ondes WIFI sur l'onde P

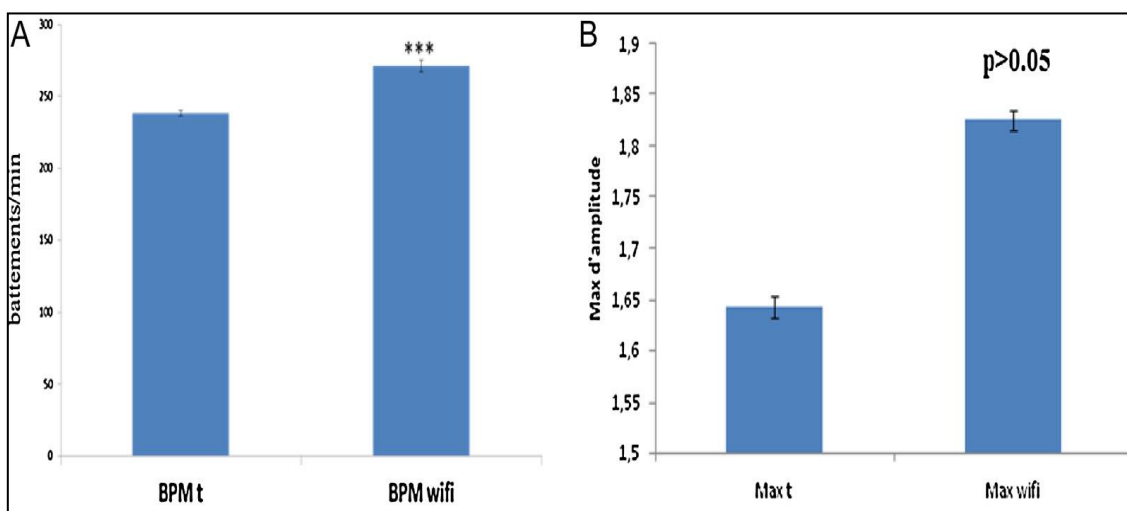
Après une heure d'exposition aux radiofréquences WIFI, on note aucune modification de l'onde P (**Figure 13**).



**Figure 13:** Les effets de l'exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h) sur l'onde P de l'électrocardiogramme chez le lapin ( $\Delta t$  P) et ( $\Delta t$  P WIFI). Les valeurs sont exprimées comme la moyenne  $\pm$  écart-type pour des groupes de six animaux. Les lapins exposés aux ondes WIFI ont été comparés aux lapins témoins.

### 3.2. Effets d'une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 heure) sur les battements du cœur et le maximum d'amplitude

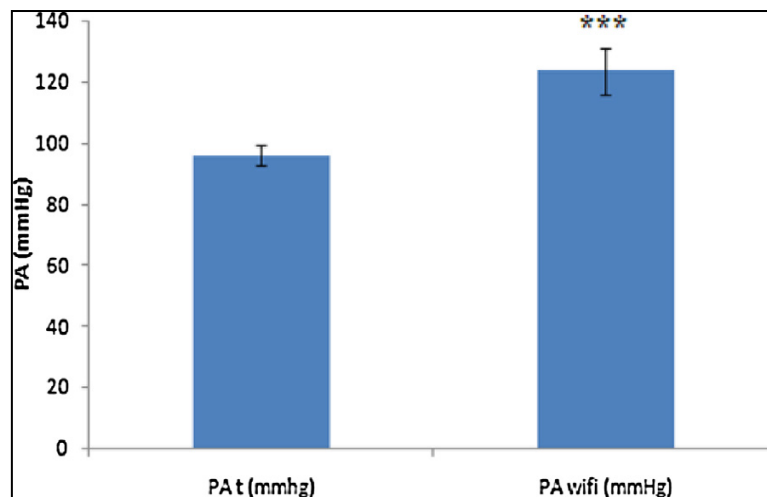
L'exposition au WIFI (2,45 GHz, 1h/jour) induit une accélération des battements du cœur des animaux ( $p < 0.001$ ), par conséquent, le rythme cardiaque est plus élevé chez les lapins exposés aux ondes WIFI par rapport aux témoins. Cependant, l'amplitude de l'électrocardiogramme est restée inchangée pendant l'exposition aux RF (radiofréquences) par rapport aux témoins (**Figure 14 A et B**).



**Figure 14** : Effets d'une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h) sur : (A) les BPM du groupe témoins et les BPM du groupe WIFI, (B) Max témoins et Max WIFI. Chaque valeur représente la moyenne de six déterminations accompagnées par l'erreur standard (SEM).

### 3.3. Effets d'une exposition aiguë aux ondes WIFI sur la pression artérielle

Dans cette étude, nous avons observé que l'exposition aiguë des lapins aux ondes WIFI (2,45 GHz) pendant une heure induit une augmentation importante de la pression artérielle par rapport aux témoins comme le montre la **figure 15**.



**Figure 15** : Effets d'une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h) sur : la pression artérielle PA du lot témoins et PA du lot WIFI. *Chaque valeur représente la moyenne de six déterminations accompagnées par l'erreur standard SEM.*

#### 4. Discussion

L'évolution de la société et de l'urbanisme et le développement nécessite des technologies de télécommunication toujours plus fiables et plus performantes. Ainsi, les technologies de transmission sans fil ont envahi le marché du High-tech et se déclinent sous diverses applications : téléphonie mobile, identification par radiofréquence, télécommande... Parmi ces technologies, le WIFI connaît une expansion rapide (Brunel, 2004). En effet, parallèlement aux craintes générées par l'utilisation du téléphone portable, un climat de suspicion face à d'éventuels risques sanitaires touche à présent les technologies WIFI. Le développement actuel du système de communication technologique (WIFI, RADAR, GSM...) nous a incité à enquêter sur les conséquences biologiques et médicales de l'exposition aux ondes WIFI en particulier sur l'activité cardiaque et la pression artérielle chez le lapin.

Nous avons exposé des lapins Albinos aux radiofréquences (WIFI, 2,45 GHz) pendant une heure pour voir leurs effets sur les enregistrements de l'ECG et la pression artérielle.

Nos résultats montrent clairement une augmentation de la fréquence cardiaque (+ 22%,  $p < 0,01$ ) et de la pression artérielle (+ 14%,  $p < 0,01$ ) après une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz/1h). Probablement les changements observés après l'exposition aux ondes WIFI sont induits par des voies directes et / ou indirectes.

Les effets directs des ondes WIFI pourraient être associés à leur action sur l'homéostasie du  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Zn}^{++}$  et en particulier sur le flux minéral des éléments divalents modulés par les OEM comme indiqué précédemment par Amara et al. (2007).

Pilla et al. (1999) ont montré que les champs magnétiques statiques (CMS) (0-200 mT) accélèrent la phosphorylation  $\text{Ca}^{2+}$  / chaîne calmoduline-dépendante légère de la myosine.

Afin d'expliquer les mécanismes par lesquels les OEM exercent leurs effets sur le système cardiovasculaire nous proposons des hypothèses qui impliquent i) les éléments divalents comme le  $\text{Ca}^{2+}$  et des ions comme le  $\text{K}^+$ .

La voie indirecte des effets biologiques des ondes sur la fonction cardiaque pourra s'expliquer par une action via le SNS, les catécholamines et les glucocorticoïdes.

Les effets indirects sont précédemment confirmés par les travaux de Braune et al. (1998) et Abdelmelek et al. (2006) qui montrent que les OEM provoquent une hyperactivité sympathique qui pourrait expliquer la tachycardie et l'hypertension classiquement observé chez l'animal sous un environnement magnétique.

La présente étude a indiqué que l'exposition aiguë aux ondes WIFI a provoqué une diminution de l'intervalle R-R, indiquant une tachycardie ce qui explique l'hypertension observée. En revanche, Jensen et al. (1988) ont montré une augmentation (+ 17%) de la longueur de l'intervalle R-R après dix minutes d'exposition aux CEM chez des volontaires sains.

L'intervalle P-R reflète le temps nécessaire pour que l'impulsion électrique se déplace à partir du nœud auriculo-ventriculaire et pénètre dans le ventricule. Nous avons observé que l'exposition aux ondes WIFI augmente la durée de l'intervalle P-R, ce qui confirme que le système de conduction du cœur a été altéré. Conformément au résultat de Blanchi et al. (1973), qui ont montré chez les souris (exposées à 100 kv / m ; 50 Hz), une augmentation (+19.50%) de la durée du complexe QRS et de l'intervalle P-R. Bien que, nous avons observé que l'exposition aiguë aux ondes WIFI augmente la durée de l'intervalle Q-T ; montrant que le temps pour la dépolarisation ventriculaire et la repolarisation étaient plus long.

Il est intéressant de mentionner que l'exposition continue des neurones aux micro-ondes pendant 60 min inhibe l'activité spontanée et prolonge la période réfractaire suivant la dépolarisation (Arber et Linn, 1985). Par ailleurs, une augmentation du courant K<sup>+</sup> pourrait être impliqué comme une cause de la prolongation de la période réfractaire (Seaman et Wachtel, 1978 ; Arber et Lin, 1985) comme indiqué dans notre enquête par prolongation des intervalles P-R et Q-T.

## 5. Conclusion

Nos résultats suggèrent que l'exposition aigue des *lapins Albinos* aux radiofréquences WIFI (2,45 GHz, pendant 1h) provoque des perturbations de l'ECG en induisant une tachycardie impliquer dans l'hypertension observée sous un environnement magnétique.

Ces résultats pourraient s'interpréter par un effet direct des RF sur la pompe cardiaque (Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> et l'altération de la conduction du tissu nodal) et un effet indirect qui s'exerce via le système sympathique.

## 1. Introduction

L'adrénaline est indiscutablement le traitement de choix du choc anaphylactique par ses effets sur les récepteurs alpha et bêta adrénergiques. C'est une hormone sécrétée par la glande médullosurrénale et qui contrôle la fréquence cardiaque, la pression artérielle et la ventilation des poumons. Cette hormone est majoritairement sécrétée par le système nerveux central et produit son effet en se fixant sur les récepteurs adrénergiques des cellules cibles. Les conséquences de l'adrénaline dépendent fortement de la dose et de la répartition des récepteurs alpha et bêta sur les organes. Globalement, les récepteurs alpha sont en plus grand nombre que les récepteurs bêta, mais ces derniers ont une plus forte affinité pour l'adrénaline (Brown, 1998 ; McLean-Tooke et al., 2003).

La dopamine est une catécholamine naturelle, précurseur de la noradrénaline, a des effets puissants sur le système cardiovasculaire. Elle agit au niveau des récepteurs alpha et bêta adrénergiques et/ou des récepteurs DA1- et DA2-dopaminergiques, (Frishman et Hotchkiss, 1996).

Des travaux de Havas (2008) ont prouvé que l'exposition aux CEM stimule la sécrétion de l'adrénaline. En plus, Paff (1963) a étudié la possibilité d'effets directs des OEM sur la fonction cardiaque. Il a exposé des cœurs isolés de poussins embryonnaires pendant 72 h et il a observé des dommages thermiques évidents à des doses élevées, mais les effets cohérents sur l'ECG ont été observés en l'absence de dommages thermiques à des niveaux inférieurs. Par la suite, plusieurs chercheurs ont rapporté des effets chronotropes de l'exposition RFEMF modifié par l'application des agents pharmacologique.

Une étude de Vangelova et al. (2005) sur les effets des RF à long-terme sur le système cardiovasculaire réalisé sur des opérateurs des stations de télévisions montrent que les radiofréquences provoquent des effets néfastes sur le système cardiovasculaire.

Ces résultats nous ont poussés à étudier l'efficacité des catécholamines (dopamine, adrénaline) sous un environnement magnétique chez le lapin.

## **2. Objectifs**

L'objectif de ce présent chapitre est i) Etude des effets des catécholamines sur l'ECG chez le lapin, ii) Etude des effets des catécholamines sous un environnement WIFI.

## **3. Résultats**

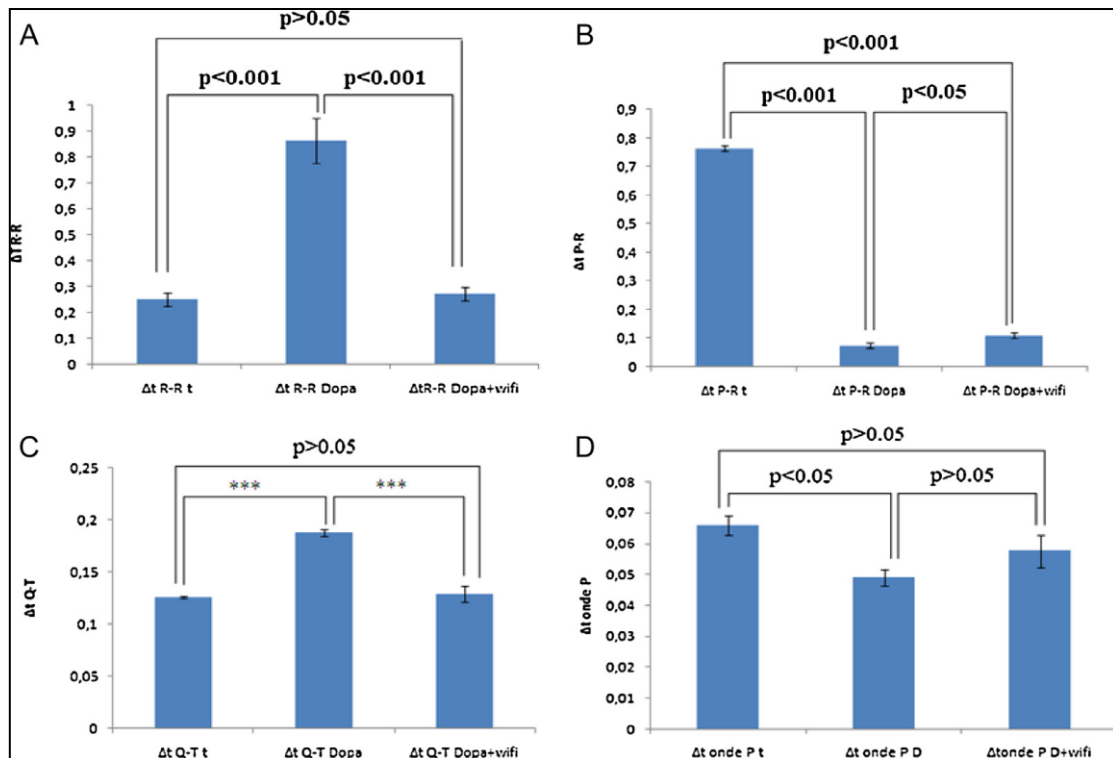
### **3.1. Effets de l'administration de la dopamine sur l'activité cardiaque et la pression artérielle sous un environnement magnétique (WIFI)**

#### **3.1.1. Effets d'une injection de dopamine sur les composantes de l'ECG sous un environnement magnétique (WIFI, 2,45 GHz/1h)**

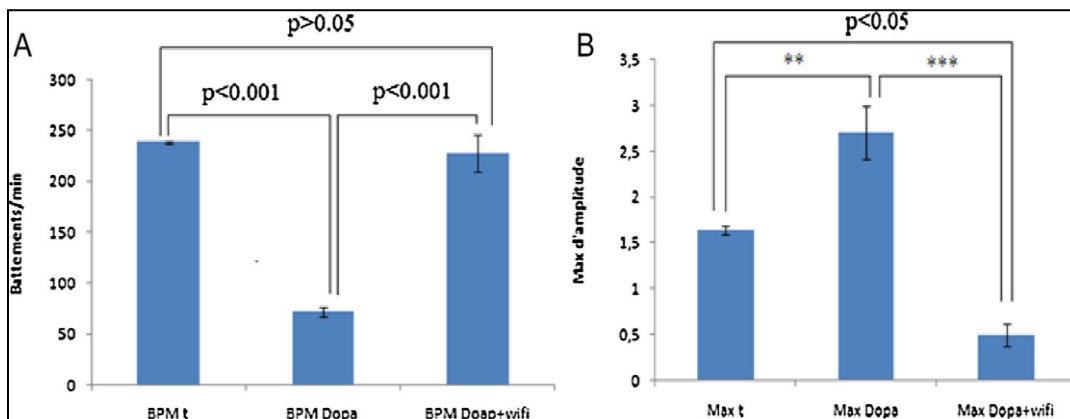
Notre étude a montré que l'injection unique de dopamine à raison de (0,50 ml / kg, iv) a induit une augmentation de la durée des intervalles R-R, Q-T et une diminution de l'intervalle PR et l'onde P de l'électrocardiogramme par rapport aux témoins. De plus, l'injection de dopamine sous exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h) provoque une diminution importante de la longueur des intervalles R-R et Q-T par rapport aux lapins ayant reçus uniquement la dopamine, tandis que l'onde P est restée inchangée (**Figure 16**).

