

2014-2015

**Thèse**

pour le

**Diplôme d'État de Docteur en Pharmacie**

**IMPACT SUR LA SANTÉ  
DES CHAMPS  
ÉLECTROMAGNÉTIQUES  
NON IONISANTS**

**SEVAUX Stanislas**

Né le 29 novembre 1987 à Angers (49)

Sous la direction de Mme  
PECH Brigitte et de Mr LARCHER Gérald

Membres du Jury |  
Gérald LARCHER| Président  
Brigitte PECH| Directrice  
Gérald LARCHER| Co-Directeur  
Jacques MALINGE| Membre  
Benoît DELDALLE| Membre



Soutenue publiquement le :  
17 octobre 2014

# ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussigné Stanislas SEVAUX  
déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une  
partie d'un document publiée sur toutes formes de support, y compris l'internet,  
constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée.  
En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées  
pour écrire ce rapport ou mémoire.

signé par l'étudiant(e) le **17 /09 / 2014**

**Année Universitaire 2014-2015****Liste des enseignants****Département Pharmacie*****PROFESSEURS******Disciplines***

BENOIT Jean-Pierre	Pharmacotechnie - Biopharmacie
DUVAL Olivier	Chimie Thérapeutique
ÉVEILLARD Matthieu	Bactériologie - Virologie
FAURE Sébastien	Pharmacologie
JARDEL Alain	Physiologie
LAGARCE Frédéric	Pharmacotechnie-Biopharmacie
LARCHER Gérald	Biochimie
MARCHAIS Véronique	Bactériologie - Virologie
PASSIRANI Catherine	Chimie générale – Chimie analytique
RICHOMME Pascal	Pharmacognosie
SAULNIER Patrick	Biophysique pharmaceutique et biostatistiques
SERAPHIN Denis	Chimie Organique
VENIER Marie-Claire	Pharmacotechnie - Biopharmacie

***PAST******Disciplines***

BRUNA Étienne	Industrie
---------------	-----------

***MAITRES DE CONFERENCES******Disciplines***

ANNAIX Véronique	Biochimie Générale et Clinique
BAGLIN Isabelle	Pharmaco - Chimie
BASTIAT Guillaume	Biophysique – biostatistiques -Rhéologie
BENOIT Jacqueline	Pharmacologie et Pharmacocinétique
CLERE Nicolas	Physiologie - Pharmacologie
DERBRÉ Séverine	Pharmacognosie-
FLEURY Maxime	Immunologie
GUILET David	Chimie Analytique

**MAITRES DE CONFERENCES**

***Disciplines***

HELESBEUX Jean-Jacques	Chimie Organique
LANDREAU Anne	Botanique
MALLET Marie-Sabine	Chimie Analytique et Bromatologie
MAROT Agnès	Parasitologie et Mycologie médicale
PECH Brigitte	Pharmacotechnie
RIOU Jérémie	Biostatistiques
ROGER Émilie	Pharmacotechnie
SCHINKOVITZ Andréas	Pharmacognosie
TRICAUD Anne	Biologie Cellulaire

**A.H.U.**

***Disciplines***

BRIS Céline	Biochimie
SPIESSER-ROBELET Laurence	Pharmacie clinique et Éducation Thérapeutique

**PRCE (Professeurs certifiés affectés  
dans l'enseignement supérieur)**

***Disciplines***

BRUNOIS-DEBU Isabelle	Anglais
-----------------------	---------

**ATER (Assistants Enseignement  
Supérieur et Recherche).**

***Disciplines***

BOISARD Séverine	Chimie analytique
DESHAYES Caroline	Bactériologie
RODIER Marion	Pharmacologie
VERRIER Julie	Parasitologie et mycologie médicale

# REMERCIEMENTS

Au Professeur Gérald Larcher, pour avoir accepté d'être co-directeur de ma thèse et de présider le jury. Votre réactivité et votre professionnalisme m'ont permis de rendre ce travail dans les temps.

A Madame Brigitte Pech, pour son travail en tant que directrice de thèse. Votre patience et votre disponibilité ainsi que vos nombreux conseils m'ont été d'une aide précieuse.

A Monsieur Jacques Malinge, pour son encadrement en tant que maître de stage. Merci d'avoir accepté de devenir membre du jury.

A Monsieur Benoît Deldalle, pour sa présence dans le jury, mais aussi pour son amitié sans faille et tous les bons moments passés ou à venir.

A mes parents, pour m'avoir permis de faire mes études dans des conditions optimales, avec cette joie de vivre qui les caractérise.

A mes sœurs, pour leurs fous-rires et leur éternelle bonne humeur.

A mon frère, avec qui l'aventure de la pharmacie ne fait que commencer, en espérant dévaler à nouveau quelques pistes à ses côtés quand la tempête sera passée.

A Paul Despres, pour son aide précieuse et sa disponibilité à toute heure.

A Hubert, Victor, Baptiste, Clément, Gérard, Jérôme, Jean-Baptiste, Lucas, Mathieu, Walid, Ludovic, Hugues, Claire, Mathilde, Alice, Maëlis, Daphné, Marion, Marie-Astrid, Marie et tous les autres, pour toutes ces soirées, ces road-trips, ces voyages... Que tout ceci dure le plus longtemps possible.

A Margaux, pour sa présence, son soutien, son sourire et son amour qui ne m'apportent que du bonheur.

# SOMMAIRE

**LISTE DES ABREVIATIONS**

**LISTE DES UNITÉS**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES TABLEAUX**

**INTRODUCTION.....** **1**

**1. RAPPELS PHYSIQUES A PROPOS DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES .....** **3**

**1.1 DEFINITION .....** **3**

**1.1.1. Modèle ondulatoire .....** **3**

**1.1.2. Modèle corpusculaire .....** **4**

**1.1.3. Dualité onde-corpuscule .....** **4**

**1.1.3.1. Le modèle de Newton.....** **4**

**1.1.3.2. Le modèle de Huygens et Young.....** **5**

**1.2 CLASSIFICATION .....** **6**

**1.2.1 Spectre électromagnétique .....** **6**

**1.2.2 Notion de rayonnement ionisant .....** **7**

**1.3 INTERACTIONS AVEC LA MATIERE .....** **8**

**2. LES DIFFERENTS RNI : PRESENTATION, DOSIMETRIE ET EFFETS .....** **9**

**2.1. LES CHAMPS STATIQUES.....** **10**

**2.1.1. Présentation.....** **10**

**2.1.2. Cas de l'imagerie par résonance magnétique .....** **10**

**2.1.3. Dosimétrie et effets sur la santé .....** **12**

**2.1.4. Signalisation .....** **13**

**2.1.5. Conclusion.....** **14**

2.2.	LES CHAMPS D'EXTREMEMENT BASSE FREQUENCE .....	15
2.2.1.	Présentation .....	15
2.2.2.	Interactions avec la matière, dosimétrie .....	15
2.2.2.1.	Seuil de perception des champs .....	15
2.2.2.2.	Seuil de perception des courants induits.....	16
2.2.3.	Cas du réseau électrique français et champs basses fréquences .....	17
2.2.3.1.	Présentation .....	17
2.2.3.2.	Exposition .....	18
2.2.3.3.	Mesures et interprétation .....	20
2.2.3.3.1.	Le réseau de transport électrique aérien .....	20
2.2.3.3.2.	Appareils électroménagers.....	21
2.2.3.4.	Signalisation .....	22
2.2.4.	Effets biologiques.....	23
2.2.4.1.	Effets sur la reproduction et le développement.....	23
2.2.4.2.	Système cardiovasculaire .....	24
2.2.4.3.	Cancer .....	24
2.2.4.3.1.	Les études <i>in vitro</i> .....	24
2.2.4.3.2.	Les expérimentations animales .....	24
2.2.4.3.3.	Le cas de la mélatonine .....	25
2.2.4.3.4.	Les études épidémiologiques : Le cas de la leucémie de l'enfant .....	25
2.2.5.	Conclusion .....	27
2.3.	LES CHAMPS DE FREQUENCE INTERMEDIAIRE (300 Hz à 10MHz) .....	28
2.3.1.	Présentation .....	28
2.3.2.	Principales utilisations.....	28
2.3.2.1.	Cuisson par induction .....	28
2.3.2.2.	La radiodiffusion .....	29
2.3.2.3.	Les autres sources.....	30
2.3.3.	Exposition.....	30
2.3.4.	Le cas des implants médicaux actifs.....	30
2.4.	LES RADIOFREQUENCES (10MHZ A 300GHZ).....	31

2.4.1.	Présentation .....	31
2.4.2.	Classification .....	31
2.4.2.1.	Le réseau sans fil longue distance.....	32
2.4.2.2.	Le réseau sans fil courte distance .....	33
2.4.2.3.	Le réseau audiovisuel.....	34
2.4.2.4.	La radio FM .....	34
2.4.3.	Interaction avec la matière, dosimétrie .....	35
2.4.3.1.	Appareils mobiles, Wi-Fi .....	35
2.4.3.1.1.	Un indicateur universel : le DAS .....	35
2.4.3.1.2.	Législation .....	35
2.4.3.1.3.	Limites du DAS .....	36
2.4.3.2.	Antennes relais (stations de base), TV, FM et Wi-Fi .....	36
2.4.3.2.1.	Propagation dans l'espace et mesure du champ électrique.....	36
2.4.3.2.2.	Législation .....	37
2.4.4.	Signalisation .....	37
2.4.5.	Effets biologiques.....	38
2.4.5.1.	Effets sur la reproduction et le développement.....	38
2.4.5.1.1.	Fertilité.....	38
2.4.5.1.2.	Tératogénicité et effet sur le développement <i>in utero</i> .....	39
2.4.5.2.	Effets sur le système cardiovasculaire .....	39
2.4.5.3.	Effets sur l'expression génétique et sur la synthèse des protéines.....	40
2.4.5.4.	Effets sur le stress oxydant .....	40
2.4.5.5.	Effets sur le système nerveux .....	41
2.4.5.5.1.	Effets sur les neurones .....	41
2.4.5.5.2.	Effets sur la barrière hématoencéphalique .....	41
2.4.5.5.3.	Effets sur l'activité électrique cérébrale .....	41
2.4.5.5.4.	Effets sur les fonctions cognitives.....	42
2.4.5.5.5.	Effets sur le sommeil.....	42
2.4.5.5.6.	Effets sur les maladies neurologiques .....	43
2.4.5.5.6.1.	Sclérose en plaque .....	43

2.4.5.5.6.2. Epilepsie.....	43
2.4.5.5.6.3. Maladie d'Alzheimer .....	43
2.4.5.6. Cancérogenèse .....	43
2.4.5.6.1. Effets sur les mécanismes cellulaires de la cancérogenèse .....	43
2.4.5.6.2. Effets sur le risque de cancer chez l'homme .....	44
2.4.5.6.2.1. Les tumeurs cérébrales.....	44
2.4.5.6.2.1.1. Gliomes .....	44
2.4.5.6.2.1.2. Méningiomes .....	45
2.4.5.6.2.1.3. Neurinomes du nerf acoustique .....	45
2.4.5.7. L'hypersensibilité aux ondes électromagnétiques.....	46
2.4.6. Conclusion.....	47
2.5. LE RAYONNEMENT INFRAROUGE .....	48
2.5.1. Présentation.....	48
2.5.2. Interactions avec la matière, dosimétrie .....	49
2.5.2.1. Au niveau de l'œil .....	50
2.5.2.2. Au niveau de la peau.....	51
2.5.3. Conclusion.....	53
2.6. LE RAYONNEMENT VISIBLE.....	54
2.6.1. Présentation.....	54
2.6.2. Interactions avec la matière, dosimétrie .....	54
2.6.2.1. Au niveau de l'œil .....	56
2.6.2.2. Au niveau de la peau.....	57
2.6.3. Conclusion.....	57
2.7. LE RAYONNEMENT ULTRA-VIOLET .....	59
2.7.1. Présentation.....	59
2.7.2. Interactions avec la matière, dosimétrie .....	59
2.7.2.1. Effets sur la peau .....	60
2.7.2.1.1. Effets non nocifs .....	60
2.7.2.1.2. Erythème actinique.....	60
2.7.2.1.3. Phototoxicité, photoallergie .....	62

2.7.2.1.4. Cancers de la peau.....	62
2.7.2.1.5. Exposition et protection .....	63
2.7.2.2. Effets sur l'œil .....	64
2.7.2.2.1. Photokératites, photoconjunctivites .....	64
2.7.2.2.2. Cataracte, DMLA .....	65
2.7.2.2.3. Exposition et protection .....	65
2.7.3. Conclusion.....	65
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>66</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>67</b>

# **LISTE DES ABREVIATIONS**

3G : third generation wireless communication

4G : fourth generation wireless communication

ADN : acide désoxyribonucléique

Afsset : Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, désormais inclus dans l'Anses.

AM : amplitude modulation

ANFR : Agence

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

ARCEP : Autorité de régulation des communications électroniques et des postes

ARN : acide ribonucléique

BT : Basse Tension

CIRC (IARC en anglais) : Centre International de Recherche sur le Cancer

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

DAS : Débit d'absorption Spécifique

DEM : Dose Erythémale Minimale

DMLA : Dégénérescence maculaire liée à l'âge

EBC : Épithélioma basocellulaire

ESC : Épithélioma spinocellulaire

EDF : Électricité de France

EEG : Électroencéphalogramme

EHF : Extrêmement haute fréquence

ELF : Extrêmement basses fréquence

FDD : Frequency-division duplexing

FM : Frequency modulation

GPRS : general packet radio service

GSM : global system for mobile communication

HF : Haute fréquence

HT : Haute tension

ICNIRP : Commission Internationale de Protection Contre les Rayonnements non ionisants

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles

IP : Indice de Protection

IR : Infrarouge

IRM : Imagerie par résonnance magnétique

LED : Diode Électroluminescente

LF : Basse fréquence

LTE : Long Term Evolution

MF : Moyenne fréquence

MT : Moyenne tension

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

RI : Rayonnement ionisant

RF : Radio fréquence

RI : Rayonnement ionisant

RNI : Rayonnement non-ionisant

RTE : Réseau de transport d'électricité

SED : Standard Erythema Dose ou Dose Erythémale standard

SEP : Sclérose en plaque

SHF : Super haute fréquence

SLF : Super basse fréquence

SNC : Système Nerveux Central

SPF : Sunburn protection factor ou Facteur de protection solaire

TDD : Time-division dupexing

THT : Très haute tension

TNT : Télévision numérique terrestre

TV : Télévision

UHF : Ultra haute fréquence

ULF : Ultra basse fréquence

UMTS : Universal mobile telecommunications system

UV : Ultraviolet

VHF : Très haute fréquence

VLF : Très basse fréquence

Wifi : Wireless fidelity

## **LISTE DES UNITÉS**

Densité de courant ( $A/m^2$ ) : courant électrique par unité de surface

Electron-volt (eV) : unité d'énergie utilisée en physique des particules. Un eV est l'énergie acquise par un électron soumis à un potentiel électrique de un volt ( $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Joules). Le seuil d'ionisation de l'eau est de 13.6 eV

Hertz (Hz) : unité de fréquence (nombre de périodes d'oscillation par seconde)

Joule (J) : unité légale de travail et d'énergie ( $1 \text{ J} = 1 \text{ Kg} \cdot m^2/s^2$ ). Par exemple 1 J est l'énergie requise pour éléver de 1 m une pomme de 100 grammes dans le champ de pesanteur terrestre.

Lambda ( $\lambda$ ) : longueur d'onde, exprimée en mètre

Stéradian (sr) : unité d'angle solide dans le Système International

Tesla (T) : unité d'induction magnétique, dans l'environnement on mesure habituellement des microteslas ( $\mu\text{T}$ ). Aux Etats-Unis l'ancienne unité qui est le Gauss ( $1 \text{ T} = 10000 \text{ G}$ ,  $1 \mu\text{T} = 10 \text{ mG}$ ) est encore utilisée

Volt par mètre ( $V/m$ ) : unité de champ électrique

Watt (W) : unité de puissance, 1 watt correspond à 1 joule/s

DAS (W/kg) : énergie absorbée par un milieu

# **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 : Représentation d'une onde électromagnétique (Wordpress, 2011).....	3
Figure 2 : Modélisation du concept de front d'onde par Huygens (H2physics, 2012).....	5
Figure 3 : Classification par fréquence des rayons non-ionisants et ionisants (INRS, 2012) .....	8
Figure 4 : Représentation schématique de la rotation d'un proton (vision-scientifique, 2010).....	11
Figure 5 : Schéma explicatif de la modification de l'axe des spins pendant l'IRM.....	11
Figure 6 : Image obtenue après réalisation de l'IRM (imagerie médicale de Douai, 2010).....	12
Figure 7 : Signalisation obligatoire de la présence de champs magnétiques potentiellement dangereux pour les personnes non habilitées (IRMcardiaque.com, 2007) .....	14
Figure 8 : Maillage du réseau électrique français (EDF, 2013) .....	18
Figure 9 : Représentation des différents pylônes permettant une signalisation du courant transporté (EDF, 2013) ....	23
Figure 10 : Schéma explicatif du fonctionnement d'une plaque à induction (plaque-induction, 2005) .....	29
Figure 11 : Représentation de la différence entre modulation de fréquence et modulation d'amplitude (Aggeliki K., 2011).....	29
Figure 12 : Émissions dans l'espace des champs d'une antenne relais (Bouygues telecom, 2012) .....	36
Figure 13 : Vision d'un animal grâce au rayonnement IR (Science et Avenir, 2010) .....	49
Figure 14 : Coupe anatomique de l'œil (CNRS, 2006).....	50
Figure 15 : Les différentes couches de la peau (Urgomedical, 2010) .....	52
Figure 16 : Domaines de longueurs d'onde dans l'UV-visible susceptibles de provoquer des lésions (INRS, 2011) .....	55
Figure 17 : Anatomie de l'œil (CNAMTS, 2011) .....	64

# **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Classification des différentes ondes électromagnétiques selon leur fréquence et leur longueur d'onde .....	6
Tableau 2 : Effets biologiques des courants induits selon leur densité (OMS, 1987).....	16
Tableau 3 : Valeurs maximales d'exposition par plage de fréquence pour les travailleurs (ICNIRP, 2010).....	19
Tableau 4 : Valeurs maximales d'exposition par plage de fréquence pour la population générale (ICNIRP, 2010).....	19
Tableau 5 : Limites conseillées de valeur des courants induits par fréquence (ICNIRP, 2010) .....	20
Tableau 6 : Valeurs mesurées à différentes distances de points divers du réseau de transport électrique (RTE-EDF, 2011).....	21
Tableau 7 : Valeurs mesurées à différentes distances de divers appareils du réseau électrique domestique (RTE-EDF, 2011).....	22
Tableau 8 : Les différentes radiofréquences du réseau sans fil (Radio-electrics, 2011).....	32
Tableau 9 : Réseau sans fil courte distance (Radio-electrics, 2011) .....	33
Tableau 10 : Réseau audiovisuel (Radio-electrics, 2011).....	34
Tableau 11 : Radio FM (Radio-electrics, 2011) .....	34
Tableau 12 : DAS de divers smartphones .....	35
Tableau 13 : Valeurs maximales d'exposition pour les radiofréquences (ICNIRP, 1998) .....	37
Tableau 14 : Les différentes couleurs du rayonnement visible associées à leur intervalle de fréquence.....	54
Tableau 15 : Classification des types de verre pour lunettes de protection (Court, 2010) .....	57
Tableau 16 : Catégories d'UV selon la longueur d'onde .....	59
Tableau 17 : Différents phototypes et leurs caractéristiques (J L Bourrain, 2008).....	61
Tableau 18 : Facteurs de protection recommandés en fonction de l'indice UV (Césarini, 2010).....	63

# INTRODUCTION

« L'expérience ne se trompe jamais, ce sont nos jugements qui se trompent. »

Léonard de Vinci

L'être humain est depuis la nuit des temps exposé à une variété innombrable de rayonnements : rayonnements cosmiques, ultraviolets, infrarouges... Ils peuvent être d'origine naturelle, provenant de l'espace et surtout du soleil, mais ils peuvent également provenir de sources artificielles : radiodiffusion, téléphonie mobile, imagerie médicale...

Devant ce très grand nombre de sources et l'augmentation grandissante de leur place dans notre société moderne ces cent dernières années, la communauté scientifique s'est beaucoup penchée sur la question de la nocivité de ces champs, notamment à propos de ceux d'origine artificielle. La nocivité de certains champs électromagnétiques de fréquence élevée a été démontrée. En effet, à une puissance suffisante, ceux-ci peuvent ioniser des molécules et provoquer des cassures au niveau de l'ADN. C'est à ce niveau que l'on divise l'ensemble des rayonnements en deux catégories : les rayonnements non-ionisants et les rayonnements ionisants.

Cette thèse traitera exclusivement des champs non ionisants, pour lesquels les effets sont plus méconnus, moins évidents à déceler, et sujet à controverse car ceux-ci sont bien plus présents et en contact avec la totalité de la population terrestre.

De plus, la surmédiatisation de certaines études, les approximations dans l'interprétation des résultats obtenus et les amalgames faits avec d'autres questions autour de la santé ont instillé de nombreuses idées préconçues au sein même de la population générale. Tout ceci a engendré un sentiment d'insécurité amplifié par le caractère invisible et peu connu de ces champs (excepté la lumière visible) pourtant très utilisés.

L'objectif de cet ouvrage est donc de commencer par présenter et classer les rayonnements électromagnétiques de la manière la plus claire possible, et de bien différencier les champs non-

ionisants des champs ionisants. Le but est de donner au lecteur les bases afin de pouvoir ensuite mieux comprendre les informations données dans la suite de cette thèse.

Les différents chapitres de cet ouvrage traitent chacun un type de rayonnement en particulier. Le lecteur pourra ainsi naviguer dans chaque partie de cette thèse de manière indépendante, dans l'ordre qu'il souhaite, en fonction de ses besoins. La structure de ces parties est toujours la même, afin que le lecteur puisse comparer rapidement ces rayonnements sur des axes bien précis.

L'objectif est de fournir au lecteur les clés pour mieux comprendre ces rayonnements, leurs effets biologiques, la réglementation en vigueur ainsi que la prévention et la protection par l'intermédiaire de nombreux organismes compétents. En se basant sur de nombreux rapports et études scientifiques, cette thèse permet de se référer à une source d'information la plus claire et pragmatique possible.

# 1. RAPPELS PHYSIQUES A PROPOS DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES

Un champ électromagnétique est l'association d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Le champ électrique apparaît lorsqu'il existe une différence de potentiel entre deux points donnés. Contrairement au champ électrique, un courant électrique est nécessaire pour qu'apparaisse un champ magnétique.

Un champ peut être caractérisé par deux modèles : celui d'un flux de particules (photons, quanta) ou celui d'une onde.

