

*Sous la direction de*  
Anne Perrin et Martine Souques

# Champs électromagnétiques, environnement et santé



# **Champs électromagnétiques, environnement et santé**



**Springer**

*Paris*

*Berlin*

*Heidelberg*

*New York*

*Hong Kong*

*Londres*

*Milan*

*Tokyo*

# **Champs électromagnétiques, environnement et santé**

*Sous la direction de*

Anne Perrin

Martine Souques



Springer

**Anne Perrin**

**Martine Souques**

ISBN : 978-2-8178-0132-2 Springer Paris Berlin Heidelberg New York

© Springer-Verlag France, Paris, 2010

Imprimé en France

Springer-Verlag France est membre du groupe Springer Science + Business Media

Cet ouvrage est soumis au copyright. Tous droits réservés, notamment la reproduction et la représentation la traduction, la réimpression, l'exposé, la reproduction des illustrations et des tableaux, la transmission par voie d'enregistrement sonore ou visuel, la reproduction par microfilm ou tout autre moyen ainsi que la conservation des banques de données. La loi française sur le copyright du 9 septembre 1965 dans la version en vigueur n'autorise une reproduction intégrale ou partielle que dans certains cas, et en principe moyennant le paiement des droits. Toute représentation, reproduction, contrefaçon ou conservation dans une banque de données par quelque procédé que ce soit est sanctionné par la loi pénale sur le copyright.

L'utilisation dans cet ouvrage de désignations, dénominations commerciales, marques de fabrique, etc. même sans spécification ne signifie pas que ces termes soient libres de la législation sur les marques de fabrique et la protection des marques et qu'ils puissent être utilisés par chacun.

La maison d'édition décline toute responsabilité quant à l'exactitude des indications de dosage et des modes d'emplois. Dans chaque cas il incombe à l'utilisateur de vérifier les informations données par comparaison à la littérature existante.

*Maquette de couverture : Jean-François Montmarché*

*Mise en page : Desk*



*Ce livre est une version mise à jour et restructurée de l'ouvrage Les Effets biologiques des rayonnements non ionisants publié en 2001 (A. Duchêne et J. Jousset-Dubien, Flammarion, coll. « Médecine-Sciences »).*

Il est dédié à Jacques Jousset-Dubien, décédé le 28 mai 2009. Président de la section Rayonnements non ionisants de la Société française de radioprotection (SFRP) de 1999 à 2003, il a toujours été un membre fidèle et dynamique du bureau de cette section, soucieux de faire partager ses connaissances.

# Préface

J.-F. Doré

Réalisons-nous que la lumière visible, les rayonnements ultraviolets et infrarouges du Soleil, mais aussi les ondes radio, celles de nos téléphones portables, les micro-ondes de nos fours sont tous des ondes électromagnétiques de la famille des rayonnements non ionisants ? N'en avons-nous pas une perception faussée par un débat récurrent sur les possibles dangers de l'exposition aux rayonnements électromagnétiques exploités par les technologies de communications sans fil ?

Le débat sur les dangers des « ondes » est fortement médiatisé. Mais il est trop souvent biaisé, au nom de l'objectivité et de la nécessité d'un débat contradictoire, en opposant systématiquement les points de vue des « pour » et des « contre », ce qui aboutit à une surreprésentation des points de vue minoritaires. Les exemples de telles médiatisations abondent au cours de ces dernières années, entraînant une certaine défiance du public à l'égard des experts. Des scientifiques eux-mêmes contribuent à entretenir les controverses, en affirmant des points de vue péremptaires, le plus souvent en dehors de leur propre domaine de compétence ! Ils attirent ainsi les médias et peuvent influencer leurs concitoyens ou du moins instiller le doute sur les positions présentées comme celles de la « science officielle ».

De telles attitudes ne datent pas d'hier et ne sont pas propres aux champs électromagnétiques. On peut citer en exemple une des grandes figures de la vie scientifique et politique de la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, le mathématicien, astronome et physicien, François Arago (1786-1853), à qui nombre de villes françaises rendent hommage en lui dédiant une avenue ou un boulevard. Élu en 1809, à l'âge de 23 ans, à l'Académie des sciences, il en deviendra ultérieurement le secrétaire perpétuel. N'avait-il pas, lors d'un débat à l'Assemblée nationale le 13 juin 1836, tenté de s'opposer au projet de ligne de chemin de fer Paris-Versailles de la rive droite ? Un de ses principaux arguments étant qu'il faudrait pour ce tracé forer un tunnel sous le parc de Saint-Cloud et que ce tunnel produirait des inconvénients dus à la fumée et au froid. Écoutons Arago : « *J'affirme*



*sans hésiter que dans ce passage subit [du chaud au froid] les personnes sujettes à la transpiration seront incommodées, qu'elles gagneront des fluxions de poitrine, des pleurésies, des catarrhes. [...] »* Il avait aussi prédit que le transport en wagon de chemin de fer allait efféminer les soldats en leur faisant perdre le goût de la marche !

Dans le domaine très médiatisé de la téléphonie mobile, par exemple, la situation est paradoxale. De très nombreuses recherches biologiques expérimentales et épidémiologiques dont les résultats sont globalement négatifs ne permettent pas de montrer l'existence d'un risque ni même d'envisager un mécanisme biologique susceptible d'étayer un éventuel effet sanitaire de rayonnements d'aussi faible intensité que ceux émis par les antennes notamment. Malgré tout, le doute et les craintes perdurent dans l'esprit du public, mais en même temps la téléphonie mobile connaît un développement explosif.

En matière de risque, le seul moyen d'apporter de la clarté dans le débat et de faire objectivement l'état des connaissances est celui de l'expertise scientifique collective. C'est la méthode mise en œuvre depuis plusieurs décennies par le CIRC<sup>1</sup>, mais aussi par l'INSERM<sup>2</sup>, l'Afsset<sup>3</sup> et bien d'autres instances internationales comme notamment le SCENIHR<sup>4</sup> de la Commission européenne ou encore l'ICNIRP<sup>5</sup>. La recette est simple : elle consiste à réunir un groupe d'experts choisis pour leur compétence dans le domaine considéré, en tenant compte d'éventuels conflits d'intérêts, pour conduire une analyse exhaustive et critique des données scientifiques disponibles et aboutir à un consensus, ce qui n'exclut pas la prise en compte de positions minoritaires clairement exprimées et argumentées.

Mais les rapports d'expertises collectives ne sont pas toujours facilement accessibles à un simple « honnête homme ». Le grand mérite de l'ouvrage coordonné par Anne Perrin et Martine Souques, d'origines professionnelles différentes et dont les compétences sont complémentaires, est de présenter sous une forme accessible l'état des connaissances actuelles. Martine Souques et Anne Perrin sont, en 2010, respectivement présidente et vice-présidente de la section Rayonnements non ionisants (RNI) de la Société française de radioprotection (SFRP) qui a pour vocation de promouvoir les échanges et la

---

1. Centre international de recherche sur le cancer.

2. Institut national de la santé et de la recherche médicale.

3. Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail incluse dans l'actuelle Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses).

4. Scientific Committee of Environmental Newly Identified Health Risks ou Comité scientifique pour les risques sanitaires nouveaux et émergents.

5. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ou Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants.

connaissance scientifiques sur les rayonnements, et ce livre est publié sous l'égide de la SFRP. Il couvre l'ensemble des rayonnements électromagnétiques non ionisants, des champs statiques aux rayonnements ultraviolets. L'objectif n'est pas de se focaliser sur les aspects les plus médiatiques du sujet, mais au contraire de faire découvrir les champs électromagnétiques non ionisants dans leur ensemble. Sa lecture demande sans doute un peu d'attention et de concentration, mais, sans tomber dans une vulgarisation réductionniste, il permet de donner un aperçu suffisamment détaillé des thèmes abordés grâce à une volonté des auteurs de rendre les connaissances accessibles. Les expertises collectives les plus récentes sont mises à profit et citées tout au long du livre. Chacun des chapitres est rédigé par un spécialiste reconnu du domaine. Les étudiants, les enseignants ou les responsables en charge de questions relatives aux champs électromagnétiques y trouveront des bases solides ainsi que de nombreux renseignements en lien avec des situations d'ordres technique, sanitaire, réglementaire autant que pratiques.

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



# Sommaire

<b>Préface</b> .....	VII
J.-F. Doré	
<b>Contributeurs</b> .....	XIII
<b>Introduction</b> .....	1
A. Perrin et M. Souques	
<b>Rappels physiques sur les rayonnements électromagnétiques</b> .....	5
A. Aurengo	
<b>L'IRM et les champs électriques et magnétiques statiques</b> .....	15
A. Perrin	
<b>L'électrochimiothérapie et les impulsions électriques</b> .....	31
L. M. Mir	
<b>L'électricité et les champs électriques et magnétiques d'extrêmement basse fréquence</b> .....	41
J. Lambrozo	
<b>L'induction et les fréquences intermédiaires</b> .....	57
M. Souques et R. de Seze	
<b>Les communications sans fil et les radiofréquences</b> .....	69
B. Veyret	
<b>Les RFID</b> .....	87
J.-C. Debouzy et A. Perrin	
<b>Le rayonnement infrarouge</b> .....	95
L. Court	

<b>La lumière et le rayonnement visible.....</b>	<b>103</b>
L. Court	
<b>Le Soleil et le rayonnement ultraviolet .....</b>	<b>115</b>
J.-P. Césarini	
<b>Les lasers.....</b>	<b>133</b>
D. Courant	
<b>Présentation des auteurs .....</b>	<b>149</b>
<b>Unités .....</b>	<b>155</b>
<b>Acronymes .....</b>	<b>157</b>
<b>Glossaire.....</b>	<b>161</b>
<b>Index.....</b>	<b>169</b>

## **Contributeurs**

Section rayonnements non ionisants  
Société française de radioprotection (SFRP)  
BP 72  
92263 Fontenay-aux-Roses Cedex France

## **Auteurs**

André Aurengo  
Jean-Pierre Césarini  
Daniel Courant  
Louis Court  
Jean-Claude Debouzy  
Jacques Lambrozo  
Lluís M. Mir  
Anne Perrin  
René de Seze  
Martine Souques  
Bernard Veyret

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 Emmanuel Barbier, Pierre Bégot, Stéphanie Billot Bonef, Alice Collin, Annette Duchêne, François Gaudaire, Colette Giraudet, Isabelle Lagroye, Jean-François Le Bas, Jean-Marc Le Douce, Isabelle Magne, Emmanuel Nicolas, Catherine Yardin.