#### **3.1.1.1. Effets d'une injection de dopamine sur les battements du cœur par minute et le maximum amplitude sous un environnement magnétique (WIFI)**

L'administration de la dopamine induit une diminution importante des battements du cœur et une augmentation de Max amplitude. Par contre, l'administration de la dopamine sous exposition WIFI (2,45 GHz, 1 h) induit une augmentation importante de battements par minute et une diminution de l'amplitude maximale, par rapport aux lapins injectés avec la dopamine seulement, comme indiqué dans la **figure 17**.

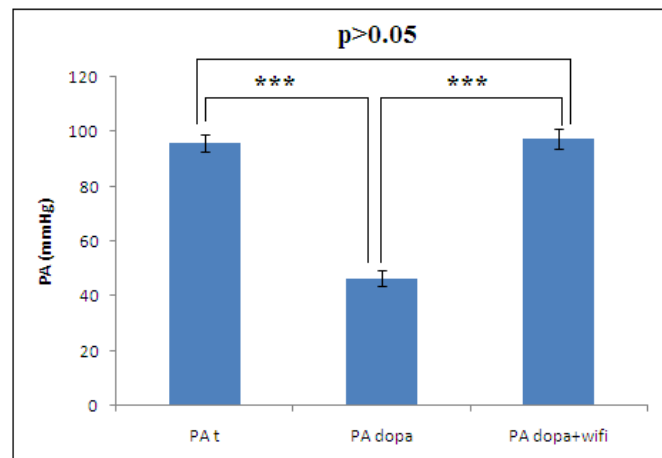


**Figure 16 :** Effets d'une injection unique de dopamine sur les composantes de l'électrocardiogramme chez le lapin sous une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h). Les valeurs sont exprimées comme la moyenne  $\pm$  écart-type pour des groupes de six animaux.



**Figure 17 :** Effets de l'injection de la dopamine sur les battements par minute (BPM) et de l'amplitude maximale (max) chez des lapins exposés aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h). Les valeurs sont exprimées comme la moyenne  $\pm$  écart-type pour des groupes de six animaux.

### 3.1.2. Effets d'une injection de la dopamine sur la pression artérielle sous l'exposition aux ondes WIFI (2,45 GHz/1h)

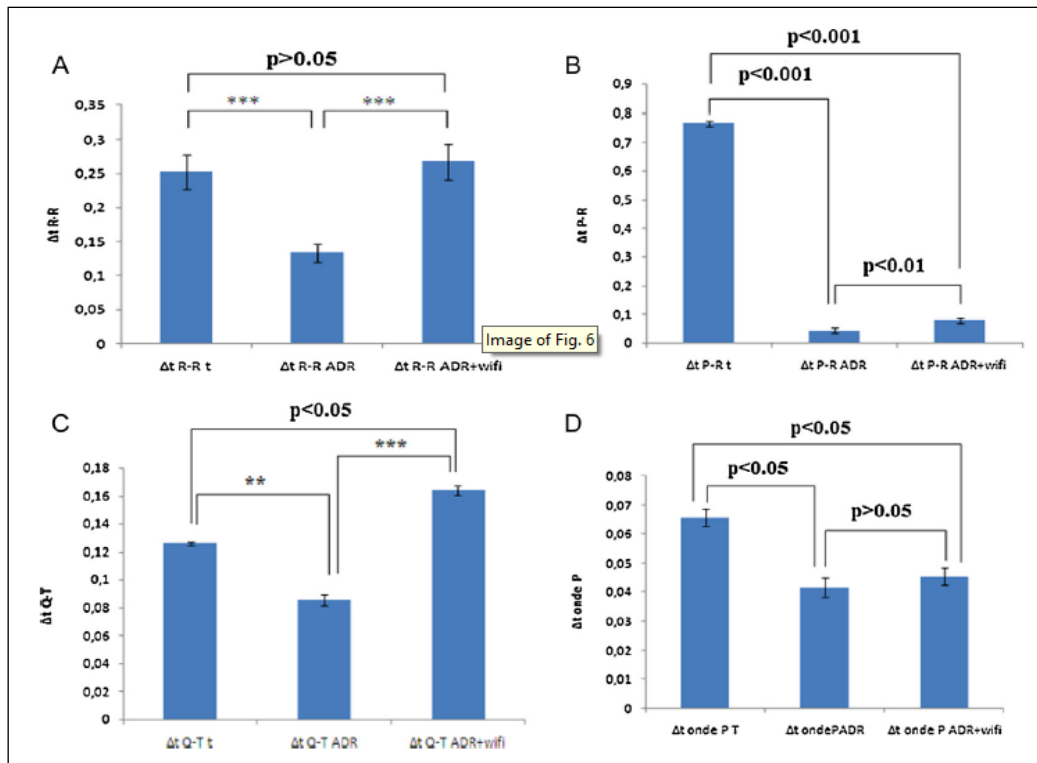


**Figure 18** : Effets d'une injection unique de la dopamine sur la pression artérielle après une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz/1h). Les valeurs sont exprimées comme la moyenne  $\pm$  écart-type pour des groupes de six animaux.

L'injection unique de la dopamine (0,50 ml / kg) a diminué la pression artérielle par rapport au témoin. En cas de lapins traités avec la dopamine sous les ondes WIFI on remarque un retour à l'état normal de la pression artérielle, ce qui montre que le WIFI (2,45 GHz, 1 h) altère les réponses classiquement observées après l'administration de la dopamine.

### 3.2.1. Effets d'une injection de l'adrénaline sur les composantes de l'ECG sous l'exposition aux ondes WIFI (2,45 GHz/1h)

L'injection d'adrénaline induit une diminution de la durée des intervalles R-R, P-R, Q-T et de l'onde P de l'électrocardiogramme par rapport aux témoins. Contrairement, le traitement combiné de l'adrénaline (0,50 ml / kg, iv) et le WIFI induit une augmentation importante de la durée des intervalles R-R et Q-T. Le même traitement provoque une diminution importante de la durée de l'intervalle P-R et l'onde P par rapport aux lapins traités avec de l'adrénaline seulement (**Figure 20 A-D**).



**Figure 19:** Effets d'une injection unique d'adrénaline sur les composantes de l'électrocardiogramme chez le lapin sous une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, 1 h).

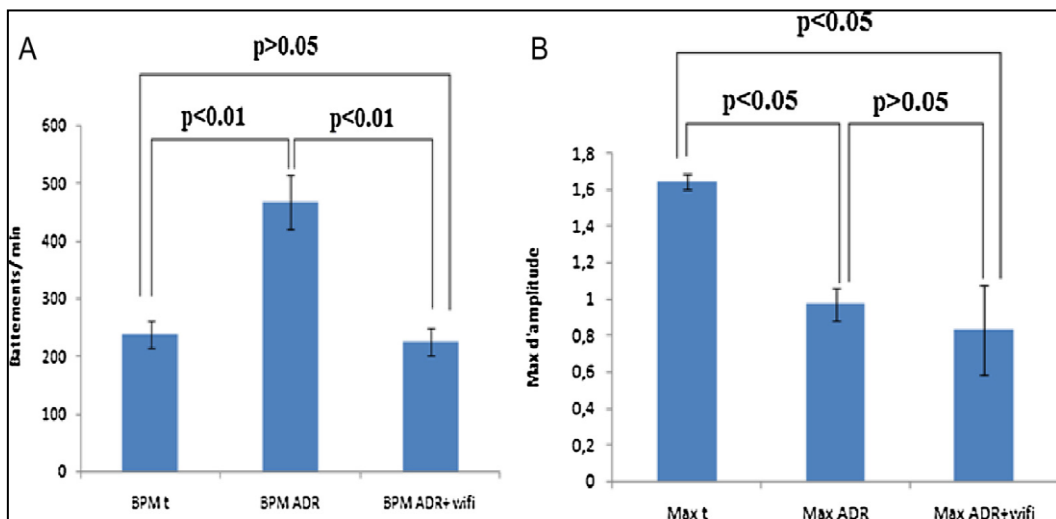
### 3.2.1.1. Effets d'une injection de l'adrénaline sur les battements cardiaque par minute et le maximum amplitude sous un environnement WIFI chez le lapin

L'injection d'adrénaline induit une augmentation importante de battements par minute et diminue l'amplitude maximale par rapport aux témoins. Dans le cas des lapins traités avec de l'adrénaline (0,50 ml / kg, iv) sous des ondes WIFI (2,45 GHz), on observe une diminution importante des battements par minute et l'amplitude maximale par rapport aux lapins injectés uniquement avec de l'adrénaline (**Figure 20 A et B**).

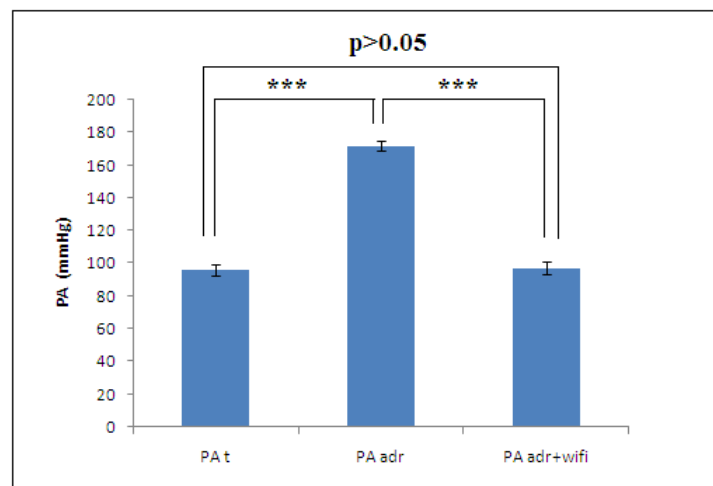
### 3.2.2. Effets d'une injection de l'adrénaline sur la pression artérielle sous un environnement WIFI (2,45 GHz/1h)

L'administration de l'adrénaline (0,50 ml / kg, iv) a augmenté la pression artérielle chez le lapin. Dans le cas des lapins traités avec l'adrénaline sous les ondes WIFI on remarque une diminution de la pression artérielle montrant ainsi que le WIFI (2,45

GHZ, 1 h) altère les réponses classiquement observées après l'administration des catécholamines.



**Figure 20** : Effets de l'injection d'adrénaline sur les battements par minute (BPM) et de l'amplitude maximale (Max) chez des lapins sous WIFI (2,45 GHz, 1 h). Les valeurs sont exprimées comme la moyenne  $\pm$  écart-type pour des groupes de six animaux.



**Figure 21** : Effets d'une injection unique de l'adrénaline sur la pression artérielle après une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz/1h). Les valeurs sont exprimées comme la moyenne  $\pm$  écart-type pour des groupes de six animaux.

#### 4. Discussion

Les premiers résultats de la présente étude suggèrent que l'injection unique de l'adrénaline (0,50 ml/kg) entraîne une hypertension et une augmentation de la fréquence cardiaque contrairement à l'injection de dopamine qui entraîne une hypotension et une diminution de la fréquence cardiaque chez le lapin.

L'adrénaline véhiculée se fixe sur les deux types de récepteurs  $\alpha$  et B. En se fixant sur les récepteurs  $\alpha$ , l'adrénaline entraîne l'activation d'une protéine  $G_i$  qui entraîne l'inhibition de l'adénylate cyclase et par conséquent une diminution de la production d'AMPc, Ce qui entraîne une vasoconstriction et donc une hypertension (McLean-Tooke et al., 2003). En plus les récepteurs dopaminergiques périphériques sont classés en deux sous-types appelés DA1 et DA2 (McCoy et al., 1986). Les récepteurs DA1 sont localisés au niveau des muscles cardiaques et leurs stimulations engendrent une vasodilatation et donc une hypotension (Berkowitz, 1983).

Nous avons montré d'autre part que l'injection d'adrénaline agit sur la fréquence cardiaque et entraîne une augmentation de l'amplitude du signal de l'ECG, et par conséquent augmente les BPM. Cette même injection provoque une diminution de la durée des intervalles R-R, Q-T, P-R et de l'onde P.

L'injection de la dopamine provoque une baisse de la fréquence cardiaque ce qui entraîne une baisse du débit cardiaque provoquant ainsi une diminution des BPM et de l'amplitude du signal de l'ECG. Cette injection entraîne une augmentation de la durée des intervalles R-R et Q-T et au contraire une diminution de l'intervalle P-R et de l'onde P.

Par ailleurs, les OEM (WIFI, 2,45 GHz) diminue l'efficacité des deux catécholamines sur la fonction cardiaque. Le mécanisme d'action des deux catécholamines (dopamine, adrénaline) pourrait s'exercer probablement via la perturbation de l'interaction ligand-récepteur par les ondes WIFI. Chiabrera et al. (2000) ont montré que la probabilité de liaison pourrait être modifiée par la composante électrique des RF, ainsi la liaison de petits ligands comme le  $Ca^{2+}$  sur une protéine modifie la conformation de celle-ci et contrôle ainsi sa fonction de récepteur.

Des effets sur les neurotransmetteurs ont été observés après 2 h d'exposition aux radiofréquences (DAS, 32 W/kg), ou GSM (4 W/kg). Une diminution nette de la liaison ligand-récepteur est observée à 4 W/kg par les récepteurs des glutamates (NMDA), de la dopamine et du GABA chez le rat. Une courbe dose-réponse est en cours de réalisation (Chiabrera et al., 2000).

## **5. Conclusion**

L'exposition des lapins aux ondes WIFI altère l'efficacité des deux catécholamines (dopamine, adrénaline) probablement via leurs récepteurs conduisant à la perturbation de la régulation de la fonction cardiaque et de la pression artérielle chez le lapin.

## 1. Introduction

La prévalence de l'ère de communication sans fil ne cesse de croître avec le développement de nouvelles technologies telles que le WIFI partout dans notre environnement (Brunel, 2004 ; Valberg et al., 2007). Au cours des dernières années, plusieurs études ont suggéré des effets biologiques et sanitaires des OEM (Jolanta et al., 2001 ; Lahbib et al., 2014 ; Ghodbane et al., 2015). Les troubles du sommeil ont été démontré chez certaines personnes vivant dans un environnement pollué par les ondes WIFI (Santini et al., 2003 ; Abdel-Rassoul et al., 2007).

Autres publications ont impliqué les RF dans la genèse de différentes pathologies comme le cancer (Lonn et al., 2004 ; Sadetzki et al., 2008), l'altération de la barrière hématoencéphalique, perturbation du système immunitaire (Reite et al., 1994 ; Lonn et al., 2004), ainsi que les troubles cardio-vasculaires (Gmitrov, 2007). Mahmoud et Shalaby (2005), ont montré que les micro-ondes émises par le téléphone portable peuvent changer l'activité anti-oxydante de l'organisme et conduit à un stress oxydatif.

Blank et Goodman (2004) ont montré que l'exposition aux ondes électromagnétiques stimule la sécrétion des hormones de stress. D'autres études ont montré que les champs magnétiques statiques provoquent des hyperglycémies (Chernysheva, 1990). En plus, Elferchichi et al. (2010) ont démontré que l'exposition subaigue (128 m T, 1h/ jour durant 15 jours) des rats males provoque une hyperglycémie avec une sécrétion réduite d'insuline et une diminution du taux de glycoène hépatique et musculaire.

De même, Ben Salah et al. (2013) ont démontré qu'une exposition aux WIFI (2,45 GHz, 1h durant 21 jours) provoque des désordres métaboliques provoquant ainsi une hyperglycémie. De plus, Sakurai et al. (2004) ont remarqué que l'exposition aux champs électromagnétiques à basse fréquences (60 Hz) réduit la sécrétion d'insuline stimulée par le glucose dans des structures de cellule  $\beta$  du pancréas. Havas (2008), révèle que les rayonnements électromagnétiques peuvent aggravés le diabète et sont responsables d'une augmentation du taux de glucose chez des sujets diabétiques. Toutes ces données nous ont poussé à étudier les effets des ondes WIFI sur la glycémie et l'efficacité de l'insuline chez le lapin.

