



InterSections

Champs électromagnétiques, environnement et santé

2^e édition

Dirigé par
Anne Perrin, Martine Souques

edp sciences



**Champs
électromagnétiques,
environnement et santé**

Champs électromagnétiques, environnement et santé

2^e édition

Dirigé par

Anne Perrin

Martine Souques

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-2258-4

ISBN (ebook) : 978-2-7598-2261-4

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2018

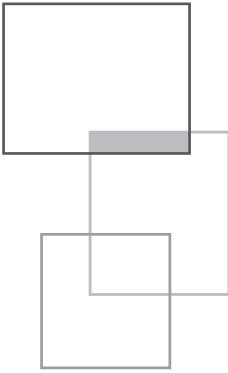


Table des matières

Préface	13
Contributeurs	17
Introduction	19
Chapitre 1 • Rappels physiques sur les rayonnements électromagnétiques	25
1.1 Modèle ondulatoire	26
1.2 Modèle corpusculaire	28
1.3 Dualité onde-corpuscule	29
1.4 Interactions onde-matière	29
1.4.1 Transitions énergétiques	29
1.4.2 Effets thermiques et induction de champ électrique	30
1.4.3 Courants induits	30
1.5 Rayonnements électromagnétiques et applications	31
1.6 Métrologie, notion d'exposition et de dosimétrie, réglementation	33
1.7 Conclusion	34
Pour en savoir plus	34
Chapitre 2 • L'IRM et les champs électriques et magnétiques statiques	35
2.1 Introduction	36
2.2 Rappels physiques	36
2.3 Sources naturelles et artificielles	37
2.3.1 Sources naturelles	37
2.3.2 Sources artificielles	37

2.3.3	La technique d'IRM	39
2.3.4	La stimulation magnétique transcrânienne	41
2.4	Expositions, mesures et dosimétrie	42
2.5	Interactions avec le vivant et effets biologiques	42
2.5.1	Interactions du champ électrique statique avec le vivant	42
2.5.2	Interactions du champ magnétique statique avec le vivant	43
2.6	Interactions avec les implants médicaux	47
2.7	Réglementation, recommandations	48
2.8	Conclusion	50
	Pour en savoir plus	51

Chapitre 3 • L'électrochimiothérapie et les impulsions électriques 53

3.1	Introduction	54
3.2	Rappels physiques	54
3.3	Sources naturelles et artificielles	55
3.4	Interactions avec la matière	55
3.5	Interactions avec le vivant et effets biologiques	56
3.5.1	Effets biologiques	57
3.5.2	Effets sanitaires	58
3.6	Applications médicales	58
3.6.1	La stimulation électrique fonctionnelle	58
3.6.2	Autres applications d'impulsions électriques de faible amplitude	59
3.6.3	Applications d'impulsions électriques de forte amplitude	59
3.6.4	L'électrochimiothérapie : naissance d'une nouvelle méthode thérapeutique	60
3.6.5	Applications futures	61
3.7	Précautions, protection	62
3.8	Conclusion	62
	Pour en savoir plus	62

Chapitre 4 • L'électricité et les champs électriques et magnétiques d'extrêmement basse fréquence 65

4.1	Introduction	66
4.1.1	Le magnétisme avant l'électromagnétisme	66
4.1.2	Les premiers repères scientifiques	67
4.2	Rappels physiques	67
4.3	Sources artificielles	68
4.4	Mesures des champs	69
4.5	Interactions avec la matière et propagation	70
4.6	Interactions avec le vivant et effets biologiques	70

4.6.1	Étude des effets biologiques <i>in vitro</i>	70
4.6.2	Expérimentation animale (<i>in vivo</i>)	74
4.6.3	Effets des expositions à court terme chez l'homme	76
4.6.4	Données épidémiologiques	77
4.6.5	L'électro-hypersensibilité (EHS)	79
4.7	Interactions avec les implants médicaux actifs	80
4.8	Réglementation, recommandations	80
4.9	Conclusion	82
	Pour en savoir plus	82