## 1.1 DEFINITION

On définit un champ électromagnétique selon deux modèles :

### 1.1.1. Modèle ondulatoire

Selon ce modèle, l'onde électromagnétique est représentée sous forme du couplage entre un champ électrique E et un champ magnétique B. Ces deux champs sont perpendiculaires entre eux, mais également par rapport à l'axe de propagation (AFFSET, 2006) (figure 1).

Le champ électrique est exprimé en volt/mètre (V/m) alors que le champ magnétique est exprimé en ampère/mètre (A/m), en tesla (T) ou en gauss (G).

L'amplitude des deux champs varie de manière sinusoïdale, avec la même fréquence et la même vitesse, en phase :

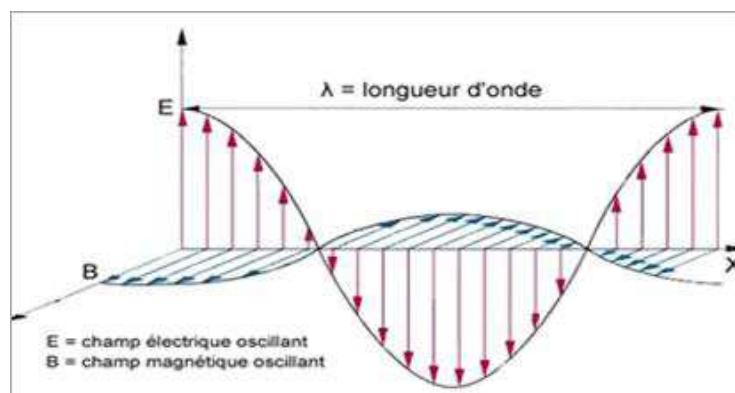


Figure 1 : Représentation d'une onde électromagnétique (Wordpress, 2011)

B : champ magnétique en ampère par mètre (A/m), simplifié en induction magnétique en tesla (T) ou gauss (G) où  $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$

E : champ électrique en volt par mètre (V/m)

f : fréquence en Hertz (Hz) où  $f = 1/T$

$\lambda$  : longueur d'onde en mètre (m) où  $\lambda = c/f = cT$

c : vitesse de la lumière dans le vide en mètre par seconde (m/s) : 299 792 458 m/s

T : Période en secondes (s) où  $T = 1/f$

(INRS, 2005)

### 1.1.2. Modèle corpusculaire

Dans le modèle corpusculaire, le champ électromagnétique est représenté par un flux de particules chargées énergétiquement. Ces particules sont appelées photons ou quanta et ont une énergie  $E = hf$  où E est l'énergie exprimée en eV (ou en joules,  $j = 1.6 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ ) et h est la constante de Planck ( $6.62 \times 10^{-34} \text{ J/s}$ ) et f la fréquence en Hz.

### 1.1.3. Dualité onde-corpuscule

Au milieu du XVII<sup>e</sup> siècle, le seul rayonnement électromagnétique connu et étudié par les scientifiques était la lumière. A l'époque, la difficulté consistait à mieux visualiser ce rayonnement, et deux modèles semblaient à même de répondre à cette problématique (Maitte, 2005).

#### 1.1.3.1. Le modèle de Newton

Dans sa théorie, Newton considère la lumière comme un flux de corpuscules soumis à l'action de forces. Il prend l'exemple de la réflexion lumineuse et explique qu'il existe une force permettant le « rebond » d'une particule. Il extrapole cette théorie à la réfraction : si la force de réflexion de la matière n'est pas suffisamment grande, le rayonnement ne sera pas réfléchi mais seulement dévié. Cependant le modèle semble montrer rapidement ses limites. En effet, Newton ne parvient pas à expliquer véritablement comment un rayonnement lumineux peut traverser une matière transparente. De plus, sa seule explication au phénomène de dispersion de la lumière après le passage dans un prisme est que les particules ont des masses variables, correspondant au spectre de couleurs. Malgré l'intelligente utilisation du prisme pour découvrir le spectre des

couleurs, il y a ici de grosses incohérences. Si ce modèle était exact, le croisement de deux rayons lumineux ne devrait-il pas les modifier (Gleick, 2005) ?

### 1.1.3.2. Le modèle de Huygens et Young

Dans son *Traité de la Lumière* publié en 1690, Christian Huygens compare la lumière au son, et la définit comme une onde. Il présente également le concept de front d'onde, qui consiste à considérer chaque point d'une onde en mouvement comme le point de départ d'une nouvelle onde (figure 2).

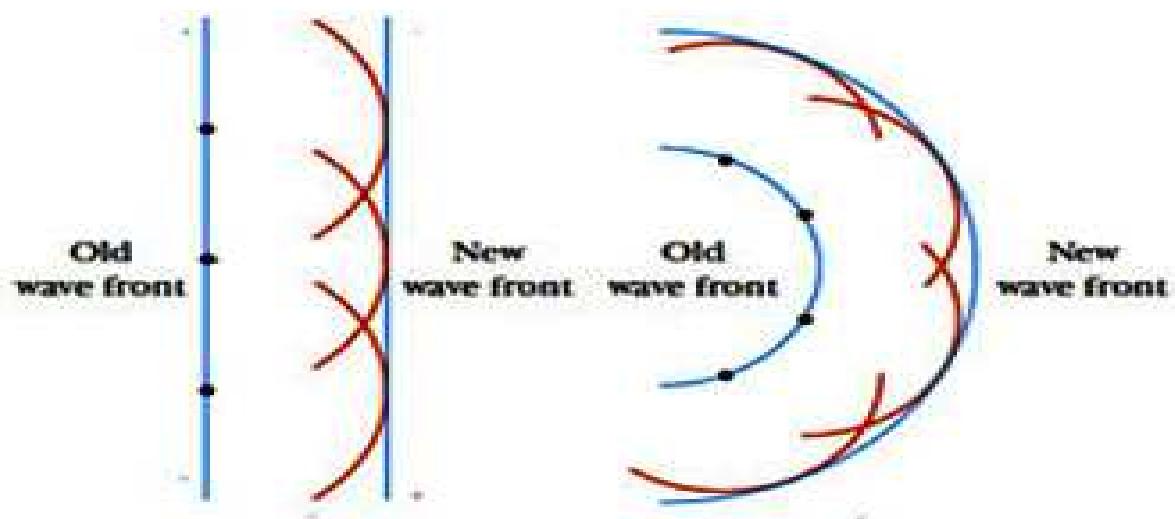


Figure 2 : Modélisation du concept de front d'onde par Huygens (H2physics, 2012)

Cependant, la même expérience de Young réalisée non plus avec un faisceau lumineux mais avec un canon à particules montrait des résultats ne pouvant plus être expliqués par le modèle ondulatoire mais corpusculaire. Cette expérience a ainsi démontré la véracité des deux modèles, et a donc mis en avant ce qu'on appelle aujourd'hui la dualité onde-corpuscule.

Ces deux modèles sont capitaux pour classer ces rayonnements, mais aussi pour cerner leurs effets sur l'homme. En effet certains effets ne pourront être expliqués que par l'un des deux modèles (Serway, 1992).

## 1.2 CLASSIFICATION

### 1.2.1 Spectre électromagnétique

Pour caractériser un champ électromagnétique, on utilise le modèle ondulatoire. On distingue plusieurs types de champs que l'on différenciera en fonction de leur fréquence ou de leur longueur d'onde. Ces deux derniers sont liés mathématiquement ( $\lambda=c/f$ ). Ainsi on définit les différentes catégories d'ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde ou de leur fréquence (tableau 1).

Tableau 1 : Classification des différentes ondes électromagnétiques selon leur fréquence et leur longueur d'onde

Fréquence	Désignation	Exemples	Longueur d'onde
0 Hz	Champs statiques	Champs magnétique terrestre	Infinie
1 à 30 Hz	Fréquences extrêmement basses(ELF)	Réseaux électriques	$10^8$ à $10^7$ m
30 à 300 Hz	Superbasses fréquences(SLF)	Radiocommunications	$10^7$ à $10^6$ m
0.3 à 3 kHz	Ultrabasses fréquences(ULF)	Radiocommunications	$10^6$ à $10^5$ m
3 à 30 kHz	Très basses fréquences(VLF)	Radiocommunications	$10^5$ à $10^4$ m
30 à 300 kHz	Basses fréquences(LF)	Fours à induction	$10^4$ à $10^3$ m
0.3 à 3 MHz	Fréquences moyennes(MF)	Radiodiffusion	1000 à 100 m
3 à 30 MHz	Hautes fréquences(HF)	Soudure, collage	100 à 10 m
30 à 300 MHz	Très hautes fréquences(VHF)	Télévision, radio FM	10 à 1 m
0.3 à 3 GHz	Ultrahautes fréquences(UHF)	téléphonie	1 à 0.1 m
3 à 30 GHz	Superhautes fréquences(SHF)	Radars, alarme anti-intrusion	0.1 à 0.01 m
30 à 300 GHz	Fréquences extrêmement hautes(EHF)	Liaison satellite	0.01 à 0.001 m
0.3 à 385 THz	Infrarouge(IR)	Vision thermique	$0.001$ à $780.10^{-9}$ m
385 à 750 THz	Lumière visible	Vision humaine	$780.10^{-9}$ à $400.10^{-9}$ m
750 à 30000THz	Ultraviolets(UV)	Cabine de bronzage	$400.10^{-9}$ à $10.10^{-9}$ m
$30000$ THz à $5.10^{20}$ Hz	Rayons X	Imagerie médicale	$10.10^{-9}$ à $10^{-11}$ m
$5.10^{20}$ à $5.10^{21}$ Hz	Rayons gamma doux	Radiothérapie	$10^{-11}$ m à $10^{-14}$ m
Supérieur à $5.10^{21}$ Hz	Rayons gamma durs	Rayonnements cosmiques	Supérieur à $10^{-14}$ m

## 1.2.2 Notion de rayonnement ionisant

Dans ce spectre électromagnétique, on distingue également les rayonnements non-ionisants (RNI) des rayonnements ionisants (RI).

Les rayonnements électromagnétiques transportent une certaine énergie puisqu'ils peuvent être considérés comme des flux de particules (quanta, photons...) ayant une énergie donnée (modèle corpusculaire). Il existe un lien de causalité entre la fréquence et cette énergie transportée représentée par la formule:

$$E = hf \text{ où } h \text{ est la constante de Planck } (6.62 \times 10^{-34} \text{ J.s}) \text{ et } f \text{ est la fréquence en Hz}$$

Ainsi, plus la fréquence du rayonnement est élevée, plus l'énergie transportée par les particules est importante. Si ces quanta ont suffisamment d'énergie pour interagir avec les molécules du corps humain, peuvent alors survenir des ruptures de liaisons comme celles de van der Waals. À des niveaux d'énergie plus élevés, peuvent apparaître des phénomènes d'ionisation. Dans ce cas, l'énergie est suffisamment importante pour arracher des électrons aux atomes, qui vont passer d'un état énergétique  $E_1$  à  $E_2$ . Voici quelques exemples de valeurs d'énergie nécessaires pour ioniser certains atomes :  $\Delta E = E_2 - E_1$

- $\Delta E$  carbone (C) = 11.24 eV
- $\Delta E$  hydrogène (H) = 13.54 eV
- $\Delta E$  oxygène (O) = 13.57 eV
- $\Delta E$  azote (N) = 14.24 eV

Le corps humain étant composé à 70% d'eau, c'est à partir du niveau énergétique pour lequel les atomes d'hydrogène et d'oxygène sont ionisés que l'on parle de rayonnement ionisant. De tels rayonnements peuvent ainsi interagir avec l'ensemble des tissus et des organes et en modifier la structure et le fonctionnement.

Un tel rayonnement doit donc avoir une énergie  $E = hf \geq \Delta E_{H_2O}$ .

Or  $\Delta E_{H_2O} = 13.6$  eV. Il faut donc que chaque particule d'un rayonnement transporte une énergie au moins égale à 13.6 eV pour altérer les molécules d'eau du corps humain.

On en conclut que tout rayonnement ayant une énergie transportée supérieure à 13.6 eV est considéré comme ionisant (figure 3). Une telle énergie n'est contenue que dans les rayons UV de très haute fréquence, les rayons X ainsi que les rayons gamma. À cette énergie, correspond une longueur d'onde de 100 nm, ce qui signifie qu'au-delà de cette valeur, le rayonnement est considéré comme non ionisant (Champion, 2002).

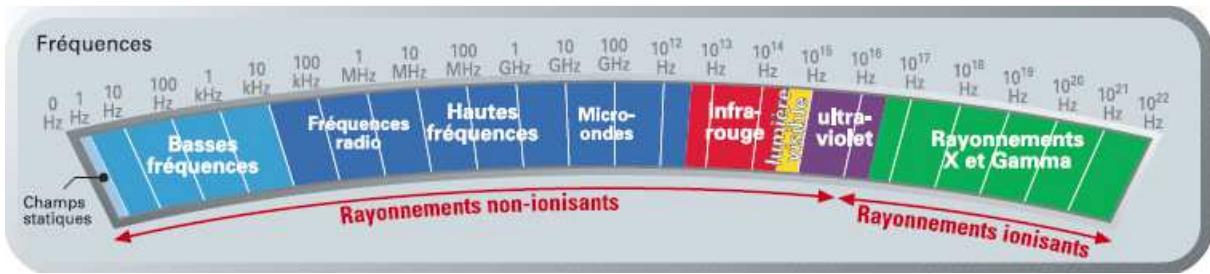


Figure 3 : Classification par fréquence des rayonnements non-ionisants et ionisants (INRS, 2012)

Les rayonnements ionisants peuvent donc interagir de manière directe avec les biomolécules du corps humain et d'être à l'origine de radicaux libres qui peuvent provoquer de graves lésions tissulaires à court et long terme. Du fait du caractère établi de la nocivité de ce type de rayonnement, cet écrit ne prendra pas en compte ce type de rayonnement (INRS, 2011).

## 1.3 INTERACTIONS AVEC LA MATIERE

Les rayonnements électromagnétiques non ionisants n'ont pas la capacité d'interagir avec les tissus biologiques, mais ils possèdent tout de même une énergie pouvant être absorbée. De plus, la composante électrique d'un rayonnement électromagnétique peut provoquer le passage d'un courant dans la matière biologique. La propension d'une onde à provoquer un tel effet dépend de sa longueur d'onde. Plus simplement, en fonction de sa longueur d'onde  $\lambda$ , une onde électromagnétique pénétrera différemment dans les tissus biologiques avec des effets variables (Perrin, 2011).

Dans cet ouvrage, sont regroupés les rayonnements non ionisants par plage de fréquence dont les effets sur les tissus biologiques, et notamment sur le corps humain sont similaires.

## **2. LES DIFFERENTS RNI : PRESENTATION, DOSIMETRIE ET EFFETS**

Le sujet des ondes électromagnétiques et leur impact sur la santé étant un véritable enjeu de santé publique, de nombreuses équipes scientifiques se sont penchés sur le sujet. De par le spectre très large de types d'ondes et leurs très nombreuses utilisations, et dans un souci de clarté, le spectre de fréquence a été divisé en groupes ayant des propriétés physiques et des interactions avec la matière biologique proches. On obtient les sept groupes suivants :

- Les champs statiques
- Les champs d'extrêmement basses fréquences
- Les champs de fréquences intermédiaires
- Les radiofréquences
- L'infrarouge
- La lumière visible
- Le rayonnement UV

## 2.1. LES CHAMPS STATIQUES

### 2.1.1. Présentation

Il existe deux types de champs statiques : les champs électriques statiques (ou champs electrostatiques) et les champs magnétiques statiques. Leur fréquence est nulle et leur longueur d'onde infinie puisqu'ils ne varient pas dans le temps (OMS, 2006).

L'intensité du champ électrique statique s'exprime en V/m et le champ magnétique statique en A/m que l'on associe souvent à l'induction magnétique exprimée en Tesla ou anciennement en Gauss (1 gauss correspond à  $10^{-4}$  tesla). On retrouve ces deux champs naturellement sur Terre : 10 à 150 V/m pour le champ électrique et 30 à 70  $\mu$ T pour le champ magnétique. Plus on s'éloigne de ces champs, plus leur intensité et leur induction magnétique diminuent (ICNIRP, 2009).

La principale utilisation « à risque » de ces champs a lieu pour l'imagerie par résonance magnétique (IRM) utilisée à des fins diagnostiques médicales. Dans ce cas, le champ magnétique statique possède une valeur de plus de 100000 fois supérieure à la valeur du champ naturel terrestre.

### 2.1.2. Cas de l'imagerie par résonance magnétique

L'imagerie par résonance magnétique ou IRM est une technique de diagnostic médical utilisant les propriétés magnétiques de l'atome d'hydrogène, plus précisément de son ion  $H^+$  présent dans les molécules d'eau. En effet, le corps humain étant constitué pour 60 à 80% d'eau, l'atome d'hydrogène y est présent dans sa quasi-totalité. L'ion  $H^+$  est composé d'un noyau constitué d'un proton tournant sur lui-même. Ce proton étant chargé électriquement positivement et étant en mouvement, il provoque l'apparition d'un champ magnétique. Le moment magnétique induit appelé  $\mu$  dépend d'une part du spin ( $I$ ) qui est un sens de rotation du proton et d'autre part de la constante gyromagnétique du proton  $\gamma$  selon :  $\mu = \gamma I$ .

Le moment magnétique  $\vec{\mu}$  est représenté sous forme d'un vecteur, dans le même axe que celui du sens de rotation du proton  $\vec{S}$  (figure 4).

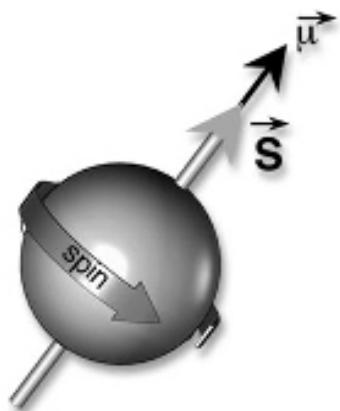


Figure 4 : Représentation schématique de la rotation d'un proton (vision-scientifique, 2010)

Lors d'une séance d'IRM, le patient est placé dans une cuve exposée à un puissant champ magnétique statique. Celui-ci est généré par un aimant supraconducteur baignant dans de l'hélium liquide à -269°C, ce qui signifie qu'il y aura dissipation de la chaleur et que seul sera utilisé le champ magnétique présentant une intensité allant de 0.1 à 7 Tesla, voire jusqu'à une douzaine de Tesla pour les IRM expérimentaux. Une fois ce champ créé, les moments magnétiques de tous les ions hydrogène  $\vec{\mu}$  vont s'orienter dans le même axe que celui du champ magnétique (figure 5).

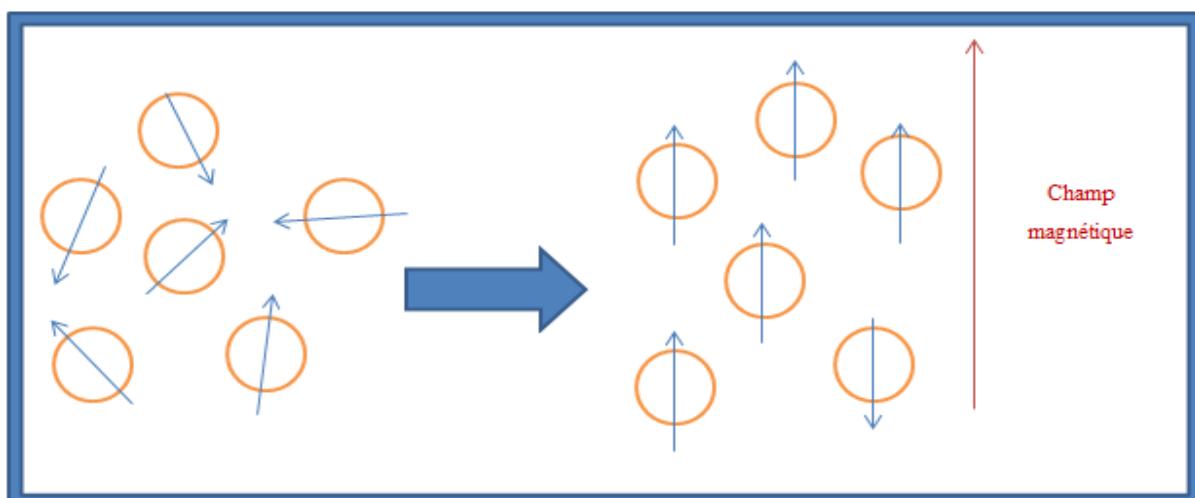


Figure 5 : Schéma explicatif de la modification de l'axe des spins pendant l'IRM

On expose ensuite le corps du patient à des radiofréquences spécifiques sous forme d'impulsions permettant de sortir les moments magnétiques des protons de leur état d'équilibre. Ainsi ils ne sont plus dans l'axe du champ magnétique, c'est le phénomène de résonance. Le retour à l'équilibre des atomes d'hydrogène après chaque impulsion prendra plus ou moins de

temps, et provoquera l'apparition de courants qui seront mesurés par des capteurs. C'est le phénomène de relaxation (McRobbie DW, 2007).

En fonction des résultats obtenus, et sachant que les différents tissus biologiques n'ont pas la même densité en atomes d'hydrogène, on peut cartographier de manière très précise les différents tissus du corps humain (sauf les os et calcifications, ne contenant pas assez d'eau et donc pas assez d'atomes d'hydrogène). (Elster & Burdette, 2000)



Figure 6 : Image obtenue après réalisation de l'IRM (imagerie médicale de Douai, 2010)

### 2.1.3. Dosimétrie et effets sur la santé

En théorie, lors d'une analyse IRM, un champ magnétique de l'ordre du Tesla peut provoquer une légère hausse de la tension artérielle du patient mais qui reste suffisamment faible pour ne pas être perceptible ou dangereuse. En effet, le champ magnétique peut influencer d'autres ions en mouvement (induction magnétique), ceci ayant pour effet de ralentir le flux sanguin. On appelle ce phénomène l'effet magnétohydrodynamique. A haute intensité, celui-ci provoquerait de légères arythmies. Cependant, il n'existe pas d'études fiables pour confirmer ou non un risque réel pour la santé à ce niveau d'intensité (Lehéryc, 2010).

L'induction magnétique serait également responsable de nausées et de vertiges notamment lorsque le sujet est en mouvement. Certains patients ressentiraient également un goût métallique dans la bouche. Ces effets seraient dus à une perturbation des courants électriques présents dans des liquides de l'oreille interne (ICNIRP, 2014) (Dale C. Roberts, 2011).