## 2. Objectifs

L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier les effets de l'exposition aigue aux radiations WIFI (2,45 GHz, pendant une heure) des *lapins Albinos* sur la glycémie et sur l'efficacité de l'insuline.

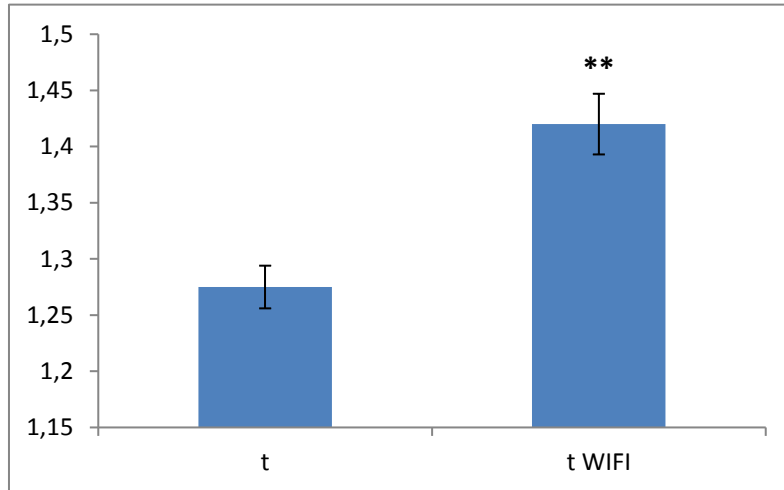
## 3. Résultat

### 3.1. Effets de l'exposition aigue aux ondes WIFI (2,45 GHz, pendant une heure) sur la glycémie chez le lapin

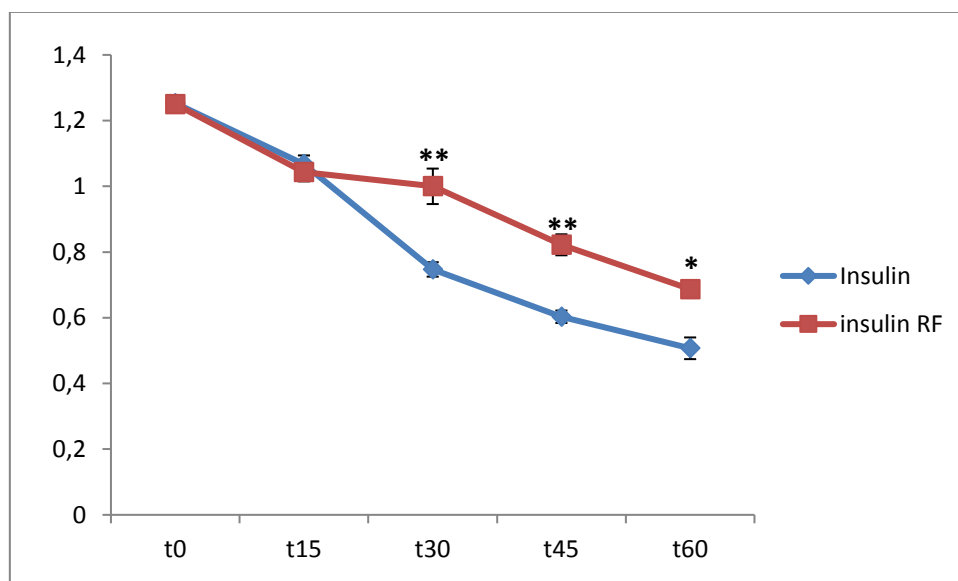
La mesure de la glycémie après l'exposition aigue aux radiofréquences (2,45 GHz/ 1h) montre une hyperglycémie permanente chez les lapins comparés aux témoins. Ce qui indique une perturbation métabolique induite par le WIFI (**Figure 22**).

### 3.2. Effets d'une exposition aigue aux ondes WIFI (2,45 GHz, pendant une heure) sur l'efficacité de l'insuline chez le lapin

La **figure (23)** montre la variation de la glycémie au cours de la période d'exposition (1 heure) et après l'injection d'insuline (0, 10 ml/kg) pour chaque groupe. Nous n'avons remarqué aucun changement sur l'effet de l'insuline à la 15ème minute, par contre, après une demi-heure, l'efficacité de l'insuline injectée (0, 10 ml/kg) a été atténuée ainsi après 45 min et 60 minute chez des lapins exposés à des hautes fréquences (2,45 GHz) comparés aux témoins.



**Figure 22:** Effets d'une exposition aiguë aux ondes WIFI (2, 45 GHz pendant 1 h) sur la glycémie. Les valeurs sont données comme la moyenne  $\pm$  SEM pour des groupes de six animaux chacun.



**Figure 23 :** Effets d'une unique injection d'insuline sous l'exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz, pendant 1 h). Chaque valeur représente la moyenne de six déterminations accompagnées par l'Erreur Standard Moyenne SEM.

#### 4. Discussion

Le développement de nouvelles technologies telles que le WIFI, qui permet le transfert de données à travers des micro-ondes (2,4GHz) et avec une vitesse de transmission 1-50 Mbps ; peut avoir des conséquences graves sur la santé publique et de multiples effets biologiques (Valberg et al., 2007 ; Sage et Carpenter, 2009).

La présente étude a montré que l'exposition aiguë aux RF (2,45 GHz pendant 1 h) a induit un état de diabète-like chez les lapins. Nos travaux montrent une altération de l'efficacité de l'insuline par les ondes WIFI. Des résultats d'auteurs ont révélé une perturbation de la sécrétion physiologique de l'insuline chez des rats exposés aux ondes WIFI (BenSalah et al., 2013 ; Elferchichi et al., 2010).

De plus, les travaux de Havas (2008) ont prouvé que l'exposition aux champs électromagnétiques stimule la sécrétion de l'adrénaline qui est une hormone de stress, impliqué dans l'inhibition de la libération de l'insuline et induit par conséquent un état d'hyperglycémie.

De même, l'étude de Blank et Goodman (2004) ont montré une augmentation dans la production des hormones de stress après l'exposition aux champs électromagnétiques de basses fréquences et des radiofréquences. Les résultats d'Abdelmelek et al. (2006), ont révélé une hyperactivité sympathique associée avec une augmentation du contenu en noradrénaline dans le muscle squelettique des rats exposés au SMF (128 m T), ce qui peut stimuler un effet glyco-génolytique. Ces résultats nous laissent supposer que l'hyperglycémie provoqué par le WIFI peut être le résultat d'une hyperactivité du système nerveux sympathique qui est impliqué dans l'augmentation du taux des hormones adrénérgiques et la stimulation de la mobilisation des réserves glucidiques.

Par ailleurs, les résultats de Chater et al. (2006), ont montré que l'exposition au champ magnétique statique (128 m T, 1h/jour pendant 10 j) entraîne une augmentation du taux de glucose chez le rat. Ces résultats sont en concordance avec les travaux de Gorczynska and Wegrzynowicz (1989). Nous suggérons par la présente recherche que l'hyperglycémie observée pourrait être attribuée à la stimulation des cellules  $\alpha$  et une inhibition des cellules  $\beta$ .

De même, les travaux de Gorczynska and Wegrzynowicz (1991), ont révélé une augmentation de la glycémie liée à une diminution de la sécrétion de l'insuline et une augmentation de la sécrétion du glucagon chez des rats exposés à un champ magnétique statique (1h / jour pendant 10 jours).

Jolley et al. (1982) ont rapporté les mêmes effets et montrent que l'exposition aux champs électromagnétiques à basse fréquences réduit la sécrétion d'insuline par les cellules  $\beta$  normaux.

D'après Li et al. (2005) l'exposition au champ de 50 Hz provoque un changement structural de l'insuline et réduit son affinité aux récepteurs cibles exprimés dans les hépatocytes.

Globalement, les RF (WIFI) altèrent l'efficacité de l'insuline par différents mécanismes à savoir i) Diminution de la biosynthèse de l'hormone par les cellules  $\beta$  ii) Changement de la conformation 3D du ligand et/ou du récepteur.

## 5. Conclusion

Après une exposition aigue aux radiofréquences WIFI (2,45 GHz/ 1h) nous avons remarqué une apparition d'une hyperglycémie montrant ainsi que ces RF provoquent des désordres du métabolisme glucidique conduisant à un état de diabète-like. On peut donc supposer que la fréquence 2,45 GHz est susceptible d'altérer l'efficacité de l'insuline en agissant sur les récepteurs spécifiques, modifiant ainsi la liaison ligand-récepteur ou même inhiber la stimulation des récepteurs.

## Discussion générale

L'exposition à des champs électromagnétiques artificiels, partie intégrante de notre vie moderne, ne cesse de croître avec l'utilisation des nouvelles technologies (WIFI, LIFI...). Depuis quelques années, des questions commencent à être soulevées quant à l'innocuité de ces ondes et l'inquiétude sociétale ne cesse de grandir. L'appréhension se cristallise essentiellement, tout du moins pour le moment, sur la dangerosité potentielle des lignes à haute tension et des communications sans fil (téléphonie mobile, WIFI). Ces technologies génèrent une nouvelle pollution appelée une pollution électromagnétique.

Dans les smart cities, le déploiement de la quatrième génération de téléphonie mobile, coexistant avec différentes générations de systèmes antérieurs, devrait s'accompagner d'une augmentation de l'exposition du public à des ondes électromagnétiques artificielles. À titre d'exemple, les tablettes numériques sont ainsi connectées au réseau de téléphonie mobile ou à des points d'accès WIFI, utilisées à la main, sur les genoux, pas loin des gonades...etc.

Le développement des télécommunications a été suivi par la recherche sur les effets des champs électromagnétiques radiofréquences (RF) sur les systèmes biologiques. L'expansion soudaine aux ondes WIFI au cours de ces dernières années a relancé les inquiétudes du fait de l'exposition de la population à une densité d'ondes radiofréquences de plus en plus importante.

Récemment, plusieurs études ont été effectuées sur l'évaluation des effets biologiques des ondes WIFI (Ait-Aïssa et al., 2012 ; Poullétier de Gannes et al., 2012 ; Ben Salah et al., 2013 ; Poullétier de Gannes et al., 2013). L'analyse de la littérature montre les carences scientifiques qui étudie les effets des ondes WIFI sur l'activité cardiaque et la pression artérielle. Nous allons évoquer pour la première fois les effets des ondes électromagnétiques sur l'efficacité des médicaments (catécholamines, insuline) utilisés en médecine humaine et vétérinaire.

Nos travaux montrent que l'exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz pendant 1 heure) a des effets remarquables sur la fréquence cardiaque (+22%) et la pression artérielle (+14%) provoquant une tachycardie et une hypertension chez le lapin.

Nos résultats confirment les travaux de Creasey and Goldberg (1993). De même, Braune et al. (1998) ont remarqué une augmentation de la pression artérielle (+10%) chez des volontaires exposés aux signaux GSM pendant 35 min. L'écoulement d'un

fluide conducteur tel que le sang, en présence d'un champ magnétique, conduit à induire des potentiels électriques (Togawa et al., 1967; Beischer, 1969) et les travaux de Chater et al. (2006) montrent aussi l'installation d'hypoxie-like statut.

L'interaction magnétohydrodynamique d'un champ magnétique stationnaire avec le flux sanguin a également été prévue pour des raisons théoriques pour produire une réduction de la vitesse d'écoulement et une élévation compensatoire de la pression artérielle pour retenir un débit de volume constant (Vardanyan, 1973). L'apparition de changement de pression dynamique pourrait, en principe, imposer un stress cardiovasculaire lors d'une exposition prolongée à des champs magnétiques élevés. En plus, Abdelmelek et al. (2006) montrent que les champs magnétiques provoquent une hyperactivité sympathique expliquant la tachycardie classiquement observés. Par ailleurs, Havas (2008) a prouvé que l'exposition aux champs électromagnétiques stimule la sécrétion de l'adrénaline ce qui indique une hyperactivité sympathique.

Ces champs électromagnétiques peuvent avoir un effet direct sur le cœur ; sachant qu'on perturbe l'homéostasie et en particulier sur le flux minéral des éléments divalents (Amara et al., 2007).

Nous supposons aussi que les perturbations du système cardiovasculaire sont dues aux effets des RF sur le système nerveux autonome sympathique, catécholamines plasmatiques et les glucocorticoïdes.

Dans la présente étude, les intervalles de temps R-R, P-R et Q-T ont été mesurés et comparés avant et après une exposition aiguë aux ondes WIFI. L'intervalle R-R, représente la durée de l'activité électrique rythmique du cœur, est l'inverse de la fréquence cardiaque. Le stimulateur rythmique du nœud sinusal est principalement responsable de la régulation des battements du cœur, mais le potentiel d'action du stimulateur cardiaque, qui se produit près du début de l'onde P, est trop faible pour le voir sur l'ECG. L'intervalle P-R représente le temps de conduction de l'activité électrique des oreillettes aux ventricules. L'intervalle Q-T est un indice de la durée du potentiel d'action ventriculaire (Katz, 1992 ; Seaman et Jauchem, 2004).

Beischer et Knepton (1964) étaient les premiers à rapporter des effets du champ magnétique sur l'ECG, ils ont observé une nette augmentation de l'amplitude du signal de l'onde T lors de l'exposition des singes écureuils aux champs fixes de 2-7 Tesla. Dans notre étude, nous avons enregistré des anomalies dans les enregistrements de l'ECG après l'exposition aiguë aux ondes WIFI, de même dans une étude sur 71

employés d'une station de radio diffusion, des anomalies de l'électrocardiogramme ont été décelées (Bortkiewicz et al., 1997 ; Chakeres et al., 2003).

Nous avons remarqué une diminution dans la durée de l'intervalle R-R, ce qui indique une augmentation de la fréquence cardiaque menant ainsi à une tachycardie ce qui explique l'hypertension. Cette même exposition provoque une augmentation dans la durée des intervalles P-R et Q-T qui montre que les ondes WIFI altèrent le système de conduction cardiaque (nœud sinusal).

De même Blanchi et al. (1973) ont remarqué une augmentation de la durée du complexe QRS et l'intervalle P-R, lorsque les souris ont été exposées à 100 kv / m (50 Hz). Ces changements dans l'enregistrement de l'ECG pourraient être expliqués par une simple réflexion de la tension magnétohydrodynamique générée par l'écoulement du sang en présence du champ magnétique appliqué (Sardjan et al., 2005), ou un effet direct ou indirect des ondes WIFI selon deux théories i) Théorie minérale  $Ca^{2+}$  ii) Théorie ionique ( $Na^+/K^+$ ).

Notre hypothèse de thèse vise à étudier les effets de l'exposition aiguë aux ondes WIFI sur l'interaction médicaments (dopamine et l'adrénaline) et leurs récepteurs spécifiques chez le lapin.

Dans cette étude, nous observons que l'injection unique de dopamine entraîne une hypotension et une diminution de la fréquence cardiaque contrairement à l'injection de l'adrénaline (0,50 ml/kg) ; qui entraîne une hypertension et une augmentation de la fréquence cardiaque.

L'injection de la dopamine provoque une augmentation de la durée des intervalles Q-T et R-R et donc une baisse de la fréquence cardiaque ; qui entraîne une baisse du débit cardiaque provoquant ainsi une diminution des battements du cœur et de l'amplitude du signal de l'ECG mais en même temps cette injection entraîne au contraire une diminution de l'intervalle P-R et de l'onde P.

Nous avons montré que l'injection d'adrénaline diminue la durée de l'intervalle R-R et agit donc sur la fréquence cardiaque et entraîne une augmentation de l'amplitude du signal de l'ECG, et par conséquent augmente les battements du cœur (BPM). Cette même injection provoque une diminution de la durée des intervalles Q-T, P-R et de l'onde P.

D'autres travaux montrent que l'injection de la dopamine provoque une hypotension et une bradycardie contrairement à l'injection de l'adrénaline qui provoque des effets opposés (McCoy et al., 1986 ; McLean-Tooke et al., 2003).