Chapitre 5 • L'induction, les CPL et les fréquences intermédiaires 85

5.1	Introduction	86
5.2	Rappels physiques et sources	86
5.3	Principales applications utilisant les fréquences intermédiaires	87
5.3.1	La cuisson par induction	87
5.3.2	La radiodiffusion (ondes longues, ondes moyennes et ondes courtes)	88
5.3.3	Les lampes fluocompactes basse consommation (LFC)	89
5.3.4	Les CPL et le compteur Linky	91
5.3.5	Les écrans de visualisation : télévision, ordinateurs, etc.	91
5.3.6	Les lecteurs de proximité	92
5.3.7	Les systèmes antivol	92
5.3.8	Les chargeurs sans fil	92
5.3.9	Autres sources	93
5.4	Mesures et dosimétrie	93
5.5	Interactions avec le vivant et effets biologiques	93
5.5.1	Mécanismes biophysiques	93
5.5.2	Mécanismes physiologiques	94
5.5.3	Études <i>in vivo</i> chez l'animal	95
5.6	Interactions avec les implants médicaux actifs	96
5.7	Réglementation, recommandations	97
5.8	Conclusion	98
	Pour en savoir plus	99

Chapitre 6 • Les communications sans fil et les radiofréquences 101

6.1	Introduction	102
6.2	Rappels physiques	102
6.3	Sources artificielles	103
6.4	Présentation générale des applications de communications sans fil	103
6.4.1	La radiodiffusion et la télédiffusion	104

6.4.2	La téléphonie mobile	105
6.5	Interactions avec la matière et propagation	107
6.6	Mesures et dosimétrie	107
6.7	Interactions avec le vivant et effets biologiques	108
6.7.1	Les recherches	108
6.7.2	Études cellulaires (<i>in vitro</i>)	110
6.7.3	Études animales (<i>in vivo</i>)	111
6.7.4	Études humaines	112
6.8	Interactions avec les implants et stimulateurs	121
6.9	Réglementation, recommandations	121
6.10	Précautions, protection	123
6.11	Conclusion	124
	Pour en savoir plus	125
Chapitre 7 • Les RFID		127
7.1	Introduction	128
7.2	Rappels physiques et sources	128
7.2.1	Sources	128
7.3	Mesures et dosimétrie	130
7.4	Interactions avec le vivant et effets biologiques	131
7.5	Interactions avec les implants médicaux actifs	131
7.6	Réglementation, recommandations	132
7.7	Applications	132
7.8	Précautions, protection	132
7.9	Conclusion	133
	Pour en savoir plus	133
Chapitre 8 • Les nouvelles technologies de communications, d'imagerie et de détections en ondes millimétriques et en térahertz		135
8.1	Introduction	136
8.2	Rappels physiques	136
8.3	Interaction avec la matière et propagation	137
8.4	Mesures et dosimétrie	137
8.5	Sources naturelles et artificielles	138
8.5.1	Sources naturelles	138
8.5.2	Sources artificielles	139
8.6	Interactions avec le vivant et effets biologiques	141
8.6.1	Études cellulaires	142
8.6.2	Études chez l'homme ou sur des modèles animaux	144
8.6.3	Conclusions sur les effets biologiques et sanitaires	145

8.7 Interactions avec les implants médicaux actifs	146
8.8 Réglementation, recommandations	146
8.9 Conclusion	148
Pour en savoir plus	148

Chapitre 9 • Le chauffage et le rayonnement infrarouge 151

9.1 Introduction	152
9.2 Rappels physiques	152
9.3 Sources naturelles et artificielles	152
9.4 Mesures et dosimétrie	153
9.5 Interactions avec le vivant et effets biologiques	153
9.5.1 Effets sur l'œil	154
9.5.2 Effets sur la peau	155
9.6 Réglementation, recommandation	156
9.6.1 Valeurs limites d'exposition pour l'œil	156
9.6.2 Valeurs limites d'exposition pour la peau	157
9.7 Conclusion	157
Pour en savoir plus	158

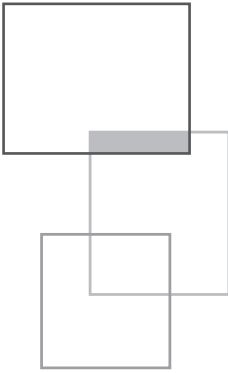
Chapitre 10 • La lumière et le rayonnement visible 159

10.1 Introduction	160
10.2 Rappels physiques	160
10.3 Sources naturelles et artificielles	160
10.4 Mesures et dosimétrie	163
10.5 Interactions avec la matière	164
10.6 Interactions avec le vivant et effets biologiques	165
10.6.1 Lésions oculaires	165
10.6.2 Lésions de la peau	167
10.7 Réglementation, recommandations	167
10.7.1 Valeurs limites d'exposition pour les risques rétinien- dus à l'effet thermique (400-780 nm)	168
10.7.2 Valeurs limites d'exposition pour les risques rétinien- dus à l'effet photochimique de la lumière bleue (400-700 nm)	169
10.8 Précautions, protection	170
10.9 Problématiques émergentes	174
10.10 Conclusion	174
Pour en savoir plus	175