# Introduction

A. Perrin et M. Souques

*« La science est à ce jour le meilleur moyen de s'approcher de la réalité à un moment donné. Même si elle n'a pas vocation à éclairer sur le sens de la vie ou à fournir la vérité avec un grand V, elle peut y contribuer en fournissant aux décideurs et aux citoyens qui en font l'effort les moyens de se forger leur propre opinion. »*  
Alan Sokal et Jean Bricmont

Les humains, comme tous les êtres vivants, ont toujours évolué au milieu de rayonnements naturels, dont certains ont permis le développement de la biodiversité et demeurent indispensables à la vie. De nos jours, l'exposition aux champs électromagnétiques présente des origines multiples, naturelles et artificielles. La multiplication des sources artificielles est liée au développement technologique. En particulier, l'exposition quotidienne aux ondes électromagnétiques s'est diversifiée depuis la mise en place du réseau de distribution électrique et le développement de la radiodiffusion au début du siècle dernier. Cet environnement électromagnétique est parfois appelé « électrosmog ». Le caractère naturel ou artificiel de l'exposition occupe une place prépondérante dans les considérations actuelles sur les risques environnementaux potentiels, et les controverses qui les accompagnent.

La gamme des ondes, ou rayonnements, électromagnétiques est vaste. Le spectre électromagnétique s'étend de la fréquence nulle avec les champs électriques et magnétiques statiques jusqu'à l'infini (rayonnements cosmiques). Tout en ayant une base physique commune, les ondes transportent des énergies très variables. En se propageant, elles investissent un espace appelé champ électromagnétique, où le terme « champ » renvoie de façon plus générale à une zone où s'exercent des forces, comme on parle de champ gravitationnel, ou plus métaphoriquement, de champ d'action. Depuis un peu plus de cent ans, on sait que ces rayonnements se traduisent par un large éventail de phénomènes physiques aussi différents que les champs magnétiques statiques, l'électricité, les ondes radio, les micro-ondes,



la lumière visible, les rayons du Soleil, les rayons X, la radioactivité, etc. De nature curieuse et inventive, l'humain n'a donc pas manqué d'en explorer les propriétés, et bien sûr de les mettre à profit à des fins utilitaires, pour agrémenter son quotidien ou pour de multiples applications médicales, industrielles ou militaires. Notre qualité de vie est devenue largement tributaire des avancées technologiques dues à la maîtrise de ces différentes ondes, il serait maintenant difficile d'imaginer le retour à une vie quotidienne sans électricité, télévision, télécommandes en tous genres, radio ou téléphone sans fil.

C'est la nature des interactions ondes-matière selon le type d'onde, associée à une puissance d'émission suffisante, qui est à l'origine d'effets biologiques ou sanitaires. De fait, les grandeurs physiques à prendre en compte varient en fonction de la fréquence. Dans la gamme des fréquences élevées du spectre, les rayonnements dits ionisants sont suffisamment énergétiques pour modifier des molécules en leur arrachant des électrons par un phénomène d'ionisation\*. Ce mécanisme peut être à l'origine de modifications provenant de cassures mal réparées au sein des molécules d'ADN\*, support de l'information génétique (mutations). Cela confère un caractère mutagène\* aux rayonnements concernés pouvant, par voie de conséquence, se révéler cancérogènes. C'est le cas des rayons gamma par exemple.

Par opposition, les champs et rayonnements électromagnétiques dont l'énergie est trop faible pour produire une ionisation dans les milieux qu'ils traversent sont regroupés sous le terme générique de rayonnements non ionisants (RNI). Leur mode d'action sur l'organisme est différent, fondé sur la circulation de courants et/ou des phénomènes d'échauffement selon la fréquence. Les rayonnements ultraviolets se situent à la frontière entre ionisant et non ionisant, mais ils sont restés classés avec la famille des RNI bien qu'ils soient des mutagènes avérés. Une erreur courante consiste à penser que la dangerosité potentielle d'un RNI est d'autant plus forte que sa fréquence est élevée, ce qui n'est pas le cas puisque l'interaction ondes-matière et la puissance sont également à prendre en compte.

À l'exception de la lumière, les rayonnements de l'ensemble de la gamme ne sont pas perçus de façon immédiate par nos sens dans les conditions d'usage habituelles. De fait, pour tout un chacun, ils sont souvent difficiles à concevoir dans leur réalité physique ce qui incite parfois à les diaboliser ou – *a contrario* – à les ignorer et à ne pas s'en méfier lorsque cela serait nécessaire.

Dans cet ouvrage, il ne sera question que des RNI, et en particulier de ceux qui font partie de notre environnement quotidien.

Une vigilance soutenue s'impose quant aux risques éventuels, même faibles, de telles expositions, car elles concernent un grand nombre de personnes. Il est donc nécessaire d'envisager objectivement les effets potentiels de ces expositions sur la santé pour être en mesure de s'en prémunir en connaissance de cause. Cela justifie l'analyse minutieuse des effets des RNI sur les systèmes biologiques et de l'influence qu'ils sont susceptibles d'exercer sur l'homme lui-même afin d'établir des limites d'exposition à ne pas dépasser, garantissant l'absence de risque pour la santé (réglementation, recommandations). Les études sont généralement très

complexes à mettre en œuvre. Elles font appel à des compétences à la fois en physique et en sciences biomédicales, d'où des collaborations transdisciplinaires entre équipes de chercheurs. C'est dans ce sens que sont conduits actuellement les projets de recherche en France et dans le monde entier. Il peut s'agir d'études épidémiologiques en environnement réel, ou d'expériences en laboratoire. Ces dernières demandent des équipements spécialisés, souvent coûteux, et font appel à des techniques différentes selon le type d'onde et les effets considérés. De ce fait, les spécialistes eux-mêmes focalisent leurs compétences sur une partie du spectre et ne sont pas experts pour tous les types de rayonnements.

Il existe des normes visant à éviter les effets nocifs pouvant être engendrés par l'exposition aux RNI dans certaines conditions. En Europe, elles sont fondées sur les travaux de l'ICNIRP<sup>1</sup> qui définit les restrictions de base (seuils préconisés) servant à établir des recommandations et des directives européennes, elles-mêmes reprises dans chaque pays pour l'élaboration éventuelle de décrets visant à appliquer la réglementation de façon pratique. Pour l'évaluation du risque, l'ICNIRP fonde ses conclusions sur une revue critique de la littérature scientifique et maintient une veille bibliographique permanente. Parallèlement, des rapports d'expertise et des avis peuvent être rendus par des institutions comme l'OMS<sup>2</sup> au niveau mondial, ou l'Afsset<sup>3</sup> (devenue Anses<sup>4</sup>) en France. Ces derniers permettent de s'assurer que les valeurs limites sont suffisamment protectrices face à l'usage des RNI, notamment par les technologies nouvelles, et de promouvoir des axes de recherche si besoin. À l'échelle du pays, ces avis apportent des aides à la gouvernance en matière de gestion des risques. Les autorités gouvernementales sont chargées de prendre les mesures estimées nécessaires à la protection de la population à partir des données de la science tout en tenant compte des aspects sociétaux, ce qui n'aboutit pas forcément à des décisions fondées sur la rationalité scientifique.

Dans le contexte actuel où la communication est dominée par les messages brefs et médiatiques, il n'est pas aisé de fournir au public une information de nature scientifique sur les champs électromagnétiques, ni sur leurs effets biologiques et sanitaires, dans un langage facilement compréhensible par tout le monde. Des effets biologiques sont parfois assimilés directement à des effets sur la santé alors que ce n'est pas nécessairement le cas.

---

1. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ou Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants. L'ICNIRP est une organisation non gouvernementale émanant de l'Association internationale de radioprotection (IRPA), officiellement reconnue par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'Organisation internationale du travail (OIT) dans le domaine des rayonnements non ionisants. <http://www.icnirp.org/>

Les États-Unis suivent les recommandations de l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) pour les rayonnements électromagnétiques à l'exception des rayonnements optiques.

2. Organisation mondiale de la santé (en anglais, WHO : World Health Organization)

3. Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail.

4. Agence nationale chargée de la sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

De plus un effet, pour être avéré, doit pouvoir être retrouvé lorsque l'expérience est répétée, mais aussi à partir de plusieurs études différentes dont les résultats sont cohérents. Nombre d'idées fausses ou d'idées reçues circulent sur les effets des RNI. Il y a parfois une simplification excessive de la question, des amalgames fâcheux ou une façon orientée de traiter les données actuelles en faveur de thèses préconçues. Les effets peuvent être exagérés ou au contraire minimisés. Au final, extrapolations et conclusions hâtives, souvent sensationnelles, alimentent régulièrement la chronique et arrivent même à se glisser jusque dans certaines revues plus spécialisées.

Après une présentation générale des RNI, cet ouvrage résume simplement, mais le plus fidèlement possible, l'état des connaissances pour différentes catégories de champs électromagnétiques susceptibles d'être rencontrés dans l'environnement quotidien. Il concerne avant tout les expositions du public et non les applications industrielles ou professionnelles qui pourront être évoquées au passage. Deux techniques médicales seront néanmoins présentées plus en détail bien que l'une comme l'autre ne soient pas à proprement parler des sources d'exposition rencontrées au quotidien. D'une part, l'IRM\* qui devient une méthode d'exploration à laquelle les médecins recourent de plus en plus fréquemment. D'autre part, l'électrochimiothérapie\* qui est une méthode thérapeutique récente ; sa présentation permet d'aborder les effets spécifiques des impulsions électriques et l'usage pouvant en être fait. Agencés suivant l'ordre des fréquences croissantes, les différents chapitres traitent chacun d'un type particulier de rayonnement en étant, lorsque c'est possible, centrés sur une source d'émission représentative : IRM et champs statiques, électrochimiothérapie et impulsions électriques, électricité et extrêmement basses fréquences, induction et fréquences intermédiaires, communications sans fil et radiofréquences\*, RFID\*, rayonnement infrarouge, lumière et rayonnement visible, Soleil et rayonnement ultraviolet et enfin, lasers\*. Les caractéristiques propres de ces champs sont abordées dans un premier temps. Le point est ensuite fait sur les principales sources d'émission, les connaissances actuelles sur les effets biologiques et les limites d'exposition recommandées par les organismes internationaux pour pouvoir les utiliser en sécurité.