Nous avons remarqué que les effets de ces deux catécholamines a été remarquablement atténués après l'exposition aigue aux ondes WIFI, on peut donc supposer que la fréquence 2,45 GHz est susceptible d'altérer l'action de ces deux catécholamines en agissant sur les récepteurs spécifiques, modifiant ainsi la liaison ligand-récepteur ou même inhiber l'activité des récepteurs. Chiabrera et al. (2000) ont montré que la probabilité de liaison pourrait être modifiée par la composante électrique des RF. Ainsi, la liaison de petits ligands comme le  $Ca^{2+}$  sur une protéine modifie la conformation de celle-ci et contrôle ainsi sa fonction de récepteur.

De même, dans une autre étude, sur les effets des RF sur trois types principaux de récepteurs : les récepteurs N-Méthyl-D-Aspartate (NMDA) du glutamate (NT exciteur principal du SNC), les récepteurs de la dopamine (impliquée dans la motricité et dans les maladies neurodégénératives) et les récepteurs du GABA. Une diminution nette de la liaison ligand-récepteur est observée à 4 W/kg (Chiabrera et al., 2000).

Le 2ème volet de la thèse evalue l'existence d'effets de l'exposition aigue aux ondes WIFI sur la glycémie et l'efficacité de l'insuline.

Dans notre investigation, l'exposition à 2,45 GHz d'un système WIFI placé à une distance de 25 cm a provoqué un état de diabète-like. Nos résultats sont en concordance avec les travaux d'Elferchichi et al. (2010) et Ben Salah et al. (2013).

Cela montre que l'exposition aux RF provoque des désordres métaboliques du glucose, l'altération du métabolisme glucidique a été confirmée par une étude de la cinétique de la glycémie, montrant une variation oscillatoire dans les taux de glucose sanguin durant une exposition aigue (Ben-salah et al ., 2013), il ont suggéré que le désordre métabolique du glucose pourrait être expliqué par une altération de la fonction, de la structure et/ou la sécrétion de l'insuline après exposition aux ondes WIFI ce qui peut affecter l'utilisation de glucose par les tissus périphérique.

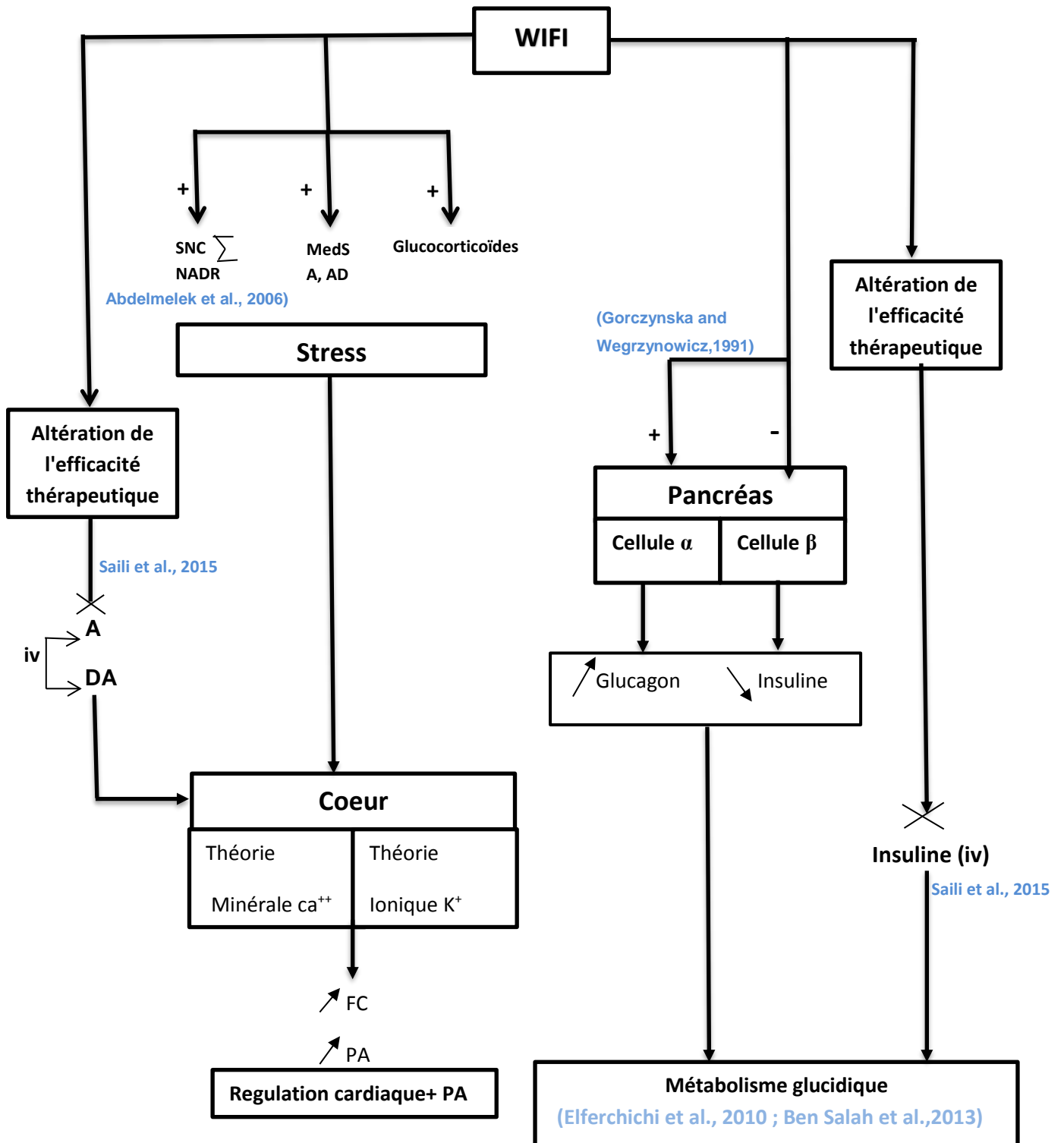
Une augmentation de triglycérides après une exposition au SMF (128 mT) a été démontrée dans une étude d'Elferchichi et al. (2010). De même en 2008, Havas a trouvé une nouvelle classe des diabétiques dont l'altération de la glycémie est renforcé par la pollution électromagnétique nommé diabète de type 3, les malades souffrants de cette forme de diabète sont capables de réguler le taux de glucose en contrôlant leurs expositions aux champs électromagnétiques RF.

On suppose que l'hyperglycémie observée peut être attribuée à l'augmentation de la sécrétion de glucagon et / ou à l'inhibition de la sécrétion de l'insuline de même ces

résultats suggèrent que les radiations électromagnétiques peuvent avoir des conséquences sur le pancréas.

Hayek et al. (1984) et Sakurai et al. (2004) ont montré une baisse de l'insuline plasmatique après l'exposition au champ magnétique ; ce qui pourrait expliquer les troubles du métabolisme glucidique. De même Jolley et al. (1982) ont réussi à prouver que les radiations électromagnétiques pulsées à basse fréquences affectes les ilots de Langerhans et réduisent la sécrétion de l'insuline. Une étude a montré une augmentation de la sécrétion du glucagon chez des rats exposés à un champ magnétique constant ce qui explique l'hyperglycémie observée (Gorczyńska and Wegrzynowicz,1991).

Enfin, nous avons évoqué la possibilité de l'altération de l'effet de l'insuline injecté (0,10 ml/kg ; iv) par l'exposition aux ondes WIFI (2,45 GHz pendant 1h). Nous avons observé que l'effet de l'insuline a été remarquablement atténué par cette exposition aigue, nous supposons donc que ces RF peuvent agir sur les récepteurs cible de l'insuline ou bien sur sa conformation structural. De même Li et al. (2005) ont remarqué une modification de la conformation structurale de l'insuline après une exposition à 50 Hz ce qui réduit son affinité au récepteur cible exprimés dans les hépatocytes.



**Figure 24 :** Schéma de synthèse de l'altération de l'efficacité thérapeutique des médicaments par les OEM (WIFI). (+) : stimulation, (-) : inhibition, × : altération, **A** : Adréraline, **DA** : Dopamine, **NADR** : Noradréraline, **iv** : injection intraveineuse, **Meds** : Médullossurréale.

## Conclusion et perspectives

L'objectif de ce travail était d'apporter des éléments de réponses tangibles quant aux craintes exprimées sur les effets des radiofréquences WIFI sur la santé humaine et animale.

De précédents travaux nous ont amené à explorer les effets spécifiques des ondes électromagnétiques sur le système cardiovasculaire et sur l'efficacité de quelques médicaments généralement utilisés en médecine humaine et vétérinaire.

Dans la première partie nous avons étudié spécifiquement les effets d'une exposition aiguë aux ondes WIFI (2,45 GHz/h) sur l'enregistrement de l'ECG chez des lapins Albinos ou la distance entre l'animal et les antennes WIFI était de 25 cm. Nos résultats montrent clairement une augmentation de la fréquence cardiaque (+ 22%,  $p < 0,01$ ) et de la pression artérielle (+ 14%,  $p < 0,01$ ).

Ces résultats pourraient s'interpréter par un effet direct des RF sur la pompe cardiaque ( $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  et l'altération de la conduction du tissu nodal) et un effet indirect qui s'exerce via le système sympathique.

Afin de démontrer l'ensemble des effets directs dont le mécanisme de l'implication de canal  $K^+$  dans les réponses cardiaques induites par ces RF, des études électrophysiologiques seront programmées pour les enquêtes futures.

Dans la présente étude, nous avons démontré une induction d'un statut de diabète-like chez les lapins exposés aux radiofréquences 2,45 GHz pendant une heure ce qui montre que les micro-ondes WIFI affectent considérablement le métabolisme glucidique menant ainsi à une hyperglycémie temporaire.

Fait intéressant, nous montrons pour la première fois que l'exposition aux ondes WIFI a des effets sur l'efficacité de quelques médicaments. Après une heure d'exposition aux RF l'effet de la dopamine (0,50 ml/kg, iv) et de l'adrénaline (0,50 ml/kg, iv) a été clairement atténué. De même, les effets biologiques de l'insuline injecté ont été altérés par ces RF.

On peut donc supposer que la fréquence 2,4 GHz est susceptible d'altérer l'efficacité de ces médicaments (Dopamine, Adrénaline et Insuline) qui pourrait

s'expliquer par une perturbation de l'interaction ligand- récepteur ou bien un changement de la conformation 3D du ligand et/ou récepteur.

L'utilisation cosmopolite du WIFI pourrait générer de nouvelles pathologies incurables liée à l'inefficacité des médicaments.

Comme perspectives nous proposons :

- Elargir les études pour évaluer l'altération de l'efficacité thérapeutiques d'autres classes pharmaceutiques utilisées en médecine humaine et vétérinaire.
- Expliquer le mécanisme d'altération de l'efficacité des médicaments par le WIFI : i) Conformation ligand ii) Conformation récepteur ou bien iii) L'énergie de liaison du ligand-récepteur.

## Références

### A

**Abdelmelek, H., Molnar, S., Servais, S., Cottet-Emard, J.M., Pequignot, J.M., Favier, R., Sakly, M., 2006.** Skeletal muscle HSP72 and norepinephrine response to static magnetic field in rat. *J. Neural Transm.* 113, 821–827.

**Abdel-Rassoul G., El- Fateh O.A., Salem M.A., Michael A., Farahat F., El-Batanouny M. and Salem., 2007.** Neurobehavioral effects among inhabitants around mobile phone base stations. *Neurotoxicology.*, 28: 434-440.

**Abdel-Rassoul G., El-Fateh OA., Salem MA., Michael A., Farahat F., El-Batanouny M., Salem E., 2007.** Neurobehavioral effects among inhabitants around mobile phone base stations. *Neurotoxicology.* 28(2):434-40.

**Acharya R. U., Lim C. M., Joseph P., 2002.** Heart rate variability analysis using correlation dimension and detrended fluctuation analysis. *ITBM-RBM;* 23 : 333-339.

**Adamec J., Adamec R., 2000.** ECG HOLTER: MANUEL D'INTERPRETATION ELECTROGARDIOGRAPHIQUE, Edition Médecine et Hygiène.

**Adey W., 1993.** Biological effects of electromagnetic fields. *J Cell Biochem.* 51(4): 410-6.

**Adlkofer Franz (2004).** Risk Evaluation of Potential Environmental Hazards from Low Energy Electromagnetic Field (EMF).

**Afsset-(2009).** L'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail. Les radiofréquences - mise à jour de l'expertise. Paris, Afsset.

**Afsset-(2010).** L'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail. Effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Paris,

**Ahlbom A., Green A., Kheifets L., Savitz D., Swerdlow A., 2004.** Epidemiology of Health Effects of Radiofrequency Exposure. *Environmental Health perspectives,* p1741-1754.

**Ait-Aissa S., Billaudel B., Poullietier de Gannes F., Ruffie´ G., Duleu S., et al (2012)** In utero and early-life exposure of rats to a Wi-Fi signal: screening of immune markers in sera and gestational outcome. *Bioelectromagnetics* 33:410–420.

**Aitken R.J., Bennetts L.E., Sawyer D., et al. 2005.** Impact of radiofrequency electromagnetic radiation on DNA integrity in the male germline. *International Journal of Andrology* 28, 171–179.

**Amara, S., Abdelmelek, H., Garrel, C., Guiraud, P., Douki, T., Ravanat, J.L., Favier, A., Sakly, M., Ben Rhouma, K., 2007.** Zinc supplementation ameliorates static magnetic field-induced oxidative stress in rat tissues. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 23 (2), 193–197, <http://dx.doi.org/10.1016/j.etap.2006.09.001>.

**Ammari M., Brillaud E., Gamez C., Lecomte A., Sakly M., Abdelmelek H., de Seze R., 2008.** Effect of a chronic GSM 900MHz exposure on glia in the rat brain. *Biomed. Pharmacother.* 62, 273–281.

**Anderson V., Joyner K.H. 1995.** Specific absorption rate levels measured in a phantom head exposed to radio frequency transmissions from analog handheld mobile phones. *Bioelectromagnetics* 16:60-69.

**Arber S.L., Lin J.C., 1985.** Microwave-induced changes in nerve cells: effects of modulation and temperature. *Bioelectromagnetics* 6, 257–270.

**Atasoy H.I., Gunal M.Y., Atasoy P., Elgun S., Bugdayci G., 2013.** Immunohistopathologic demonstration of deleterious effects on growing rat testes of radiofrequency waves emitted from conventional Wi-Fi devices. *Journal of Pediatric Urology.* 9: 223-229.

## B

**Barnes F. S., Greenbaum B., 2006.** Handbook of biological effects of electromagnetic fields, Third edition, CRC Press.

**Barnothy M.F., Ed. 1964.** Biological effects of electromagnetic fields. New York, Plenum.

**Baudry J., Rouzeau C., Goubault C., Robic C., Cohen-Tannoudji L., Koenig A., Bertrand E., Bibette J., 2006.** Acceleration of the recognition rate between grafted

ligands and receptors with magnetic forces. Proc Natl Acad Sci U S A. 31;103(44):16076-8.

**Beaubois E., Girard S., Lallechere S., Davies E., Paladian F., Bonnet P., Ledoigt G and Vian A., 2007.** Intercellular communication in plants: evidence for two rapidly transmitted systemic signals generated in response to electromagnetic field stimulation in tomato. Plant cell and environment, 30(7):834-844.

**Beaubois E., Girard S., Lallechere S., Davies E., Paladian F., Bonnet P., Ledoigt G. and Vian A. , 2007.** Intercellular communication in plants: evidence for two rapidly transmitted systemic signals generated in response to electromagnetic field stimulation in tomato. Plant cell and environment, 30(7):834-844.

**Beischer DE (1969).** Vectorcardiogram and aortic blood flow of squirrel monkeys (*Saimiri sciureus*) in a strong superconductive electromagnet. In: Barnothy M (ed): "Biological Effects of Magnetic Fields." Vol. 2. New York Plenum Press, pp 241-259.

**Beischer DE., Knepton JC., 1964.** Influence of strong magnetic fields on the electrocardiogram of squirrel monkeys (*Saimiri sciureus*). Aerospace Med 35:939-944.

**Beischer DE., Knepton JC., 1964.** Influence of strong magnetic fields on the electrocardiogram of squirrel monkeys (*Saimiri sciureus*). Aerospace Med 35:939-944.

**Bergqvist B., Arvidsson L., Pettersson E., Galt S., Saalman E., Hamnerius Y., Norden B., 1994.** Effect of microwave radiation on permeability of liposomes. Evidence of non-thermal leakage. Biochim Biophys Acta 1201: 51-54.