Chapitre 11 • Le soleil et le rayonnement ultraviolet 177

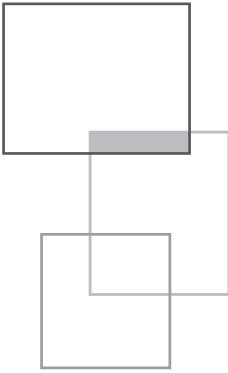
11.1 Introduction	178
-------------------	-----

11.2 Rappels physiques	178
11.3 Sources naturelles et artificielles	178
11.3.1 Source naturelle d'UV	178
11.3.2 Sources artificielles d'UV	179
11.4 Mesures et dosimétrie	181
11.5 Interactions avec le vivant et effets biologiques	182
11.5.1 Interactions au niveau moléculaire	182
11.5.2 Interactions au niveau tissulaire	183
11.6 Réglementation, recommandations	189
11.7 Précautions, protection	190
11.7.1 L'index UV	191
11.7.2 Protection externe physique	191
11.7.3 Protection externe par produits antisolaires	192
11.7.4 Protection à l'aide de compléments alimentaires	192
11.7.5 Exposition aux rayonnements ultraviolets artificiels	193
11.8 Conclusion	194
Pour en savoir plus	194
Chapitre 12 • Les lasers	197
12.1 Introduction	198
12.2 Rappels physiques	198
12.3 Sources naturelles et artificielles	202
12.4 Interactions avec la matière et propagation	202
12.4.1 L'effet thermique	203
12.4.2 L'effet photochimique	204
12.4.3 L'effet photoablatif	205
12.4.4 L'effet disruptif	205
12.5 Mesures et dosimétrie	206
12.6 Interactions avec le vivant et effets biologiques	207
12.7 Réglementation, recommandations	210
12.8 Précautions, protection	211
12.9 Conclusion	214
Pour en savoir plus	215
Présentation des auteurs	217
Unités	225
Acronymes	227
Glossaire	231
Index	239



Ce livre est une version mise à jour et enrichie de l'édition précédente parue en 2010 aux éditions Springer.

Il est dédié à Annette Duchêne, décédée le 13 janvier 2017. Elle était spécialisée en réglementation de la protection contre les rayonnements ionisants et non ionisants et a participé activement à la création de l'ICNIRP et de la section RNI de la SFRP. Elle a notamment été, avec Jacques Jousot-Dubien, la cheville ouvrière de l'ouvrage *Les Effets biologiques des rayonnements non ionisants* (Flammarion, collection « Médecine-Sciences », 2001) qui a servi de point de départ à l'édition de 2010.



Préface

Imagineraient-on aujourd'hui se passer d'électricité, de lumière, de radio, de télévision, de GPS, de téléphones mobiles, de tablettes, de contrôles performants dans les aéroports, d'étiquettes « intelligentes », d'examens IRM, etc. ? Certes non.

Pour ne citer qu'un seul domaine, le plus commenté dans les médias, il est de plus en plus question d'objets connectés et de l'Internet des objets. Ces développements technologiques récents ont profondément modifié notre vie, nos communications, nos comportements, nos relations avec les autres. Avez-vous un problème sur l'autoroute ? Au lieu de risquer votre vie en marchant le long de l'autoroute jusqu'au poste d'appel le plus proche, gardez-vous prudemment sur la bande d'arrêt d'urgence, restez sur place (à l'abri derrière les glissières de sécurité) et l'application embarquée va pouvoir appeler les secours qui vous trouveront facilement par géolocalisation GPS. Récemment, un alpiniste a pu être secouru dans l'Himalaya grâce à son téléphone satellite. Les smartphones dont nous sommes quasiment tous munis ne servent plus seulement à téléphoner ou à correspondre par courts messages. Ils sont tous dotés d'un appareil photo rapidement mis en œuvre et permettant la réalisation de « selfies ». Ils vous permettent d'accéder à Internet et aux réseaux sociaux, de consulter vos boîtes mail, de visionner des films, et de vous orienter en ville. Des applications vous permettent de surveiller votre domicile à distance, de savoir si vos enfants sont rentrés, et de recevoir une alerte en cas d'anomalie...