Des spécialistes, médecins, biophysiciens et physiciens, ingénieurs ou chercheurs se sont associés pour rédiger les textes dans leur domaine de compétence. Nous avons opté pour un livre à tiroirs où chacun pourra s'immerger en fonction de sa curiosité et de l'état actuel de ses connaissances. Ce n'est ni un catalogue exhaustif de toutes les études faites à ce jour sur les effets biologiques et sanitaires des champs électromagnétiques, ni une réduction de l'état des connaissances à quelques études choisies. Le but n'est pas non plus de présenter toutes les sources de RNI. Pour approfondir, le lecteur pourra consulter un certain nombre de rapports de synthèses bibliographiques disponibles et des textes référencés au fil des différents chapitres.

À la fin de l'ouvrage sont rassemblés la liste des abréviations, les principales unités employées ainsi que le glossaire où sont définis les mots marqués d'un astérisque (\*).

# Rappels physiques sur les rayonnements électromagnétiques

A. Aurengo

Les rayonnements électromagnétiques sont une forme de transport de l'énergie sans support matériel. Très hétérogènes par l'énergie qu'ils transportent et par leurs possibilités d'interaction avec la matière et en particulier les structures biologiques, ils peuvent être décrits soit comme des ondes électromagnétiques (modèle « ondulatoire »), soit comme un flux de photons\* (modèle « corpusculaire »).

Les champs statiques, électriques ou magnétiques, également traités dans cet ouvrage, ne sont pas des champs électromagnétiques à proprement parler ; ils ne se propagent pas et ne correspondent ni à une onde, ni à un flux de photons. Leur physique sera abordée dans les chapitres correspondants.

## Modèle ondulatoire

Dû à Maxwell (1865), le modèle ondulatoire est fondé sur la notion d'onde électromagnétique. Une onde électromagnétique est la combinaison d'un champ électrique  $E$ , exprimé en volt par mètre (V/m) et d'un champ magnétique  $H^1$ , exprimé en ampère par mètre (A/m), perpendiculaire à  $E$ . Ces deux champs se propagent à la même vitesse (appelée « célérité ») dans une direction perpendiculaire au plan qui contient  $E$  et  $H$ .

---

1. On utilise souvent une autre expression de la composante magnétique : l'« induction magnétique » ou « densité de flux magnétique » notée  $B$ , exprimée en tesla (T).  $H$  et  $B$  sont liés par  $B = \mu H$  où  $\mu$  est la perméabilité magnétique du milieu de propagation. Dans la plupart des milieux biologiques,  $\mu$  est égal à la perméabilité magnétique du vide  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ . On en déduit qu'un tesla est approximativement égal à  $8 \times 10^5$  A/m. Par abus de langage,  $B$  est souvent appelé « champ magnétique ».

Les amplitudes des deux champs ont au cours du temps une variation sinusoïdale, de même fréquence et en phase. E et H forment une onde plane (fig. 1). Dans le vide, la propagation est rectiligne et se fait à célérité constante. Cette propagation s'accompagne d'un flux d'énergie par unité de surface proportionnel au produit des amplitudes de E et H. Les principales caractéristiques d'une onde électromagnétique sont :

- sa *fréquence*  $f$ , exprimée en hertz (Hz ou  $s^{-1}$ ) ;
- sa *période*  $T = \frac{1}{f}$  exprimée en seconde (s) ;
- sa *longueur d'onde dans le vide*  $\lambda = cT = \frac{c}{f}$ , distance de propagation durant une période, exprimée en mètre (m).

Pour des ondes émises sous forme d'impulsions, le rapport de la durée de l'impulsion à l'intervalle entre deux impulsions successives est appelé *rapport cyclique*. La *puissance crête* est la puissance instantanée pendant une impulsion, la *puissance moyenne* est égale à la puissance crête multipliée par le rapport cyclique : plus il est faible, plus la puissance moyenne est faible.

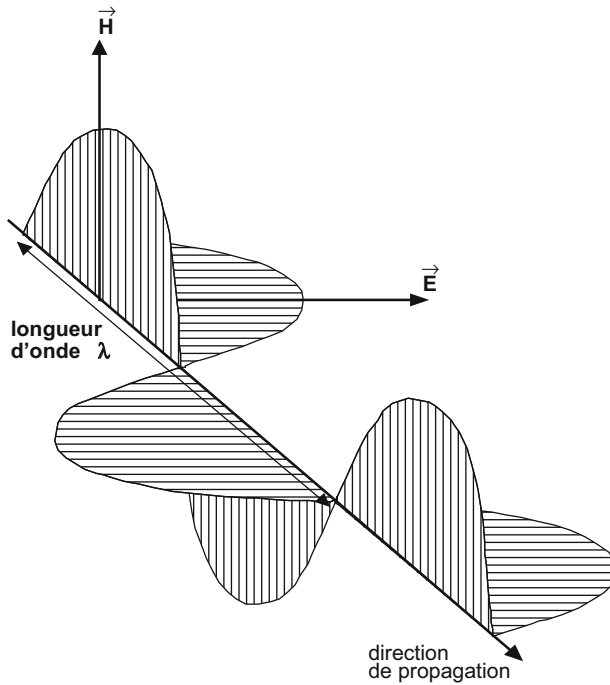


Fig. 1 – Représentation schématique d'une onde électromagnétique.

On définit l'*intensité énergétique* d'une source de rayonnement, exprimée en watt par stéradian (W/sr) comme l'énergie émise par unité de temps et d'angle solide, dans une direction déterminée. Pour une cible, on définit l'*éclairement énergétique*, exprimé en watt par mètre carré (W/m<sup>2</sup>), comme le rapport de l'énergie reçue par unité de temps à l'aire de la cible.

L'atténuation de l'éclairement énergétique en fonction de la distance à la source suit une loi qui dépend des caractéristiques de cette source (source étendue ou ponctuelle, géométrie du faisceau émis). Dans le cas le plus simple d'une source ponctuelle émettant de manière isotrope\* dans toutes les directions de l'espace, l'éclairement énergétique varie comme l'inverse du carré de la distance à la source.

Le rayonnement électromagnétique élémentaire est dit « monoénergétique », ou « monochromatique » dans le cas d'ondes lumineuses. Il peut également être constitué d'un mélange de rayonnements élémentaires de différentes fréquences (dans le cas *discret*, par exemple l'émission d'un laser, on est en présence d'un nombre fini de fréquences distinctes ; dans le cas *continu*, par exemple l'émission du Soleil, toutes les fréquences comprises entre deux valeurs minimale et maximale sont représentées).

L'aspect ondulatoire des rayonnements électromagnétiques permet d'expliquer les lois fondamentales de l'optique géométrique, les propriétés interférentielles de ces rayonnements et leurs propriétés liées à la polarisation. L'optique géométrique est une approximation de la mécanique ondulatoire dans le cas d'ondes sinusoïdales dont l'amplitude varie peu sur des distances de l'ordre de la longueur d'onde. Cette approximation, vérifiée en général pour les ondes lumineuses, permet l'étude de la propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux matériels transparents où la vitesse de propagation  $v$  est toujours plus faible que dans le vide. Pour une lumière monochromatique, le rapport  $c/v$  est appelé *indice de réfraction* du milieu.

Un rayonnement électromagnétique peut être permanent et stable (d'amplitude maximale et de fréquence constante) ou bien « modulé » (variable soit en amplitude maximale, soit en fréquence) ou encore « pulsé » avec émission brève et régulièrement répétée d'une onde électromagnétique. Les champs électromagnétiques modulés sont adaptés aux radiotransmissions ; les champs pulsés sont utilisés par exemple pour les radars et dans certaines procédures thérapeutiques.

## Modèle corpusculaire

Certaines interactions des rayonnements électromagnétiques avec des systèmes de l'ordre de grandeur d'un atome ou d'une molécule, ne sont pas explicables par le modèle ondulatoire. L'impossibilité d'expliquer l'effet photoélectrique a conduit Einstein, en 1905, à reprendre la

notion de *quanta* proposée par Planck et à considérer les rayonnements électromagnétiques comme un flux discontinu de « paquets » d'énergie électromagnétique appelés *photons*.

Dans le vide, un photon se propage en ligne droite, avec la même célérité  $c$  que l'onde électromagnétique associée ; il transporte une quantité d'énergie élémentaire  $E$ , appelée *quantum*, proportionnelle à la fréquence de l'onde :

$$E = hf, \text{ où } h \text{ est la constante de Planck : } h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

L'énergie  $E$ , exprimée en joule (J) ou en électronvolt<sup>2</sup> (eV), est liée à la longueur d'onde par les relations :

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,98 \times 10^{-25}}{\lambda} \text{ J} = \frac{1,24 \times 10^{-6}}{\lambda} \text{ eV}$$

L'intensité d'un rayonnement électromagnétique dépend de deux facteurs : l'énergie des photons et leur nombre.

## Dualité onde-corpuscule

Les modèles ondulatoire et corpusculaire sont théoriquement adaptés à n'importe quel type de rayonnement électromagnétique, mais leur utilisation dépend des phénomènes que l'on cherche à expliquer.

Les phénomènes macroscopiques et les rayonnements de faible fréquence, ayant des photons d'énergie individuelle trop faible pour interagir avec la matière, sont en général plus facilement abordés en considérant le rayonnement comme une onde.

En revanche, les interactions des rayonnements électromagnétiques très énergétiques avec des atomes ou des molécules dont les niveaux d'énergie sont quantifiés relèvent d'une approche corpusculaire. Les ondes associées à des photons très énergétiques ont des longueurs d'onde de l'ordre des dimensions atomiques et leurs indices de réfraction sont proches de 1 ; il en résulte que le modèle ondulatoire n'est le plus souvent pas utilisable et que seul l'aspect corpusculaire est à prendre en considération.

## Interactions ondes-matière

L'interaction entre un rayonnement électromagnétique et la matière peut se traduire par une diffusion sans transfert d'énergie ni changement de fréquence (diffusion élastique)

---

2. 1 eV =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  joule.

ou par un transfert au matériau de tout ou partie de l'énergie du rayonnement. Dans ce dernier cas, l'énergie incidente est en partie absorbée par la matière et en partie diffusée sous la forme d'un nouveau rayonnement électromagnétique de fréquence plus basse (diffusion inélastique). La fraction absorbée peut avoir un éventuel effet biologique. Elle peut entraîner une transition énergétique et/ou un effet thermique.