Pour les personnes portant des stimulateurs cardiaques, ceux-ci peuvent être abimés, voire

déplacés en présence de puissants champs magnétiques, mettant en danger la santé du patient. De plus, des signaux parasites peuvent être émis, faussant les résultats de l'IRM. Sans oublier que tout élément ferromagnétique soumis à un fort champ magnétique peut être projeté à grande vitesse et devenir potentiellement dangereux. On appelle ça l'effet missile.

En se basant sur ces études et sur l'intensité des champs, la Commission Internationale de Protection Contre les Rayonnements non ionisants (ICNIRP) a proposé des valeurs limites d'exposition afin de limiter ces risques (ICNIRP, 2009).

Cette commission considère qu'une densité de flux magnétique inférieure à 2 T est sans risque pour l'homme, et que cette limite peut être augmentée jusqu'à 8 T en présence d'un personnel compétent pour surveiller le patient. La commission précise cependant que des sensations désagréables peuvent apparaître, notamment si la personne est en mouvement, comme indiqué précédemment.

La limite de 400 mT est également conseillée pour n'avoir aucun risque sanitaire dans les lieux publics.

La commission souligne également qu'une limite de 0.5 mT doit être respectée pour les personnes portant des implants susceptibles d'interagir avec le champ magnétique.

Pour la femme enceinte, aucun risque n'a été démontré, mais il lui est tout de même déconseillé de s'exposer. Si l'examen s'avère nécessaire, la réalisation nécessite l'accord de la patiente qui aura été informée. Il est techniquement interdit à une travailleuse enceinte de pénétrer dans l'espace d'examen.

#### 2.1.4. Signalisation

La limite d'exposition exprimée par l'ICNIRP (Commission Internationale de Protection Contre les Rayonnements non ionisants) pour certains patients portant des implants ferromagnétiques est de 0.5 mT (soit 5 Gauss). Dans une salle d'IRM, il est obligatoire de marquer au sol une ligne appelée « ligne des 5 Gauss » par-delà laquelle toute personne est certaine d'être exposée à un champ magnétique statique d'une induction magnétique de moins de 5 Gauss (Sctirck, 2009). Un panneau de signalisation doit être installé (figure 7).



Figure 7 : Signalisation obligatoire de la présence de champs magnétiques potentiellement dangereux pour les personnes non habilitées (IRMcardiaque.com, 2007)

### 2.1.5. Conclusion

Présents à l'état naturel, les champs électriques et magnétiques statiques font partie de l'environnement et l'homme est en contact de ces champs tout au long de sa vie. Cependant lorsqu'ils sont utilisés pour le diagnostic médical, l'induction magnétique peut être suffisamment forte pour être dangereuse et l'exposition doit donc être limitée. Néanmoins aux intensités les plus fréquemment utilisées, des effets désagréables inoffensifs et transitoires peuvent apparaître lorsque le patient est en mouvement. Dans le cas de l'IRM, si le diagnostic est réalisé dans les conditions recommandées et que la signalisation est bien respectée, tout risque sanitaire est évité. Sur les effets à long terme, pour l'instant, peu d'études ont été menées et aucune n'a montré une corrélation entre exposition à ces champs statiques et des problèmes de santé à type de malformation ou cancer.

## **2.2. LES CHAMPS D'EXTREMEMENT BASSE FREQUENCE**

### **2.2.1. Présentation**

Comme pour les champs statiques, les rayonnements électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence (1 à 300 Hz) sont traités en tant que deux champs séparés : le champ électrique et le champ magnétique. De tels champs ne sont pas présents de manière naturelle sur Terre. Leur origine est artificielle, et est liée aux activités humaines. La plupart des personnes résidant en France sont en contact permanent avec ceux-ci. En effet, le courant électrique utilisé est un courant alternatif de 50 Hz. C'est toujours à cette fréquence que fonctionnent les réseaux électriques français. Dès lors qu'un appareil électrique est branché, il émet un champ électrique variable de fréquence 50 Hz, associé à un champ magnétique avec la même fréquence (EDF-RTE, 2011).

On exprime toujours le champ électrique en V/m et le champ magnétique en A/m. Le champ magnétique peut également être exprimé en Tesla ou en Gauss.

Dans la suite de cette thèse, nous traiterons les deux types d'expositions auxquels l'homme est le plus fréquemment exposé: les appareils électroménagers et les lignes à hautes tensions.

### **2.2.2. Interactions avec la matière, dosimétrie**

Contrairement aux champs statiques, la variabilité des champs d'extrêmement basses fréquences augmente fortement leur capacité à induire des courants électriques dans la matière. Cela se traduit chez l'homme par une possible apparition de courants induits au niveau de cellules particulièrement sensibles comme les neurones ou les cellules cardiaques (ICNIRP, 2010) (OMS, 2007).

#### **2.2.2.1. Seuil de perception des champs**

Concernant les champs électriques, l'homme les percevrait à une intensité d'environ 5 kV/m, et leur présence deviendrait gênante voire douloureuse vers 20 kV/m (Reilly, 1998).

Pour les champs magnétiques il semblerait qu'ils ne puissent pas être détectés par l'homme.

### 2.2.2.2. Seuil de perception des courants induits

Pour les courants induits par ces champs d'extrêmement basse fréquence, la limite de perception par l'homme serait de **2 V/m**. La stimulation des certains nerfs périphériques serait estimée vers **4 à 6 V/m**. Au-delà de ces valeurs apparaîtrait une gêne puis la douleur. (So PP, 2004) (Nyenhuis JA, 2001)

Cependant, on utilise plus couramment leur expression en  $A/m^2$  pour mesurer la perception des courants induits. Les valeurs limites de perception et d'apparition des symptômes causés par ces courants induits sont toujours celles indiquées par l'OMS en 1987 (tableau 2).

Tableau 2 : Effets biologiques des courants induits selon leur densité (OMS, 1987)

Densité de courant induit	Effets reportés
<b>1 à 10 mA/m<sup>2</sup></b>	Effets biologiques mineurs
<b>10 à 100 mA/m<sup>2</sup></b>	Effets bien établis. Des troubles visuels et nerveux, ainsi qu'une fragilité osseuse ont été rapportés
<b>100 à 1000 mA/m<sup>2</sup></b>	Stimulation de certains tissus excitables pouvant entraîner un risque pour la santé
<b>Plus de 1000 mA/m<sup>2</sup></b>	Extrasystole et fibrillation ventriculaire, troubles graves de la santé

Grâce aux nouvelles technologies, certaines études ont permis d'établir pour une fréquence de 50 Hz un rapport entre l'induction magnétique et courants induits d'une part, et l'intensité électrique et courants induits d'autre part. Ces valeurs ne sont pas totalement fiables et précises, mais elles permettront de donner une idée de la dangerosité de ces champs. A l'heure actuelle, seuls les courants induits au niveau du cerveau et de la peau sont mesurables par ces nouvelles techniques (Dimbylow, 2006) (Bahr, Bolz, & Hennes, 2007).

Actuellement, pour les champs magnétiques de fréquence 50 Hz, ce rapport est de **23 à 33 mV/m par mT** pour le cerveau et de **20 à 60 mV/m par mT** pour la peau. En ce qui concerne les champs électriques de 50 Hz, le rapport est de **1.7 à 2.6 mV/m par kV/m** pour le cerveau et de **12 à 33 mV/m par kV/m** pour la peau. Ces rapports pourront être utilisés pour estimer l'intensité des courants induits par différentes sources en fonction de l'intensité de leur champ électrique ou de l'induction de leur champ magnétique (Hirata A, 2009) (Nagaoka T, 2004).

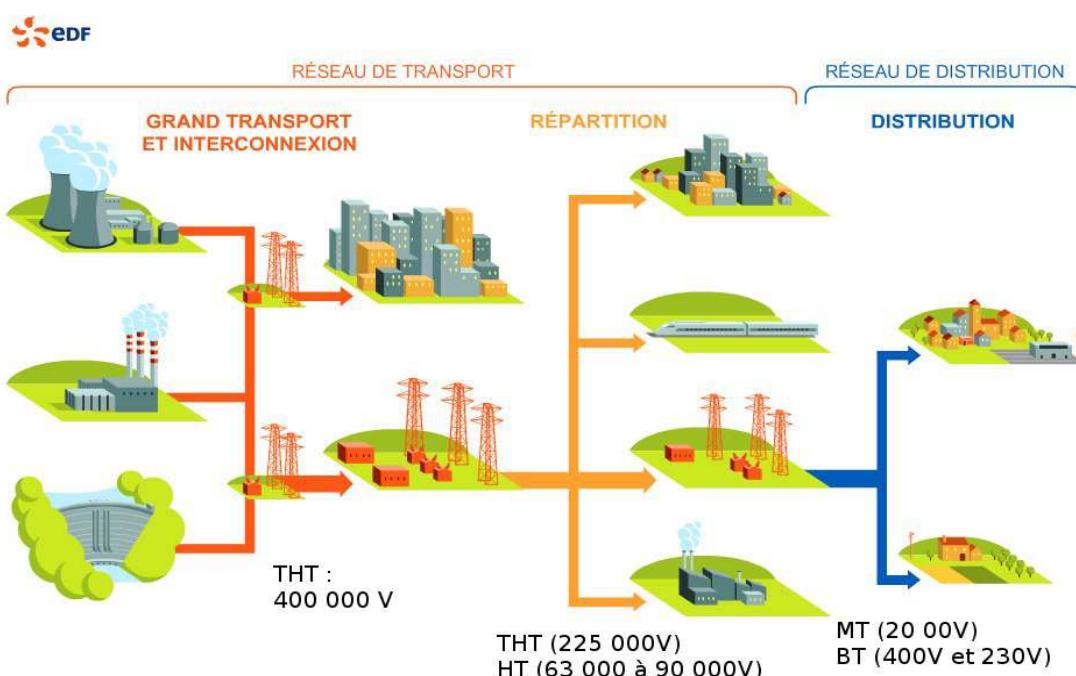
## 2.2.3. Cas du réseau électrique français et champs basses fréquences

### 2.2.3.1. Présentation

Le réseau électrique français est dans notre pays la principale source de champs électromagnétiques de basse fréquence. Il s'agit d'un réseau de courant alternatif de fréquence 50 Hz. Il est divisé en deux réseaux : le réseau de transport et le réseau de distribution.

Le réseau de transport permet de transporter l'électricité venant juste d'être produite (centrale nucléaire, barrage...) d'une unité de production à une autre ou vers les lieux de répartition et de consommation à l'échelle nationale (grandes villes, transport ferroviaire...). La quantité transportée est telle que les tensions peuvent avoisiner les 400 000 V, et sont appelées THT (Très Hautes Tensions). Au bout du réseau, la tension est moindre, avoisinant les 75 000 V, on parle alors de HT (Hautes Tensions).

Le réseau de distribution permet quant à lui de distribuer à des tensions moindres l'électricité à une échelle régionale, locale et même domestique. On parle alors de MT (Moyennes Tensions) vers 20 000 V et de BT (Basses Tensions) à 230 V et 400 V (figure 8).



**Figure 8 : Maillage du réseau électrique français (EDF, 2013)**

Le réseau domestique auquel est reliée chaque habitation française est donc basé sur un courant de 230 V et 400 V à une fréquence de 50 Hz. Tout appareil électrique étant branché au réseau, doit être compatible avec ces normes (EDF-RTE, 2011).

Le transport de l'électricité et l'utilisation d'équipements électriques branchés à ce réseau entraînent la formation de champs électriques et magnétiques d'extrêmement basses fréquences. Le voltage et la fréquence vont influer sur la dangerosité de ces champs vis-à-vis des personnes.

### **2.2.3.2. Exposition**

En France, les valeurs limites d'exposition sont définies par des directives européennes (la directive 1999/519/CE pour les particuliers et la directive 2004/40/CE pour les professionnels). Ces directives sont édictées à partir d'études menées par la commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP). Il s'avère que les directives européennes se rapportent à des données plus anciennes tandis que de nouveaux résultats sont apportés par la commission. Dans la suite de cette thèse, nous nous baserons sur les dernières publications émises par cette commission. On rappellera que la limite d'exposition à un champ magnétique en France est officiellement de [100 µTesla](#) pour une fréquence de 50 Hz.

Après avoir pris en compte un grand nombre d'études, l'ICNIRP a établi les valeurs maximales d'exposition concernant les champs électriques et magnétiques de basses fréquences ainsi que leurs courants induits. La méthode de calcul est telle que ces valeurs d'expositions dépendent de la fréquence des champs (ICNIRP, 2010).

Pour calculer les valeurs maximales d'exposition des champs électriques et magnétiques, l'ICNIRP propose les deux tableaux suivants : un tableau 3 destiné aux travailleurs, un tableau 4 destinés à la population générale.

Tableau 3 : Valeurs maximales d'exposition par plage de fréquence pour les travailleurs (ICNIRP, 2010)

Bandes de fréquence	Champ électrique en kV/m	Champ magnétique en A/m	Champ magnétique en Tesla
<b>1 Hz – 8 Hz</b>	20	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$0.2 / f^2$
<b>8 Hz – 25 Hz</b>	20	$2 \times 10^4 / f$	$2.5 \times 10^{-2} / f$
<b>25 Hz – 300 Hz</b>	$5 \times 10^2 / f$	$8 \times 10^2$	$1 \times 10^{-3}$
<b>300 Hz – 3 kHz</b>	$5 \times 10^2 / f$	$2.4 \times 10^5 / f$	0.3/f
<b>3 kHz – 30 MHz</b>	$1.7 \times 10^{-1}$	80	$1 \times 10^{-4}$

NB : f est la fréquence en Hz

Tableau 4 : Valeurs maximales d'exposition par plage de fréquence pour la population générale (ICNIRP, 2010)

Bandes de fréquence	Champ électrique en kV/m	Champ magnétique en A/m	Champ magnétique en Tesla
<b>1 Hz – 8 Hz</b>	5	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^{-2} / f^2$
<b>8 Hz – 25 Hz</b>	5	$4 \times 10^3 / f$	$5 \times 10^{-3} / f$
<b>25 Hz – 50 Hz</b>	5	$1.6 \times 10^2$	$2 \times 10^{-4}$
<b>50 Hz – 400 Hz</b>	$2.5 \times 10^2 / f$	$1.6 \times 10^2$	$2 \times 10^{-4}$
<b>400 Hz – 3 kHz</b>	$2.5 \times 10^2 / f$	$6.4 \times 10^4 / f$	$8 \times 10^{-2} / f$
<b>3 kHz – 10MHz</b>	$8.3 \times 10^{-2}$	21	$2.7 \times 10^{-5}$

NB : f est la fréquence en Hz

Pour les travailleurs, la limite est de 10 kV/m pour le champ électrique et de 1000 µtesla pour le champ magnétique.

Quant à la population générale, la limite est de 5 kV/m pour le champ électrique et 200 µtesla pour le champ magnétique.

Pour calculer les valeurs des courants induits, l'ICNIRP fournit le tableau 5.

Tableau 5 : Limites conseillées de valeur des courants induits par fréquence (ICNIRP, 2010)

Caractéristiques de l'exposition	Bande de fréquence	Courant induit en V/m
Pour les travailleurs		
SNC	1 Hz – 10Hz	0.5/f
	10 Hz – 25 Hz	0.05
	25 Hz – 400 Hz	$2 \times 10^{-3}/f$
	400 Hz – 3 kHz	0.8
	3 kHz – 10 MHz	$2.7 \times 10^{-4}/f$
Autres tissus	1 Hz – 3 kHz	0.8
	3 kHz – 10 MHz	$2.7 \times 10^{-4}/f$
Pour la population générale		
SNC	1 Hz – 10Hz	0.1/f
	10 Hz – 25 Hz	0.01
	25 Hz – 1000 Hz	$4 \times 10^{-4}/f$
	1000 Hz – 3 kHz	0.4
	3 kHz – 10 MHz	$1.35 \times 10^{-4}/f$
Autres tissus	1 Hz – 3 kHz	0.4
	3 kHz – 10 MHz	$1.35 \times 10^{-4}/f$

NB : f est la fréquence en Hz

En ce qui concerne les courants induits, les valeurs limites pour les travailleurs et la population générale sont mesurées au niveau du système nerveux central (SNC), soit pour les travailleurs une limite de **0.1 V/m** dans le SNC et **0.8 V/m** dans les autres tissus et pour la population générale une limite de **0.02 V/m** dans le SNC et **0.4 V/m** dans les autres tissus.

### 2.2.3.3. Mesures et interprétation

#### 2.2.3.3.1. Le réseau de transport électrique aérien

En ce qui concerne le transport de l'électricité, on ne prendra en compte que les valeurs

concernant le transport par câbles aériens, celui par les câbles souterrains ou sous-marins étant beaucoup moins fréquent et ayant des rayonnements plus faibles pour la population (tableau 6).

**Tableau 6 : Valeurs mesurées à différentes distances de points divers du réseau de transport électrique (RTE-EDF, 2011)**

	Champ électrique en V/m	Courants induits cerveau en mV/m	Courants induits peau en mV/m	Champ magnétique en µTesla	Courants induits cerveau en mV/m	Courants induits peau en mV/m
<b>Lignes à 400 000V</b>						
Sous la ligne	<b>5000</b>	13	115	<b>30</b>	1.00	1.8
A 30m de l'axe	<b>2000</b>	5.2	66	<b>12</b>	0.40	0.72
A 100m de l'axe	<b>200</b>	0.52	6.6	<b>1.2</b>	0.04	0.07
<b>Lignes à 225 000 V</b>						
Sous la ligne	<b>3000</b>	7.8	1.88	<b>20</b>	0.66	1.2
A 30m de l'axe	<b>400</b>	1.04	13.2	<b>3</b>	0.1	0.18
A 100m de l'axe	<b>40</b>	0.10	1.32	<b>0.3</b>	0.01	0.02
<b>Lignes à 90 000 V</b>						
Sous la ligne	<b>1000</b>	2.6	33	<b>10</b>	0.33	0.6
A 30m de l'axe	<b>100</b>	0.26	3.3	<b>1</b>	0.03	0.06
A 100m de l'axe	<b>10</b>	0.03	0.33	<b>0.1</b>	-	0.01
<b>Lignes à 20 000V</b>						
Sous la ligne	<b>250</b>	0.65	8.25	<b>6</b>	0.2	0.36
A 30m de l'axe	<b>10</b>	0.03	0.33	<b>0.2</b>	-	0.01
A 100m de l'axe	-	-	-	-	-	-
<b>Lignes à 230V</b>						
Sous la ligne	<b>9</b>	0.02	0.30	<b>0.4</b>	0.01	0.02
A 30m de l'axe	<b>0.3</b>	-	-	-	-	-
A 100m de l'axe	-	-	-	-	-	-

Ce tableau 6 montre que les champs électriques et magnétiques les plus intenses (ici sous la ligne à 400 000V) ne dépassent pas les valeurs maximales principales préconisées par l'ICNIRP. Il en est de même pour les valeurs théoriques de courants induits obtenus par la méthode de calcul citée plus haut.

### 2.2.3.3.2. Appareils électroménagers

Pour les appareils électroménagers, les mesures ont été rapportées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Valeurs mesurées à différentes distances de divers appareils du réseau électrique domestique (RTE-EDF, 2011)

	Champ électrique en V/m	Courants induits cerveau en mV/m	Courants induits peau en mV/m	Champ magnétique en µTesla	Courants induits cerveau en mV/m	Courants induits peau en mV/m
<b>Radio réveil</b>						
A 5cm	<b>166</b>	0.43	5.48	<b>1.6</b>	0.05	0.1
A 30cm	<b>16</b>	0.041	0.528	<b>0.08</b>	0.025	0.05
A 1m	<b>8</b>	0.021	0.264	<b>0.02</b>	0.006	0.01
<b>Grille-pain</b>						
A 5cm	<b>57</b>	0.15	1.88	<b>3</b>	0.10	0.18
A 30cm	<b>10</b>	0.03	0.33	<b>0.21</b>	0.01	0.02
A 1m	<b>6</b>	0.02	0.20	<b>0.06</b>	-	-
<b>Alimentation</b>						
<b>ordinateur</b>						
A 5cm	<b>178</b>	0.46	5.87	<b>0.55</b>	0.02	0.03
A 30cm	<b>25</b>	0.07	0.83	<b>0.02</b>	-	-
A 1m	<b>4</b>	0.01	0.13	<b>0.01</b>	-	-
<b>Plaque à induction</b>						
A 5cm	<b>94</b>	0.24	3.1	<b>0.57</b>	0.02	0.03
A 30cm	<b>32</b>	0.08	1.1	<b>0.2</b>	-	-
A 1m	<b>4</b>	0.01	0.12	<b>0.13</b>	-	-
<b>Télévision</b>						
A 5cm	<b>364</b>	0.95	12.01	<b>0.01</b>	-	-
A 30cm	<b>75</b>	0.20	2.47	<b>0.01</b>	-	-
A 1m	<b>10</b>	0.02	0.33	<b>0.01</b>	-	-
<b>Sèche-cheveux</b>						
A 5cm	<b>187</b>	0.49	6.17	<b>0.72</b>	0.02	0.04
A 30cm	<b>28</b>	0.07	0.92	<b>0.05</b>	-	-
A 1m	<b>7</b>	0.02	0.22	<b>0.04</b>	-	-

Nous constatons que les résultats sont ainsi les mêmes que pour le transport électrique, c'est-à-dire en deçà des valeurs maximales d'exposition préconisées par l'ICNIRP, que ce soit pour l'intensité des champs électriques et magnétiques que pour les courants induits.

#### 2.2.3.4. Signalisation

Le réseau électrique français est constitué de pylônes permettant de placer les câbles en hauteur. La forme et la taille de ces pylônes permettent d'identifier le type de courant qui est transporté, qu'il soit de basse, moyenne ou haute voire très haute tension (figure 9).

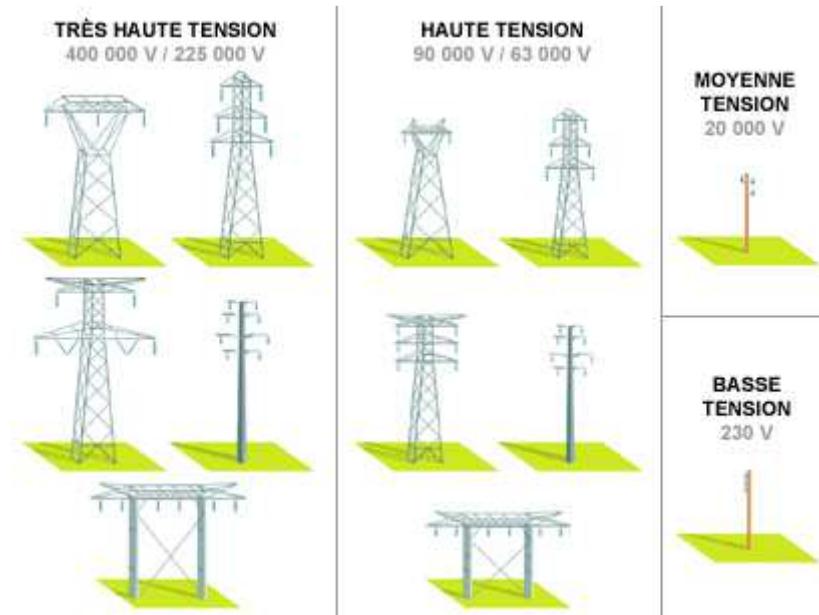


Figure 9 : Représentation des différents pylônes permettant une signalisation du courant transporté (EDF, 2013)

## 2.2.4. Effets biologiques

En se basant sur les recommandations officielles, les effets immédiats des champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence sont évités même en dessous des lignes à haute tension. Cependant, les effets biologiques liés à une exposition sur une longue période ne sont pas clairement établis. De nombreuses études, parfois contradictoires, permettent de nous éclairer sur les différents effets potentiellement néfastes de ces champs (INRS, 2013).