Toutes ces technologies ont en commun le fait de fonctionner grâce à des « ondes », ou plus exactement à des rayonnements électromagnétiques non ionisants. « Non ionisants » signifie que ces rayonnements n'ont pas une énergie suffisante pour arracher un électron aux atomes, et ainsi produire une ionisation de la matière génératrice de radicaux libres. En revanche, les rayonnements ionisants, rayons X et gamma, beaucoup plus énergétiques, ont la capacité d'induire des lésions de l'ADN

et des mutations à l'origine de cancers. En fonction de leur puissance et de leur fréquence (et longueur d'onde), l'interaction des rayonnements non ionisants avec la matière, et notamment avec les tissus biologiques, met en jeu l'induction de courants ou un phénomène d'échauffement. C'est cette dernière propriété qui est exploitée dans votre four à micro-ondes.

Le développement explosif de l'usage de la téléphonie mobile au cours des dernières décennies, et l'implantation d'antennes-relais sur la quasi-totalité du territoire a suscité, et suscite encore, des craintes chez les riverains de ces antennes, mais aussi chez les utilisateurs des technologies de communication sans fil, quant aux conséquences sur la santé de l'exposition aux ondes électromagnétiques radiofréquences. Des sociologues ont montré que cette controverse peut être aussi motivée par des questions patrimoniales et/ou esthétiques liées à la perte de valeur d'un bien dont la vue est impactée par des équipements collectifs sans contrepartie jugée acceptable. Initialement concentrée sur les effets des antennes-relais, cette controverse s'est ensuite étendue à d'autres applications récentes comme le wifi ou les compteurs « intelligents ».

Et n'oublions pas les lignes haute tension, indispensables à la fourniture d'électricité sur tout le territoire, les nouvelles techniques d'éclairage telles que les LED qui commencent aussi à faire parler d'elles... Eh oui, la lumière est aussi une onde électromagnétique non ionisante !

Pour la sécurité de la population et en réponse à ces inquiétudes, des groupes d'experts chargés d'analyser les données scientifiques disponibles et d'évaluer un éventuel risque pour la santé publique ont été mis en place, en France (Anses), en Europe (SCENIHR) et dans de nombreux autres pays dans le monde tant au niveau national (Suède, Pays-Bas, Canada, etc.) qu'international (ICNIRP). Dans leur ensemble, ces rapports d'experts sont rassurants. Finalement, le seul risque avéré de la téléphonie mobile est le risque d'accident de la circulation, qui n'est pas lié à l'exposition aux champs électromagnétiques, mais plutôt à une baisse d'attention. L'OMS¹, dans un aide-mémoire daté de fin 2014, déclare qu'« à ce jour, la recherche n'a apporté aucun élément de preuve significatif d'effets néfastes pour la santé provoqués par l'exposition aux champs de radiofréquences à des niveaux inférieurs à ceux qui induisent un échauffement des tissus » et précise aussi que « le CIRC a classé les champs électromagnétiques de radiofréquence dans la catégorie des cancérogènes possibles pour l'homme (Groupe 2B), catégorie utilisée lorsqu'on considère comme crédible un lien de cause à effet, mais sans qu'on puisse éliminer avec une certitude raisonnable le hasard, un biais ou des facteurs de confusion ».

Mais depuis les affaires de l'amiante et du sang contaminé, on observe une perte de confiance, voire une défiance, vis-à-vis des experts et des pouvoirs publics. Sur Internet ou dans les médias, la prolifération d'informations non vérifiées, de prises de position péremptoires de lanceurs d'alerte et de certains scientifiques, de reportages alarmistes, a alimenté les théories du complot. L'expertise scientifique minutieuse et

1. OMS. Champs électromagnétiques et santé publique : téléphones portables. Aide-mémoire n° 193, octobre 2014.

rigoureuse, mais complexe et difficilement accessible au simple citoyen, est souvent rejetée en bloc par les promoteurs de la peur. Elle fait difficilement le poids face au « buzz » engendré par la publication de certaines études ou la diffusion prématurée de résultats partiels. Dans le remarquable ouvrage *La Démocratie des crédules*², le sociologue Gérard Bronner a tenté de montrer pourquoi mythes et théories du complot ont tendance à envahir l'esprit des populations, alors qu'il aurait été raisonnable de penser que la libre circulation de l'information et l'élévation du niveau d'étude auraient pour effet le développement d'une sorte de sagesse collective. Bien au contraire, une récente enquête de l'IFOP³ indique (en dépit de limitations méthodologiques) que près de 8 Français sur 10 (79 %) croient à au moins une théorie complotiste : 55 % adhèrent à l'idée selon laquelle « *le ministère de la Santé est de mèche avec l'industrie pharmaceutique pour cacher au grand public la réalité sur la nocivité des vaccins* », 16 % pensent que les Américains ne sont jamais allés sur la Lune et 9 % que la Terre est plate...