## Transitions énergétiques

Les atomes et les molécules existent sous un grand nombre d'états, de niveaux d'énergie différents et quantifiés. Si un système peut exister sous deux états A et B, de niveaux d'énergie respectifs  $E_A < E_B$ , l'interaction d'un photon d'énergie  $hf$  peut entraîner le passage de l'état A à l'état B, si et seulement si  $hf \geq \Delta E = E_B - E_A$ . Par exemple les liaisons de Van der Waals ( $\Delta E \approx 0,1$  eV) ne peuvent être rompues que par des rayonnements infrarouges ou d'énergie supérieure.

Un mode d'interaction important est l'ionisation\* des molécules. Pour les physiciens, ce seuil est fixé à 12 eV, correspondant à un rayonnement de 100 nm de longueur d'onde. En biologie, le seuil de 13,6 eV a été choisi en raison de l'importance de l'ionisation de l'eau dans l'interaction entre les rayonnements et les tissus biologiques. Les rayonnements non ionisants (RNI) sont ceux dont l'énergie est inférieure à l'énergie d'ionisation des atomes d'hydrogène (H) et d'oxygène (O) ( $\Delta E \approx 13,6$  eV) et qui sont donc incapables de les ioniser. Ces rayonnements vont des rayonnements d'extrêmement basse fréquence tels ceux du réseau de distribution de l'électricité (ELF) aux ultraviolets (UV) les moins énergétiques<sup>3</sup>. Les champs magnétiques statiques ne sont pas un « rayonnement », mais sont également non ionisants. Inversement, les rayonnements UV les plus énergétiques, rayons X et  $\gamma$ , dont l'énergie est supérieure à 13,6 eV, sont dits ionisants (RI).

D'autres transitions énergétiques que l'ionisation sont importantes en biologie. Comme l'ionisation, elles ne se produisent que si les photons ont une énergie supérieure à un certain seuil. Certaines liaisons covalentes qui relient les atomes dans les molécules peuvent être cassées à partir de 1 eV (lumière visible), les liaisons de Van der Waals, qui stabilisent la structure des macromolécules, à partir de 0,1 eV (infrarouge), les niveaux d'énergie de rotation et de vibration des molécules sont les plus faibles, potentiellement importants en biologie ; passer d'un niveau à un autre nécessite une énergie de 0,01 à 0,001 eV (infrarouge).

---

3. Appelés parfois UV proches, par opposition aux UV lointains, qui sont plus énergétiques.



## Effets thermiques

Ces effets peuvent se produire quelle que soit la fréquence du rayonnement électromagnétique incident.

Dans le cas de rayonnements peu énergétiques, tels les radiofréquences\* (RF), on interprète les effets thermiques avec le modèle ondulatoire comme le résultat de l'effet Joule dû à l'agitation des charges et des dipôles.

L'énergie absorbée est définie par l'absorption spécifique  $AS = \frac{dW}{dm}$ , énergie absorbée par unité de masse du matériau considéré, exprimée en joule par kilogramme (J/kg), et par le débit d'absorption spécifique<sup>4</sup>  $DAS = \frac{dW}{dm \cdot dt}$ , absorption spécifique par unité de temps exprimée en watt par kilogramme (W/kg).

Pour les fréquences extrêmement basses (300 Hz), les mouvements oscillants des charges dans l'organisme, sous l'effet du champ électrique, sont très réduits, ce champ étant atténué d'un facteur d'environ 25 000 000 quand il pénètre dans le corps dont la peau fait office de cage de Faraday. En revanche, le champ magnétique est très peu atténué et génère des courants induits. Ces courants sont quantifiés par l'intensité qui traverse une section donnée, grandeur appelée « densité de courant » et exprimée en ampère par mètre carré (A/m<sup>2</sup>).

## Rayonnements électromagnétiques et applications

Les principales applications des rayonnements électromagnétiques, classés par bandes de fréquences d'énergie croissante telles que définies par l'Union internationale des télécommunications (UIT) et la Commission internationale de l'éclairage (CIE) sont résumées dans le tableau I et schématisées dans la figure 2. Cette figure servira de « fil rouge » tout au long de cet ouvrage, pour situer chaque chapitre dans le spectre électromagnétique. La gamme des RF n'est pas strictement délimitée et englobe l'ensemble des fréquences concernées par les communications sans fil. De même, on appelle « hyperfréquences » les fréquences comprises entre 1 et 100 GHz.

Les rayonnements électromagnétiques dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 750 nm sont perceptibles par l'œil humain. Si l'intensité énergétique est suffisante, les différentes longueurs d'onde sont perçues comme des couleurs différentes, du rouge (600-750 nm) au violet (400-450 nm).

---

4. En anglais, SAR : *specific absorption rate*.

**Tableau I** – Rayonnements électromagnétiques (abréviation anglaise couramment rencontrée), caractéristiques et principales applications.

<i>Désignation</i>	<i>Fréquence</i>	<i>Longueur d'onde</i>	<i>Exemples</i>
Fréquences extrêmement basses (ELF)	0-300 Hz	$10^5$ - $10^3$ km	Réseau électrique 50 Hz, électroménager...
Fréquences audio (VF)	0,3-3 kHz	1 000-100 km	Transmission de données vocales, métallurgie, chauffage par induction...
Très basses fréquences (VLF)	3-30 kHz	100-10 km	Radiocommunications...
Basses fréquences (LF)	30-300 kHz	10-1 km	Radiodiffusion GO, Fours à induction...
Fréquences moyennes (MF)	0,3-3 MHz	1 km-100 m	Radiodiffusion MO, PO, diathermie médicale...
Hautes fréquences (HF)	3-30 MHz	100-10 m	CB (citizen band), soudure, collage...
Très hautes fréquences (VHF)	30-300 MHz	10-1 m	Télévision, radio FM...
Fréquences ultrahautes (UHF)	0,3-3 GHz	1-0,1 m	Télévision, radars, téléphones mobiles, fours à micro-ondes, hyperthermie médicale...
Fréquences superhautes (SHF)	3-30 GHz	0,1-0,01 m	Radars, alarmes anti-intrusion
Fréquences extrêmement hautes (EHF)	30-300 GHz	0,01-0,001 m	Radars, communications par satellite, scanner corporel...
Infrarouge (IR)	0,3-385 THz	1 mm-780 nm	Spectrométrie IR, chauffage...
Lumière visible	385-750 THz	780-400 nm	Vision humaine, photosynthèse...
Ultraviolet (UV)	750 THz – 3 PHz	400-100 nm	Spectrométrie, lampes germicides, solarium...

Préfixes utilisés : k = kilo =  $10^3$  ; M = méga =  $10^6$  ; G = giga =  $10^9$  ; T = téra =  $10^{12}$  ; P = péta =  $10^{15}$  ; m = milli =  $10^{-3}$  ;  $\mu$  = micro =  $10^{-6}$  ; n = nano =  $10^{-9}$  ; GO : grandes ondes ; MO : ondes moyennes ; PO : petites ondes.

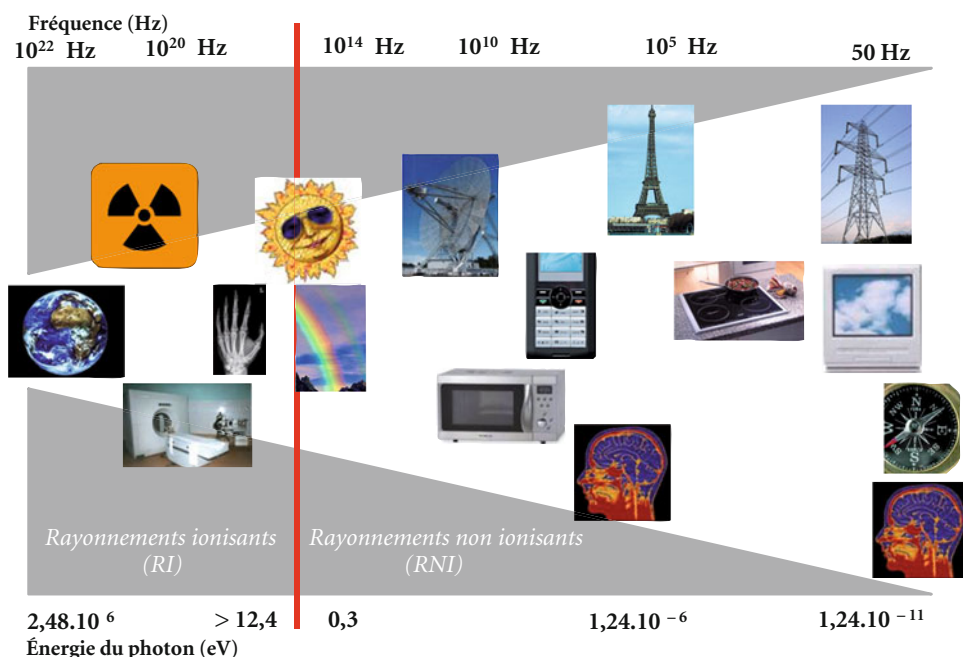


Fig. 2 – Schéma du spectre électromagnétique avec les ordres de grandeurs des fréquences et des énergies développées dans la gamme de fréquences.

## Métrologie, notion d'exposition et de dosimétrie, réglementation

Selon la gamme de fréquences considérée, les interactions ondes-matière des rayonnements non ionisants ne reposent pas sur les mêmes propriétés physiques de l'onde. Les unités de mesures pertinentes pour caractériser les interactions ne sont donc pas les mêmes et les effets biologiques varient selon le type de rayonnement (tableau II). Les tissus ou organes cibles diffèrent en fonction du mode d'interaction possible. Par conséquent, les effets biologiques pris en considération pour l'établissement des valeurs limites à ne pas dépasser (normes) pour l'emploi des ondes électromagnétiques ne sont pas les mêmes selon la fréquence. Les plus basses fréquences ont une action prépondérante par stimulation des tissus excitables (muscles, cœur, système nerveux) tandis que les plus élevées induisent une élévation de température, avec un continuum entre les deux.