### 2.2.4.1. Effets sur la reproduction et le développement

C'est le rapport de l'OMS de 2007 qui rapporte le plus grand nombre d'études sur le sujet. Des études effectuées sur plusieurs générations de mammifères, n'ont pas montré d'effet tératogène (aucune fausse-couche ni apparition de malformations, externes ou viscérales).

Concernant les capacités de reproduction, l'OMS stipule que dans l'état actuel des connaissances et compte tenu du trop faible nombre d'études, aucune conclusion ne peut être formulée sur l'impact de ce type de champ. On peut cependant noter que quelques études ont rapporté une diminution de la capacité de reproduction de certains animaux non mammifères comme par exemple les drosophiles (Li S, 2013).

Cependant, on ne peut raisonnablement conclure sur ces études, compte tenu de

l'éloignement phylogénétique de l'homme et des drosophiles (insectes) et sachant que ces études ont été réalisées à des valeurs d'induction magnétique élevées (de l'ordre du mT).

A l'heure actuelle, les champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences ne semblent pas affecter la reproduction et le développement chez l'homme si l'on prend en compte des valeurs d'exposition moyennes.

#### **2.2.4.2. Système cardiovasculaire**

La plupart des études traitant des effets cardiovasculaires de ces champs dans des conditions d'exposition standard montrent qu'il n'existe aucun lien avéré de causalité entre des troubles cardiovasculaires et une exposition à ces champs (McNamee D.A., 2009) (Kheifets L, 2007).

#### **2.2.4.3. Cancer**

L'effet cancérigène de ces champs est sans aucun doute le plus propice aux polémiques. De nombreuses équipes de recherche se sont penchées sur ce sujet sensible. Pour mieux comprendre les résultats, il est nécessaire de classer ces études.

##### **2.2.4.3.1. Les études *in vitro***

Certaines études ont tenté de déceler un impact de ces champs sur les différents états cellulaires afin d'y observer un effet cancérigène. Les résultats se révèlent le plus souvent contradictoires d'une étude à l'autre, et ne semblent attester d'une génotoxicité qu'à des inductions magnétiques très élevées, dépassant de beaucoup les valeurs d'exposition classiques. Certaines études suggèrent des effets cancérigènes probables vers des intensités de 50 mT. Il n'empêche que l'OMS recommande de poursuivre ces études (Miyakoshi, 2006).

##### **2.2.4.3.2. Les expérimentations animales**

Des études ont été réalisées sur des animaux, notamment des rongeurs. Ceux-ci ont été exposés à différents stades de leur développement, à des fréquences et à des inductions magnétiques variables pendant de courtes ou longues périodes. Les résultats penchent clairement vers l'hypothèse qu'il n'existe pas de lien entre exposition et apparition de cancer (Sommer, 2006) (Kharazi A.I., 1999).

#### 2.2.4.3.3. Le cas de la mélatonine

La mélatonine, hormone sécrétée par l'épiphyse, joue un grand rôle dans la régulation du sommeil. Sa sécrétion est dépendante de la quantité de lumière (rayonnement électromagnétique de fréquence 300 à 600 nm) emmagasinée par certaines cellules de la rétine. Elle aurait donc un rôle d'information concernant la luminosité ambiante autour du corps (photopériode). En fait, moins il y a de lumière reçue par la rétine, plus la mélatonine sera synthétisée (pic entre 2 et 4 heures du matin) et elle sera à l'origine d'un chaîne de réactions chimiques favorisant l'endormissement.

Certaines études ont rapporté que des champs d'extrêmement basses fréquences modifiaient les taux de mélatonine. Etant donné que la mélatonine présente des propriétés oncostatique et antioxydante, de telles études pourraient expliquer de probables effets cancérogènes des champs (Ishido M, 2001) (Liburdy RP, 1993).

Néanmoins, ces résultats n'ont jamais été retrouvés dans des études menées sur des animaux de races différentes ou même sur des humains volontaires, que ce soit pour une exposition courte ou prolongée, et même pour des valeurs de champs élevées (Burchard, 1998) (Jahandideh S, 2010) (Selmaoui, 1996).

Le cas de la mélatonine est intéressant car il met en confrontation les études *in vitro* et applications *in vivo* sur l'homme et l'animal. Si l'on compare le faible nombre d'études *in vitro* montrant un effet des champs d'extrêmement basses fréquences sur la mélatonine, à l'écrasante majorité des études réalisées directement sur l'homme et l'animal, on peut conclure qu'il existe une très faible probabilité pour que ces champs puissent réellement influer sur le taux de mélatonine chez l'homme.

#### 2.2.4.3.4. Les études épidémiologiques : Le cas de la leucémie de l'enfant

Contrairement aux études en laboratoire, l'épidémiologie permet de mesurer sur le terrain l'impact des champs électromagnétiques sur la population. Cependant, les biais lors d'une enquête épidémiologique sont plus nombreux et les facteurs moins facilement contrôlables que lors d'expériences en laboratoire. Le suivi d'une étude épidémiologique doit donc être rigoureux et précis, et ses résultats doivent être analysés et interprétés avec beaucoup de prudence (Calvente I, 2009).

Cependant, ce sont ces enquêtes qui ont permis d'établir un lien de causalité entre champs

magnétiques d'extrêmement basse fréquence et leucémie chez l'enfant. La première étude à avoir mis en lumière ce phénomène est l'étude de Wertheimer N. et Leeper E. datant de 1979, qui a conclu que les enfants habitant dans des maisons proche de lignes à haute tension, et ainsi fortement exposés aux champs basses fréquences auraient un risque plus élevé de contracter une leucémie. Comme les résultats étaient d'interprétation difficile et les interrogations nombreuses, la communauté scientifique fût incitée à se pencher plus précisément sur le sujet (Wertheimer N, 1979).

Bien que de nombreuses études aient été réalisées sans jamais montrer de lien de causalité entre champs basses fréquences et leucémie de l'enfant, deux méta-analyses désormais célèbres, celles de Greenland S. *et al.* (2000) et de Ahlbom A. *et al.* (2000) ont au contraire démontré un lien.

Selon la méta-analyse d'Ahlbom, le risque de leucémie serait deux fois plus élevé pour les enfants exposé à des champs magnétiques de 50/60 Hz d'induction magnétique supérieure à 0.4 µT (Ahlbom A, 2000).

Quant à la méta-analyse de Greenland, les résultats donnaient un risque de leucémie 1.7 fois plus élevé chez les enfants exposés à des champs de fréquences 50/60 Hz d'induction supérieure à 0.3 µT (Greenland S, 2000).

Ces deux méta-analyses ont justifié le choix pris en 2002 par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) de classer les champs magnétiques d'extrêmement basses fréquences comme cancérogènes possibles (groupe 2B) pour le risque de leucémie de l'enfant (IARC, 2002).

Les études antérieures à l'année 2000 mesuraient de manière indirecte les inductions magnétiques présentes dans les habitations. Après cette date, des avancées technologiques ont permis d'installer des points de mesures à l'intérieur des habitations, afin de gagner en précision. Les résultats de ces études coïncidèrent avec ce que les méthodes plus anciennes avaient conclu, c'est à dire qu'à partir d'une certaine valeur d'induction magnétique aux alentours de 0.4 µT, les cas de leucémies infantiles augmentent.

Malgré cette mise en évidence d'un lien de causalité évident entre champs magnétiques d'extrêmement basse fréquence et leucémie de l'enfant, et la classification de la CIRC, certaines organisations comme l'ICNIRP ou l'OMS ne considèrent pas pour autant la présence d'un lien de cause à effet (ICNIRP, OMS, Bfs, 2008).

En effet, elles rappellent les limites des études épidémiologiques, que ce soit les biais de sélection, les erreurs de classification, le mauvais choix des variables, les méthodes de mesure, le faible nombre d'enfants exposés à ces valeurs d'induction magnétique, etc.

De plus, il est difficile d'établir les bons critères pour une étude épidémiologique lorsque l'étiologie de la maladie est aussi mal connue que celle de la leucémie infantile.

En ajoutant à tout cela que les études effectuées en laboratoire chez l'animal ainsi que les études *in vitro* n'attestent d'aucune liaison entre champs basses fréquence et leucémie, on comprend que l'on ne puisse pas valider les résultats de ces études épidémiologiques. Rappelons enfin que la proportion d'enfants exposés à ce types de champ reste relativement faible soit 1 à 4% des enfants de la population mondiale.

## 2.2.5. Conclusion

Les champs électriques et magnétiques d'extrêmement basse fréquence font partie de notre environnement. Du fait de leur caractère invisible et qu'ils soient le fruit de l'activité humaine, ces champs ont été le sujet de nombreuses interrogations de la communauté scientifique depuis maintenant plusieurs dizaines d'années. Les premières études épidémiologiques concernant la leucémie de l'enfant ont d'ailleurs renforcé ces craintes, entraînant la réalisation de très nombreuses études. Après toutes ces années de recul, on peut désormais attester qu'en dehors d'une faible partie de la population plus fortement exposée, pour lesquels les résultats sont mitigés et controversés (d'où la classification de CIRC comme cancérigène possible), l'exposition moyenne de la population générale ne porte globalement pas de risques immédiats ou à long terme.

## **2.3. LES CHAMPS DE FREQUENCE INTERMEDIAIRE (300 Hz A 10MHz)**

### **2.3.1. Présentation**

Les champs électromagnétiques de fréquence comprise entre 300 Hz et 10 MHz sont appelés champs de fréquence intermédiaire car ils font la jonction entre les champs basses fréquences et les radiofréquences, notamment en ce qui concerne leurs interaction avec les tissus biologiques. En effet plus la fréquence de ces champs est proche de 300Hz, plus le risque de provoquer des courants induits sera important (comme les champs d'extrêmement basse fréquence) et plus la fréquence sera proche de 10 MHz, plus le risque d'agitation moléculaire génératrice d'échauffement sera important (comme les champs radiofréquence). Leurs composantes magnétique et électrique sont présentées en fonction de leur utilisation par l'homme qui est récente.

### **2.3.2. Principales utilisations**

#### **2.3.2.1. Cuisson par induction**

L'utilisation la plus courante de ces champs est lors de la cuisson des aliments avec les plaques à induction mettant en jeu la composante magnétique de ces champs. En effet le principe en utilisant ce type de champ est d'induire des courants électriques dans le récipient placé sur la plaque (appelés courants de Foucault) afin de le chauffer son contenu (figure 10). Ce principe a été rapidement adopté au niveau des plaques de cuisson car le rendement énergétique est bon ce qui rend le système moins coûteux que tout autre système de chauffage classique. De plus, on gage en sécurité puisque les plaques perdent leur chaleur très rapidement après cuisson. Pour cette utilisation les fréquences utilisées sont comprises entre 20 et 50 kHz.

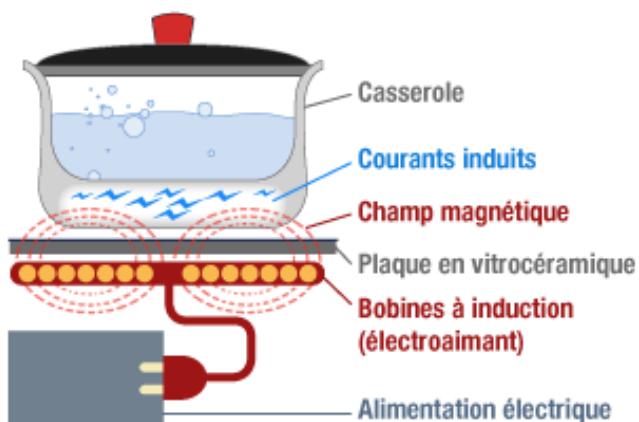


Figure 10 : Schéma explicatif du fonctionnement d'une plaque à induction (plaqué-induction, 2005)

### 2.3.2.2. La radiodiffusion

Ces champs électromagnétiques sont aussi utilisés pour la radiodiffusion de longue portée. En effet, aux fréquences utilisées (entre 150 et 26 MHz) les longueurs d'ondes sont particulièrement grandes, permettant une diffusion de très longue portée. C'est d'ailleurs pour cette raison que ces ondes sont aussi appelées grandes ondes ou ondes kilométriques.

Apparues en France au milieu du XXème siècle, elles transmettent une information par modulation de l'amplitude (d'où le nom AM), où la fréquence reste la même (contrairement aux ondes FM où la modulation concerne la fréquence) (figure 11).

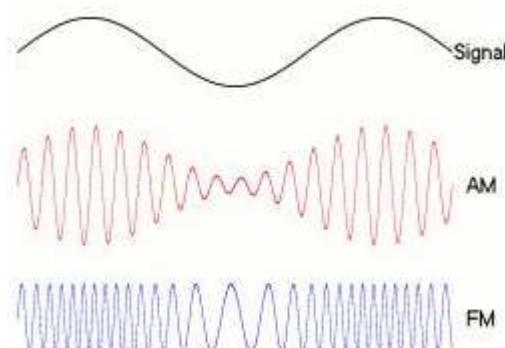


Figure 11 : Représentation de la différence entre modulation de fréquence et modulation d'amplitude (Aggeliki K., 2011)

De par leur mauvaise qualité audio, elles sont de moins en moins utilisées au profit des ondes FM mais existent toujours en Europe et dans le Monde.

### **2.3.2.3. Les autres sources**

Ces champs sont aussi utilisés pour des lampes fluo compactes, les écrans de télévision et d'ordinateur, les systèmes antivols, les détecteurs de métaux, certains systèmes médicaux etc.

### **2.3.3. Exposition**

Dans ses rapports, l'ICNIRP a évalué l'exposition maximale recommandée pour ce type de champ. En se référant donc aux tableaux 4 et 5 cités plus haut, on s'aperçoit que les valeurs limites d'expositions sont plus basses, notamment après 100 kHz car les valeurs limites prennent en compte, outre les courants induits, les phénomènes d'agitation des charges moléculaires, pouvant provoquer un échauffement (effet joule) (ICNIRP, 2010).

Ce phénomène devient d'autant plus important que la fréquence augmente, il sera donc plus présent vers 10 MHz qu'à 100 Hz. Il sera encore plus significatif pour les radiofréquences. C'est d'ailleurs la recommandation européenne de 1999 (1999/519/CE) qui fixe pour la population générale des recommandations sur ces champs, en utilisant le DAS (Débit d'absorption spécifique).

Le DAS se définit comme une quantité d'énergie (en watt) pouvant être absorbée par unité de masse (kg de tissu). Il s'exprime donc en W/kg. Son calcul reste théorique et difficile, mais il permet d'établir une norme afin que les références des appareils coïncident entre eux.

Ce DAS doit être au maximum de **0.08 W/kg** pour les fréquences 100 kHz à 10 MHz

### **2.3.4. Le cas des implants médicaux actifs**

De nombreuses études ont porté sur le fait que de tels champs pourraient influer sur des appareillages médicaux comme les implants.

Des études réalisées sur des volontaires ou sur des simulacres de cœur n'ont montré aucun effet. Les études portant sur des champs d'intensités inférieures aux valeurs de référence étaient sans effet et celles utilisant des valeurs largement supérieures aux valeurs de références n'ont montré que des dysfonctionnements légers et réversibles. Au niveau d'expositions maximales prévues pour la population générale et pour les travailleurs, il n'y a donc aucun risque prouvé pour ce type de rayonnement (Souques M, 2002) (Schmitt P, 2005).

## **2.4. LES RADIOFRÉQUENCES (10MHZ A 300GHZ)**

### **2.4.1. Présentation**

La famille des radiofréquences est très vaste, puisqu'elle comprend de nombreux rayonnements servant de base pour les communications sans fil. D'origine exclusivement humaine, ces rayonnements sont en contact quasi-permanent avec une grande proportion de la population générale : télévision, téléphonie mobile, Wi-Fi, Bluetooth, réseau de données 3G et maintenant 4G. Les utilisations sont nombreuses, autant que les interrogations sur les potentiels effets nocifs de ces rayonnements sur la santé. En effet, le cas le plus emblématique est évidemment l'emploi des téléphones portables, souvent collés au crâne de l'utilisateur. De plus, pour ces moyens de communication, on observe une évolution du type de rayonnement utilisé dans le but d'améliorer la vitesse et la qualité des communications (TNT, 4G). Dans cet ouvrage, nous nous intéresserons aux différentes utilisations de ces rayonnements afin que le lecteur puisse avoir les clés pour savoir comment connaître son exposition quotidienne.

La forte médiatisation des potentiels effets néfastes de ces ondes a suscité de nombreuses interrogations de la part du public, des autorités politiques et sanitaires qui ont demandé à la communauté scientifique de s'y pencher. Le but de cet ouvrage est donc aussi de faire la synthèse des connaissances acquises ces vingt dernières années afin de donner une idée au lecteur de l'impact de ces rayonnements sur la population générale.

### **2.4.2. Classification**

En ce qui concerne les communications sans fils, on les partage en quatre types de réseaux :

- Le réseau sans fil longue distance
- Le réseau sans fil courte distance
- Le réseau audiovisuel
- La radio FM

#### 2.4.2.1. Le réseau sans fil longue distance

Appelé réseau cellulaire, il rassemble plusieurs bandes de fréquence (tableau 8). Chacune d'entre elle est associée à une technologie bien précise, et la bande de fréquence n'est pas la même en fonction du sens de transfert du rayonnement.

Tableau 8 : Les différentes radiofréquences du réseau sans fil (Radio-electrics, 2011)

Technologie	Bandes de fréquences
<b>Radiocom 2000 (1G)</b>	400 Mhz / 900 Mhz/ etc.
<b>GSM (2G), GPRS, EDGE (Uplink)</b>	880 à 915 MHZ / 1710 à 1785 MHz
<b>GSM (2G), GPRS, EDGE (Downlink)</b>	925 à 960 MHz/ 1805 à 1880 MHz
<b>UMTS (3G) TDD</b>	1885 à 1920 MHz / 2010 MHz à 2025 MHz
<b>UMTS (3G) FDD (Uplink)</b>	880 à 915 MHZ / 1920 à 1980 MHz
<b>UMTS (3G) FDD (Downlink)</b>	925 à 960 MHz / 2110 à 2170 MHz
<b>LTE, LTE advanced (4G) (Uplink)</b>	791 à 821 MHz / 1710 à 1785 MHz/ 2500 à 2570 MHz
<b>LTE, LTE advanced (4G) (Downlink)</b>	832 à 862 MHz/ 1805 à 1880 MHz / 2620 à 2690 MHz

NB : Uplink : du téléphone à l'antenne ; Downlink : de l'antenne au téléphone

Ce réseau est appelé réseau cellulaire puisqu'il est constitué de cellules dans lesquelles sont présentes des antennes relais ou BTS (station de base) qui font le lien entre les téléphones présents dans la cellule et l'ensemble du réseau.

C'est le réseau le plus large, puisque c'est à travers lui que transitent toutes les communications sans fil par l'intermédiaire des téléphones portables. Depuis l'avènement des smartphones connectés à internet, il permet également le transfert de données en haut débit (Dupont, 2013).

De la première à la quatrième génération, de nombreuses évolutions technologiques ont permis de mieux utiliser les bandes de fréquence de ce réseau afin d'augmenter le débit d'information transporté et ainsi le nombre de services proposés, mais aussi d'améliorer la rentabilité en réduisant les coûts énergétiques. Il est intéressant de noter que ces bandes de fréquences sont la propriété de l'Etat qui vend leur utilisation aux opérateurs pour des sommes de l'ordre du million d'euros. Les enjeux économiques sont donc énormes. Comme les ondes ne s'arrêtent pas aux frontières et qu'une harmonisation de ces réseaux au niveau mondial est plus que préférable, des organismes ont été créés dont le rôle est de réguler leur utilisation, comme par exemple l'Agence Nationale des Fréquences (ANFr) ou l'Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes (ARCEP).

#### **2.4.2.2. Le réseau sans fil courte distance**

Il correspond aux technologies Bluetooth, Wi-Fi, Wimax (tableau 9).

Tableau 9 : Réseau sans fil courte distance (Radio-electrics, 2011)

Technologie	Bandes de fréquences
Bluetooth	2400 à 2483.5 MHz
Wi-Fi	2400 à 2483.5 MHz / 5150 à 5350 MHz/ 5470 à 5725 MHz
Wimax	3.4 à 3.8 GHz
Wimax mobile	2 à 6 GHz

Même si certaines technologies comme le Wimax ont une portée allant jusqu'à plusieurs kilomètres, on appellera ce type de réseau sans fil de courte portée. Ce réseau est privé, dans le sens où il ne fait pas partie d'un ensemble et assure un service spécifique, notamment pour le Wi-Fi qui est présent dans un très grand nombre d'habitations assurant de plus en plus l'accès à internet, mais aussi pour les communications entre appareils. De nombreuses personnes sont donc en contact permanent dans leur foyer avec ses rayonnements.

### 2.4.2.3. Le réseau audiovisuel

Tableau 10 : Réseau audiovisuel (Radio-electrics, 2011)

Technologie	Bandes de fréquences
<b>Télévision analogique</b> <b>(jusqu'au 29 novembre 2011)</b>	470 à 862 MHz
<b>Télévision Numérique Terrestre</b> <b>(TNT)</b>	470 à 790 MHz

La disparition de la télévision analogique le 29 novembre 2011 a permis de libérer des bandes de fréquences afin d'améliorer le service numérique (tableau 10) et a entraîné aussi une diminution des coûts. Une partie de la bande de fréquence a même pu être allouée pour les réseaux cellulaires de nouvelle génération.

### 2.4.2.4. La radio FM

Tableau 11 : Radio FM (Radio-electrics, 2011)

Technologie	Bandes de fréquences
<b>Radio FM (modulation de fréquence)</b>	87.5 à 108 MHz

Toujours fonctionnel, ce service permet la diffusion de programmes audio sur une zone géographique limitée. En France, le risque de saturation de cette bande de fréquence est réel dans certaines villes, rendant impossible l'implantation de nouvelles radios. Les programmes d'optimisation du réseau sont malheureusement peu nombreux et la diffusion numérique de la radio n'est pas à l'ordre du jour.