Les recherches sur les effets biologiques et sanitaires des champs électromagnétiques se poursuivent dans le monde et en France, où elles sont financées par le programme national de recherche santé-environnement-travail (PNREST), nécessitant la mise à jour régulière des expertises collectives. Ainsi, le rapport Anses « Radiofréquences et santé » 2013 a mis en évidence un effet sur les performances cognitives et de mémoire (amélioration) et des modifications non pathologiques de l'électroencéphalogramme de sommeil avec un niveau de preuve limité (c'est-à-dire qui reste à confirmer). Le très récent rapport Anses 2018 sur l'électrohypersensibilité aux champs électromagnétiques a analysé la possibilité d'un effet nocebo⁴ déjà évoqué dans le rapport 2009. Cet effet s'est illustré dans une affaire médiatisée : l'installation d'une nouvelle antenne-relais sur un immeuble résidentiel à Saint-Cloud (92) déclenche instantanément des maux de tête et des troubles du sommeil dans le voisinage ; les habitants se constituent en collectif et portent l'affaire devant le juge des référés qui convoque l'opérateur très étonné : l'antenne n'était pas encore reliée au réseau électrique...

Il faut cependant se résoudre à l'évidence : on ne pourra jamais démontrer scientifiquement la non-existence d'un phénomène, et donc la totale innocuité de l'exposition aux champs électromagnétiques ne pourra jamais être prouvée scientifiquement ! C'est ce qu'illustre la métaphore de la théière de Russell. Le philosophe anglais Bertrand Russell affirmait, en substance, que s'il suggérait qu'entre la Terre et Mars se trouve une théière de porcelaine en orbite elliptique autour du Soleil, trop petite pour être détectée par les plus puissants télescopes, personne ne serait capable de prouver le contraire.

Alors, comment se retrouver dans la pléthore d'informations sur les effets biologiques et sanitaires des rayonnements non ionisants ? Eh bien, tout simplement en

2. G. Bronner. *La Démocratie des crédules*. PUF, 2013.

3. www.ifop.fr ; Enquête sur le complotisme, 8 janvier 2018.

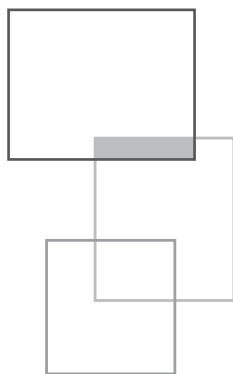
4. Effet inverse de l'effet placebo. Phénomène par lequel les symptômes d'une personne sont déclenchés par l'attente d'effets indésirables d'un traitement, un aliment, une situation...

lisant l'ouvrage coordonné par Anne Perrin et Martine Souques, animatrices depuis des années de la section RNI de la Société française de radioprotection qui a pour vocation de promouvoir les échanges et les connaissances scientifiques sur les rayonnements. D'origines professionnelles différentes et de profils complémentaires, elles ont mis à profit leurs compétences dans ce domaine pour construire cet ouvrage dont la première version est parue en 2010. Cet ouvrage est plus que la simple actualisation de l'édition précédente, puisqu'il intègre un nouveau chapitre et de nouvelles informations, mais il a toujours l'ambition de faire découvrir les rayonnements non ionisants dans leur ensemble, sans céder à la tentation de vulgarisation. Chacun des chapitres a été rédigé par un ou plusieurs spécialistes reconnus du domaine, avec une volonté affirmée des auteurs de rendre les connaissances accessibles.

Merci à tous d'avoir fait cet effort réussi de simplification, sans altérer le contenu. Souhaitons à cet ouvrage la large diffusion qu'il mérite.

Jean-François Doré

Directeur de recherche émérite à l'INSERM,
membre du Comité d'experts spécialisés « Agents physiques »
et ancien président du groupe de travail « Radiofréquences et santé » de l'Anses.



Contributeurs

Auteurs :

André Aurengo

Pierre Bourdon

Jean-Pierre Césarini

Daniel Courant

Louis Court

René de Sèze

Jean-Claude Debouzy

Jacques Lambrozo

Yves Le Dréan

Alexis Hass

Luis Mir

Anne Perrin

Sébastien Point

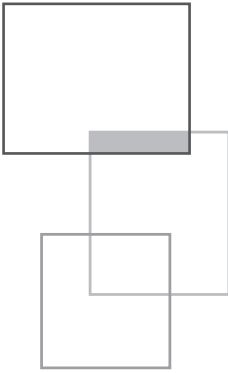
Martine Souques

Bernard Veyret

Maxime Zabodov

Le texte final est le fruit de nombreux échanges entre les auteurs.