**Berkowitz BA., 1983.** Dopamine and dopamine receptors as target sites for cardiovascular drug action Fed Proc, 42:3019- 3021

**Binhi V. N., 2002.** Ed. Magnetobiology: Underlying Physical Problems. London, Academic Press, Elsevier Science.

**Blanchi D., Cedrini L., Ceria F., Meda E., Re G.G., 1973.** Exposure of mammals to strong 50-Hz electric fields. Arch. Fisiol. 70, 33.

**Blank M., 1992.** Na, K -ATPase function in altering fields. FASEB J. 6: 2434-2438.

**Blank M., 1995a.** Biological effects of environmental electromagnetic fields: Molecular Mechanism. *Biosystems*. 35 (2-3): 175-178.

**Blank M., 1995b.** EMF studies. *Science* 270: 1104-1105.

**Blank M., 2005.** Do electromagnetic fields interact with electrons in the Na,K-ATPase? *Bioelectromagnetics* 26, 677–683.

**Blank M., Ed. 1995a.** Electromagnetic fields, Biological Interactions and Mechanisms. Advances in chemistry series 250. Washington, DC, American Chemical Society.

**Blank M., Ed. 1995b.** *Electromagnetic fields, Biological interactions and Mechanisms*, Advances in Chemistry series 250. Washington, American chemical Society.

**Blank M., Goodman R., 2008.** A mechanism for stimulation of biosynthesis by electromagnetic fields: charge transfer in DNA and base pair separation. *Journal of Cellular Physiology* 214, 20–26.

**Blank, M., Goodman, R., 2009.** Electromagnetic fields stress living cells. *Pathophysiology* 16, 71–78.

**Blondeau M., Hiltgen M., 1980.** ELECTROCARDIOGRAPHIE CLINIQUE, Masson.

**Borbely A.A., Huber R., Graf T., Fuchs B., Gallmann E., Achermann P. 1999.** Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram. *Neurosci Lett* 275:207-210.

**Bortkiewicz, A., Zmyslony, M., Gadzicka, E., Palczynski, S., 1997.** Ambulatory ECG monitoring in workers exposed to electromagnetic fields. *J. Med. Eng. Technol.* 21 (2), 41–46.

**Braune S., Riedel A., Schulte-Monting J. et al. 2002.** Influence of a radiofrequency electromagnetic field on cardiovascular and hormonal parameters of the autonomic nervous system in healthy individuals. *Radiation Research* 158, 352–356.

**Braune S., Riedel A., Schulte-Monting J., Raczek J., 2002.** Influence of a radiofrequency electromagnetic field on cardiovascular and hormonal parameters of the autonomic nervous system in healthy individuals. *Radiat Res* 158:352–356.

**Braune S., Wrocklage C., Raczek J., Gailus T., Lucking CH., 1998.** Resting blood pressure increase during exposure to a radiofrequencyelectromagnetic field [letter] [see comments]. *Lancet* 351(9119):1857–1858.

**Braune, S., Wrocklage, C., Raczek, J., Gailus, T., Lücking, C.H., 1998.** Resting blood pressure increase during exposure to radio-frequency electromagnetic field. *Lancet* 351, 1857–1858.

**Brillaud E., Piotrowski A., de Seze R., 2007.** Effect of an acute 900MHz GSM exposure on glia in the rat brain: a time-dependent study. *Toxicology* 16, 23–33.

**Brown AFT., 1998.** Therapeutic controversies in the management of acute anaphylaxis. *J Accident Emerg Med*; 15: 89-95

**Brown RF., Marshall SV., 1986.** Differentiation of murine erythroleukemic cells during exposure to microwave radiation. *Radiat Res* 108:12–22.

**Brunel, J.L., 2004.** Les risques liés au WiFi. Observatoire Académique de la Sécurité Informatique: études/actualités.

**Byus C.V., Kartun K., Pieper S., and Adey W.R., 1988.** Increased ornithine decarboxylase activity in cultured cells exposed to low energy modulate microwave fields and phorbol ester tumor promoters. *Cancer Res.* 48:4222-4226.

## C

**Cai, G., Li, Q.Y., Wang, D.W., Qu, H.Y., Wang, S.M., Li, H., 2006.** The ECG effect of exposure to radar. *Chin. Heart J.* 18 (3), 325.

**Chater S., Abdelmelek H., Sakly M., Pequinot JM., Ben Rhouma K., 2006.** Effects of sub-acute exposure to magnetic field on blood hematological and biochemical parameters in female rats. *Turk J Hematol* 2006; 23:182-187

**Chernysheva O.N., 1990.** Status of the lipid phase of plasma membranes of the heart after repeated exposure to alternate magnetic field of 50Hz frequency. *Kosmicheskaia biologiya I Aviakosmicheskaia Meditsina.*, 24: 30-31.

**Chou C.K., Guy A.W., Kunz L.L., Johnson R.B., Crowley J.J., Krupp J.H. 1992.** Long-term, low-level microwave irradiation of rats. *Bioelectromagnetics* 13:469-496.

**Combes P.F., 1997.** Micro-ondes, lignes, guides et cavités. Dunod.

**Conti P., Gigante G.E., Cifone MG., Alesse E., Ianni G., Reale M., et al 1983.** Reduced mitogenic stimulation of human lymphocyte by extremely low frequency electromegneti fields. *FEBS Letters* 162(1): 156-160.

**Cook C.M., Thomas A.W., Prato F.S. (2002)** Human electrophysiological and cognitive effects of exposure to ELF magnetic and ELF modulated RF and microwave fields: a review of recent studies. *Bioelectromagnetics* 23:144-157.

**Cosquer B., Vasconcelos AP., Frohlich J., Cassal JC., 2005.** Blood-brain barrier and electromagnetic fields: effects of scopolamine methylbromide on working memory after whole body exposure to 2.45 GHz microwaves in rats. *Behav Brain Res* 161,p. 229-237.

**Creasey, W.A., Goldberg, R.B., 1993.** Safety of High Speed Guided Ground Transportation Systems: Potential Health Effects of Low Frequency Electromagnetic Fields Due to Maglev and Other Electric Rail Systems. US Department of Transportation, Federal Railroad Administration. Report DOT-FRA/ORD 93/31, Washington, DC.

**Crouzier D., 2006.** EFFETS NON THERMIQUES DES CHAMPS DE RADIOFREQUENCE SUR LE SYSTEME NERVEUX CENTRAL : ETUDE MULTIPARAMETRIQUE REALISEE SUR LE RAT VIGILE. *Neurons and Cognition*. Universit\_e Joseph-Fourier - Grenoble I, French. <tel-00012197>

## D

**D'Andrea JA., Gandhi OP., Lords JL., Durney CH., Astle L., Stensaas LJ., Schoenberg AA., 1980.** Physiological and behavioral effects of prolonged exposure to 915 MHz microwaves. *J Microw Power* 15:123–135.

**Dasdag S., Ketani MA., Akdag Z et al. 1999.** Whole-body microwave exposure emitted by cellular phones and testicular function of rats. *Urology Research* 27, 219–223.

**Dasdag S., Zulkuf Akdag M., Aksen F et al. 2003.** Whole body exposure of rats to microwaves emitted from a cell phone does not affect the testes. *Bioelectromagnetics* 24, 182–188.

**Davoudi M., Brossner C., Kuber W., 2002.** The influence of electromagnetic waves on sperm motility. *Journal für Urologie und Urogynäkologie* **19**, 18–22.

**Dawe A.S., Smith B., Thomas D.W.P., Greedy S., Vasic N., Gregory A., Loader B., and de Pomerai D.I., 2006.** A small temperature rise may contribute towards the apparent induction by microwaves of heat-shock gene expression in the nematode  
**Dawe A.S., Smith B., Thomas D.W.P., Greedy S., Vasic N., Gregory A., Loader B., and de Pomerai D.I., 2006.** A small temperature rise may contribute towards the apparent induction by microwaves of heat-shock gene expression in the nematode

**De Seze R., Fabbro-Peray P., Miro L., 1998.** GSM radiocellular telephones do not disturb the secretion of antepituitary hormones in humans. *Bioelectromagnetics* **19**:271–278.

**Diem E., Schwarz C., Adlkofer F et al. 2005.** Non-thermal DNA breakage by mobile-phone radiation (1800 MHz) in human fibroblasts and in transformed GFSH-R17 rat granulosa cells *in vitro*. *Mutation Research* **583**, 178–183.

**Duchêne A., Jousset-Dubien J., 2001.** Les effets biologiques des rayonnements non ionisants. Médecine-Sciences Flammarion.

## E

**Elder J.A., Czerski P.A., Stuchly M.A., Mild K.H. and Sheppard A.R., 1989.** Radiofrequency radiation. In: Sues MJ, Benwell-Morison DA, editors. Non-ionizing radiation protection. 2<sup>nd</sup> edition. Copenhagen: WHO., pp 117-173

**Elferchichi, M., Mercier, J., Coisy-Quivy, M., Metz, L., Lajoix, A.D., Gross, R., Belguith, H., Abdelmelek, H., Sakly, M., Lambert, K., 2010.** Effects of exposure to a 128-mT static magnetic field on glucose and lipid metabolism in serum and skeletal muscle of rats. *Arch. Med. Res.* **41**, 309–314.

**Elmas O., Comlekci S., Koylu H., 2012.** Effects of short-term exposure to powerline-frequency electromagnetic field on the electrical activity of the heart. *Arch. Environ. Occup. Health* **67** (2), 65–71, <http://dx.doi.org/10.1080/19338244.2011.578680>.

**Erogul O., Oztas E., Yildirim I et al. 2006.** Effects of electromagnetic radiation from a cellular phone on human sperm motility: an *in vitro* study. *Archives of Medical Research* **37**, 840–843.

## F

**Fejes I., Zavaczki Z., Szollosi J et al. 2005.** Is there a relationship between cell phone use and semen quality? *Archives of Andrology* **51**, 385–393.

**Fitzsimmons R., Farley J., Adey W., Baylink D., 1989.** Frequency dependence of increased cell proliferation, in vitro, in exposure to low-amplitude, low-frequency electric field: evidence for dependence on increased mitogen activity released into culture medium. *J cell physiol* **139**(3): 586-91.

**French P.W., Penny R., Laurence J.A., McKenzie D.R., 2001.** Mobile phones, heat shock proteins and cancer. *Differentiation*, **67**(4-5):93-97.

**Frey A.H., 1993.** Electromagnetic fields interactions with biological systems. *FASEB J* **7**: 272-281.

**Frishman, WH., Hotchkiss, H., 1996.** Selective and nonselective dopamine receptor agonists: an innovative approach to cardiovascular disease treatment. *Am Heart J.* **132**(4):861-70.

## G

**Gaffey, C.T., Tenforde, T.S., 1981.** Alterations in the rat electrocardiogram induced by stationary magnetic fields. *Bioelectromagnetics* **2**, 357–370.

**Gaffey, C.T., Tenforde, T.S., Dean, E.E., 1980.** Alterations in the electrocardiograms of baboons exposed to DC magnetic fields. *Bioelectromagnetics* **1**, 209.

**Ghodbane, S., Lahbib, A., Ammari, M., Sakly, M., Abdelmelek, H., 2015.** static magnetic field-exposure induced oxidative stress and apoptosis in rat kidney and muscle? Effect of vitamin E and selenium supplementations. *Gen Physiol Biophys.* **34**(1), 23-32. doi: 10.4149/gpb\_2014027.

**Gmitrov J., 2007.** Static magnetic field effect on the arterial baroreflex-mediated control of microcirculation: implications for cardiovascular effects due to environmental magnetic fields. *Radiat Environ Biophys.* **46**(3), 281-90.

**Gmitrov, J., 2007.** Static magnetic field effect on the arterial baroreflex-mediated control of microcirculation: implications for cardiovascular effects due to environmental magnetic fields. *Radiat. Environ. Biophys.* 46 (3),281–290.

**Gorczyńska E and Wegrzynowicz R., 1991.** Glucose homeostasis in rats exposed to magnetic fields. *Investigative Radiology.*, 26: 1095-1100.

## H

**Habash R.W.Y. 2008.** Bioeffects and therapeutic applications of electromagnetic energy. CRC Press, Taylor and Francis Group. expression. *Radiation research*, 172(3):265-287.

**Halliwell B. and Gutteridge J.M.C., 1984.** Lipid peroxidation, oxygen radicals, cell damage and antioxidant therapy. *Lancet I.*, 1396-1397.

**Hamrick PE., Fox SS.,1977.** Rat lymphocytes in cell culture exposed to 2450 MHz (CW) microwave radiation. *J Microw Power*12:77–87.

**Hashish AH., El-Missiry MA., Abdelkader HI., Abou-Saleh RH., 2008.** Assessment of biological changes of continuous whole body exposure to static magnetic field and extremely low frequency electromagnetic fields in mice. *Ecotoxicol Environ Saf.*71(3):895-902.

**Havas M., 2008.** Dirty Electricity Elevates Blood Sugar Among Electrically Sensitive Diabetics and May Explain Brittle diabetes. *Electromagnetic Biology and Medicine.*, 27: 135-146.

**Hayashi, Y., Yoshida, M., Yamato, M., Ide, T., Wu, Z., Ochi-Shindou, M., Kanki, T., Kang, D.C., Sunagawa, K., Tsutsui, H., Nakanishi, H., 2008.** Reverse of age-dependent memory impairment and mitochondrial DNA damage in microglia by an over expression of human mitochondrial transcription factor A in mice. *J. Neurosci.* 28, 8624–8634.

**Health Protection Agency., 2012.** Health Effects from Radiofrequency Electromagnetic Fields - RCE 20. Report of an independent Advisory Group on Non ionising Radiation. Available at

<http://www.hpa.org.uk/Publications/Radiation/DocumentsOfTheHPA/RCE20HealthEffectsfromRFElectromagneticFields/>

**Hinrichs H., Heinze H.J.** (2004) Effects of GSM electromagnetic field on the MEG during an encoding-retrieval task. *Neuroreport* 15:1191-1194.

**Huang AT., Mold NG., 1980.** Immunologic and hematopoietical alterations by 2,450-MHz electromagnetic radiation. *Bioelectromagnetics* 1:77–87.

## I

**IARC International Agency for Research on Cancer 2013.** Non-Ionizing Radiation, Part 2: Radiofrequency Electromagnetic Fields. *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, Vol 102. Lyon, IARC.

**ICNIRP (1998).** Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *Health Phys* 74:494-522.

**Ilhan, A., Gurel, A., Armutcu, F., Kamisli, S., Iraz, M., Akyol, O., Ozen, S., 2004.** Ginkgo biloba prevents mobile phone-induced oxidative stress in rat brain. *Clin. Chim. Acta* 340, 153–162.

**Irmak, M.K., Fadillioglu, E., Gulec, M., Erdogan, H., Yagmurca, M., Akyol, O., 2002.** Effects of electromagnetic radiation from a cellular telephone on the oxidant and antioxidant levels in rabbits. *Cell Biochem. Funct.* 20, 279–283.

**Israel M., Tomov P., 2000.** Epidemiological study of the effect radiofrequency radiation on operators in radio, TV and relay stations. In: Israel, M., Repacholi, M. (Eds.), *Proceedings of Eastern European Regional EMF Meeting and Workshop*. VM-OFSET, Sofia, pp. 145–154.

## J

**Jauchem JR., Frei MR., Ryan KL., Merritt JH., Murphy MR., 1999a.** Lack of effects on heart rate and blood pressure in ketamine anesthetized rats briefly exposed to ultra-wideband electromagnetic pulses. *IEEE Trans Biomed Eng* 46:117–120.

**Jauchem JR., Ryan KL., Frei MR., 1999b.** Cardiovascular and thermal responses in rats during 94 GHz irradiation. *Bioelectromagnetics* 20:264–267.

**Jehensen P., Duboc D., Lavergne T., Guize L., Gue´irin F., Degeorges M., Syrota A., 1988.** Change in human cardiac rhythm induced by a 2-T static magnetic field. *Radiology* 166, 227–230.

**Jentink J., Loane MA., Dolk H., Barisic I., Grane E., Morros JK., de Jong-Van de Berg LTW., 2010.** Valporic acid monotherapy in pregnancy and major congenital malformation. *N Engl J Med* 362:2185-93.