Il existe aussi d'autres types de réseaux mobiles comme ceux fonctionnant par communication satellite (réseau satellitaire) mais ceux-ci sont moins présents dans l'environnement. Ils ne seront donc pas traités dans cet ouvrage.

## 2.4.3. Interaction avec la matière, dosimétrie

### 2.4.3.1. Appareils mobiles, Wi-Fi

#### 2.4.3.1.1. Un indicateur universel : le DAS

En ce qui concerne les appareils mobiles, l'irradiation ne concerne qu'une partie du corps. C'est pourquoi on parle des risques directs dus à l'absorption des rayonnements. En effet même s'ils sont en partie réfléchis par le corps, le reste des rayonnements est absorbé par les différents tissus irradiés. De cette absorption résulte une chaleur, qui sera neutralisée par des mécanismes de thermorégulation. Cette absorption est quantifiée par la mesure du Débit d'Absorption Spécifique (DAS) exprimé en W/Kg.

#### 2.4.3.1.2. Législation

Le décret n°2002-775 du 3 mai 2002 impose un DAS (mesuré sur 10g de tissu) maximum de **2W/kg** pour les appareils télécoms ainsi que les émetteurs Wi-Fi pour une exposition de la tête et du tronc à des fréquences de 10MHz à 10GHz.

L'arrêté du 8 octobre 2003 impose aux fabricants d'indiquer le DAS maximum mesuré pour leurs appareils.

Pour illustrer ces propos, voici une liste non exhaustive de DAS de smartphones récents (tableau 12) :

Tableau 12 : DAS de divers smartphones

Modèle	DAS (W/Kg)	Modèle	DAS (W/Kg)
Samsung galaxy S3 4G	0.24	Sony Xperia J	0.73
Huawei Ascend Mate	0.25	Iphone 3G	0.88
Samsung Galaxy Note 2	0.37	Iphone 5S	0.98
LG G2	0.41	Blackberry Curve 8520	1.02
GOOGLE NEXUS 4	0.55	Nokia Lumia 710	1.30
HTC HD 7	0.66	Blackberry Bold 9790	1.86

Les appareils respectent donc bien les normes en ce qui concerne le DAS.

#### 2.4.3.1.3. Limites du DAS

Bien qu'il soit utilisé comme référence, le DAS a plusieurs limites :

- seule la valeur la plus élevée est prise en compte, sans préciser de valeur moyenne, ou au moins les conditions exactes de la mesure.
- un appareil avec un DAS élevé peut être en moyenne moins irradiant qu'un appareil avec un DAS plus faible, puisque la mesure se fait sur une portion très faible de tissu (10 grammes).
- un DAS faible peut aussi cacher un manque de sensibilité de l'appareil, qui peut être peu performant en émission et réception de données.

#### 2.4.3.2. Antennes relais (stations de base), TV, FM et Wi-Fi

##### 2.4.3.2.1. Propagation dans l'espace et mesure du champ électrique

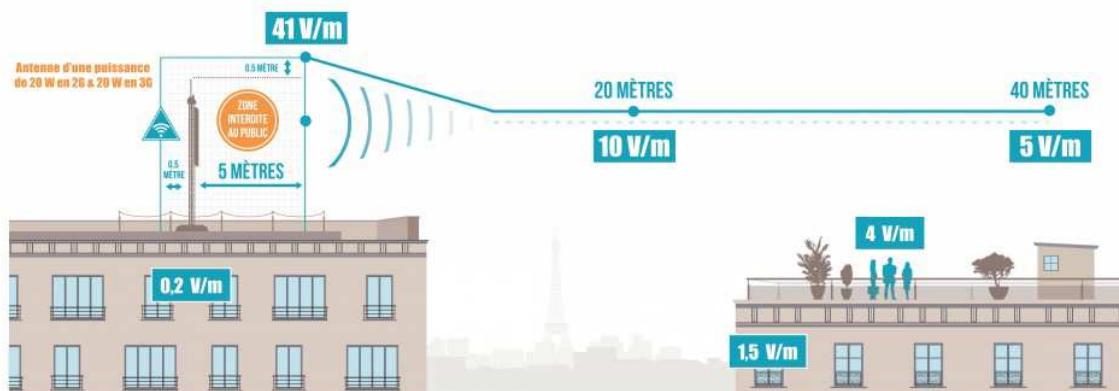


Figure 12 : Émissions dans l'espace des champs d'une antenne relais (Bouygues telecom, 2012)

Pour les antennes relais, on prend en compte le champ électrique (exprimé en V/m) puisque dans leur cas tout le corps est irradié. Ces antennes sont placées sur les toits d'immeubles (figure 12) afin de limiter l'exposition au sol, et les champs sont orientés le plus parallèlement possible par rapport au sol.

Concernant les antennes FM, elles sont situées plus hautes à proximité des villes. Quant aux antennes de diffusion TV elles sont situées encore plus en hauteur, étant plus puissantes et moins

nombreuses.

#### 2.4.3.2.2. Législation

C'est aussi le décret N° 2002-775 du 3 mai 2002, en se basant sur les recommandations de l'ICNIRP, qui délimite les valeurs maximales d'exposition des champs électriques créés par les antennes relais, antennes TV et radio FM (tableau 13). On notera que pour les fréquences comprises entre 400 et 2000 MHz, cette valeur limite dépend de la fréquence.

Tableau 13 : Valeurs maximales d'exposition pour les radiofréquences (ICNIRP, 1998)

Fréquences	Intensité du champ électrique (V/m)
10 à 400 MHz	28
400 à 2000 MHz	$1.375.f^{0.5}$
2 à 300GHz	61

NB : f est la fréquence en MHz

Pour les différents types de fréquences, on obtient les valeurs limites suivantes :

- 28 V/m pour l'émission FM
- 41 V/m pour une antenne GSM 900
- 58 V/m pour une antenne GSM 1800
- 61 V/m pour une antenne 3G et Wi-Fi

Ces valeurs d'intensité de champ électrique sont atteintes à moins de 5 m de ces antennes, mais en ce qui concerne la population générale au sol, elle n'est irradiée en pratique que par des champs électriques d'une intensité avoisinant les 2 V/m, ce qui est loin des valeurs limites d'exposition (ICNIRP, 1998).

#### 2.4.4. Signalisation

Concernant les appareils mobiles, l'arrêté du 12 octobre 2010 stipule :

- Que le DAS d'un appareil doit être indiqué sur le lieu de vente ou de distribution de l'appareil, et ce en gras et de taille au moins égale à celle du descriptif technique.

- Que le DAS doit aussi être présent sur la notice de l'appareil.
- Que le DAS doit également être indiqué dans chaque publicité
- Que sur chaque lieu de vente ou de distribution doit être présente la mention :  
 « Le DAS (débit d'absorption spécifique) des téléphones mobiles quantifie le niveau d'exposition maximale de l'utilisateur aux ondes électromagnétiques, pour une utilisation à l'oreille. La réglementation française impose que le DAS ne dépasse pas 2 W/kg. »

Concernant les antennes de diffusion, les zones proches des antennes où les valeurs de champs électriques sont supérieures aux valeurs maximales recommandées sont obligatoirement interdites au public.

De plus, chaque antenne doit être indiquée à l'ANFr, qui sera ajoutée au site internet Cartoradio qui répertorie toutes les antennes. Ce site est accessible au public. Cette même ANFr donne un protocole précis pour les prises de mesures aux alentours de l'antenne, qui devront elles aussi être transmises obligatoirement à cette agence.

## **2.4.5. Effets biologiques**

Les normes actuelles permettent d'éviter tout effet immédiat pour ce type de rayonnement. Cependant il est plus compliqué de prévoir et de prévenir un éventuel effet néfaste de ce type d'onde en ce qui concerne une exposition de manière prolongée. La place de plus en plus importante des communications sans fil a poussé la communauté scientifique à réaliser de nombreuses études sur le sujet, notamment pour les téléphones portables.

### **2.4.5.1. Effets sur la reproduction et le développement**

#### **2.4.5.1.1. Fertilité**

Le nombre d'études parues à ce jour traitant de ce risque est relativement faible, mais la communauté scientifique commence à se pencher sur le sujet depuis quelques années. Les études *in vitro* et *in vivo* sur des modèles animaux n'ont pas montré de résultats significatifs pour démontrer une relation entre perte de fertilité chez l'homme et l'exposition à ce type de rayonnement. Les études portant sur la fertilité de la femme sont beaucoup moins nombreuses, se résumant à quelques études *in vivo* chez l'animal (Pouilletier de Gannes, 2013), (Falzone, 2010),

(Lee, 2010).

Cependant, certaines études réalisées *in vivo* sur des souris mâles semblent montrer un effet néfaste, comme par exemple une altération de la barrière hémato-testiculaire, ou encore une apoptose des cellules testiculaires. Mais les résultats ne peuvent être pris en compte sachant que les champs utilisés sont beaucoup plus puissants que ceux auxquels la population générale est soumise. En outre, ces études utilisent des groupes trop restreints d'animaux pour être interprétables d'un point de vue statistique (Wang, 2010), (Kesari, 2010).

#### **2.4.5.1.2. Tératogénicité et effet sur le développement *in utero***

De nombreuses études ont été effectuées *in vivo* sur des modèles animaux, notamment des rats, afin de déterminer si ce type de rayonnement peut sur le long terme altérer le développement d'animaux immatures, voire pendant la période embryonnaire. Après avoir irradié des femelles gestantes, les études n'ont montré aucune déformation ou anomalie pour le fœtus. Quant aux mères, elles n'ont présenté aucune séquelle. De même, aucun résultat probant n'a été obtenu chez des souris juvéniles (Kuribayashi, 2005), (Ogawa, 2009), (Pouilletier de Gannes, 2013).

*In vitro*, l'effet de telles ondes a été récemment observé sur le trophoblaste (couche externe) de l'embryon montrant de légères modifications transitoires de l'ADN et de l'ARN. Ces résultats sont à prendre en compte, mais de par le côté éphémère des modifications obtenues et du faible nombre d'études réalisées, on ne peut conclure sur un lien de causalité et affirmer la dangerosité pour le fœtus (Cervellati, 2009), (Franzellitti, 2010).

#### **2.4.5.2. Effets sur le système cardiovasculaire**

Quelques études ont tenté de trouver un lien entre exposition aux radiofréquences et effets sur le système cardiovasculaire. Que ce soit des études *in vivo* sur des animaux ou des études épidémiologiques chez l'homme, aucune n'a montré de dérèglements du système cardiovasculaire, que ce soit au niveau du rythme cardiaque, de la pression artérielle ou des paramètres hématologiques. Cependant, le nombre d'études est faible et l'échantillonnage d'animaux ou de volontaires humains est trop réduit pour pouvoir conclure à de possibles effets nocifs de ces rayonnements sur le fonctionnement de ce système (Barutcu, 2011), (Barker, 2007), (Colak, 2012).

#### **2.4.5.3. Effets sur l'expression génétique et sur la synthèse des protéines**

L'expression génétique correspond à une chaîne de réactions biochimiques permettant à l'ADN d'initier la synthèse de protéines. Son analyse est désormais accessible grâce aux nombreuses avancées technologiques en matière de biologie moléculaire. Ainsi, des travaux ont été effectués pour savoir si les radiofréquences étaient à même de modifier cette expression, ce qui serait la preuve que la cellule puisse être sensible à ces rayonnements et pourrait ainsi affecter son fonctionnement.

Basées sur des techniques modernes (puces à ADN, réaction en chaîne par polymérase, électrophorèse bidimensionnelle...), certaines études ont mesuré l'impact sur l'expression génétique d'expositions courtes ou longues, *in vivo* ou *in vitro*, à des champs de type radiofréquence (Im CN, 2010), (Sakurai, 2011), (Nylund, 2010).

De légères variations d'expression des gènes ont pu être observées, et ce de manière réversible. Ces modifications ne semblent pas d'après les auteurs être en mesure de modifier notamment la synthèse des protéines dans les cellules. Mais le secteur de recherche étant très vaste et peu étudié, on ne peut pas conclure quant à l'absence de nocivité de ces champs.

#### **2.4.5.4. Effets sur le stress oxydant**

Certaines études ont cherché à détecter un possible lien entre les radiofréquences et le stress oxydant, c'est-à-dire la production d'espèces oxygénées réactives dont des radicaux libres en excès. Ce surplus de radicaux libres peut engendrer une altération des composants de la cellule, de la membrane jusqu'à l'ADN.

Des études montrent un effet amplificateur du stress oxydant pour les radiofréquences, en particulier *in vitro* et *in vivo* chez les animaux (Ozgur, 2010), (Xu, 2010).

A l'inverse, d'autres études démontrent un effet bénéfique des radiofréquences contre le stress oxydant (Dragicevic, 2011).

Ces résultats contradictoires ne permettent pas de conclure sur une nocivité des radiofréquences chez l'homme, d'autant que ces études ont été réalisées sur des animaux. La plupart des études n'ont révélé aucun lien de causalité (Campisi, 2010).

Il n'empêche que les recherches doivent être poursuivies.

## **2.4.5.5. Effets sur le système nerveux**

### **2.4.5.5.1. Effets sur les neurones**

Des études ont été réalisées *in vivo* sur des animaux et *in vitro* pour mettre en évidence un possible effet des radiofréquences sur les cellules nerveuses. Même si un grand nombre d'entre elles n'ont montré aucun effet nocif sur les neurones, certaines ont montré pour des DAS élevés (environ 5W/Kg), qu'une exposition prolongée pouvait diminuer la croissance cellulaire, voire déclencher l'apoptose des cellules (Liu, 2012).

D'autres études ont obtenu un résultat inverse c'est-à-dire une diminution de l'apoptose ce qui suggère un grand risque de biais et d'erreurs dans la réalisation de ces recherches (Sonmez, 2010), (Dasdag, 2009).

Un effet nocif potentiel des radiofréquences a pu être observé sur les cellules neuronales mais elles ont été réalisées avec un faible nombre d'animaux et sur des valeurs de champs plus élevées que les valeurs classiques. En conclusion, on ne peut affirmer une nocivité des radiofréquences sur les cellules neuronales.

### **2.4.5.5.2. Effets sur la barrière hématoencéphalique**

Après une étude accablante parue en 2003, qui stipulait que les radiofréquences étaient nocives pour la barrière hématoencéphalique, la communauté scientifique a enclenché des études pour vérifier ces résultats. Dix ans plus tard, aucune étude n'a pu les confirmer, mettant fin à cette polémique (Salford L.G., 2003), (Nittby, 2011).

### **2.4.5.5.3. Effets sur l'activité électrique cérébrale**

Dans ce cas, le but des études était de détecter si les radiofréquences pouvaient ou non interférer sur l'électroencéphalogramme (EEG) d'une personne exposée à ce type de champ. De nombreuses études cliniques ont été réalisées sur des hommes et des femmes volontaires. Certaines d'entre elles ont montré des variations au niveau de l'EEG mais pour quelques fréquences seulement. Il n'est actuellement pas scientifiquement possible de déterminer si des variations de ce type peuvent avoir des répercussions sur l'état de santé du patient et si elles doivent être prises en compte (Vorobyov, 2010).

#### 2.4.5.5.4. Effets sur les fonctions cognitives

Afin de détecter d'éventuels troubles de mémoire, de concentration ou du temps de réaction à un stimulus dû aux radiofréquences, des études ont été effectuées sur des souris ou des rats. Elles consistaient à évaluer la capacité des animaux à se déplacer dans des labyrinthes et à réussir d'autres exercices. Ces expériences n'ont pas montré de perturbations des fonctions cognitives. Il a même été observé une amélioration sensible de ces fonctions. Ces améliorations viendraient d'un effet bénéfique de ces champs sur la fonction mitochondriale des cellules cérébrales (Arendash, 2010), (Dragicevic, 2011).

Bien que ces rares résultats ne soient pas suffisants pour affirmer un effet bénéfique, ceci ouvre tout de même de nouvelles voies d'investigation.

Quant aux études réalisées chez l'homme à différents âges (de l'enfant *in utero* à l'adulte), le très grand nombre de méthodes utilisées et la très forte disparité des résultats obtenus font que l'on ne peut conclure sur cette question (Vrijheid, 2010), (Thomas, 2010), (Riddervold, 2010).

Parmi les rares études épidémiologiques réalisées dans ce cadre, une amélioration cognitive a été relevée chez les utilisateurs de téléphone portable, mais encore une fois avec trop peu de critères pris en compte pour que ces résultats soient valides (Nguyen T, 2012), (Vecchio, 2010).

#### 2.4.5.5.5. Effets sur le sommeil

Le sommeil est un ensemble de mécanismes complexes difficiles à analyser. Les études tant épidémiologiques que celles effectuées sur des animaux n'ont pas montré de lien entre exposition aux radiofréquences et troubles du sommeil. Les études sur les rats, bien qu'intéressantes dans leur déroulement, restent limitées du simple fait que ces mammifères n'ont pas le même rythme de sommeil que l'homme. Quant aux études épidémiologiques, elles montrent que les personnes qui ont un sommeil perturbé sont les mêmes qui présentent de l'anxiété vis-à-vis de ces champs (Pelletier, 2013), (Danker-Hopfe, 2010).

Les études cliniques semblent plus instructives. En effet, certaines révèlent de légères modifications de l'EEG du sommeil à différents stades. Cependant même si ces résultats sont retrouvés dans plusieurs études, de nombreuses zones d'ombres dans leur interprétation subsistent. Il semble exister de nombreuses variabilités inter-individuelles : par exemple, il y aurait une différence de sensibilité entre l'homme et la femme. De plus, ces modifications n'ont qu'exceptionnellement un impact sur le sommeil des personnes exposées. On ne peut donc

conclure concernant la nocivité de ces champs, mais il faut néanmoins considérer qu'une modification de l'EEG est possible (comme vu dans le chapitre précédent) (Danker-Hopfe, 2011), (Schmid, 2012), (Loughran, 2012).

#### **2.4.5.5.6. Effets sur les maladies neurologiques**

##### **2.4.5.5.6.1. Sclérose en plaque**

Seule une étude épidémiologique a pu établir un lien entre sclérose en plaque (SEP) et exposition aux radiofréquences mais ces résultats ne peuvent être interprétés correctement compte tenu du trop faible nombre de cas de SEP examinés.

Les connaissances scientifiques en la matière sont insuffisantes, et des études plus poussées devront être effectuées dans ce domaine (Schüz, 2009).

##### **2.4.5.5.6.2. Epilepsie**

Concernant l'épilepsie le nombre d'études est lui aussi très faible. Les rares travaux effectués sur le rat et l'homme ont mis en évidence quelques modifications dans le rythme des crises mais le manque de données et le caractère trop vague des résultats obtenus ne permettent pas d'établir un lien évident. D'autres investigations sont nécessaires afin d'établir un lien de causalité (Carballo-Quintas, 2011), (Vecchio F, 2012).

##### **2.4.5.5.6.3. Maladie d'Alzheimer**

Des études ont été menées *in vivo* sur des souris transgéniques ayant des mutations propres à la maladie pour tester l'influence des radiofréquences sur cette maladie. Les résultats obtenus sont intéressants puisqu'une exposition de ces souris malades aux ondes radiofréquences annulerait leurs troubles mémoriels. On a constaté également une amélioration des capacités cognitives chez des souris n'ayant pas de maladie (voir chapitre sur les fonctions cognitives). Cet effet serait dû à une action bénéfique de ces fréquences sur l'activité mitochondriale au niveau synaptique (Arendash G. W., 2010), (Arendash G. W.-R., 2010).

#### **2.4.5.6. Cancérogenèse**

##### **2.4.5.6.1. Effets sur les mécanismes cellulaires de la cancérogenèse**

Les radiofréquences entraîneraient le développement de cellules cancéreuses. Par quel mécanisme ? Des études ont été réalisées afin de rechercher non pas un lien direct avec le cancer,

mais plutôt avec un mécanisme biochimique initiateur du processus cancéreux.

D'après des travaux réalisées *in vitro* et *in vivo*, peu de résultats ont démontré un lien de causalité entre une exposition aux radiofréquences et un risque que ce soit au niveau mutagène, apoptotique, ou génomique (Ziemann, 2009), (Ros-Llor, 2012).

Cependant plusieurs études indiquent une augmentation du nombre de cassures de l'ADN, ainsi qu'une diminution des facultés de réparation de ces cassures. Cet effet pourrait être lié à une augmentation du stress oxydant (voir partie plus haut). Cependant ces résultats ne sont pas alarmants : de nombreuses cassures de l'ADN ont habituellement lieu dans les cellules saines, c'est ce qu'on appelle le bruit de fond. Même si elles s'avéraient plus nombreuses en cas d'exposition à des radiofréquences, les cassures sont normalement réparées n'entraînant aucun impact sur l'intégrité du génome. Les résultats de ces mêmes études témoignent d'une rapidité dans la réparation de ces altérations de l'ADN.

On peut donc conclure que ces ondes provoqueraient des cassures dans la molécule d'ADN par augmentation du stress oxydant mais que ces données ne sont pas encore suffisantes pour témoigner d'un véritable effet cancérogène de ces rayonnements. Cependant, il devra être pris en compte dans les prochaines études (Markova & Malmgren, 2010), (Franzellitti, 2010), (Kesari, 2010).

#### 2.4.5.6.2. Effets sur le risque de cancer chez l'homme

##### 2.4.5.6.2.1. Les tumeurs cérébrales

###### 2.4.5.6.2.1.1. Gliomes

Pour savoir si une exposition aux radiofréquences augmente le nombre de cas de gliomes, il est important de savoir s'il existe une augmentation du nombre de gliomes recensés chaque année, et savoir si cette augmentation est imputable aux radiofréquences.

Certaines publications se sont penchées sur le sujet et ont noté une légère augmentation du taux d'incidence des gliomes, toutes catégories de population confondues (+ 0.4% par an). Elles ont été réalisées dans des pays où le taux de recensement des cancers est fiable et élevé (Deltour, 2012), (Little, 2012).

Ainsi, une étude de grande ampleur rassemblant plus de 2000 personnes, appelée *l'Interphone Study Group 2010*, a montré que pour les personnes ayant cumulé plus de 1640 h d'appels téléphoniques dans sa vie le risque de gliome serait *a priori* accru. Cependant, cette étude

essentiellement basée sur des réponses à un questionnaire fut considérée comme non recevable compte tenu du risque de trop nombreux biais statistiques. (The Interphone Study Group, 2010)

Une autre étude a également montré un lien de causalité très fort entre radiofréquences et gliomes : il y aurait un risque de gliome plus élevé de 30% après 1 an d'utilisation de téléphone mobile et une augmentation de plus de 150% des cas de gliomes après 10 ans d'utilisation.