**Tableau II** – Grandeurs physiques et effets de références en fonction de la fréquence.

<i>Gamme de fréquences</i>	<i>Grandeur physique</i>	<i>Unités</i>	<i>Effets à l'origine des valeurs limites visant à prévenir les effets sanitaires</i>		
0-1 Hz	<b>Induction magnétique</b> pour les champs statiques (fréquence nulle)	T	Stimulation musculaire	Échauffement <=====	Effets sur le système cardio-vasculaire/charges électriques de surface – induction de champ électrique dans les tissus en mouvement
	<b>Densité de courant</b> pour les champs variables dans le temps	A/m <sup>2</sup>			Stimulation du système nerveux central
1 Hz - 100 kHz	<b>Densité de courant</b>	A/m <sup>2</sup>			Stimulation du système nerveux central
100 kHz - 10 MHz	<b>Densité de courant et débit d'absorption spécifique</b>	A/m <sup>2</sup> W/kg			Stimulation du système nerveux central Stress thermique généralisé du corps, échauffement localisé
10 MHz - 10 GHz	<b>Débit d'absorption spécifique</b>	W/kg			Stress thermique généralisé du corps Échauffement localisé
10 GHz - 300 GHz	<b>Densité de puissance</b>	W/m <sup>2</sup>			Échauffement des tissus à la surface ou proches de la surface du corps
300 GHz - rayonnements ionisants	<b>Énergie des photons</b>	eV			Échauffement des tissus à la surface ou proches de la surface du corps, réaction photochimique

T : tesla ; A/m<sup>2</sup> : ampère par mètre carré ; W/kg : watt par kilogramme ; W/m<sup>2</sup> : watt par mètre carré ; eV : électron-volt.

Dans chaque cas, des valeurs limites d'exposition doivent être respectées. Elles sont exprimées dans l'unité de référence de la gamme d'ondes considérée (tableau II). Le respect des restrictions de base suppose alors des mesures et/ou des calculs.

Ainsi le DAS est un paramètre qui ne peut être obtenu facilement et ne peut être mesuré directement, tout comme les courants induits dans la gamme des basses fréquences. Par conséquent, pour les fréquences où le DAS est la grandeur de référence,

des calculs permettent d'estimer la densité de puissance à ne pas dépasser, pour une fréquence donnée, afin que les valeurs limites de DAS ne soient pas dépassées dans les pires conditions d'exposition pouvant être rencontrées et compte tenu de la diversité des individus. Ainsi, dans le cas d'émetteurs suffisamment éloignés de la source (comme des antennes relais par exemple), les seuils réglementaires sont transposés, en suivant un protocole bien défini, en grandeurs plus facilement mesurables telles que le champ électrique exprimé en volt par mètre (V/m) ou la puissance incidente exprimée en watt par mètre carré (Wm<sup>2</sup>). Ces deux valeurs sont liées par la relation suivante :

$$P = E^2 / 377$$

où P est la puissance incidente par unité de surface en W/m<sup>2</sup> et E est la valeur du champ électrique en V/m.

Les détails relatifs à chaque gamme de fréquences sont repris dans les chapitres correspondants.

## **Conclusion**

Les phénomènes biologiques pris en compte pour prévenir des effets sanitaires dépendent de l'interaction des ondes avec la matière selon la fréquence considérée.

Ils s'expriment différemment en fonction du type de champ prééminent, électrique ou magnétique, et de sa fréquence.

Jusqu'à 100 kHz, il s'agit des champs et des courants pouvant entraîner la stimulation de tissus excitables (systèmes nerveux et muscles).

Au-dessus de 10 MHz, l'absorption par les tissus devient prédominante et l'échauffement le mécanisme essentiel.

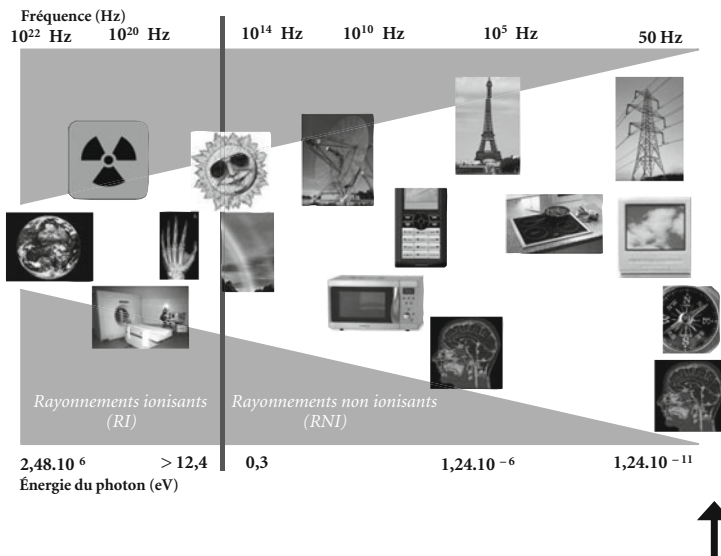
Aux fréquences intermédiaires, il y a un mélange des deux.

## **Pour en savoir plus**

– Marchandise X. (2007) Biophysique pour les sciences de la vie et de la santé. Omniscience.

# L'IRM et les champs électriques et magnétiques statiques

A. Perrin



## Introduction

Les champs électriques et magnétiques statiques sont présents en permanence dans l'environnement. Alors que le champ électrique statique est associé à la présence de charges électriques fixes, le champ magnétique est dû au mouvement physique de charges électriques. Contrairement aux autres catégories de champs traitées dans cet ouvrage, les champs statiques ne varient pas dans le temps.

La technique d'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) est la source de champ magnétique statique intense la plus répandue, avec plusieurs milliers d'appareils utilisés dans le monde. Elle sera donc particulièrement développée dans ce chapitre. Toutefois, le principe de cette technologie repose sur l'emploi d'un champ magnétique statique mais aussi de gradients de champs magnétiques (spatiaux et temporels) et d'un

rayonnement radiofréquence\* (RF). Ce dernier n'est présent que lors des phases d'acquisition d'images, alors que le champ statique de forte intensité, obtenu grâce à un aimant supraconducteur, est émis de façon permanente. Les consignes de sécurité doivent donc prendre en compte cette triple exposition.

## Rappels physiques

Tout corps électriquement chargé sans mouvement crée un champ électrostatique. Un courant continu dans un circuit crée un champ magnétique statique.

Le champ électrique s'exprime en volt par mètre (V/m), il est facilement atténué par un blindage approprié.

Le champ magnétique (H) lié au déplacement des charges électriques est proportionnel à l'intensité du courant et se mesure en ampère par mètre (A/m). En fait, c'est l'induction magnétique<sup>1</sup> (B), exprimée en tesla (T) qui est fournie le plus souvent. Par abus de langage l'induction magnétique ou densité de flux magnétique B est communément appelée « champ magnétique ».

Les grandeurs et unités employées pour caractériser les champs statiques sont les mêmes que celles décrites pour les composantes des champs variables de 50/60 Hz.

Il n'est donc pas question de champ ou d'onde électromagnétique dans ce chapitre. Du point de vue des interactions et des effets produits, il convient de considérer séparément le champ électrique statique et le champ magnétique statique.

## Sources naturelles et artificielles

À la différence des champs électriques et magnétiques variables issus principalement de l'activité industrielle, les champs statiques, s'ils connaissent aussi une origine industrielle, existent à l'état naturel dans l'atmosphère.

---

1. Suivant la relation :  $B = \mu H$ , où  $\mu$  correspond à la perméabilité absolue du matériau ou milieu,  $\mu = \mu_0 \mu_r$  où  $\mu_r = 1$  dans le vide, c'est la perméabilité relative (par rapport à  $\mu_0$ ) et  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  USI.

## Sources naturelles

### *Champ électrique statique*

Le champ électrique statique à la surface de la Terre est d'environ 100 à 150 V/m par beau temps. Par temps orageux, sa valeur est en moyenne de 10 à 15 kV/m.

### *Champ magnétique statique*

Le champ magnétique terrestre, dû au fait que la Terre se comporte comme un aimant, présente d'importantes variations locales. Sa valeur est non négligeable. En moyenne, il varie de 30 à 70  $\mu\text{T}$  et il est d'environ 50  $\mu\text{T}$  en France. Ce champ magnétique, lié à l'organisation du magma au centre de la Terre, n'est pas aligné avec l'axe de rotation de celle-ci. L'angle ainsi fait s'appelle la « déclinaison », il varie au cours des âges. La composante verticale du champ magnétique est maximale aux pôles avec une valeur d'environ 65 à 70  $\mu\text{T}$  et nulle à l'équateur, tandis que sa composante horizontale est maximale à l'équateur, environ 30  $\mu\text{T}$ , et nulle aux pôles. Le champ magnétique peut être modifié à proximité de structures métalliques.

Ce champ géomagnétique dirige l'aiguille de la boussole, mais joue aussi un rôle décisif dans l'orientation et la migration de certaines espèces animales grâce à des mécanismes biologiques spécifiques permettant la sensibilité au champ magnétique ou magnétoréception\*.

## Sources artificielles

### *Champ électrique statique*

La différence de potentiel\* créant un champ électrique statique apparaît principalement dans deux situations : autour des équipements placés à un potentiel élevé ou par frottement d'objets électriquement isolés. Un frottement peut séparer les charges positives des charges négatives. Il arrive que, en atmosphère sèche, une personne se charge en marchant sur un sol revêtu d'une matière isolante (moquette ou matière plastique). Lorsque la personne arrive au contact d'un objet non chargé, le champ électrique statique local au niveau du contact est égal à la différence de potentiel divisée par la distance. Si ce champ dépasse le champ de claquage dans l'air (environ 30 kV/cm), l'air devient conducteur et la personne se décharge sur l'objet : c'est ce qu'on appelle une « décharge électrostatique », plus ou moins ressentie selon les individus.

La seule source créant, dans notre environnement, un champ électrique statique d'intensité comparable à celle du champ terrestre et une exposition non localisée est le transport d'énergie électrique sous tension continue. Toutefois, ce mode de transport de



l'électricité est aujourd'hui peu utilisé ; en France, le poste des Mandarins<sup>2</sup> en est le seul exemple actuel. Par ailleurs, le courant continu a été utilisé au début de l'électrification des voies ferrées. En France, certains réseaux ferrés (essentiellement sud-est et sud-ouest) sont alimentés par des caténaires en 1500 V continu. Les écrans munis de tubes cathodiques représentent aussi des sources artificielles pour lesquels un champ électrique de 10 à 20 kV/m est mesuré à proximité.