**Jolanta J., Janina G., Marek Z., Elzbieta R., Mariola S., Marek, K., 2001.** Influence of 7mT static magnetic field and iron ions on apoptosis and necrosis in rat blood lymphocytes. *J. Accup. Health*, 43, 379-381.

**Jolley W.B., Hinshaw D.B. et al., 1982.** Magnetic field effects on calcium efflux and insulin secretion in isolated rabbit islets of langerhans. *Bioelectromagnetics.*, 4: 103-106.

**Jones S. A., 2005.** M.S Ed, MHA, EMT-P, ECG NOTES INTERPRETATION AND MANAGEMENT GUIDE, F. A. Davis Company, Philadelphia, USA.

**Jung A., Schill WB., 2000.** [Male infertility. Current life style could be responsible for infertility]. *MMW Fortschritte der Medizin* 142, 31–33.

## K

**Kandeel FR., Swerdloff RS., 1988.** Role of temperature in regulation of spermatogenesis and the use of heating as a method for contraception. *Fertility and Sterility* 49, 1–23.

**Kato. A.** *Electromagnetics in biology.* Springer, 2006.

**Katz A.M., 1992.** *Physiology of the Heart*, 2nd ed. New York: Raven.

**Kilgallon SJ., Simmons LW. 2005.** Image content influences men’s semen quality. *Biology Letters* 1, 253–255.

**Koivisto M., Krause CM., Revonsuo A., Laine M., Hämäläinen H., 2000.**The effects of electromagnetic field emitted by GSM phones on working memory. *Neuroreport*. 5;11(8):1641-3.

**Koolman J., Röhm K.H., 1999.**Atlas de poche de biochimie, deuxième édition, Medecine-sciences, Flammarion, 122-123.

**Koylu, H., Mollaoglu, H., Ozguner, F., Naziroglu, M., Delibas, N., 2006.**Melatonin modulates 900 MHz microwave-induced lipid peroxidation changes in rat brain. *Toxicol. Ind. Health* 22, 211–216.

## L

**Lacy-Hullbert A., Metcalfe J., Hesketh R., 1998.** Biological responses to electromagnetic fields. *FASEB J.* 12: 395-420.

**Lahbib, A., Elferchichi, M., Ghodbane, S., Belguith, H., Chater, S., Sakly, M., Abdelmelek, H., 2010.** Time-dependent effects of exposure to static magnetic field on glucose and lipid metabolism in rat. *Gen. Physiol. Biophys.* 29, 390–395.

**Lai H.** (1992) Research on the neurological effects of nonionizing radiation at the *Caenorhabditis elegans*. *Bioelectromagnetics*, 27(2):88-97 .

**Lai H., Carino M.A., Horita A., Guy A.W.** (1989) Low-level microwave irradiation and central cholinergic activity: a dose-response study. *Bioelectromagnetics* 10:203-208.

**Lai H., Carino M.A., Horita A., Guy A.W.** (1992) Opioid receptor subtypes that mediate a microwave-induced decrease in central cholinergic activity in the rat. *Bioelectromagnetics* 13:237-246.

**Lai H., Carino M.A., Wen Y.F., Horita A., Guy A.W.** (1991) Naltrexone pretreatment blocks microwave-induced changes in central cholinergic receptors. *Bioelectromagnetics* 12:27-33.

**Lai H., Horita A., Chou C.K., Guy A.W.** (1987) Effects of low-level microwave irradiation on hippocampal and frontal cortical choline uptake are classically conditionable. *Pharmacol Biochem Behav* 27:635-639.

**Lai H., Horita A., Guy A.W.** (1988) Acute low-level microwave exposure and centralcholinergic activity: studies on irradiation parameters. *Bioelectromagnetics* 9:355-362.

**Lai H., Horita A., Guy A.W.** (1994) Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat. *Bioelectromagnetics* 15:95-104.

**Lai H., Horita A., Guy A.W.** (1994) Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat. *Bioelectromagnetics* 15:95-104.

**Lai H., Singh N.P.** (1995) Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 16:207-210.

**Lai H., Singh N.P., 1997.** Melatonin and a spin-trap compound block radio-frequency electromagnetic radiation-induced DNA strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 18, 446–454.

**Lai H., Singh N.P., 2005.** Effects of microwaves and a temporally incoherent magnetic field on single and double DNA strand breaks in rat brain cells. *Electromagn. Biol. Med.* 24, 23–29.

**Lefebvre M., Wiesendanger M., Blackinton D., Cherlin D., Mehta S., Polk c., 1992.** Alteration of immune cell response in low frequency fields. Proceedings of the Eighteenth IEEE Annual Northeast Bioengineering Conference (Cat. No. 92CH3238-3), New York, NY, USA, IEEE.

**Lerchl A., Krüger H., Niehaus M., Streckert JR., Bitz AK., Hansen V., 2008.** Effects of mobile phone electromagnetic fields at nonthermal SAR values on melatonin and body weight of Djungarian hamsters (*Phodopus sungorus*). *J Pineal Res.*;44 (3):267-72. doi: 10.1111/j.1600-079X.2007.00522.x.

**Li L., Dai Y. et al., 2005.** Pulsed electric field exposure of insulin induces ant-proliferative effects on human hepatocytes. *Bioelectromagnetics.*, 26: 639-647

**Lin, M.T., Beal, M.F., 2006.** Mitochondrial dysfunction and oxidative stress in neurodegenerative diseases. *Nature* 443, 787–795.

**Lonn S., Ahlbom A., Hall, P., Feychting M., 2004.** Mobile phone use and the risk of acoustic neuroma. *Epidemiology* 15, 653–659.

**Lotfi A. and Sharayar H.A., 2009.** Effects of 900 MHz Electromagnetic Fields Emitted by Cellular Phone on Total Cholesterol and Triglyceride Levels of Plasma in Syrian Hamsters (*mesocricetus auratus*). *Journal of Applied Biological Sciences.*, 3: 93-96.

**Lotz WG., Michaelson SM., 1978.** Temperature and corticosterone relationships in microwave-exposed rats. *J Appl Physiol.* 44:438–445.

**Lotz WG., Podgorski RP., 1982.** Temperature and adrenocortical responses in rhesus monkeys exposed to microwaves. *J Appl Physiol* 53:1565–1571.

**Lu ST., Lebda N., Pettit S., Michaelson SM., 1981.** Microwave induced temperature, corticosterone, and thyrotropin interrelationships. *J Appl Physiol* 50:399–405.

### M

**Magin RL., Lu S., Michaelson SM., 1977.** Stimulation of dog thyroid by local application of high intensity microwaves. *Am J Physiol* 233:E363–E368.

**Mahmoud M.M and Shalaby T.S., 2005.** Effects of Acute Exposure to Microwave Frequency Field of Mobile Phone Base Station on Antioxidant Enzymes Activities of some Mouse Tissues. *Journal of the Medical Research Institute.*, 26: 115-118.

**Mahrour N., Pologea-Moraru R., Moisescu MG., Orlowski S., Leveque P., Mir LM., 2005.** In vitro increase of the fluid-phase endocytosis induced by pulsed radiofrequency electromagnetic fields : importance of the electric field component. *Biochim Biophys Acta* 1668,p. 126-137.

**Mann K., Roschke J. (1996)** Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep. *Neuropsychobiology* 33:41-47.

**Mausset A.L., de Seze R., Montpeyroux F., Privat A. (2001)** Effects of radiofrequency exposure on the GABAergic system in the rat cerebellum: clues from semi-quantitative immunohistochemistry. *Brain Res* 912:33-46.

**McCoy CE., Douglas FL., Goldberg LI., 1986.** Selective antagonism of the hypotensive effects of dopamine agonists in spontaneously hypertensive rats. *Hypertension.* 8(4):298-302.

**McLean-Tooke AP., Bethune CA., Fay AC., Spickett GP., 2003.** Adrenaline in the treatment of anaphylaxis: what is the evidence?. *BMJ.* 327(7427):1332-5.

**McNamee J.P. and Chauhan V., 2009.** Radiofrequency radiation and gene/protein expression. *Radiation research*, 172(3):265-287.

**Meral I., Mert H., Mert N., Deger Y., Yoruk I., Yetkin A. and Siddik Keskin S., 2007.** Effects of 900-MHz electromagnetic field emitted from cellular phone on brain oxidative stress and some vitamin levels of guinea pigs. *Brain Research.*, 1169: 120-124

**Michaelson S.M., Houk W.M., Lebda N.J., Lu S.T., Magin R.L., 1975.** Biochemical and neuroendocrine aspects of exposure to microwaves. *Ann NY Acad Sci* 247:21–45.

Microwave irradiation affects gene expression in plants. *Plant signaling and behavior*, 1(2):67-70 .

**Mikolajczyk H., 1978.** Biological effects of electromagnetic fields below 300 MHz (pregnancy, litter size and gonadotropic activity of the anterior pituitary gland). *Med Pr* 29:111–120.

**Moustafa Y.M., Moustafa R.M., Belacy A., Abou-El-Ela S.H., Ali F.M., 2001.** Effects of acute exposure to the radiofrequency fields of cellular phones on plasma lipid peroxide and antioxidant activities in human erythrocytes. *J. Pharm. Biomed. Anal.* 26, 605–608.

## O

**Oktem, F., Ozguner, F., Mollaoglu, H., Koyu, A., Uz, E., 2005.** Oxidative damage in the kidney induced by 900-MHz-emitted mobile phone: protection by melatonin. *Arch. Med. Res.* 36, 350–355.

**Ozguner F., Altinbas A., Ozaydin M. et al. 2005.** Mobile phone-induced myocardial oxidative stress: protection by a novel antioxidant agent caffeic acid phenethyl ester. *Toxicology and Industrial Health* 21, 223–230.

**Ozguner F., Oktem F., Armagan A., Yilmaz R., Koyu A., Demirel R., Vural H., Uz E., 2005a.** Comparative analysis of the protective effects of melatonin and caffeic acid phenethyl ester (CAPE) on mobile phone-induced renal impairment in rat. *Mol. Cell. Biochem.* 276, 31–37.

**Ozguner F., Oktem F., Ayata A., Koyu A., Yilmaz H.R., 2005b.** A novel antioxidant agent caffeic acid phenethyl ester prevents long-term mobile phone exposure-induced renal impairment in rat. Prognostic value of malondialdehyde, N-acetyl-beta-D-glucosaminidase and nitric oxide determination. *Mol. Cell. Biochem.* 277, 73–80.

**Ozguner M., Koyu A., Cesur G et al., 2005.** Biological and morphological effects on the reproductive organ of rats after exposure to electromagnetic field. *Saudi Medical Journal* **26**, 405–410.

## P

**Paff GH., Boucek RJ., Nieman RE., Diechmann WB., 1963.** The embryonic heart subjected to radar. *Anat Rec* **147**:379–385.

**Panagopoulos DJ, Chavdoula ED, Nezis IP, Margaritis LH 2007** Celldeath induced by GSM 900-MHz and DCS 1800-MHz mobiletelephony radiation. *Mutation Research* **626**, 69–78.

**Pawlak, K., Sechman, A., Nieckarz, Z., Wojtysiak, D., 2013.** Effect of weak electromagnetic field on cardiac work, concentration of thyroid hormones and bloodaminotransferase level in the chick embryo. *Electromagn. Biol. Med.* **32** (2),173–181, <http://dx.doi.org/10.3109/15368378.2013.776424>.

**Peterson DJ., 1979.** An investigation of the thermal and athermaleffects of microwave irradiation on erythrocytes. *IEEE TransBiomed Eng* **26**:428–436.

**Phillips, J.L., Singh, N.P., Lai, H., 2009.** Electromagnetic fields and DNA damage. *Pathophysiology* **16**, 79–88.

**Pilla A.A., Muehsam D.J., Markov M.S., Siskin B.F., 1999.** EMF signals and ion/ligandbinding kinetics: prediction of bioeffective waveform parameters. *Bioelectrochem. Bioenerg.* **48**, 27–34.

**Pomerai D.I., Daniells C., H. David, Allan J., Duce I., Mutwakil M., Thomas D., Sewell P., Tattersall J., Jones D., and Candido P., 2000.** Non thermal heat-shock responseto microwaves. *Nature*, **405**(6785):417-418.

**Poullétier de Gannes F., Billaudel B., Haro E., Taxile M., Le Montagner L. et al., 2013.**Rat fertility and embryo fetal development:influence of exposure to the Wi-Fi signal. *Reprod Toxicol* **36**:1–5.

**Poullétier de Gannes F., Haro E., Hurtier A., Taxile M., Athane A. et al., 2012.**Effect of in utero Wi-Fi exposure on the pre-and postnataldevelopment of rats. *Birth Defects Res B Dev Reprod Toxicol***95**:130–136.

**Presman A.S., Frank J., Brown A., 1970.** Ed. Electromagnetic Fields and life. New York, London, Plenum Press.

## R

**Ramundo-Orlando A., Liberti M., Mossa G., D’Inzeo G., 2004.** Effects of 2.45 GHz microwaves fields on liposomes entrapping glycoenzyme ascorbate oxidase: evidence for oligosaccharide side chain involvement. *Bioelectromagnetics* 25,p. 338-345.

**Reite M., Higgs L., Lebet J.P., Barbault A., Rossel C., Kuster N., Dafni U., Amato D., Pasche B., 1994.** Sleep inducing effect of low energy emission therapy. *Bioelectromagnetics* 15, 67–75.

**Reite M<sup>1</sup> Higgs L., Lebet JP., Barbault A., Rossel C., Kuster N., Dafni U., Amato D., Pasche B., 1994.** Sleep inducing effect of low energy emission therapy. *Bioelectromagnetics*. ;15(1):67-75.

**Roberts NJ Jr., Lu ST., Michaelson SM., 1983.** Human leukocyte functions and the U.S. safety standard for exposure to radiofrequency radiation. *Science* 220:318–320.

**Roosli M., 2008.** Radiofrequency electromagnetic field exposure and non-specific symptoms of ill health: a systematic review. *Environ Res* 107(2): 277-287.

**Roux D., Vian A., Girard S., Bonnet P., Paladian F., Davies E., and Ledoigt G., 2006.** Electromagnetic fields (900 MHz) evoke consistent molecular responses in tomato plants. *Physiologia plantarum*, 128(2):283-288 .

**Roux D., Vian A., Girard S., Bonnet P., Paladian F., Davies E., and Ledoigt G., 2006 .** Electromagnetic fields (900 MHz) evoke consistent molecular responses in tomato plants. *Physiologia plantarum*, 128(2):283-288.

**Roux D., Vian A., Girard S., Bonnet P., Paladian F., Davies E., Ledoigt G., 2008.** High frequency (900 MHz) low amplitude (5 Vm<sup>-1</sup>) electromagnetic field: a genuine environmental stimulus that affects transcription, translation, calcium and energy charge in tomato. *Planta*, 227(4):883-891.

**Rubin GJ., Hillert L., Nieto-Hernandez R., van Rongen E., Oftedal G., 2011.** Do people with idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields

displayphysiological effects when exposed to electromagnetic fields? A systematic review of provocation studies. *Bioelectromagnetics* 32(8): 593-609.

## S

**Saalman E., Norden B., Arvidsson L., Hamnerius Y., Hojevic P., Connel KE., Kurucsev T., 1991.** Effects of 2.45 GHz microwaves radiation on permeability of unilamellar liposomes toto 5(6)- carboxyfluorescein. Evidence of non-thermal leakage. *Biochim Biophys Acta*1064,p.124-130.

**Sadetzki S., Chetrit A., Jarus-Hakak A., Cardis E., Deutch Y., Dvendevani S., Zultan A., Novikov I., Freedman L. and Wolf M., 2008.** *Cellular phone use and risk of benign and malignant parotid gland tumors-a nationwide case-control study. American Journal of Epidemiology., 335: 233-467.*

**Sadetzki S., Chetrit A., Jarus-Hakak A., Cardis E., Deutch Y., Duvdevani S., Zultan A., Novikov I., Freedman L., Wolf M., 2008.** Cellular phone use and risk of benign and malignant parotid gland tumors--a nationwide case-control study. *Am J Epidemiol.* 15;167(4):457-67.