Ces valeurs très élevées peuvent difficilement être prises au sérieux car elles ne coïncident absolument pas avec l'incidence des gliomes mesurée lors des autres études (Hardell L, 2010), (Hardell & Carlberg, 2011).

Même si cette comparaison ne discrédite pas totalement cette étude, et qu'un lien a pu être démontré, il ne peut pas l'être à un tel niveau d'augmentation.

En outre, des études de cohorte portant sur plusieurs millions de personnes ne corroborent pas le lien entre le nombre d'années d'utilisation d'un mobile et la probabilité d'apparition d'un gliome (Frei, 2011).

#### **2.4.5.6.2.1.2. Méningiomes**

Concernant les méningiomes, moins de publications sont parues. Des études ont montré une incidence de l'apparition de ce genre de tumeurs, mais les méthodes employées manquent de rigueur (non prise en compte des bons registres de cancer dans les pays sélectionnés, périodes de mesures trop courtes...). En tout cas, aucun lien entre la durée d'utilisation de téléphones mobiles et l'augmentation du risque de méningiome n'a pu être établi. En résumé les données sont insuffisantes pour conclure sur quelque effet des radiofréquences sur l'apparition des méningiomes (Deltour & Johansen, 2009), (Frei, 2011).

#### **2.4.5.6.2.1.3. Neurinomes du nerf acoustique**

Le neurinome du nerf acoustique, rare et bénin, a souvent été mentionné comme conséquence de l'utilisation de téléphones mobiles de par sa position près de l'oreille. A la suite de cela, de nombreuses publications sont parues pour tenter d'établir un lien de causalité. La plupart des études n'ont révélé aucun lien, y compris une étude de grande ampleur dénommée *Interphone* (The Interphone Study Group, 2011), (Schüz & Steding-Jessen, 2011).

Cependant quelques études dont certaines récentes ont mis en avant un effet nocif d'une exposition aux fréquences à long terme sur le neurinome acoustique. Mais ces résultats ne permettent pas à eux seuls d'établir un lien entre téléphonie mobile et ce type de tumeurs

(Benson, 2013), (Larjavaara, 2011).

#### **2.4.5.7. L'hypersensibilité aux ondes électromagnétiques.**

L'hypersensibilité aux ondes électromagnétiques regroupe tous les symptômes imputés par certaines personnes à l'exposition aux ondes électromagnétiques. Ce sujet est traité dans le chapitre dédié aux radiofréquences car c'est ce type d'onde qui est pointé du doigt dans la majorité des cas. Les personnes en question se plaignent de maux de tête, d'insomnie, de fatigue, de perte de concentration, voire même de dépression.

La surmédiatisation de ces cas provient d'une étude néerlandaise qui en 2003 présentait des résultats mettant en avant ce lien de causalité entre bien-être et radiofréquences (Zwamborn, 2003).

Or, de nombreuses études ne confirment pas cette association entre ondes électromagnétiques et altération du bien-être, et ce en tenant compte de nombreux symptômes. Les rares études montrant un possible effet ne sont pas valables puisque les résultats sont incohérents au final. Par exemple, les personnes les plus exposées aux ondes ne ressentent rien contrairement à d'autres personnes moins exposées, ou alors les effets semblent s'inverser au cours de la journée (Heinrich, 2010), (Milde-Busch, 2010), (Röösli, 2010).

Certaines études réalisées sur les antennes relais suggèreraient un effet nocebo. En effet, il y a une corrélation entre symptômes perçus et distance perçue de l'antenne plus importante qu'avec la distance réelle. Cela signifie que le ressenti des personnes influe notablement sur leurs symptômes (Baliatsas, 2011).

Ces études restent trop peu nombreuses. Elles sont souvent basées sur des questionnaires dont les réponses fournies par les personnes sont de l'ordre du subjectif. C'est pourquoi l'analyse de ce phénomène d'hypersensibilité aux ondes électromagnétiques est difficile à interpréter. A l'heure actuelle, il est donc impossible de conclure sur un lien de causalité évident. Cependant, la composante psychologique (nocebo) semble plus plausible, même s'il est impossible de l'affirmer. Il ne faut pas oublier que l'utilisation du téléphone mobile peut être anxiogène. En effet, on reconnaît de plus en plus que le fait d'être constamment connecté aux réseaux sociaux, d'être joignable à tout moment, peut générer un stress.

En conclusion, de nombreux facteurs interfèrent, il faut attendre de nouveaux résultats afin de déterminer si cette hypersensibilité est bien réelle, et pas seulement psychologique. Néanmoins la

souffrance de ces personnes est bien réelle. Pour elles un traitement symptomatique s'impose ainsi qu'un suivi psychologique dans le but de diminuer la souffrance, quelle qu'en soit la cause.

#### **2.4.6. Conclusion**

Malgré le grand nombre d'études publiées, les résultats ne permettent pas d'émettre une conclusion définitive sur ce sujet condamné à rester polémique. Les méthodes employées dans ces études manquent de précision, de véracité dans leurs propos pour servir de références. Cependant une grande majorité de ces travaux semblent s'orienter vers une absence d'effets sur le long terme de ce type d'onde. Inversement, certaines études montrent des effets possibles. Tout ceci indique qu'il est nécessaire de poursuivre les investigations. La prévention de ces éventuels risques, même s'ils ne sont pas avérés, doit tout de même être mise en place par mesure de précaution.

## 2.5. LE RAYONNEMENT INFRAROUGE

### 2.5.1. Présentation

Le rayonnement infrarouge regroupe l'ensemble des longueurs d'onde allant de 780 à  $10^6$  nm. Il fait partie de la famille des rayonnements optiques avec le rayonnement visible et le rayonnement ultra-violet. L'origine de son nom s'explique du fait que ce type de rayonnement se situe juste en dessous de la lumière visible en termes de longueur d'onde, et que la couleur rouge est le rayonnement visible ayant la fréquence la plus basse. Ainsi infrarouge signifie « en dessous du rouge ».

On classe ce rayonnement en fonction de leur intervalle de fréquences en trois catégories :

- IR A pour 0.7 à 1.4 µm
- IR B pour 1.4 à 3 µm
- IR C pour 3 à 1000 µm

Il existe des sources naturelles et artificielles d'infrarouges. Le soleil constitue la première et la plus évidente des sources puisqu'il est admis depuis longtemps que le rayonnement infrarouge est intimement lié à la chaleur. En effet, la chaleur provoque une agitation et une rotation des molécules induisant une émission d'un rayonnement infrarouge. Ceci a été découvert à travers la théorie du corps noir et la loi de Planck qui stipule que le rayonnement émis évolue en fonction de la température de la matière émettrice. Le soleil n'est donc pas le seul émetteur d'infrarouges, loin de là, puisque tout organisme vivant émet de la chaleur et est donc émetteur de ce type de rayonnement (Perrin A, 2010).

En ce qui concerne les sources artificielles d'infrarouges, il en existe une grande quantité : fours industriels, télécommandes, outils pour la recherche scientifique, matériel de détection militaire. Leur usage est basé soit sur la production de chaleur soit sur la détection de celle-ci. L'exemple le plus connu concerne les lunettes de vision nocturne qui sont basées sur la captation du rayonnement infrarouge (fig. 13).

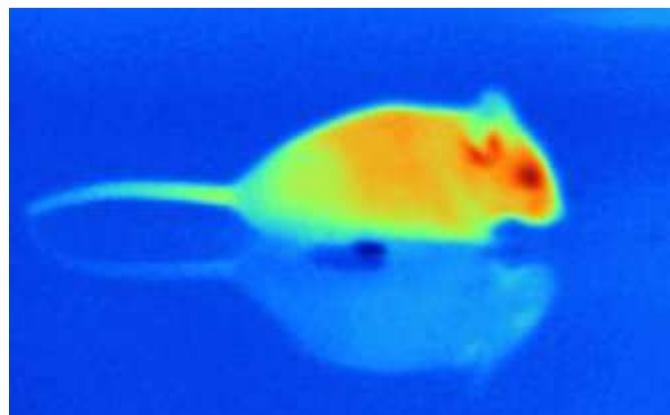


Figure 13 : Vision d'un animal grâce au rayonnement IR (Science et Avenir, 2010)

### 2.5.2. Interactions avec la matière, dosimétrie

Pour mesurer une exposition aux rayons infrarouges, on mesure l'éclairement énergétique  $E$  en  $\text{W/m}^2$  et l'exposition énergétique  $H$  en  $\text{J/m}^2$ . Ces mesures représentent la quantité de rayonnement reçu par unité de temps ( $E$ ) ainsi que la quantité totale de rayonnement reçu au final ( $H$ ).

Pour les IRA qui pénètrent jusque dans la rétine, on mesure l'exposition de la rétine sous forme de la luminance énergétique  $L$  en  $\text{W/m}^2/\text{sr}$ . En effet l'exposition dépend aussi de l'angle de pénétration du rayon (ICNIRP, 2006), (Stellman, 2000).

La pénétration de ce type de rayonnement dans les tissus biologiques est très faible, de l'ordre du millimètre. Elle dépend d'ailleurs de la longueur d'onde. Plus elle est faible, plus la pénétration est profonde. Ainsi les IRA pénètrent plus profondément que les IRB et les IRC.

Les principaux effets directs attendus se situent au niveau de la peau ou des yeux. Dans certains environnements, ils peuvent induire spécifiquement des effets sur la globalité du corps par effet de chaleur allant jusqu'à perturber les mécanismes de thermorégulation.

### 2.5.2.1. Au niveau de l'œil

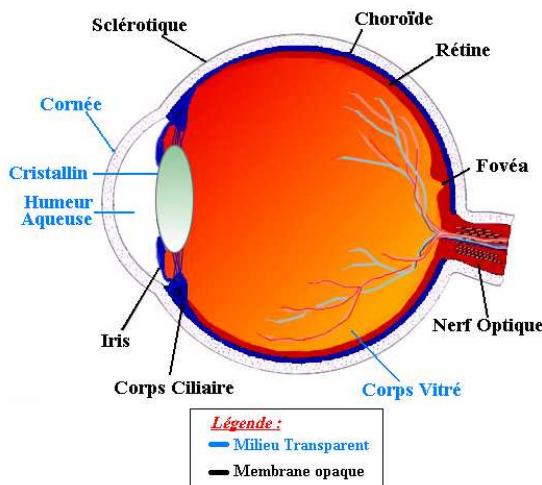


Figure 14 : Coupe anatomique de l'œil (CNRS, 2006)

Les IRA de faible longueur d'onde peuvent atteindre et chauffer les différents éléments de l'œil dont la rétine. Les IRB et IRC sont intégralement absorbés par la cornée et l'humeur aqueuse et n'atteignent pas la rétine. Les IRB peuvent être absorbés en partie par le cristallin.

En fait, les atteintes de la cornée sont rares car les réflexes de protection de l'œil permettent d'éviter les éventuelles brûlures qui pourraient engendrer les rayonnements IR.

Les atteintes de la rétine sont possibles par les IRB et surtout par les IRA, car la focalisation du rayonnement peut déclencher des brûlures très rapides. Cependant, ces cas de lésions rétiennes ne peuvent être induits que par un rayonnement IR du type laser que produisent certains appareils utilisés par des professionnels qualifiés. Ces lésions de l'œil ne concernent donc pas la population générale mais plutôt certains travailleurs opérant dans des zones spécifiques.

L'atteinte la plus fréquente et la mieux étudiée est sans aucun doute la cataracte qui se traduit par une opacification du cristallin. Une étude portant sur les travailleurs de l'acier et du verre qui subissent quotidiennement un éclairement énergétique de 80 à 400 mW/m<sup>2</sup> pendant une quinzaine d'années a démontré une augmentation des cas de cataracte par rapport à ceux recensés dans la population générale (Sliney DH, 180).

Certaines études relatent l'apparition immédiate de lésions à partir d'une exposition à un éclairement de 40 kW/m<sup>2</sup>. Concernant une exposition à plus long terme, la limite énergétique avant apparition de lésions dans le cristallin serait de 5 kJ/cm<sup>2</sup> (Pitts DG, 1981), (Wolbarsht, 1978), (Wolbarsht, 1992).

Les atteintes au niveau de l'œil sont plus rapides dans un environnement chaud, car les

mécanismes de thermorégulation de l'œil sont plus rapidement dépassés. C'est pourquoi les valeurs limites d'exposition préconisées par l'ICNIRP dépendent de la température de la zone dans laquelle se situe les personnes.

Pour une température de zone supérieure à 35°C, les valeurs limites d'exposition sont :

- 100 W/m<sup>2</sup> si le temps d'exposition t est supérieur à 1000 s.
- $1.8 \cdot 10^{-4} \cdot t^{-0.75}$  W/m<sup>2</sup> si le temps d'exposition t est inférieur à 1000 s.

Pour une température de zone inférieure à 35°C, on estime que chaque degré de moins dans la zone d'exposition autorise une augmentation de la valeur maximale d'exposition à 6 W/m<sup>2</sup> et jusqu'à 400 W/m<sup>2</sup> pour une température de zone proche de 0°C (ICNIRP, 2006).

Ces valeurs sont utilisées comme références dans la directive 2006/25/CE de 2006 établie par la commission européenne pour limiter les expositions des travailleurs.

On notera que les professionnels exposés à ces rayonnements ont en général l'œil plus sec, dû au léger échauffement produit par le rayonnement. Cela peut induire des irritations et un risque plus élevé d'infections sans pour autant présenter un danger à court ou à long terme.

### **2.5.2.2. Au niveau de la peau**

Comme pour l'œil, concernant l'effet des rayons infrarouges sur la peau, il est indispensable de distinguer IRA, IRB et IRC. Les IRC sont totalement absorbés par la couche supérieure de l'épiderme. Les IRB pénètrent dans l'épiderme et le derme. Quant aux IRA, ils pénètrent encore plus profondément, jusqu'à l'hypoderme (figure 15).

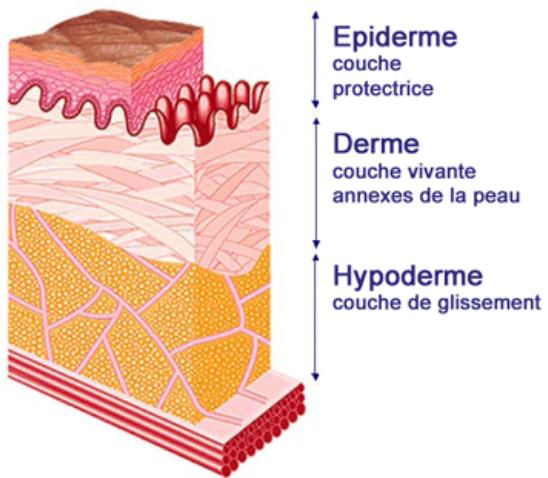


Figure 15 : Les différentes couches de la peau (Urgomedical, 2010)

Les IRA étant les rayons pénétrant le plus profondément la peau, ils peuvent provoquer des brûlures. Le seuil de brûlure à la surface de la peau est de 45°C. Cependant, avant d'atteindre ce seuil, les rayons IR peuvent provoquer des lésions touchant plus ou moins les mécanismes de thermorégulation du corps. Ainsi, il peut y avoir formation d'érythèmes à la surface de la peau, non dangereuses mais pouvant gêner esthétiquement. Il ne faut pas négliger les effets potentiellement cancérigènes de tels rayonnements. En effet, il est reconnu que la chaleur peut être un cofacteur du cancer, n'étant pas directement responsable mais pouvant interférer sur la réparation de l'ADN (Dewhirst DW, 2003), (Boukamp P, 1999).

D'après certaines études, l'apparition d'érythème survient après une exposition de 1000 W/m<sup>2</sup> pendant 15 min (soit 90 J/cm<sup>2</sup>) (Walsder EJ, 2002), (Meffert H, 2002).

La valeur limite d'exposition donnée par l'ICNIRP n'existe que pour une durée t inférieure à 10s. On obtient alors une valeur d'exposition énergétique devant être inférieure à  $20000 \cdot t^{0.25}$  J/m<sup>2</sup> (ICNIRP, 2006). Cette valeur limite est elle aussi utilisée dans la directive européenne citée plus haut.

Lorsque l'exposition de la peau d'un individu devient élevée et se rapproche de ces seuils de brûlure ou d'apparition d'érythème qui s'accompagnent d'un ralentissement des mécanismes de thermorégulations, un certain inconfort est ressenti par la personne qui va de ce fait avoir le réflexe de réduire son exposition. A cet inconfort s'ajoute l'apparition de nausées, de vertiges, de fièvre, d'une sécheresse des muqueuses voire même d'une perte de connaissance.

### **2.5.3. Conclusion**

Les rayonnements de type infrarouge sont présents partout dans notre environnement. Cependant l'exposition de la population générale à ces rayonnements ne semble pas présenter de risque important pour la santé. L'utilisation de ces rayonnements dans les activités industrielles nécessite tout de même que les professionnels s'en protègent grâce à un équipement adapté. Ainsi, les normes exigent le port de lunettes ou de masques filtrant les rayonnements IR (à la norme NF EN 171) sur la zone de travail, la présence d'écrans fixes devant les sources d'émissions intenses et bien évidemment l'interdiction de l'accès à certaines zones d'exposition particulièrement dangereuses. Ces recommandations sont inscrites dans le Code du Travail (article R4452-13).

## 2.6. LE RAYONNEMENT VISIBLE

### 2.6.1. Présentation

C'est le rayonnement dont les longueurs d'onde sont comprises entre 400 et 780 nm. Il est présent de manière naturelle et sa source principale est le soleil. Il peut provenir de sources artificielles créées pour l'éclairage mais aussi involontairement lors de certains travaux industriels comme en fonderie. Ce rayonnement, appelé plus communément lumière est le seul perceptible par l'œil humain. Il est notamment associé au concept de couleur puisque dans cette bande de fréquence, chacune d'elle est associée à une longueur d'onde spécifique. Il existe donc une infinité mais on peut schématiser cet ensemble en 6 couleurs représentant chacune une petite portion de la bande de fréquence (tableau 14).

Tableau 14 : Les différentes couleurs du rayonnement visible associées à leur intervalle de fréquence

Couleur	Longueur d'onde
Violet	380 à 450 nm
Bleu	450 à 490 nm
Vert	490 à 570 nm
Jaune	570 à 585 nm
Orange	585 à 620 nm
Rouge	620 à 750 nm

Lorsque ce rayonnement traverse l'œil humain pour arriver sur la rétine, il stimule des cellules sensibles qui envoient un signal au cerveau. Celui-ci reconstitue l'image. La couleur perçue par un individu dans son environnement dépend donc de la longueur d'onde du rayonnement qui stimule les cellules de sa rétine.

### 2.6.2. Interactions avec la matière, dosimétrie

Tout comme le rayonnement infrarouge, la lumière ne pénètre pas profondément dans les tissus biologiques. Les seules parties du corps pouvant être éventuellement lésées par ce type de

rayonnement sont la peau et les yeux.

L'exposition à ce rayonnement est mesurée de la même manière que pour le rayonnement IRA, c'est-à-dire en utilisant les concepts d'éclairement énergétique E exprimé en  $\text{W/m}^2$ , d'exposition énergétique H en  $\text{J/m}^2$  et de luminance énergétique L en  $\text{W/m}^2/\text{sr}$  (ICNIRP, 2013).

A ces grandeurs s'ajoutent d'autres plus spécifiques au rayonnement visible comme l'intensité lumineuse d'une source exprimée en candela (cd), la luminance visuelle en  $\text{cd/m}^2$  (correspond à l'intensité lumineuse d'une source ou d'une surface éclairée ressentie par l'individu), le flux lumineux d'une source exprimé en lumen (lm) et l'éclairement lumineux exprimé en  $\text{lm/m}^2$  ou lux qui mesure l'intensité de la lumière reflétée par une surface (ANSES, 2010).

Pour mieux cerner la différence entre flux lumineux et intensité lumineuse, il faut comprendre que le flux correspond à la quantité totale d'énergie électromagnétique diffusée par la source, alors que l'intensité ne tient compte que de l'énergie transmise dans une direction précise.

Concernant la luminance visuelle et l'éclairement lumineux, il faut comprendre le fait que la luminance permet de mesurer la lumière ressentie par la personne exposée à la source alors que l'éclairement lumineux intègre la distance entre une surface éclairée et sa source.

Ce rayonnement peut provoquer deux types de lésions (figure 16) :

- Des lésions photochimiques liées à l'apparition de radicaux libres dans les tissus pouvant être cancérogènes. Elles sont étroitement associées à l'intensité de l'éclairement énergétique, dépendant de la dose reçue ainsi que de la durée d'exposition. Ces effets ne se présentent qu'à des longueurs d'onde inférieures à 600 nm.
- Des lésions thermiques liées à un échauffement de la zone exposée qui dépendent de la température ambiante ainsi que la vascularisation du tissu cible.

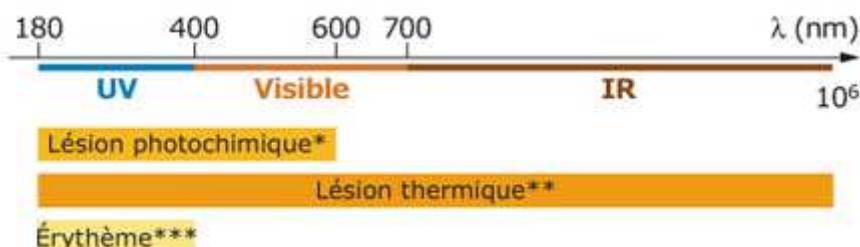


Figure 16 : Domaines de longueurs d'onde dans l'UV-visible susceptibles de provoquer des lésions (INRS, 2011)

### **2.6.2.1.      Au niveau de l'œil**

Il est important de souligner de prime abord que face à un rayonnement lumineux intense et donc potentiellement dangereux, le corps humain dispose de mécanismes de défense. En effet, la quantité de lumière pénétrant à l'intérieur de l'œil peut être limitée par un rétrécissement de la pupille (réflexe photomoteur), et aller jusqu'à la fermeture de la paupière en cas d'exposition intense. Cependant, ces mécanismes peuvent être dépassés si la source lumineuse est trop intense, comme par exemple lorsqu'un individu regarde directement le soleil (fréquent lors d'observation d'une éclipse).

Les lésions photochimiques se traduisent par des altérations cellulaires au niveau de l'œil dont la gravité est fonction de l'exposition sur le long terme d'un individu. En effet, une exposition trop importante et trop fréquente de l'œil peut être à l'origine d'un altération du cristallin et ainsi de l'apparition précoce d'une cataracte.