### *Champ magnétique statique*

Le transport d'énergie électrique sous très haute tension continue engendre, d'autre part, un champ magnétique statique de l'ordre de 20  $\mu$ T.

Le transport ferroviaire utilisant la traction sous tension continue crée aussi un champ magnétique, de l'ordre de 50 mT, dans des zones généralement inaccessibles tant au public qu'au personnel. Les transports ferroviaires à sustentation magnétique, tels que le MagLev<sup>3</sup> (pour *magnetic levitation*), peuvent engendrer des champs magnétiques statiques de l'ordre de 10 à 100 mT près des moteurs. En revanche, le champ enregistré à l'intérieur de ces différents trains est bien inférieur à 0,1 mT.

De nombreux objets communément rencontrés dans notre environnement sont munis d'un aimant permanent (magnets, fermeture de portes, porte-trombones, etc.) qui engendre localement des champs statiques de quelques milliteslas (mT).

Pour le public, l'exposition la plus importante se produit à l'occasion des examens de diagnostic médical utilisant l'IRM (détaillée ci-dessous) où l'intensité du champ peut être plus de 50 000 fois supérieure au champ magnétique terrestre.

Concernant les expositions professionnelles, certaines applications industrielles utilisent des courants continus qui induisent des expositions significatives aux champs magnétostatiques de l'ordre de quelques mT à 50 mT. C'est le cas dans l'industrie électrochimique (production d'aluminium ou de chlore par exemple) ou de fabrication de matériaux magnétiques utilisant le phénomène d'électrolyse. La mise en œuvre de soudage au gaz (soudage à l'arc) s'accompagne d'un champ d'environ 5 mT à 1 cm des câbles de soudure, de même qu'auprès des générateurs supraconducteurs, dont les équipements de résonance magnétique nucléaire, auprès des accélérateurs de particules ou encore des unités de séparation d'isotopes.

---

2. Les réseaux électriques anglais et français fonctionnent en courant alternatif à la fréquence de 50 Hz, mais la transmission entre les deux pays se fait en courant continu par des câbles sur 73 km dont 46 km sous-marins. De part et d'autre, deux stations de conversion du courant alternatif/courant continu sont situées dans chaque pays. Côté France, l'interconnexion France-Angleterre (IFA2000) a lieu au poste RTE des Mandarins près de Calais.

3. Un train à sustentation magnétique a été mis en service à Shanghai en 2004, un autre est prévu au Japon aux alentours de 2025, mais le coût et les contraintes occasionnées par ce moyen de transport font qu'il reste peu développé.

## Cas de la technique d'IRM

La résonance magnétique nucléaire (RMN) permet de distinguer sélectivement des signaux provenant de certains atomes du fait du comportement magnétique de leur noyau. Pour cela, ils sont placés dans un champ magnétique très intense ( $B_0$ ) et soumis à une onde électromagnétique dont la fréquence est spécifique pour l'atome étudié (fréquence dite « de Larmor »). Une fois la perturbation électromagnétique arrêtée, l'atome émet en retour une onde électromagnétique.

Selon l'analyse de ces signaux et le noyau atomique considéré, la technique donne lieu à des spectres de résonance, on parle alors de spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (SRM), ou bien à des images, on parle alors d'imagerie par résonance magnétique (IRM) qui en est l'application la plus connue, apparue dans les années 1980. L'appareil est parfois appelé « scanner RMN », mais, contrairement au scanner, il n'utilise pas, ni n'émet de rayons X. Cette technique permet d'obtenir des images en deux ou trois dimensions (2D, 3D) d'une partie du corps, notamment des images du cerveau avec une haute résolution spatiale ( $1\text{-}3\text{ mm}^3$ ) et temporelle (1-2 s). Les aimants le plus souvent utilisés aujourd'hui dans les centres d'imagerie médicale sont de 1,5 T, parfois de 3 T dans lesquels les patients sont exposés durant un temps limité ( $< 1\text{ h}$ ). Cette augmentation de la valeur du champ va de pair avec une amélioration de la résolution des images et la possibilité d'observer des volumes de plus en plus petits. Les champs utilisés pour la recherche sont plus élevés, pouvant maintenant dépasser 10 T pour l'imagerie<sup>4</sup> et même 20 T pour la spectroscopie. À l'extérieur de l'aimant, le champ est moins fort. Il en résulte une exposition des opérateurs et du personnel médical qui peut dépasser localement 1,5 T à proximité de l'aimant lors de la manipulation des patients ou d'une intervention, tandis qu'ils peuvent être exposés à des champs statiques de l'ordre de 0,2 à 0,5 T à la console de commande durant des temps longs.

Pour comprendre d'où vient le signal RMN, rappelons qu'un atome se compose d'un noyau autour duquel gravitent des électrons. Le noyau est constitué de nucléons (neutrons et protons chargés positivement). Celui d'hydrogène est constitué d'un seul proton. Il est animé d'un mouvement autour d'un axe de rotation et l'une de ses caractéristiques est d'avoir un moment magnétique de spin\*. Ce dernier peut être représenté schématiquement comme un petit barreau aimanté qui peut prendre n'importe quelle orientation hors d'un champ magnétique. Tous les noyaux ne sont pas observables et seuls ceux

---

4. Par exemple, un IRM à haut champ est en cours d'installation au centre de recherches sur le cerveau Neurospin (CEA Saclay). Ce système génère 11,7 T, soit 234 000 fois le champ terrestre. Avec l'augmentation du champ, des difficultés techniques doivent être surmontées. Outre un abaissement en température supplémentaire du supraconducteur (de  $-269\text{ °C}$  à  $-271\text{ °C}$ ), il est aussi nécessaire de s'opposer à la tendance de l'instrument à s'effondrer sur lui-même (collapser), sous l'effet de son propre champ magnétique ou encore de s'assurer que le bruit y soit supportable pour les oreilles des patients.

qui ont un spin peuvent être orientés dans le champ magnétique. C'est le cas pour certains isotopes tels que le carbone 13, le phosphore 31, l'azote 15, l'oxygène 17 ou encore le fluor 19, pour les plus utilisés en RMN. L'IRM utilise la résonance de l'hydrogène qui est présent en grande quantité dans l'organisme, notamment dans la molécule d'eau ( $H_2O$ ), constituant majeur du corps humain ( $\approx 60\%$ ), ce qui explique que la technique concerne avant tout les tissus mous.

Concrètement et très schématiquement, la technique de RMN est fondée sur l'utilisation d'un champ statique ( $B_0$ ) permanent très intense, généré par des bobines supraconductrices refroidies par de l'hélium liquide dans une première enveloppe étanche, elle-même entourée d'azote liquide<sup>5</sup>. Pour obtenir un signal, les aimantations nucléaires orientées par le champ magnétique statique sont soumises à un champ électromagnétique RF pour les orienter différemment durant un temps court (impulsions). La fréquence de résonance permettant cet effet est spécifique du noyau considéré. Dès l'arrêt de cette exposition RF, le retour des spins à leur état d'équilibre dans le champ statique produit un courant induit qui est capté en retour par les antennes de la chaîne d'acquisition, puis traité. Ce signal de résonance dépend aussi de l'environnement du noyau dans une molécule et, du point de vue quantitatif, son intensité est proportionnelle au nombre de noyaux concernés.

Afin d'obtenir une image IRM, des bobines de gradient produisent des champs magnétiques qui s'additionnent et se retranchent à  $B_0$ . Elles sont responsables d'une variation graduelle rapide du champ magnétique dans l'espace et permettent le codage spatial de l'image. Il faut deux bobines pour produire un gradient de champ magnétique. Ainsi, l'appareil possède trois paires de bobines, une pour chaque direction de l'espace. Les plus récents sont capables de varier à une vitesse de 200 T/m.s, permettant de passer de zéro au maximum en 200  $\mu$ s. Chaque impulsion électrique dans les bobines entraîne une vibration à l'origine du bruit caractéristique de fonctionnement de l'appareil. L'exposition au gradient de champ magnétique est spécifique de la technique d'IRM, elle n'a lieu que lors de l'acquisition d'image.

C'est durant cette phase que l'exposition à des RF pulsées a lieu à une fréquence comprise entre 10 et 400 MHz selon le cas (voir chapitre « Les communications sans fil et les radiofréquences »). Celle-ci peut entraîner une élévation de la température (effet « four à micro-ondes ») qui doit être limitée à 1 °C dans des régions localisées du corps ou dans l'organisme entier. Dans un avis sur les examens par résonance magnétique publié en 2004, l'ICNIRP précise que, dans le cas de femmes enceintes, d'enfants ou de personnes ayant des problèmes cardio-vasculaires, chez lesquels les mécanismes thermorégulateurs sont moins efficaces, il est recommandé de veiller à ne pas dépasser une augmentation de température de 0,5 °C.

---

5. L'ensemble constitue le tunnel.

Le spectre des fréquences utilisées en IRM est récapitulé dans le tableau I.

**Tableau I** – Spectre des fréquences utilisées en IRM.

<i>Champ magnétique statique</i>	<i>Gradients de champ magnétique</i>	<i>Champ électromagnétique radiofréquence</i>
0 Hz	100-1 000 Hz	10-400 MHz

Une variante de la technique, l'IRM fonctionnelle (IRMf) utilise en outre les caractéristiques paramagnétiques\* de la déoxyhémoglobine\* pour repérer les zones d'activité du cerveau. En effet, le métabolisme neuronal est dépendant des apports sanguins en oxygène. L'activité neuronale provoque une augmentation de la consommation en oxygène et une augmentation encore plus importante du débit sanguin local (couplage neurovasculaire). L'activation neuronale se traduit alors par une augmentation relative en oxyhémoglobine par rapport à la déoxyhémoglobine dans les zones activées. Cette baisse relative de la concentration en déoxyhémoglobine, utilisée comme agent de contraste endogène, entraîne une faible variation du signal détectable en IRM. C'est le principe du contraste BOLD (blood oxygenation level dependent). Ainsi, il est possible de superposer à l'image IRM une cartographie des zones actives du cerveau dans différentes situations.