**Sage, C., Carpenter, D.O., 2009.**Public health implications of wireless technologies.*Pathophysiology* 16, 233–246.

**Sakurai, T., Satake, A., Sumi, S., Inoue, K., Miyakoshi, J., 2004.** An extremely low frequency magnetic field attenuates insulin secretion from the insulinoma cell line, RIN-m. *Bioelectromagnetics* 25, 160–166.

**Sakurai, T., Satake, A., Sumi, S., Inoue, K., Miyakoshi, J., 2004.**An extremely low frequency magnetic field attenuates insulin secretion from the insulinoma cell line, RIN-m. *Bioelectromagnetics* 25, 160–166.

**Salford L.G., Brun A.E., Eberhardt J.L., Malmgren L., Persson B.R., 2003.** Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. *Environ. Health Perspect.* 111, 881–883.

**Santini R., Santini P., Le Ruz P., Danze J.M., and Seigne M., 2003.**Survey study of people living in the vicinity of cellular phone base stations. *Electromagnetic Biology and Medicine., 22: 41-49.*

**Santini R., Santini P., Danze JM., Le Ruz P., Seigne M., 2003.** [Symptoms experienced by people in vicinity of base stations: II/ Incidences of age, duration of exposure, location of subjects in relation to the antennas and other electromagnetic factors]. *Pathol Biol (Paris)*.51(7):412-5.

**Saunders R., Sienkiewicz Z., Kowalczyk C., 1991.** Biological effects of electromagnetic fields and radiation. *Journal of Radiological Protection* **11**, 27–42.

**Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks. (SCENIHR) 2009.** Health effects of exposure to EMF. Brussels: European Commission.

**Seaman R. L., and Jauchem J. R., 2004.** “Rat Electrocardiogram During Acute Exposure to Synchronized Burst of Ultra-Wideband Pulses,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 32, no. 4, pp. 1644 - 1652.

**Seaman R., Wachtel H., 1978.** Slow and rapid responses to CW and pulsed microwave radiation by individual *Aplysia* pacemakers. *J. Microw. Power* **13**,77–86.

**Selmaoui B., Lambrozo J. and Touttou Y., 1996.** Magnetic fields and pineal function in humans: Evaluation of nocturnal acute exposure to extremely low frequency magnetic fields on serum melatonin and urinary 6-sulfatoxymelatonin circadian rhythms. *Life science.*, **58**: 1539-1549.

**Sharlip ID., Jarow JP., Belker AM.et al., 2002.** Best practice policies for male infertility. *Fertility and Sterility* **77**, 873–882.

**Sharlip ID., Jarow JP., Belker AM.et al., 2002.** Best practice policies for male infertility. *Fertility and Sterility* **77**, 873–882.

**Simunic D., Wach P., Renhart W., Stollberger R. (1996)** Spatial distribution of high frequency electromagnetic energy in human head during MRI: numerical results and measurements. *IEEE Trans Biomed Eng* **43**:88-94.

**Sokolovic, D., Djindjic, B., Nikolic, J., Bjelakovic, G., Pavlovic, D., Kocic, G., Krstic, D., Cvetkovic, T., Pavlovic, V., 2008.** Melatonin reduces oxidative stress induced by chronic exposure of microwave radiation from mobile phones in rat brain. *J. Radiat. Res. (Tokyo)* **49**, 579–586.

**Stark KD., Krebs T., Altpeter E., Manz B., Griot C., Abelin T., 1997.** Absence of chronic effect of exposure to short-wave radiobroadcast signal on salivary melatonin concentrations in dairy cattle. *J Pineal Res* 22:171–176.

**Stavroulakis P., Ed. 2003.** Biological effects of electromagnetic fields. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag. University of Washington. *Bioelectromagnetics* 13:513-526.

**Stronati L., Testa A., Moquet J., et al. 2006.** 935 MHz cellular phone radiation. An in-vitro study of genotoxicity in human lymphocytes. *International Journal of Radiation Biology* 82, 339–346.

**Szmigielski S., Bortkiewicz A., Gadzicka E., 1998.** Alterations of diurnal rhythms of blood pressure and heart rate of workers exposed to radiofrequency electromagnetic fields. *Blood Press. Monit.* 3 (3), 323–330.

**Szmigielski S., Sobiczewska A., Kubacki R., 1999.** Dysregulation of autonomic control of cardiac function and shift of diurnal rhythms of blood pressure in workers exposed to RF electromagnetic fields. In: Bolton, S., Gemmel, C. (Eds.), *Mobile Telephones and Health – An Update of the Latest Research*. Rad City and Financial Document Department Print Consultancy, Surrey, UK, pp. 117–136.

## T

**Tahvanainen K., Nino J., Halonen P. et al. 2004.** Cellular phone use does not acutely affect blood pressure or heart rate of humans. *Bioelectromagnetics* 25, 73–83.

**Tenforde, T.S., Gaffey, C.T., Moyer, B.R., Budinger, T.F., 1983.** Cardiovascular alterations in Macaca monkeys exposed to stationary magnetic fields: experimental observations and theoretical analysis. *Bioelectromagnetics* 4, 1–9.

**Testylier G., Tonduli L., Malabiau R., Debouzy J.C. (2002)** Effects of exposure to low level radiofrequency fields on acetylcholine release in hippocampus of freely moving rats. *Bioelectromagnetics* 23:249-255.

**Thapan K., Arendt J., Skene DJ., 2001.** An action spectrum for melatonin suppression: Evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J Physiol* 535(Pt 1): 261–267.

**Thonneau P., Marchand S., Tallec A. et al., 1991.** Incidence and main causes of infertility in a resident population (1,850,000) of three French regions (1988–1989). *Human Reproduction* **6**, 811–816.

**Thuroczy G., Elekes E., Kubeiny G., et al 1993.** *Biological effects of modulates and CW microwaves exposure: in vivo experiments in immunology and neurophysiology.* Proceedings of COST 244 of mobile communications and ELF, Simunic D., (ed), pp. 64-74.

**Togawa T., Okai O., Oshima M., 1967.** Observation of blood flow E.M.F. in externally applied strongmagnetic fields by surface electrodes. *Med Biol Eng* 5:169-170.

**Touitou Y., Selmaoui B., 2012.** The effects of extremely low-frequency magnetic fields on melatonin and cortisol, two marker rhythms of the circadian system. *Dialogues ClinNeurosci* 14(4): 381-399.

**Tsang T.Y., 1992.** Molecular recognition and processing of periodic signals in cells: study of activation of membrane ATPases by altering electric fields. *Biochim. Biophys. Acta* 1113: 53-70.

**Tsang T.Y., Chang C.H., 2003.** Ion pump as Brownian motor: Theory of electroconformational coupling and proof of ratchet mechanism Na, K-ATPase action. *Physica A* 321(1-2): 124-38.

**Tsang T.Y., Tsang T.T., Kingsley E., Ciliciano R., 1979.** Relaxation phenomena in human erythrocyte suspensions. *Biophys J* . 16(9): 1091-104.

**Tsuji Y., Nakagawa M., Suzuki Y., 1996.** Five-tesla static magnetic fields suppress food and water consumption and weight gain in mice. *Ind Health* . ;34(4):347-57.

**Tynes T., Hannevik M., Andersen A., Vistnes Al., Haldorsen T., 1996.** Incidence of breast cancer in Norwegian female radio and telegraph operators. *Cancer Causes Control* 7:197–204.

## V

**Valberg P.A., van Deventer T.E., Repacholi M.H., 2007.** Workgroup report: base stations and wireless networks—radiofrequency (RF) exposures and health consequences. *Environ. Health Perspect.* 115 (3), 416–424.

**Vander Vorst A., Rosen A., Kotsuka Y., 2006.** RF/Microwave interaction with biological tissues. Wiley series in microwave and optical engineering. Wiley interscience,

**Vander Vorst A., Rosen A., Kotsuka Y., 2006.** RF/Microwave interaction with biological tissues. Wiley series in microwave and optical engineering. Wiley interscience,

**Vangelova, K., Deyanov, C., Israel, M., 2005.** Cardiovascular risk in operators under radiofrequency electromagnetic radiation. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 209 (2), 133–138, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheh.2005.09.008>.

**Vardanyan VA., (1973).** Effect of a magnetic field on blood flow. *Biophys* 18:515-521.

**Vaton M., 2008.** Danger sur les ondes. Paris, Le Nouvel Observateur, 2p.

**Verschaeve, L., Juutilainen, J., Lagroye, I., Miyakoshi, J., Saunders, R., de Seze, R., Tenforde, T., van Rongen, E., Veyret, B., Xu, Z., 2010.** In vitro and in vivo genotoxicity of radiofrequency fields. *Mutat. Res.* 705, 252–268.

**Vian A., Roux D., Girard S., Bonnet P., Paladian F., Davies E., Ledoigt G., 2006.** Microwave irradiation affects gene expression in plants. *Plant signaling and behavior*, 1(2):67-70.

## W

**Wang B., Lai H. (2000)** Acute exposure to pulsed 2450-MHz microwaves affects water-maze performance of rats. *Bioelectromagnetics* 21:52-56.

**Wang SM., Wang DW., Peng RY. et al., 2003.** [Effect of electromagnetic pulse irradiation on structure and function of Leydig cells in mice]. *Zhonghua Nan Ke Xue* 9, 327–330.

**Weisbrot D., Lin H., Blank M., and Goodman R., 2003.** Effects of mobile phone radiation on reproduction and development in *Drosophila melanogaster*. *Journal of cellular biochemistry*, 89(1):48-55.

**Weisbrot D., Lin H., Blank M., and Goodman R., 2003.** Effects of mobile phone radiation on reproduction and development in *Drosophila melanogaster*. *Journal of cellular biochemistry*, 89(1):48-55.

**Wiktor-Jedrzejczak W., Ahmed A., Czerski P., Leach WM., Sell KW., 1977.** Immune response of mice to 2450-mhz microwaveradiation: overview of immunology and empirical studies of lymphoid splenic cells. *Radio Sci* 12(No. 6S):209–219.

**Wilson JD., 1994.** Chapter 13. In: Isselbacher, et al., editors. *Harrison's Principles of Internal Medicine*. Thirteenth Edition.

**World Health Organization., 2006c.** Fact sheet 299. Electromagnetic fields and public health. Static electric and magnetic fields. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs299/en/index.html>.

World Health Organization., 2006b. Fact sheet 304. Electromagnetic fields and public health. Base stations and wireless technologies. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs304/en/index.html>.

**World Health Organization., 2001.** Fact sheet 263. Electromagnetic fields and public health: Extremely frequency fields and cancer. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs263/en/S>.

**World Health Organization., 2005a.** Information sheet February 2005. Electromagnetic fields and public health: Intermediate frequencies (IF). <http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/intmedfrequencies/en/S>.

**World Health Organization., 2005b.** Fact sheet 296. Electromagnetic fields and public health. Electromagnetic Hypersensitivity. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs296/en/index.html>.

**World Health Organization., 2006a.** The International EMF Project. Progress Report June 2005-2006. [http://www.who.int/entity/peh-emf/publications/reports/IAC\\_Progress\\_Report\\_2005-2006.pdf](http://www.who.int/entity/peh-emf/publications/reports/IAC_Progress_Report_2005-2006.pdf).

**World Health Organization., 2006d.** Environmental Health Criteria (series; e.g. monograph No. 238). <http://www.who.int/ipcs/publications/ehc/en/index.html>.

## Z

**ZDNET (2007)** Des associations s'opposent au déploiement des réseaux Wi-Fi dans les écoles (en ligne). Levallois-Perret, 2p.

**Zecca L., Mantegazza C., Margonato V., Cerretelli P., Caniatti M., Piva F., Dondi D., Hagino N., 1998.** Biological effects of prolonged exposure to ELF Electromagnetic fields in rats: III. 50 Hz electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*;19:57–66.

**Zhadobov M., Sauleau R., Le Dréan Y., Alekseev S.I., and Ziskin M.C., 2008.** Numerical and experimental millimeter-wave dosimetry for *in vitro* experiments. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 56(12):2998-3007.

## **Annexe I : Rappels sur les propriétés des ondes électromagnétiques.**

Cette annexe consiste en un bref rappel sur les propriétés des ondes électromagnétiques, notamment dans le contexte des interactions ondes/vivant.

### **1. Propriétés physiques des ondes électromagnétiques**

Contrairement aux ondes acoustiques, une onde EM constitue une forme de transport d'énergie sans support. Les ondes EM se déplacent dans le vide à la vitesse de la lumière. Dans un milieu, cette vitesse, ainsi que la longueur d'onde sont toutefois plus réduites. En fonction de leur type d'interaction avec la matière, les radiations EM peuvent être classées en deux catégories :

- Les radiations ionisantes, localisées au-delà de  $3 \cdot 10^{15}$  Hz (UV lointains, rayons X, rayons  $\gamma$ ).
- Les radiations non ionisantes (très basses fréquences, RF et micro-ondes, IR, lumière visible, UV proches).

Les radiations ionisantes peuvent briser des liaisons chimiques ou ioniser les atomes, ce qui crée des radicaux libres extrêmement dangereux pour les organismes vivants. À l'inverse, les radiations non ionisantes ne sont pas suffisamment énergétiques pour casser des liaisons chimiques ou ioniser des atomes. Les ondes non ionisantes peuvent cependant provoquer des réactions photochimiques, l'exemple le plus connu étant la photosynthèse ; les végétaux et les algues recueillant l'énergie lumineuse et utilisant celle-ci pour former des substances organiques à partir d'eau et de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) (Koolman et Röhm, 1999). Les réactions photochimiques restent restreintes aux propriétés de la lumière ; cependant, les rayonnements non ionisants peuvent interagir avec la matière, entraîner des vibrations moléculaires importantes, provoquant un dégagement de chaleur (cette propriété étant notamment utilisée par les fours à micro-ondes) (Duchêne et Jousot-Dubien, 2001). Cette production de chaleur serait associée à l'absorption de l'énergie électromagnétique, laquelle résulte de la conductivité des matériaux. Cette conductivité électrique dépendrait ainsi du mouvement translationnel de particules chargées (les ions) mais aussi du travail effectué par le champ électrique pour entraîner des rotations de dipôles, tels que l'eau par exemple. Celle-ci possède un moment dipolaire permanent qui s'oriente de manière aléatoire en absence de champ

électrique appliqué. Moment dipolaire dans sa direction mais, en raison de la viscosité de l'eau, devra fournir un travail pour entraîner la rotation des dipôles, lequel se traduira par un transfert d'énergie dans le liquide, conduisant ainsi au dégagement de chaleur (Habash, 2008).

Pour les ondes EM, le terme de densité de puissance (S) est employé. Il est exprimé en  $W/m^2$ , avec  $S = 1/2 E \cdot H$  où E est le champ électrique et H le champ magnétique. La puissance correspond au taux de production ou de consommation de l'énergie, mesurée en watts (W).

Un watt équivaut à un joule par secondes (J/s). La densité de puissance correspond à l'énergie qui passe par unité de surface par unité de temps. Cette caractéristique est largement utilisée en ondes MM comme grandeur dosimétrique, à cause de la faible pénétration de ces ondes dans les tissus biologiques. Pour quantifier l'énergie absorbée dans les tissus, le terme de débit d'absorption spécifique (DAS) est utilisé. Cette grandeur caractérise l'énergie absorbée par unité de masse par unité de temps. Le DAS est exprimé en W/kg. En relation avec l'intensité du champ électrique (notée E), au sein d'un tissu, cette formule devient alors :

$DAS = r \sigma E^2$  où  $\sigma$  est la conductivité spécifique du tissu (en S/m) et  $\rho$  la densité du tissu, (en  $kg/m^3$ ).

Cette grandeur est généralement utilisée pour quantifier les niveaux d'exposition pour les fréquences inférieures à 10 GHz. Les différentes approches de détermination de DAS en ondes MM sont décrites en détail dans l'article de Zhadobov et collègues (Zhadobov et al., 2008). Naturellement, les ondes utilisées dans les systèmes de télécommunication font partie de la catégorie des rayonnements non ionisants et ne sont pas capables d'induire de réactions de type photochimique.