Certaines équipes scientifiques pensent également que les effets photochimiques peuvent atteindre la rétine et qu'à long terme il puisse y avoir des lésions au niveau des cellules rétiniennes. On pense de plus en plus que cela puisse jouer un rôle dans l'apparition de la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA). Dans ce cas, il s'agit d'une altération de la zone centrale de la rétine, la macula, entraînant une diminution des fonctions visuelles sans toutefois aboutir à la cécité (Organisciak DT, 2010), (Young, 1988).

Les lésions thermiques n'apparaissent qu'en cas d'expositions très courtes et très intenses. Leurs conséquences dépendent de nombreux facteurs : durée d'exposition, température atteinte, température des tissus et vascularisation de ceux-ci. Elles nécessitent un éclairement important et peuvent toucher la rétine provoquant une baisse de la vision pouvant aller du transitoire à l'irréversible (Schulmeister K, 2008), (Lund DJ, 2007).

La sensibilité de l'œil à ce type de rayonnement étant plus importante que celle de la peau, ce sont les risques rétiniens qui sont d'abord pris en compte pour la détermination des valeurs limites d'exposition. Ces valeurs exprimées par l'ICNIRP sont basées sur la luminance énergétique L de la source. Le calcul de cette valeur est complexe et dépend de nombreux paramètres, il ne semble pas utile de le décrire dans cet ouvrage. Ces valeurs sont également détaillées dans les réglementations européennes dans la directive 2006/25/CE du parlement européen et du conseil du 5 avril 2006 (ICNIRP, 2013).

### **2.6.2.2. Au niveau de la peau**

Le rôle du rayonnement visible sur la peau a été très peu étudié contrairement aux UV. Une lésion thermique, obtenue à partir d'une source extrêmement intense, n'apparaît que dans de très rares cas.

Néanmoins, des études semblent démontrer que le rayonnement visible aurait un impact plus important qu'on ne le pense sur la production de radicaux libres et pourrait donc induire un effet cancérogène. En effet le potentiel nocif des UV est connu, et de par ses fréquences proches, la lumière pourrait provoquer des effets identiques, notamment pour les longueurs d'ondes les plus basses. Une étude indique même que pour des longueurs d'onde comprises en 380 et 460 nm, 50% de la production des espèces oxygénées réactives leur seraient imputé. Ces résultats restent à confirmer (Zastrow L., 2009).

### **2.6.3. Conclusion**

Le rayonnement visible, bien que connu par l'homme depuis la nuit des temps, reste relativement méconnu en ce qui concerne ses effets sur la santé. Certaines expositions peuvent être brutales sans forcément se faire sentir : éclipse solaire, éclairement en milieu industriel, etc. Un effet cancérigène sur le long terme est suspecté, notamment par analogie avec l'action des UV proches de ce type de rayonnement. Dans tous les cas il est plus que conseillé de se munir de protections adaptées telles que des lunettes de protection (norme NF EN 172) (tableau 15) ou des filtres pour la peau.

Tableau 15 : Classification des types de verre pour lunettes de protection (Court, 2010)

Catégorie de verre	Transmission (%) de	Transmission (%) UVB
	lumière visible	
S0	80 à 100%	8 à 10%
S1	43 à 80%	4.3 à 8%
S2	18 à 43%	1.8 à 4.3%
S3	8% à 18%	0.8 à 0.18%
S4	3 à 8%	0.3 à 0.8%

Le corps humain s'adapte heureusement très bien à ce rayonnement naturel mais le développement très rapide de nouvelles techniques d'éclairages telles que les diodes électroluminescentes ou LED à forte puissance énergétique pourraient être préjudiciables pour la santé des populations. En effet leur développement récent est tel que nous manquons de recul pour évaluer leurs potentiels effets néfastes à long terme.

## 2.7. LE RAYONNEMENT ULTRA-VIOLET

### 2.7.1. Présentation

Les ultraviolets, ou UV, sont des radiations électromagnétiques dont les longueurs d'onde sont comprises entre 100 et 400 nm. La source principale est le soleil mais il existe également des sources artificielles : les plus connues étant les cabines de bronzage, l'industrie Le milieu médical les utilise pour traiter certaines pathologies.

Ce rayonnement se divise en trois catégories selon la longueur d'onde (tableau 9) :

Tableau 16 : Catégories d'UV selon la longueur d'onde

Catégorie d'ultraviolet	Longueur d'onde
UV-A	400 à 315 nm
UV-B	315 à 280 nm
UV-C	280 à 100 nm

Plus la longueur d'onde augmente, plus l'énergie des photons augmente. Avec une énergie par photon légèrement inférieure au seuil d'ionisation des molécules d'eau, les UV-C ayant les plus petites longueurs d'onde sont des rayonnements non ionisants. Par contre, les rayonnements de longueur d'onde inférieure sont ionisants mais n'appartiennent pas aux UV.

Concernant les UV-B et les UV-A solaires, ceux-ci parviennent jusqu'au sol terrestre alors que les UV-C sont absorbés par l'oxygène de l'atmosphère terrestre. Les UV-B subissent quand même une légère absorption atmosphérique.

On retrouve très fréquemment des rayonnements UV-A et des UV-B artificiels dans l'industrie, dans certains éclairages et en médecine. Les UV-C peuvent être utilisés pour la stérilisation.

### 2.7.2. Interactions avec la matière, dosimétrie

Les effets biologiques des UV dépendent de trois facteurs : la longueur d'onde du rayonnement, l'intensité de celui-ci et la durée d'exposition. Comme pour le rayonnement infrarouge et la lumière, de par leur faible absorption, les UV ont des effets essentiellement sur la peau et l'œil.

Il n'empêche qu'ils ont suffisamment d'énergie pour provoquer des mutations au niveau du génome, il a été mis en évidence une modification du gène p53 situé sur le chromosome 17 dont la protéine associée joue un rôle important dans la division cellulaire. Cette protéine interviendrait dans la synthèse de l'hormone alpha-MSH au niveau des kératinocytes, cette hormone ayant pour rôle de stimuler la production de mélanine par les mélanocytes (Cui R, 2004). Rappelons que la mélanine protège la peau des UV en les absorbant. Il est évident que l'absence de cette protéine limite les mécanismes de protections contre le rayonnement et de réparation des tissus. De plus, les lésions engendrées favoriseraient la production d'espèces oxygénées réactives qui altèrent certaines fonctions enzymatiques. Ce mécanisme complexe et spécifique aux ultraviolets serait à l'origine de cancers cutanés. Ceci concerne les UV-A et les UV-B tout comme les UV-C le seraient s'ils n'étaient pas absorbés par l'atmosphère (ICNIRP, 2004), (AFFSAPS, 2005).

### **2.7.2.1. Effets sur la peau**

#### **2.7.2.1.1. Effets non nocifs**

Une exposition modérée aux UV-A et UV-B peut entraîner une pigmentation adaptative de la peau appelée plus communément bronzage sans effet pour la santé de l'individu exposé. De plus, les UV-B interagissent avec le 7-déhydrocholestérol présent au niveau de la peau afin de synthétiser la vitamine D (Perrin A, 2010). Chez les personnes peu exposées aux UV, une hypovitaminose D peut être observée. Celle-ci peut être facilement palliée par une supplémentation alimentaire ou médicamenteuse.

#### **2.7.2.1.2. Erythème actinique**

Quatre-vingts % des UV-B et 50% des UV-A sont absorbés par la peau, essentiellement au niveau de l'épiderme et du derme dans la zone où se trouvent des kératinocytes et les mélanocytes. L'absorption par les tissus des radiations UV provoque dans certains cas une réaction inflammatoire aboutissant à l'apparition d'un érythème actinique appelé communément coup de soleil. En fonction de l'intensité du rayonnement, de la durée d'exposition et de la surface exposée, l'apparition de l'érythème est plus ou moins rapide, ainsi que son intensité et son étendue. Si l'exposition est intense, l'érythème devient œdémateux et violacé, des symptômes comme la fièvre apparaissent. Des phlyctènes ou bulles peuvent apparaître au niveau de la peau dans le cas d'expositions très intenses (Perrin A, 2010).

La gravité de ces érythèmes est également liée à la longueur d'onde du rayonnement. La longueur de 308 nm serait la plus propice à l'apparition d'un coup de soleil, et plus celle-ci augmenterait, moins l'effet serait important (ICNIRP, 2004).

Ces effets ne dépendent pas seulement du rayonnement, mais aussi du type de peau de l'individu exposé. En effet, il existe différents phototypes (1 à 6) qui confèrent différents niveaux de protection vis-à-vis des rayons UV (tableau 17).

**Tableau 17 : Différents phototypes et leurs caractéristiques (J L Bourrain, 2008)**

Phototypes	bronzage	Propension au coup de soleil	Type de peau	Type de cheveux, yeux
1	Ne bronce pas	Coup de soleil systématique	Peau très claire, taches de rousseurs	Cheveux blonds ou roux
2	Bronze difficilement	Coup de soleil fréquent	Peau très claire	Cheveux blonds ou châtain, yeux clairs
3	Bronze progressivement	Coup de soleil de temps en temps	Peau claire	Cheveux blonds ou châtain, yeux foncés
4	Bronze facilement	Peu de coups de soleil	Peau mate	Cheveux châtain ou bruns, yeux foncés
5	Bronze très facilement	Coups de soleils rares	Peau foncée	Cheveux bruns, yeux foncés
6		Jamais de coup de soleil	Peau noire	Cheveux bruns, yeux foncés

#### 2.7.2.1.3. Phototoxicité, photoallergie

Certains produits appliqués directement sur la peau peuvent absorber les rayons UV et par réaction en chaîne provoquer la synthèse de molécules toxiques pour la peau. Cet effet rapide peut être provoqué par certains médicaments, cosmétiques ou parfums et dépend étroitement de la quantité de produit utilisé. Cet effet peut être difficile à cerner puisqu'il peut être associé à la seule exposition solaire. Le signe d'alerte est que l'érythème produit semble disproportionné par rapport à l'exposition de l'individu au soleil. Concernant les médicaments responsables de ce genre de réaction, un cryptogramme est maintenant présent sur la boîte afin de prévenir l'utilisateur du risque de photosensibilisation.

La phototoxicité doit être dissociée de la photoallergie, réaction retardée de l'organisme qui n'est pas dose-dépendante et donne des lésions de type urticaire pouvant dépasser la seule zone d'exposition (Bourrain, 2008).

#### 2.7.2.1.4. Cancers de la peau

De par leur propension à induire des lésions génomiques, les ultraviolets peuvent à long terme dérégler les mécanismes de division des cellules et ainsi conduire à l'apparition de cellules cancéreuses. Les phototypes les plus sensibles sont donc les plus visés concernant le risque de cancer. Il existe d'ailleurs un lien de causalité inversé entre la latitude géographique et l'incidence de ces cancers. Les trois types de cancers cutanés sont, par ordre de nocivité, les épithéliomas basocellulaires (EBC), les épithéliomas spinocellulaires (ESC) et les mélanomes malins. Les deux premiers sont les plus fréquents (90% des cas). Le rayonnement UV est classé par l'IARC (International Agency for Research on Cancer) comme premier facteur étiologique pour ces trois types de cancer (IARC, 2006).

De nombreuses études confirment la classification de l'IARC, même si le mécanisme d'apparition des cancers n'est pas encore élucidé. En effet, il semblerait que la durée totale d'exposition ne soit pas le facteur primordial et qu'une exposition intermittente soit plus dangereuse. De plus, il semblerait que l'exposition pendant l'enfance ait un rôle très important sur la probabilité de développer de tels cancers. Enfin, certains chercheurs mettent en évidence un lien entre le nombre d'érythèmes actiniques dans l'historique du patient et le risque de cancer (Bataille V, 2005), (Parkin DM, 1997).

### 2.7.2.1.5. Exposition et protection

Pour mesurer l'impact d'une exposition aux UV, on parle de mesurer la dose érythémale minimale (DEM), dose à partir de laquelle il y a apparition de l'érythème actinique. En ce qui concerne la protection, on utilise plutôt la mesure de la dose standard érythémale (SED). Basée sur des calculs complexes, la SED correspond à une exposition énergétique de 100 J/m<sup>2</sup>. Quant à la DEM, il faut surtout retenir qu'elle s'exprime en tant que multiple de la SED et que ces valeurs permettent uniquement de mieux interpréter les effets des rayonnements UV ainsi que leur dangerosité. De la même manière, l'index UV permet d'indiquer de manière claire le niveau d'intensité du rayonnement UV solaire (tableau 18) à un moment précis dans une zone géographique définie. Il est proportionnel à l'intensité du rayonnement. Souvent cité dans les médias pendant la météo, il est lui aussi un indicateur clair pour la population et aide à la sensibiliser au risque de sur-exposition (AFSSE, 2005), (AFFSAPS, 2005).

La sensibilisation de la population à la dangerosité de ce type de rayonnement est de plus en plus importante. En effet, de nombreux médias ainsi que l'État ont très souvent recours à des spots de sensibilisation rappelant les principes de base : port de lunettes protectrices (voir tableau 8), utilisation de chapeaux, parasols notamment pour les enfants. Les produits cosmétiques dits « solaires » sont de plus en plus utilisés. Ils sont regroupés en fonction de leur indice de protection et doivent être choisis en fonction du type de peau (tableau 11). On notera également qu'il n'existe pas de valeur limite d'exposition pour les effets des UV sur la peau.

Tableau 18 : Facteurs de protection recommandés en fonction de l'indice UV (Césarini, 2010)

Index UV	Intensité solaire	Facteur de protection	Facteur de protection
		recommandé pour enfants et peaux sensibles	recommandé pour peau normale
1 à 2	Faible	9 à 15	-
3 à 5	Moyenne	15 à 25	15
6 à 7	Forte	25 à 50	25
8 à 10	Très forte	50 et plus	25 à 50
Supérieur à 10	Extrême	50 et plus (ombre)	50 et plus

NB : Facteurs de protection : SPF = sun protection factor; IP = indice de protection

La valeur du facteur de protection solaire ou indice de protection est basée sur le calcul : DEM zone protégée / DEM zone non protégée. Cette valeur à la même signification dans le monde entier suite à un consensus international. C'est la commission européenne qui donne l'obligation de mesurer cet indice par une méthode standardisée proposée par le Colipa (Comité de liaison des industries de la parfumerie) à travers la recommandation de la commission du 22 septembre 2006 relative aux produits de protection solaire et aux allégations des fabricants quant à leur efficacité (2006/647/CE).

### 2.7.2.2. Effets sur l'œil

#### 2.7.2.2.1. Photokératites, photoconjunctivites

Comme pour la peau, l'absorption des UV au niveau de l'œil dépend de leur longueur d'onde. Ainsi pour les UV-B de longueur d'onde inférieure à 300 nm, la majorité du rayonnement est absorbé au niveau de la cornée et de la conjonctive (figure 17) ce qui peut provoquer une inflammation. L'œil étant moins protégé que la peau, ces symptômes apparaissent plus rapidement que pour l'érythème actinique. Les UV-B compris entre 300 à 315 nm sont absorbés partiellement par ces deux tissus, le reste étant absorbé par l'humeur aqueuse. Quant aux UV-A, ils pénètrent plus profondément dans l'œil et ne causent donc pas ce type de lésion (Cullen AP, 1994).

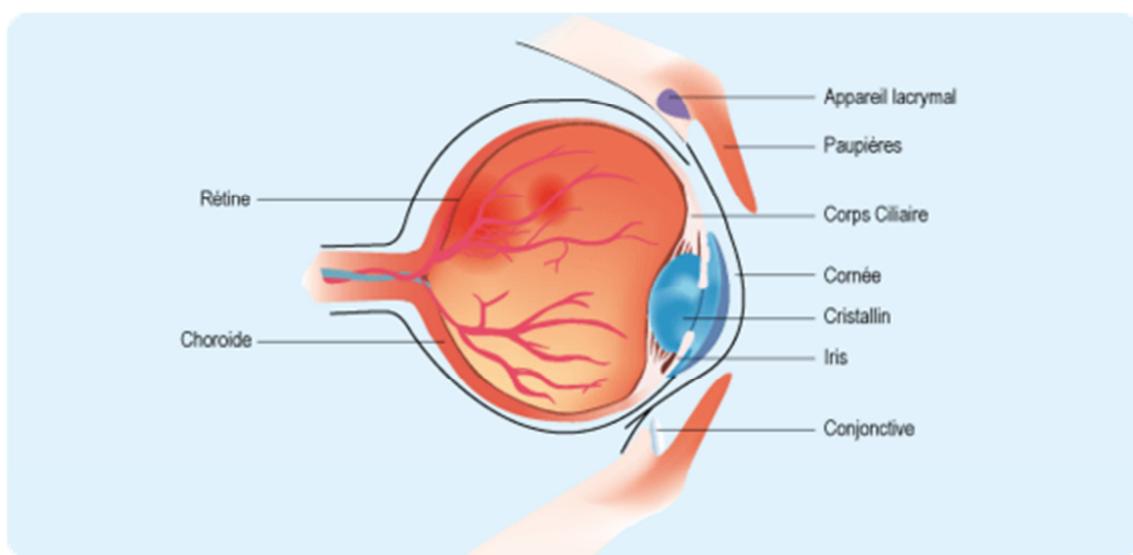


Figure 17 : Anatomie de l'œil (CNAMTS, 2011)

#### **2.7.2.2.2. Cataracte, DMLA**

Certains UV-B arrivent en très faible proportion jusqu'au cristallin mais ce sont surtout les UV-A qui sont absorbés par celui-ci. Cela entraîne un dérèglement des structures protéiques provoquant ainsi une opacification du cristallin ou cataracte pouvant aller jusqu'à la cécité (Tomany SC, 2005). Ces dérèglements structuraux augmenteraient l'incidence de la DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge) dans la population (AFFSAPS, 2005).

#### **2.7.2.2.3. Exposition et protection**

Comme pour les effets sur la peau, les risques oculaires concernant l'exposition aux UV sont de plus en plus compris par la population. Le choix des lunettes de soleil doit être adapté à leur utilisation (tableau 8). L'ICNIRP donne comme valeur limite d'exposition journalière pour les travailleurs de  $30 \text{ J/m}^2$  (ICNIRP, 2004). La directive 2006/25/CE du parlement européen et du conseil du 5 avril 2006 prend également en compte ses valeurs.

### **2.7.3. Conclusion**

Situés à la limite entre rayonnements non ionisants et ionisants, les rayonnements UV sont capables de provoquer des effets néfastes sur la santé. Leur dangerosité n'est plus à démontrer mais grâce à une bonne connaissance de leur action sur les tissus biologiques et à une sensibilisation de plus en plus importante de la population générale et des travailleurs, les comportements et les outils de protections permettent aujourd'hui de limiter les risques de cancers cutanés et d'atteintes oculaires.

# CONCLUSION

Les champs électromagnétiques non-ionisants font l'objet d'une attention particulière de la part de la communauté scientifique et des autorités sanitaires. De nombreuses études ont été réalisées mais rares sont celles montrant un lien de causalité entre ces rayonnements et de potentiels effets nocifs sur la santé des personnes exposées. Souvent, le lien de causalité mis en évidence est ténu et ces études restent difficilement reproductibles.

Néanmoins, ces résultats peu significatifs et contradictoires démontrent que les connaissances scientifiques dans ce domaine sont largement insuffisantes. Il devient nécessaire de renforcer ces études de manière à mieux comprendre ces champs et leurs interactions avec les tissus biologiques.

Les moyens de détection, de protection et de prévention instaurés depuis plusieurs dizaines d'années par de nombreuses organisations internationales comme l'OMS ou l'ICNIRP mais aussi au niveau national avec l'ANSES ou l'INRS permettent d'encadrer et de limiter les expositions, et leurs investigations doivent continuer.

La population générale doit donc être informée mais de la bonne manière. La surmédiatisation de quelques études ainsi que l'exagération de certains effets par sensationnalisme ne permettent pas de faire évoluer les comportements mais provoquent au contraire un sentiment d'insécurité et de rejet. Des campagnes d'information claires et soutenues, des mesures de prévention inculquées dès le plus jeune âge et une coordination internationale sont les clés pour accéder à une meilleure protection de la population.

Le professionnel de santé a toute sa place dans ce processus. En tant qu'interlocuteur privilégié, il peut éclairer le patient sur les risques encourus envers certains rayonnements et lui rappeler les gestes et les moyens adéquats pour sa protection.