De nos jours se développe également l'IRM interventionnelle qui complète le panel des techniques de neuronavigation, au cours de laquelle des interventions sont pratiquées selon un mode peu invasif, avec un suivi en temps réel. Avec cette technique apparaissent également de nouvelles formes d'exposition du personnel qui opère à proximité de l'appareil.

Par ailleurs, il est possible d'obtenir des images du système cardio-vasculaire. Il s'agit alors d'angiographie\* par résonance magnétique nucléaire (ARM) appelée encore angiographie IRM.

Il existe encore bien d'autres applications de l'IRM dans différents domaines, telles que l'IRM de diffusion (qui permet le tracé de fibre), l'IRM de la graisse (avec une image de l'eau, une image de la graisse), l'IRM de l'élasticité (élastographie par IRM), etc.

## Mesures et dosimétrie

Pour analyser les effets biologiques lors d'études *in vitro*\*, *in vivo*\* ou sur les humains, il est nécessaire de connaître au mieux quels sont les paramètres d'exposition pouvant influencer et d'en définir la valeur le plus précisément possible. En plus des mesures directes du champ avec des sondes appropriées, des simulations numériques permettent de caractériser les champs électrostatique et magnétostatique à l'aide de modèles. Cependant, il n'est pas toujours aisé de connaître le niveau de champ, et cela peut induire des biais dans les résultats des études.

## Interactions avec le vivant

### Interactions du champ électrique statique avec le vivant

Le seuil de perception du champ électrique chez le rongeur semble se situer autour de 20 kV/m. Certaines espèces de poissons sont nettement plus sensibles ; la vive utilise pour s'orienter un champ électrique très faible de l'ordre de 500 nV/m. Les requins possèdent un organe spécial, l'ampoule de Lorenzini, qui leur permet de détecter aussi bien les champs émis par d'autres poissons que le champ terrestre.

Le comportement de rongeurs, sous un champ atteignant 12 kV/m, ne fait apparaître aucun trouble. Les variations observées au cours de précédentes études, qui montraient des perturbations de l'électroencéphalogramme\* chez le rat, semblent être le fait du bruit produit par le générateur de champ. Aucune modification de la concentration intracérébrale de divers neurotransmetteurs n'a été trouvée en exposant, par exemple, des rats mâles à un champ de 3 kV/m.

Aucune variation des paramètres hématologiques et biochimiques n'a été observée ni chez la souris après exposition à un champ de 340 kV/m pendant 32 semaines, ni chez le rat après exposition à des champs variant entre 2,8 et 19,7 kV/m.

Enfin, en ce qui concerne la reproduction et le développement, une exposition de souris gestantes, puis de leur portée, à un champ de 340 kV/m, n'a entraîné aucune différence chez les descendants par rapport aux témoins.

### Interactions du champ magnétique statique avec le vivant

#### *Mécanismes en jeu*

Trois types d'interactions du champ magnétique statique avec la matière vivante ont été démontrés : l'induction magnétique, les interactions magnétomécaniques et les interactions électroniques.

De façon générale, les possibilités d'interactions avec l'organisme augmentent avec l'intensité du champ.

*L'induction magnétique* dérive elle-même de deux sortes de phénomènes :

- les *interactions électrodynamiques* (ou magnétohydrodynamiques) avec les particules chargées en mouvement, entraînant un courant et un champ électrique induit. En effet, tout comme le champ magnétique résulte du mouvement de charges électriques (courant électrique), le champ magnétique exerce une force physique sur les charges électriques en mouvement (force de Laplace-Lorentz). Cette interaction se traduit par un

changement de direction des charges sans changement de vitesse, qui peut néanmoins se traduire chez l'homme ou l'animal par une diminution de l'écoulement du sang. Jusqu'à 8 T, elle n'apparaît pas susceptible d'affecter le fonctionnement cardiaque. Au-delà, aucune étude expérimentale\* n'a été publiée. D'après des calculs théoriques, cette diminution pourrait être de 10 % dans l'aorte en présence d'un champ de 10 T ;

- *les champs et les courants électriques induits* créés par les champs magnétiques varient dans le temps comme ceux pouvant être rencontrés dans les gradients de champs en IRM ou bien aussi par le mouvement de la matière dans un champ statique. De fait, l'amplitude des champs électriques et des courants induits augmente avec celle du gradient et avec la vitesse du déplacement. Des calculs suggèrent qu'ils peuvent devenir importants pour des mouvements normaux d'un individu dans un champ statique de l'ordre de 2-3 T. Ils sont à l'origine de vertiges, de nausées et de magnétosphènes\* rapportés par des patients ou des volontaires en mouvement dans de tels champs. Des champs électriques de surface de 0,015 à 0,3 V/m ont pu être mesurés dans la partie haute du corps pour un sujet qui marche et tourne à côté d'un imageur 3 T tandis qu'à l'intérieur d'un aimant de 4 T des auteurs ont estimé qu'un champ électrique maximal de 2 V/m pouvait être induit.

*Les effets magnétomécaniques* sont de deux sortes :

- *la magnéto-orientation* concerne les molécules paramagnétiques qui se trouvent orientées dans le champ statique. Les forces en jeu sont considérées comme trop faibles pour affecter la matière vivante qui présente une très faible susceptibilité magnétique. Cependant cet effet est impliqué dans la magnétoréception chez certaines espèces d'oiseaux ou de poissons. Expérimentalement, une réorientation de structures qui se mettent en place lors de la division cellulaire (fuseau mitotique\*) a été observée dans des embryons de grenouille soumis à un champ magnétique statique très intense ( $> 17$  T) ;
- *la translation magnétomécanique* a lieu en présence d'un gradient de champ pour des matériaux paramagnétiques ou diamagnétiques\* pour lesquels la direction de la force est respectivement identique ou opposée à celle du gradient. Cet effet, particulièrement important dans le cas de matériaux ferromagnétiques, qui présentent une forte susceptibilité magnétique, est responsable de leur accélération violente. Cette force est proportionnelle au produit de la densité de flux magnétique ( $B$ , en tesla) par son gradient ( $dB/dx$ ). En 1994, des auteurs ont montré un effet sur la répartition d'un volume d'eau placé dans un aimant de 8 T avec un gradient de 50 T/m. En 2000, une réduction de flux sanguin a été observée sur des rats entièrement exposés à 8 T. En 2005, d'autres mesures réalisées sur de l'eau font état d'une pression s'exerçant de l'intérieur vers l'extérieur d'un aimant de 10 T, néanmoins insuffisante pour affecter la circulation sanguine humaine d'après les auteurs.

### *L'interaction de spin électronique*

Les effets sur les états de spins électroniques des intermédiaires réactionnels peuvent jouer sur la vitesse de recombinaison des paires de radicaux libres dont les électrons sont non appariés transitoirement au cours de certaines réactions métaboliques. Ce mécanisme semble être mis en jeu dans les moyens de navigation de certains oiseaux.

Pour l'IRM, en plus des effets liés aux champs statiques : les interactions ondes-matière connues dans la gamme des RF entraînent un échauffement des tissus à la suite de l'absorption d'énergie par la matière. Cet effet a lieu lorsque le système de thermorégulation du corps n'est plus en mesure de dissiper la chaleur par le biais de la circulation sanguine et de la transpiration, ce qui implique une limitation de la puissance émise.

### *Effets biologiques*

#### *Études in vitro*

Des études ont été réalisées sur les cellules animales et des bactéries\*, ou sur des systèmes élémentaires (membranes, enzymes isolées) pour examiner l'influence de l'exposition sur les grandes fonctions cellulaires, l'expression génique\* et l'intégrité du matériel génétique (ADN\*). Pour une gamme de densité de flux allant jusqu'à 8 T, des résultats positifs ou négatifs ont été obtenus sans grande cohérence lorsque des effets sont observés, et pas forcément corrélés avec l'intensité du champ. Ils sont rarement reproduits et aucun effet n'a été clairement établi. Le résultat le plus consistant serait l'effet observé en 2002 sur le fuseau mitotique cité précédemment qui avait déjà été décrit en 1998 par une autre équipe. Les résultats n'indiquent pas non plus d'effet mutagène\* qui aurait pu être la conséquence d'une perturbation des flux de radicaux libres. Peu d'études concernent les effets sur l'ADN (génotoxiques), elles ne montrent pas d'effet jusqu'à 9 T sauf une étude où le système de réparation est apparu déficient. Au-dessus de 1 T, un effet sur l'orientation des cellules est observé systématiquement, la signification d'un tel effet *in vivo* n'étant pas établie.

#### *Études in vivo chez l'animal*

De nombreuses études ont été conduites chez l'animal. Chez le rat, des expériences ont mis en évidence une aversion à partir d'une densité de flux de l'ordre de 4 T qui proviendrait d'une interaction avec l'appareil vestibulaire\*. Il n'y a pas de preuve d'un effet sur le comportement ou la mémoire à 2 T, ni d'effet sur l'excitation électrique des tissus nerveux.

En revanche, l'induction de courants par effet Hall, due à la circulation sanguine dans le système vasculaire et autour du cœur, a été mise en évidence pour des expositions entre 0,1 et 2 T durant de quelques heures à plusieurs jours selon les études. Ceux-ci se traduisent par une modification de l'électrocardiogramme\* (ECG). Des résultats similaires

ont été obtenus pour différents modèles animaux et chez l'homme, sans que le flux, la pression sanguine ou le rythme cardiaque ne s'en trouve altéré. Les expériences conduites sur des volontaires n'ont pas mis en évidence de conséquences sur la santé. Des porcs soumis plusieurs heures à une densité de flux de 8 T n'ont pas subi non plus d'altération des fonctions cardiaques. D'autres travaux ont mis en évidence des effets sur différents paramètres cardio-vasculaires chez des rongeurs (pression sanguine, microcirculation périphérique, etc.). Sans réplification indépendante de ces études, il n'est pas possible de conclure, car d'autres facteurs, comme l'anesthésie, pourraient également influencer sur ces paramètres.

Les études sur la reproduction ou le développement fœtal n'ont pas mis en évidence d'effets des champs statiques jusqu'à 6,3 T, dans les conditions testées.

Il y a eu quelques travaux de recherche concernant les effets génotoxiques ou cancérogènes, directs ou de promotion (associés à d'autres facteurs cancérogènes) et sur le système hormonal, sur l'hématopoïèse\*. Ils n'apportent pas de preuve d'un effet potentiellement néfaste pour la santé.