## **2. Micro-ondes et ondes millimétriques à l'interface entre l'air et les tissus biologiques**

L'interaction entre une onde incidente et le corps humain peut être caractérisé par trois phénomènes :

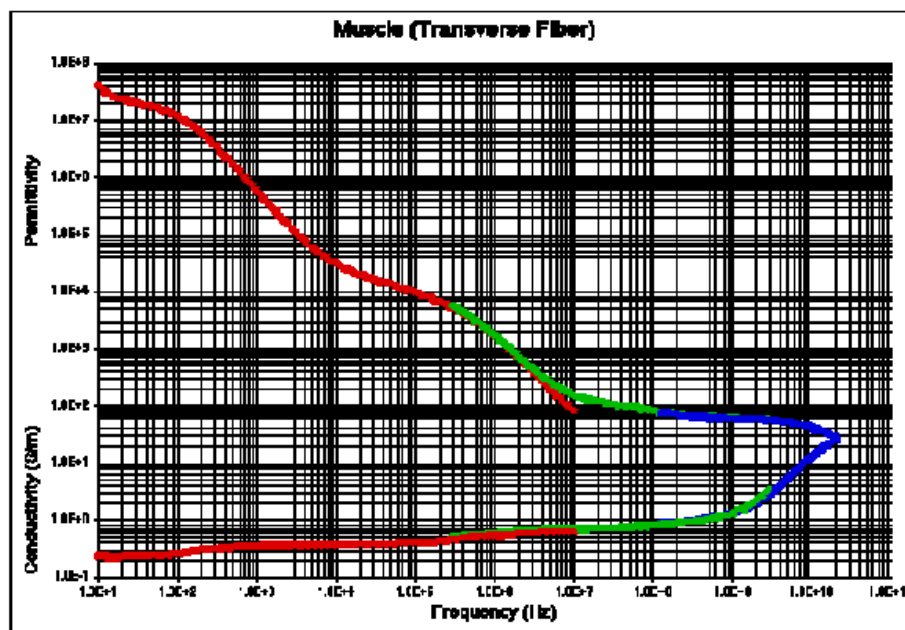
1. Réflexion de l'onde à la surface du corps.
2. Transmission d'une partie de l'énergie dans le corps.

### 3. Atténuation de l'onde dans les tissus.

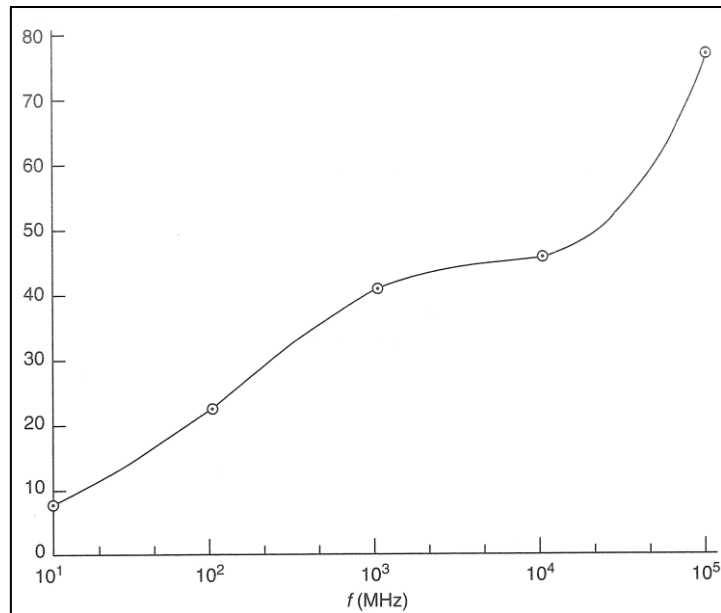
Ces trois phénomènes sont principalement déterminés par la fréquence et les propriétés diélectriques des tissus biologiques. Les propriétés diélectriques sont caractérisées par deux grandeurs physiques : (1) permittivité diélectrique et (2) conductivité.

La permittivité est une propriété qui décrit la réponse d'un milieu à un champ électrique appliqué et se traduit par la capacité de la matière à se polariser en réponse à l'exposition au champ électrique.

La conductivité caractérise les pertes électriques. On distingue la conductivité ionique qui est liée à la présence des charges libres et la conductivité électrique qui caractérise les pertes diélectriques. Plus la conductivité d'un tissu est grande et plus ce tissu est capable d'absorber de l'énergie électromagnétique. Il est important de préciser que la permittivité et la conductivité pour un tissu donné dépendent de la fréquence (**Figure A1**) (Zhadobov et al., 2008).



**Figure A1** : Permittivité et conductivité d'un tissu biologique (ici fibre transverse de muscle) en fonction de la fréquence (Zhadobov et al., 2008).

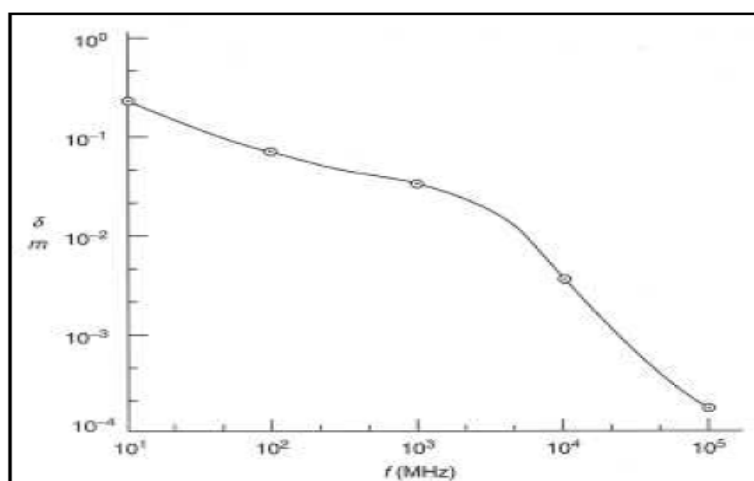


**Figure A2** : Représentation graphique de la correspondance entre le ratio de la puissance transmise et de la puissance incidente (exprimé en %, axe des ordonnées), en fonction de la fréquence (Barnes et Greenbaum, 2006).

La **figure A2** illustre quant à elle que la partie transmise de la puissance augmente avec la fréquence.

L'énergie transmise dans les tissus est partiellement absorbée par ces derniers. Le paramètre qui caractérise cette atténuation est dénommé profondeur de pénétration.

La **figure A3** montre la profondeur de pénétration d'une onde plane en fonction de la fréquence.



**Figure A3** : Profondeur de pénétration d'une onde électromagnétique dans un muscle (Barnes et Greenbaum, 2006).

On peut par ailleurs constater sur cette figure que les hautes fréquences du spectre micro-ondes pénètrent moins dans les tissus que les basses fréquences (Barnes et Greenbaum, 2006).

## **Annexe II : L'Electrocardiogramme (ECG).**

Le terme électrocardiogramme (ECG) désigne en général les techniques permettant de visualiser les différences de potentiel qui résultent de l'excitation du coeur. Ces potentiels naissent à la limite entre les zones excitées et celles non excitées du myocarde et sont mesurés entre deux points de la surface du corps. Une fibre cardiaque en cours de dépolarisation peut être assimilée à un dipôle électrique. A un instant donné le front de l'onde d'activation formé par l'ensemble des dipôles élémentaires crée un champ électrique qui est fonction des moments dipolaires. L'enregistrement de l'évolution temporelle du champ électrique résultant, effectué au moyen d'électrodes cutanées, est nommé l'électrocardiogramme de surface et appelé simplement ECG (Blondeau et Hiltgen, 1980 ; Jones, 2005).

### **1. Les dérivations**

Généralement les appareils électrocardiographiques peuvent enregistrer plusieurs différences de potentiel en même temps, selon l'emplacement et le nombre d'électrodes réparties sur le thorax et les membres. Chaque mesure de ces potentiels correspond à une dérivation de l'ECG. Un système de dérivations consiste en un ensemble cohérent de dérivations, chacune étant définie par la disposition des électrodes sur le corps du patient. L'emplacement des électrodes est choisi de façon à explorer la quasi-totalité du champ électrique cardiaque. Si on mesure le vecteur cardiaque dans une seule direction, on ne sera pas en mesure de le caractériser entièrement. Il est donc important d'avoir un standard de positionnement des électrodes (dérivations) pour l'évaluation clinique du signal ECG. En pratique, douze dérivations sont utilisées dans les plans frontal et transversal pour explorer l'activité électrique du coeur. On distingue :

#### **Trois dérivations bipolaires (ou dérivations standard) :**

Elles ont été déterminées par Einthoven (Einthoven, 1906) et ils sont appelées bipolaires car le potentiel est mesuré entre deux électrodes. Elles sont obtenues à

partir des potentiels du DI, DII, DIII obtenues par permutation des électrodes placées sur le bras droit, le bras gauche et la jambe gauche de la manière suivante :

$$DI = VL - VR$$

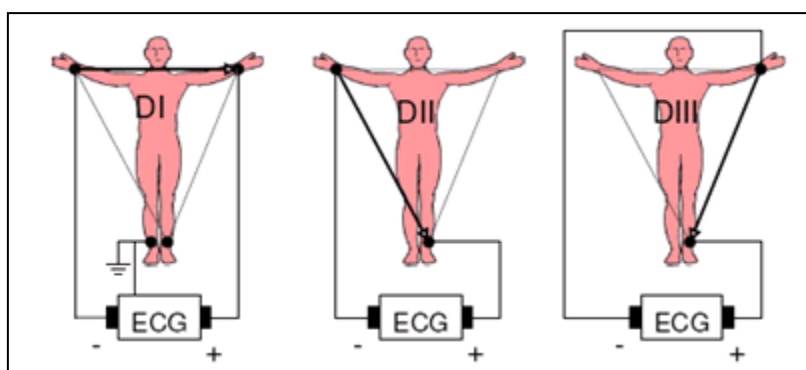
$$DII = VF - VR$$

$$DIII = VF - VL$$

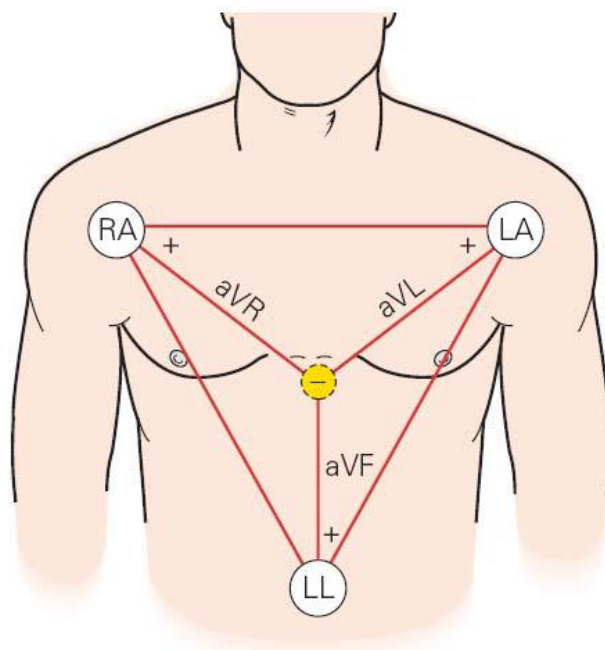
Où VR correspond au potentiel au bras droit, VL correspond au potentiel au bras gauche et VF correspond au potentiel dans la jambe gauche. La jambe droite est reliée à la masse. Les vecteurs obtenus forment alors un triangle équilatéral appelé triangle d'Einthoven comme donné sur **la figure (A4)**.

#### - Trois dérivations unipolaires aVR, aVL, aVF :

Les dérivations unipolaires des membres permettent d'étudier l'activité électrique du cœur sur le plan frontal. Elles ont été déterminées par Wilson (Wilson et al., 1934). Ces dérivations permettent de mesurer la tension entre un point de référence et le bras droit, le bras gauche et la jambe gauche respectivement. Le point de référence est réalisé par la moyenne des signaux qui apparaissent sur les deux autres membres qui ne sont pas en observation. A cet effet, on utilise des résistances de valeur élevée, supérieure à 5MΩ. **La figure (A4)** montre les dérivations unipolaires.

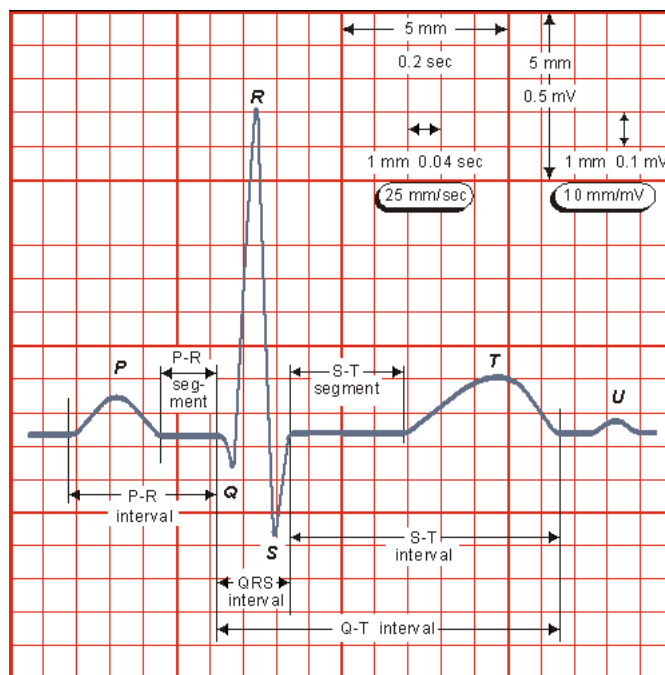


**Figure A4** : Montage d'Einthoven pour l'enregistrement des dérivations bipolaires des membres.



**Figure A5** : Dérivations unipolaires.

Le processus de dépolarisation et de repolarisation des structures myocardiques se présente dans l'ECG comme une séquence de déflexions ou ondes superposées à une ligne de potentiel zéro, appelée ligne isoélectrique ou ligne de base. Ces déflexions sont dites positives si elles sont situées au-dessus de la ligne isoélectrique sinon elles sont dites négatives. Pour chaque battement cardiaque l'ECG enregistre principalement trois ondes successives (Adamec et Adamec, 2000 ; Jones, 2005) comme montré sur **la figure (A6)**.



**Figure A6 : Tracé ECG.**

#### - L'onde P:

Elle représente la dépolarisation auriculaire. Cette onde peut être positive ou négative avec une durée de l'ordre de 90 ms. Généralement son observation est difficile, spécialement dans des conditions bruitées. Il faut noter que la repolarisation auriculaire n'est pas visible sur l'ECG car elle coïncide avec le complexe QRS d'amplitude plus importante.

#### - Le complexe QRS:

Il correspond à la dépolarisation ventriculaire précédant l'effet mécanique de contraction et il possède la plus grande amplitude de l'ECG. Il est constitué de trois ondes consécutives : l'onde Q qui est négative, l'onde R qui est positive dans un ECG normal et l'onde S qui est négative. Sa durée normale est comprise entre 85 et 95 ms.

#### - L'onde T:

Elle correspond à la repolarisation des ventricules, qui peut être négative, positive ou biphasique et qui a normalement une amplitude plus faible que le complexe QRS. Bien que la dépolarisation et la repolarisation des ventricules soient des événements opposés, l'onde T est normalement du même signe que l'onde R, ce qui indique que la dépolarisation et la repolarisation ne sont pas symétriques.

L'ECG est aussi caractérisé par plusieurs intervalles comme on peut voir sur la **figure (A6)** :

**- L'intervalle RR :**

Il est délimité par les sommets de deux ondes R consécutives et d'où est évaluée la fréquence cardiaque instantanée. Cet intervalle est utilisé pour la détection des arythmies ainsi que pour l'étude de la variabilité de la fréquence cardiaque.

**- Le segment ST:**

Il représente l'intervalle durant lequel les ventricules restent dans un état de dépolarisation actif. Il est aussi défini comme la durée entre la fin de l'onde S et le début de l'onde T.

**- L'intervalle PQ:**

Il représente l'intervalle de temps entre le début de la dépolarisation des oreillettes et le début de la dépolarisation ventriculaire. Il représente le temps nécessaire à l'impulsion électrique pour se propager du noeud sinusal jusqu'aux ventricules et il est mesuré entre le début de l'onde P et le début du complexe QRS.

**- L'intervalle QT:**

Il représente la durée entre le début du complexe QRS et la fin de l'onde T. Cet intervalle reflète la durée de la dépolarisation et repolarisation ventriculaire. En effet sa dynamique peut être associée à des risques d'arythmie ventriculaire et de mort cardiaque sou