Nous remercions aussi tous ceux qui ont relu et contribué activement à l'enrichissement de cet ouvrage, tout particulièrement Jean-Benoît Agnani, Stéphanie Billot Bonef, Dagmar Dechent, Jean-François Doré, Jacques Felblinger, Isabelle Lagroye, Cédric Lavenu, Jean-François Le Bas, Jean-Marc Le Douce, Allal Ouberhil, Isabelle Magne, Camille Masset, Yves Neau, Emmanuel Nicolas, Patrick Staebler, Guillaume Villalonga, Catherine Yardin.



Index

A

absorption spécifique 30, 33, 94, 98, 106, 107, 228
ADN 13, 20, 45, 61, 71, 72, 75, 110, 143, 144, 182, 219, 227, 231, 234, 235, 237, 238
apoptose 58, 71, 72, 73, 110, 111, 142, 182, 231
ARN 72, 143, 182, 227, 231, 234

B

bronzage 178, 180, 187, 193, 195, 218

C

cancer cutané 187
cataracte 95, 154, 166, 188, 210, 232
compatibilité électromagnétique 80, 96, 99, 125, 133, 232
courant induit 30, 31, 40, 70, 94, 98

croissance cellulaire 72, 73
cuisson par induction 87

D

débit d'absorption spécifique (DAS) 30, 33, 34, 94, 98, 106, 107, 108, 110, 111, 114, 119, 122, 123, 225, 228
décret du 3 mai 2002 122, 132
défibrillateur cardiaque 47, 96, 121
dégénérescence maculaire liée à l'âge 188, 228
directive européenne 2013/35/UE 132
dispositifs médicaux implantés actifs 121

E

échauffement 14, 20, 33, 34, 44, 47, 55, 56, 93, 95, 102, 107, 108, 119, 131, 137, 138, 141, 145, 147, 153, 154, 155, 160, 180, 204

effet analgésique 141, 144, 145
effet électrochimique 56
effet photochimique 164, 169, 204, 205
effet thermique 29, 31, 142, 146, 154, 164, 166, 168, 203, 204, 220
EHS 79, 80, 120, 228
électroporation 57, 58, 61, 67, 221, 233
ELF 32, 66, 73, 79
épidémiologie 66, 77, 113, 188, 222, 233
érythème 184, 187, 190, 208, 210
exposition énergétique 153, 163, 169, 211, 213

F

FM 32, 103, 104, 106, 114, 228, 236
foudre 55, 58
four à micro-ondes 14

G

grandeurs photométriques 163, 164
grandeurs radiométriques 153, 163, 164
grandeurs spectroradiométriques 163
GSM 91, 103, 105, 111, 228

H

héliodermatose 187

I

index UV 191, 192
indice de réfraction 28
induction magnétique 26, 33, 36, 43, 49, 68, 98
infrarouge (IR) 22, 32, 136, 139, 146, 148, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 160, 161, 168, 169, 175, 178, 179, 180, 181, 194, 200,

202, 206, 207, 208, 209, 211, 214, 218, 229
interphone 114, 115, 116, 117, 122
IRM interventionnelle 41, 42

L

lampes fluocompactes
fluocompactes (LFCs) 89, 162, 175
LED 14, 92, 153, 161, 162, 164, 170, 171, 172, 173, 175, 179, 193, 229
leucémie de l'enfant 78, 79
linky 86, 91, 120
longueur d'onde 14, 26, 28, 29, 32, 75, 88, 138, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 161, 163, 164, 168, 169, 174, 178, 179, 180, 181, 182, 184, 188, 189, 191, 199, 200, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 209, 210, 211, 213, 225
lumière bleue 89, 161, 165, 166, 169, 170, 171, 173

M

magnétite 45, 76, 235
magnétosphères 43, 46, 76, 94
magnétoréception 37, 44, 45, 46, 76, 235
mélanome 58, 60, 235
mélatonine 75, 174, 234, 235
micro-ondes 14, 20, 32, 102, 103, 221

O

organes électriques 55

P

peau 30, 59, 74, 107, 118, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 146, 147, 153, 155, 156, 157, 164, 167, 171, 181,