# BIBLIOGRAPHIE

- AFFSAPS. (2005). *Rayonnements ultraviolet, état des connaissances sur l'exposition et les risques sanitaires.*
- AFFSET. (2006). Agents : champs électromagnétiques.
- AFSSE. (2005). *Résumé du rapport : évaluation des risques liés à l'exposition aux ultraviolets.*
- Ahlbom A, D. N. (2000). Ahlbom A, Day N, Feychtung M, Roman E, A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer* 83(5), 692-698.
- ANSES. (2010). *Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED).*
- Arendash, G. W. (2010). Response to Letter to Editor, Regarding Article: Electromagnetic Field Treatment Protects Against and Reverses Cognitive Impairment in Alzheimer's Disease Mice by Arendash et al. *Journal of Alzheimer's Disease.*
- Arendash, G. W.-R. (2010). Electromagnetic field treatment protects against and reverses cognitive impairment in Alzheimer's disease mice. *Journal of Alzheimer's Disease* 19(1), 191-210.
- Bahr, A., Bolz, T., & Hennes, C. (2007). Numerical dosimetry ELF (extremely low frequency): accuracy of the method, variability of models and parameters, and the implication for quantifying guide-lines. *Health Physics* 92(6), 521-530.
- Baliatsas, C. I. (2011). Non-specific physical symptoms in relation to actual and perceived proximityto mobile phone base stations and powerlines. *BMC Public Health* 11, 421.
- Barker, A. T. (2007). The effect of GSM and TETRA mobile handset signals on blood pressure, catechol levels and heart rate variability. *Bioelectromagnetics* 28(6), 433-438.
- Barutcu, I. A. (2011). Do mobile phones pose a potential risk to autonomic modulation of the heart? *Pacing Clin Electrophysiol* 34(11), 1511-1514.
- Bataille V, B. M. (2005). A multicentre epidemiological study on sunbed use and cutaneous melanoma in Europe. *Eur J Cancer* 41, 2141-2149.
- Benson, V. S. (2013). Mobile phone use and risk of brain neoplasms and other cancers: Prospective study. *International Journal of Epidemiology* 42(3), 792-802.
- Boukamp P, P. S. (1999). Tumorigenic conversion of immortal human skin keratinocytes (HaCaT) by elevated temperature. *Oncogene* 18, 5638-5645.
- Bourrain, J. (2008). Phototoxicité, photoallergie : diagnostic et prise en charge. Progrès en dermato-allergologie. *John Libbey Eurotext Paris (France)* 2008 :135 – 150, 135-150.
- Burchard, F. D. (1998). Effects of Electric and Magnetic Fields on Nocturnal Melatonin Concentrations in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 81, 722-727.
- Calvente I, M. F. (2009). Exposure to electromagnetic fields (non-ionizing radiation) and its relationship with childhood leukemia: A systematic review. *Science of the Total Environment* 408, 3062-3069.
- Campisi, A. M. (2010). Reactive oxygen species levels and DNA fragmentation on astrocytes in primary culture after acute exposure to low intensity microwave electromagnetic field. *Neuroscience Letter* 473(1), 52-55.
- Carballo-Quintas, M. I.-S. (2011). A study of neurotoxic biomarkers, c-fos and GFAP after acute exposure to GSM

- radiation at 900 MHz in the picrotoxin model of rat brains. *Neurotoxicology* 32(4), 478-494.
- Cervellati, F. G. (2009). Effect of high-frequency electromagnetic fields on trophoblastic connexions. *Reproductive Toxicology* 28(1), 59-65.
- Champion, C. (2002). Interaction des ondes et des particules avec la matière vivante.
- Colak, C. H. (2012). Effects of electromagnetic radiation from 3G mobile phone on heart rate, blood pressure and ECG parameters in rats. *Toxicology and Industrial Health* 28(7), 629-638.
- Cui R, H. R. (2004). Central Role of p53 in the Suntan Response and Pathologic Hyperpigmentation. *Cell* 128(5), 171-186.
- Cullen AP, P. S. (1994). Sunlight and human conjunctival actionspectrum. *Proc SPIE* 2134B, 24-30.
- Danker-Hopfe, H. H. (2010). Do mobile phone base stations affect sleep of residents? Results from an experimental double-blind sham-controlled field study. *American Journal of Human Biology* 22(5), 613-618.
- Danker-Hopfe, H. H. (2011). Effects of electromagnetic fields emitted by mobilephones (GSM 900 and WCDMA/UMTS) on the macrostructure of sleep . *Journal of Sleep Research* 20(1 PART I), 73-81.
- Dasdag, S. M. (2009). Effect of mobile phone exposure on apoptotic glial cells and status of oxidative stress in rat brain. *Electromagnetic Biology and Medicine* 28(4), 342-354.
- Deltour, I. A. (2012). Mobile phone use and incidence of glioma in the Nordic countries 1979-2008: consistency check. *Epidemiology* 23(2), 301-307.
- Deltour, I., & Johansen, C. e. (2009). Time trends in brain tumor incidence rates in Denmark, Finland, Norway, and Sweden, 1974-2003. *Journal of the National Cancer Institute* 101(24), 1721-1724.
- Dewhirst DW, V. B.-M. (2003). Basic principles of thermal dosimetry and thermal thresholds for tissue damage from hyperthermia. *International Journal of Hyperthermia* 19, 267-294.
- Dimbylow, P. (2006). Development of pregnant female, hybrid voxel-mathematicalmodels and their application to the dosimetryof applied magnetic and electric fields at50 Hz. *Physics in Medicine and Biology* 51, 2383-2394.
- Dragicevic, N. P. (2011). Long-term electromagnetic field treatment enhances brain mitochondrial function of both Alzheimer's transgenic mice and normal mice: a mechanism for electromagnetic field-induced cognitive benefit? *Neuroscience* 185, 135-149.
- Dupont, F. (2013). Réseaux sans fil et réseaux de mobiles. Consulté le Juin 1, 2014, sur liris.cnrs.fr: <http://liris.cnrs.fr/florent.dupont/Enseignement/Reseaux-sans-fil.pdf>
- EDF-RTE. (2011). *Brochure Champs Electromagnetiques Très Basse Fréquence*. Consulté le Juin 10, 2014, sur rtefrance.com: [http://www.rtefrance.com/uploads/Mediatheque\\_docs/environnement/champs\\_electromagnetiques/Brochure\\_Champs\\_Electromagnetiques\\_TBF.pdf](http://www.rtefrance.com/uploads/Mediatheque_docs/environnement/champs_electromagnetiques/Brochure_Champs_Electromagnetiques_TBF.pdf)
- Elster, A., & Burdette, J. (2000). *Questions and Answers in Magnetic Resonance Imaging*. St louis: Mosby.
- Falzone, N. C. (2010). Mobile phone radiation does not induce pro-apoptosis effects in human spermatozoa. *Radiat Res* 174(2), 169-176.
- Franzellitti, S. P. (2010). Transient DNA damage induced by high-frequency electromagnetic fields (GSM 1.8 GHz) in the human trophoblast HTR-8/SV neo cell line evaluated with the alkaline comet assay. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis* 683(1–2), 35-42.

- Frei, P. A. (2011). Use of mobile phones and risk of brain tumours: update of Danish cohort study. *BMJ* 343 d6387.
- Gleick, J. (2005). *Isaac Newton : un destin fabuleux*. Paris: Dunod.
- Greenland S, S. A. (2000). A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. *Epidemiology* 11(6), 624-634.
- Hardell L, F. S. (2010). Exposure to wireless phone emissions and serum  $\beta$ - Trace protein. *International Journal of Molecular Medicine* 26(2), 301-306.
- Hardell, L., & Carlberg, M. e. (2011). Re-analysis of risk for glioma in relation to mobile telephone use: Comparison with the results of the Interphone international case-control study. *International Journal of Epidemiology* 40(4), 1126-1128.
- Heinrich, S. S. (2010). Association between exposure to radiofrequency electromagnetic fields assessed by dosimetry and acute symptoms in children and adolescents: a population based cross-sectional study. *Environ Health* 9, 75.
- Hirata A, W. K. (2009). In-situ electric field and cur-rent density in Japanese male and femalemodels for uniform magnetic field exposures. *Radiation Protection Dosimetry* 135(4), 272-275.
- IARC. (2002). *IARC MONOGRAPHS ON THE EVALUATION OF CARCINOGENIC RISKS TO HUMANS. Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields*. Lyon: IARC press.
- IARC. (2006). *Exposure to artificial UV radiation and cancer*.
- ICNIRP. (1998). ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300ghz). *Health Physics* 74(4), 494-522.
- ICNIRP. (2004). ICNIRP guidelines on limits of exposure to ultravioletradiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). *Health physics* 87(2), 171-186.
- ICNIRP. (2006). ICNIRP statement on far infrared radiation exposure. *Health Physics* 91(6), 630-645.
- ICNIRP. (2009). ICNIRP guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Physics* 96(4), 504-514.
- ICNIRP. (2010). ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1hz–100khz). *Health Physics* 99(6), 818-836.
- ICNIRP. (2013). ICNIRP guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation. *Health Physics* 105(1), 74-96.
- ICNIRP. (2014). ICNIRP guidelines for limiting exposure to eletric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic fields below 1 Hz. *Health Physics* 106(3), 418-425.
- ICNIRP, OMS, Bfs. (2008). Risk Factors for Childhood Leukemia. Proceedings of an International Workshop of WHO/ICNIRP/BfS. *Radiation Protection Dosimetry* 132(2), 107-274.
- Im CN, K. E. (2010). Genome-wide Response of Normal WI-38 Human Fibroblast Cells to 1,763 MHz Radiofrequency Radiation. *Genomics & informatics* 8(1), 28-33.
- INRS. (2005). *Généralités sur les rayonnements non ionisants jusqu'à 300 GHz. Fiche Champs électromagnétiques*. ED 4201. INRS edition.
- INRS. (2011). *Le point sur les rayonnements non ionisants*. ED 5027. INRS edition.
- INRS. (2013). *Exposition des travailleurs aux risques dus aux champs électromagnétiques, Guide d'évaluation des risques*. ED 6136. INRS edition.

- Ishido M, N. H. (2001). IshidMagnetic fields (MF) of 50 Hz 1.2 mT as well as 100 mT cause uncoupling of inhibitory pathways of adenylyl cyclase mediated by melatonin 1a receptor in MF-sensitive MCF-7 cells. *Carcinogenesis* 22, 1043-1048.
- Jahandideh S, A. P. (2010). Prediction of melatonin excretion patterns in the rat exposed to ELF magnetic fields based on support vector machine and linear discriminant analysis. *Micron* 41, 882-885.
- Kesari, K. K. (2010). Effects of microwave at 2.45 GHz radiations on reproductive system of male rats. *Toxicological and Environmental Chemistry* 92(6), 1135-1147.
- Kharazi A.I., J. B. (1999). Primary brain tumour incidence in mice exposed to split-dose ionizing radiation and circularly polarized 60 Hz magnetic fields. *A.I. Kharazi, J.T. Babbitt, T.J. Hahn Cancer Letters*, 147 (1-2), 149-156.
- Kheifets L, A. A. (2007). Extremely low-frequency magnetic fields and heart disease. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 33, 5-12.
- Kuribayashi, M., & Wang, J. e. (2005). Lack of effects of 1439 MHz electromagnetic near field exposure on the blood-brain barrier in immature and young rats. *Bioelectromagnetics* 26(7), 578-588.
- Larjavaara, S. M. (2011). Incidence trends of vestibular schwannomas in Denmark, Finland, Norway and Sweden in 1987-2007. *British Journal of Cancer* 105(7), 1069-1075.
- Lee, H. J. (2010). The lack of histological changes of CDMA cellular phone-based radio frequency on rat testis. *Bioelectromagnetics* 31(7), 528-534.
- Lehéricy, S. (2010, mars). *Danger de l'IRM, contre-indications, Directive Européenne*. Consulté le Juillet 15, 2014, sur <http://www.sfrnet.org>: [http://www.sfrnet.org/Data/upload/files/DESRadio\\_DangerIRM-Cl\\_0310.pdf](http://www.sfrnet.org/Data/upload/files/DESRadio_DangerIRM-Cl_0310.pdf)
- Li S, Z. Z. (2013). Gene expression and reproductive abilities of male *Drosophila melanogaster* subjected to ELF-EMF exposure. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 758, 95-103.
- Liburdy RP, S. T. (1993). ELF magnetic fields, breast cancer, and melatonin: 60 Hz fields block melatonin's oncostatic action on ER+ breast cancer cell proliferation. *J Pineal Res* 14, 89-97.
- Little, M. P. (2012). Mobile phone use and glioma risk: Comparison of epidemiological study results with incidence trends in the United States . *BMJ* 344 (7849). .
- Liu, Y. X. (2012). Exposure to 1950-MHz TD-SCDMA electromagnetic fields affects the apoptosis of astrocytes via caspase-3-dependent pathway. *PLoS ONE (en ligne: plusone.org)* 7(8) e42332.
- Loughran, S. P. (2012). Individual differences in the effects of mobile phone exposure on human sleep: rethinking the problem. *Bioelectromagnetics* 33(1), 86-93.
- Lund DJ, E. P. (2007). Variation of laser-induced retinal injury thresholds with retinal irradiated area: 0.1-s duration, 514-nm exposures. *J Biomed Opt* 12.
- Maitte, B. (2005). *La lumière*. Paris: Éditions du Seuil.
- Markova, E., & Malmgren, L. e. (2010). Microwaves from Mobile Phones Inhibit 53BP1 Focus Formation in Human StemCells More Strongly Than in Differentiated Cells: Possible Mechanistic Link to Cancer Risk. *Environ Health Perspect* 118, 394-399.
- McNamee D.A., L. A. (2009). A literature review: The cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. *Int Arch Occup Environ Health* 82, 919-933.
- McRobbie DW, M. E. (2007). *MRI From Picture to Proton*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Meffert H, P. H. (2002). Effects of artificial infrared radiation on human beings. *Akt Dermatol* 28, 187-192.
- Milde-Busch, A. R. (2010). The association between use of electronic media and prevalence of headache in adolescents: Results from a population-based cross-sectional study. *BMC Neurology* 10, 12.
- Miyakoshi, J. (2006). Biological responses to extremely low-frequency electromagnetic fields. *Journal of Dermatological Science Supplement* 2, 23-30.
- Nagaoka T, W. S. (2004). Development of realistic high-resolution whole-body voxelmodels of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry. *Physics in Medicine and Biology* 49, 1-15.
- Nguyen T, P. M. (2012). Long-term digital mobile phone use and cognitive decline in the elderly. *Bioelectromagnetics* 33(2), 176-485.
- Nittby, H. A. (2011). Nonthermal GSM RF and ELF EMF effects upon rat BBB permeability. *Environmentalist* 31(2), 140-148.
- Nyenhuis JA, B. J. (2001). Health effects and safety of intense gradient fields. New York: CRC Press, 31-54.
- Nylund, R. N. (2010). Analysis of proteome response to the mobile phone radiation in two types of human primary endothelial cells. *Proteome Sci* 8, 52.
- Ogawa, K. K. (2009). Effects of gestational exposure to 1.95-GHz W-CDMA signals for IMT-2000 cellular phones: Lack of embryotoxicity and teratogenicity in rats. *Bioelectromagnetics* 30(3), 205-212.
- OMS. (2006, mars). *Champs électriques et magnétiques statiques. Aide-mémoire n° 299*. Consulté le juillet 18, 2014, sur who.int: <http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs299/fr/>
- OMS. (2007). *Extremely low frequency fields. Environmental Health Criteria, Vol. 238*. Geneva: World Health Organization.
- Organisciak DT, V. D. (2010). Retinal light damage: Mechanisms and protection. *Progr Ret Eye Res* 29, 113-134.
- Ozgur, E. G. (2010). Mobile phone radiation-induced free radical damage in the liver is inhibited by the antioxidants N-acetyl cysteine and epigallocatechin-gallate. *Int J Radiat Biol* 86(11), 935-994.
- Parkin DM, W. S. (1997). Cancer incidence in five continents. *IARC Sci Publ* 143.
- Pelletier, A. S. (2013). Effects of chronic exposure to radiofrequency electromagnetic fields on energy balance in developing rats. *Environ Sci Pollut Res Int* 20(5), 2735-2746.
- Perrin A, S. M. (2010). *Champs électromagnétiques, environnement et santé*. Paris: Springer.
- Perrin, A. (2011). Radiofréquences : aspects médico-sanitaires. Grenoble: Institut de Recherches Biomédicale des Armées (IRBA).
- Pitts DG, C. A. (1981). Determination of infrared radiation levels for acute ocular cataractogenesis. *Albrecht von Graefes Arch Klin Ophthalmol* 217, 285-297.
- Pouletier de Gannes, F. B. (2013). Rat fertility and embryo fetal development: influence of exposure to the Wi-Fi signal. *Reprod Toxicol* 36, 1-5.
- Reilly, J. (1998). *Applied Bioelectricity: From electrical stimulation to electropathology*. New York: Springer.
- Riddervold, I. S. (2010). No effect of TETRA hand portable transmission signals on human cognitive function and symptoms. *Bioelectromagnetics* 31(5), 380-390.
- Roberts DC, M. V. (2011). MRI Magnetic Field Stimulates Rotational Sensors of the Brain. *Current Biology, Volume 21*,

*Issue 19, 1635-1640.*

- Röösli, M. E. (2010). Sense and sensibility in the context of radiofrequency electromagnetic field exposure. *Comptes rendus physiques* 11, 576-584.
- Ros-Llor, I. M.-S. (2012). Effect of mobile phones on micronucleus frequency in human exfoliated oral mucosal cells. *Oral Dis* 18(8), 786-792.
- Sakurai, T. T. (2011). Analysis of gene expression in a human-derived glial cell line exposed to 2.45 GHz continuous radiofrequency electromagnetic fields. *Journal of Radiation Research* 52, 185-192.
- Salford L.G., A. E. (2003). Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. *Environmental Health Perspectives* 111(7), 881-883.
- Schmid, M. R. (2012). Sleep EEG alterations: effects of different pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields. *J Sleep Res* 21(1), 50-58.
- Schmitt P, R. P. (2005). Étude expérimentale de l'immunité des défibrillateurs implantables aux perturbations électromagnétiques basses fréquences. *Actes du 5ème congrès SFRP*. Nantes.
- Schulmeister K, H. J. (2008). Ex vivo and computer model study on retinal thermal laser-induced damage in the visible wave-length range. *J Biomed Opt* 13.
- Schüz J, W. G. (2009). Risks for central nervous system diseases among mobile phone subscribers: A Danish retrospective cohort study. *PLoS ONE* 4(2) e4389.
- Schüz, J., & Steding-Jessen, M. e. (2011). Long-term mobile phone use and the risk of vestibular schwannoma: A danish nationwide cohort study. *American Journal of Epidemiology* 174(4), 416-422.
- Sctirck, L. (2009, Octobre 9). *Imagerie par résonance magnétique, exposition professionnelle, santé au travail*. Consulté le Mai 14, 2014, sur anmtpf.fr: [http://www.anmtpf.fr/\\_documents/24IRM.pdf](http://www.anmtpf.fr/_documents/24IRM.pdf)
- Selmaoui, B. L. (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 Sciences* 58, 1539-1549.
- Serway, A. (1992). *Physique 3: optique et physique moderne*. Montreal: Les éditions de la chenelière.
- Sliney DH, W. M. (180). Safety with lasers and other opticalradiation sources. *New York: Plenum Press*.
- So PP, S. M. (2004). Peripheral nerve stimulation by gradient switching fields in magnetic resonance imaging. *Biomedical Engineering* 51, 1907-1914.
- Sommer, A. L. (2006). 50 Hz magnetic fields of 1 mT do not promote lymphoma development in AKR/J mice. *Radiation Research* 165(3) , 343-349.
- Sonmez, O. F. (2010). Purkinje cell number decreases in the adult female rat cerebellum following exposure to 900 MHz electromagnetic field. *Brain Res* 1356, 95-101.
- Souques M, F. R.-M. (2002). Effets des champs magnétiques de 50, 60 Hz et de 20 à 50 kHz sur le fonctionnement des cardiotimulateurs implantés. *Environnement, Risques et Santé* vol.1, 87-96.
- Stellman, J. M. (2000). *Encyclopédie de sécurité et de santé au travail, volume 2*. Organisation Internationale du Travail.
- The Interphone Study Group. (2010). Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: Results of the INTERPHONE international case-control study. *International Journal of Epidemiology* 39(3), 675-694.

- The Interphone Study Group. (2011). Acoustic neuroma risk in relation to mobile telephone use: Results of the INTERPHONE international case-control study. *Cancer Epidemiology* 35(5), 453-4364.
- Thomas, S. S. (2010). Exposure to radio-frequency electromagnetic fields and behavioural problems in Bavarian children and adolescents. *Eur J Epidemiol* 25(2), 135-141.
- Tomany SC, C. K. (2005). Sunlight and the 10-year incidence of age-related maculopathy: the Beaver Dam Eye Study. *Arch Ophthalmol* 122, 750-757.
- Vecchio F, M. T. (2012). Mobile phone emission increases inter-hemispheric functional coupling of electroencephalographic alpha rhythms in epileptic patients. *Int J Psychophysiol* 84(2), 164-171.
- Vecchio, F. C. (2010). Mobile phone emission modulates inter-hemispheric functional coupling of EEG alpha rhythms in elderly compared to young subjects. *Clin Neurophysiol* 121(2), 163-171.
- Vorobyov, V. B. (2010). Repeated exposure to low - level extremely low frequency - modulated microwaves affects cortex - hypothalamus interplay in freely moving rats: EEG study. *Int J Radiat Biol* 86(5), 376-383.
- Vrijheid, M. D. (2010). Prenatal exposure to cell phone use and neurodevelopment at 14 months . *Epidemiology* 21(2) , 259-262.
- Walsder EJ, H. A. (2002). Chronic moderate heat dermatitis (erythema ab igne) in five dogs, three cats and one silvered langur. *Vet Derm* 13, 283.
- Wang, X. W. (2010). Wang, X. W.Mechanisms involved in the blood-testis barrier increased permeability induced by EMP. *Toxicology* 276(1), 58-63.
- Wertheimer N, L. E. (1979). Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Epidemiol* 109(3), 273-284.
- Wolbarsht, M. (1978). The effects of optical radiation on the anteriorstructures of the eye. *Tengroth B, Epstein D, eds. Current concepts in ergophthalmology. Stockholm: Karolinska Institute, Department of Ophthalmology*, 29-46.
- Wolbarsht, M. (1992). Cataract from infrared lasers: evidence for photochemical mechanisms. *Lasers Light Ophthalmol* 4, 91-96.
- Xu, S. Z. (2010). Exposure to 1800 MHz radiofrequency radiation induces oxidativel damage to mitochondrial DNA in primary cultured neurons. *Brain Research* 1311, 189-196.
- Young, R. (1988). Solar radiation and age-related macular degeneration. *Surv Ophthalmol* 32, 252-269.
- Zastrow L., G. N. (2009). The Missing Link – Light-Induced (280–1,600 nm) Free Radical Formation in Human Skin. *Skin Pharmacol Physiol* 22, 31-44.
- Ziemann, C. H. (2009). Absence of genotoxic potential of 902 MHz (GSM) and 1747 MHz (DCS) wireless communication signals: In vivo two-year bioassay in B6C3F1 mice. *Int J Radiat Biol* 85(5), 454-464.
- Zwamborn, A. P. (2003). Effects of Global Communication system radio-frequency fields on Well Being and Cognitive Functions of human subjects with and without subjective complaints. *Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO)* 148, 1-89.

# STANISLAS SEVAUX

## IMPACT SUR LA SANTE DES CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES NON IONISANTS

### RÉSUMÉ

Les champs électromagnétiques font partie de notre quotidien. Qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle, nous sommes en contact permanent avec eux. De par leur nature mystérieuse et la surmédiatisation de leur potentiel impact sur la santé, ces champs suscitent de nombreuses inquiétudes et un certain nombre d'idées préconçues circule dans la population générale.

Cet ouvrage a d'abord pour but de définir la notion de champ électromagnétique non-ionisant, et d'en préciser les différents types. Pour chaque type de champ, l'ouvrage permet de faire un état des lieux des connaissances scientifiques à travers les résultats de nombreuses études, afin de mieux cerner les risques encourus pour la santé des personnes exposées. Sont également indiqués les valeurs limites d'exposition ainsi que les moyens de prévention et ses effets biologiques.

En se référant à un des chapitres de cette thèse, le lecteur peut ainsi se faire une idée rapide et claire sur un type de rayonnement en particulier.

**Mots-clés : Champs électromagnétiques, rayonnement non ionisant, effets biologiques, santé**

### ABSTRACT

Electromagnetic fields are part of everyday life. Whether natural or artificial, we are in constant contact with them. By their mysterious nature and excessive media coverage of their potential impact on health, these fields have been many concerns and many preconceived ideas in the general population.

This book was originally intended to define what a non-ionizing electromagnetic field, and what are the different types. For each field type, the book allows for an overview of the scientific knowledge to know what are the risks for population health through the results of many studies. Exposure limit values, biological effects and ways of prevention are also indicated.

Referring to one of the chapters of this thesis, the reader can get a quick and clear idea on a particular type of radiation.

**Keywords : Electromagnetic field, non-ionizing irradiation, biological impact, health**