En ce qui concerne les mécanismes de la magnéto-réception chez les animaux, deux types moléculaires sensibles au champ magnétique sont impliqués : la magnétite\* et des réactions radicalaires faisant intervenir des cryptochromes\*. Des études ont montré qu'une action combinée du champ magnétique terrestre et de la lumière, à des longueurs d'onde spécifiques (certaines couleurs), est décisive pour le choix de la direction à prendre. Chez l'homme, bien que des molécules de magnétite et de cryptochromes aient été détectées dans quelques tissus, aucune aptitude à la magnéto-réception n'a pu être mise en évidence.

#### *Effets biologiques chez l'humain (IRM)*

Il s'agit essentiellement d'exposition à des appareils de RMN et d'IRM. Un suivi détaillé des paramètres physiologiques\* a été fait (température, respiration, oxygénation, fréquence cardiaque, etc.) en présence d'un champ magnétique jusqu'à 9,4 T.

Les effets des courants induits cités précédemment ne permettent plus d'interpréter l'ECG au-delà de 8 T mais la fréquence cardiaque n'est pas affectée, tandis que la pression systolique (le chiffre haut de la tension) augmente de 4 % au maximum. C'est le seul effet physiologique observé. Il s'explique logiquement par un phénomène de résistance aux effets magnétohydrodynamiques cités précédemment. Toutefois d'autres auteurs n'ont pas observé cet effet à 9,4 T dans des conditions d'acquisition d'images IRM (avec gradient de champ et RF).

De nombreux paramètres neurologiques ont été testés jusqu'à 8 T. Aucun effet n'a été observé notamment sur la mémoire à court terme, la parole, le temps de réaction audiomoteur. En revanche, au voisinage d'un aimant (0,5 ; 1,6 et 7 T) des effets négatifs sur la coordination yeux-main, la perception du contraste ou la poursuite visuelle ont



été constatés par suite de la variation du champ dans le temps (par exemple de 0,3 T à 1,6 T/s) lors de mouvements de la tête.

En exposition de courte durée (aiguë), les courants induits sont à l'origine de perturbations de l'électrorétinogramme\* observées dès 1,5 T. Des magnétosphènes peuvent apparaître à partir de 2-3 T ainsi que des manifestations générales comme un goût métallique dans la bouche et une sensation de vertige ou de nausée. Ces symptômes disparaissent à l'arrêt de l'exposition. Leur sévérité peut être réduite en diminuant la vitesse des mouvements ; ils peuvent être intenses si le sujet se trouve dans la cavité de l'aimant. Néanmoins, ils ne sont pas systématiques et révéleraient des différences de susceptibilité magnétique en accord avec les caractéristiques différentes de l'organe vestibulaire\* selon les individus. Il n'y a pas de répercussions sur les performances cognitives.

#### *Études épidémiologiques*

Elles concernent des expositions longues en milieu professionnel. Plusieurs études ont été conduites dans l'industrie de l'aluminium ou du chlore sans apporter de preuve d'une modification d'incidence des cancers due au champ magnétique (à plusieurs dizaines de mT). Notons que les facteurs d'exposition des sujets sont multiples dans ce type d'activité, notamment du fait de l'utilisation de produits chimiques.

D'autres effets sanitaires ont été étudiés, notamment une étude en 1993 qui s'est intéressée aux effets d'un champ de l'ordre de 1 T sur la fertilité et la grossesse chez des femmes opératrices en IRM. Les auteurs ont relevé quelques différences statistiquement significatives avec les femmes au foyer, mais pas lorsque la comparaison est faite avec des femmes travaillant dans d'autres secteurs d'activité, non exposées au champ magnétique statique.

Dans l'ensemble, les études épidémiologiques n'indiquent pas l'existence d'un risque important, mais ne permettent pas de mettre en évidence des effets faibles, car elles portent sur peu de cas et présentent des limitations méthodologiques.

## **Interactions avec les implants médicaux**

Compte tenu du phénomène d'aimantation, les implants passifs ferromagnétiques tels que clips vasculaires, agrafes, valves cardiaques, prothèses odontologiques métalliques mobiles, implants dentaires, implants auditifs ou orthopédiques, etc., ou tout autre objet contenant un métal ferromagnétique (fragment de projectile...) sont susceptibles d'être déplacés dans le champ magnétique, selon sa force. Une liste des matériaux compatibles est régulièrement mise à jour.

Les implants actifs du type stimulateur cardiaque (pacemaker), défibrillateur cardiaque ou neurostimulateur, ou tout autre implant électronique peuvent être perturbés ou endommagés par un champ magnétique intense.

En IRM, les implants ou électrodes implantées (pour électroencéphalogramme par exemple), pourraient en plus subir un échauffement excessif par interaction avec les ondes RF.

Compte tenu de l'usage de plus en plus courant de cette technique d'investigation, de nombreux porteurs de pacemakers peuvent être amenés à subir un tel examen. Des implants compatibles sont aujourd'hui commercialisés.

En outre, durant l'examen IRM, il convient d'éviter :

- la présence, à proximité de l'aimant, de matériaux ferromagnétiques qui pourraient être violemment attirés et devenir des projectiles dangereux ;
- les maquillages ou tatouages contenant des ions métalliques, qui peuvent créer des artefacts localement sur les images ;
- les bijoux et tous accessoires métalliques qui peuvent concentrer les champs électromagnétiques et induire des brûlures.

De façon générale, l'accès en zone proche des aimants IRM et RMN est réglementé pour les porteurs d'implants passifs et actifs. L'avis d'un médecin est indispensable avant tout examen. Par ailleurs, en dehors du risque sanitaire potentiel, la présence de l'implant peut entraîner un artefact de l'image.

## Valeurs d'exposition, normalisation et recommandations

Les limites d'exposition au champ magnétique statique proposées par l'ICNIRP en 1994 pour les travailleurs et les personnes du public ont été révisées en 2009.

Pour les expositions professionnelles, elles visent essentiellement à prévenir l'apparition de vertiges, nausées et autres sensations décrites précédemment. Les valeurs d'exposition aiguës sont respectivement de 2 et 8 T pour la tête et les membres. Il n'y a pas eu à ce jour d'expérimentation à des niveaux de champ plus élevés sur laquelle pourraient être fondées des limites éventuellement plus élevées.

Pour la population générale, la limite est fixée à 400 mT, fondée sur les effets biologiques directement dus à l'exposition au champ magnétique. Les personnes du public peuvent être autorisées à pénétrer occasionnellement, dans des conditions bien contrôlées, dans des zones où le champ magnétique statique dépasse les limites. Néanmoins, les personnes portant des stimulateurs cardiaques, d'autres appareils électroniques ou des implants ferromagnétiques peuvent ne pas être suffisamment protégées par ces limites. Des accidents peuvent également survenir à cause du mouvement d'objets attirés par

l'aimant (effet missile). Du fait de ces effets indirects, il est recommandé que les zones où la densité de flux magnétique dépasse 0,5 mT soient signalées par des lignes rouges et des panneaux appropriés<sup>6</sup>.

En revanche, la limite d'exposition moyenne pondérée sur une journée a été supprimée, car l'état des connaissances indique l'existence d'effets aigus dans certaines conditions alors que l'absence d'effet cumulatif est désormais admise. Globalement, les nouvelles limites préconisées sont moins restrictives (tableau II).

**Tableau II** – Limites d'exposition au champ magnétique statique.

<i>Type d'exposition</i>	<i>Induction magnétique, valeurs limites</i>	
	<i>ICNIRP 1994</i>	<i>ICNIRP 2009</i>
<i>Exposition professionnelle</i> – 8 h/j (en moyenne) – Tête et tronc – Membres	200 mT 2 T 5 T	2 T* 8 T
<i>Personnes du public</i> – Toute partie du corps	40 mT	400 mT

\*occasionnellement possible jusqu'à 8 T dans des conditions contrôlées pour un personnel volontaire et informé des sensations possibles.

Notons qu'une directive européenne 2004/40/CE relative à l'exposition des travailleurs et visant à limiter l'exposition de ceux-ci aux champs électromagnétiques jusqu'à 300 GHz a été adoptée en 2004, fondée sur les recommandations de l'ICNIRP en 1994. Son application s'est révélée incompatible avec certains examens IRM au cours desquels les niveaux d'exposition peuvent dépasser les limites autorisées, ainsi qu'avec les perspectives de recherches dans le domaine. Risquant en plus de favoriser une réorientation des patients vers des techniques d'investigations plus invasives, ce texte fait l'objet d'une révision pour définir des normes pertinentes sans être inutilement restrictives. Sa mise en application est reportée à 2012. Par ailleurs, il n'y a pas de raison objective pour écarter d'une activité normale les femmes enceintes qui travaillent dans les unités IRM.

En 2004, l'ICNIRP a publié des recommandations pour l'IRM, relatives à l'exposition des patients ou des volontaires (pour la recherche). Ce document s'appuie sur une revue de la littérature plus spécifique des types d'expositions rencontrés lors d'un examen IRM, pour faire état de consignes de sécurité appliquées dans les centres d'imagerie médicale. Le document stipule que les conditions d'exposition peuvent être, si nécessaire, poussées

6. Recommandation qui ne relève pas de l'ICNIRP, mais de la commission internationale pour la sécurité des équipements (International Electrotechnical Commission (2002). Safety of magnetic resonance equipment for medical diagnosis. Geneva: Switzerland: IEC; IEC 60601-2-33).

à l'extrême selon l'estimation de la balance bénéfice-risque pour le patient. Cette dernière sera également considérée avec attention dans le cas des femmes enceintes, notamment en début de grossesse, pour lesquelles, toutefois, les données obtenues chez l'humain n'indiquent pas à ce jour d'effet délétère justifiant de contre-indication à l'examen IRM.

## Conclusion

Les effets biologiques des champs électriques et magnétiques statiques ont été relativement peu étudiés, si on compare les données disponibles avec celles concernant les champs de 50/60 Hz. Ils sont rarement rencontrés à niveau élevé dans l'environnement. Le champ magnétique est utile pour l'orientation de certains animaux et même de l'homme muni d'une boussole.

Pour l'IRM, aucun effet sanitaire important n'a été démontré à ce jour, que ce soit pour les patients ou le personnel technique. Lors de l'exposition, des effets liés aux gradients de champ magnétique et au mouvement dans le champ peuvent se produire de manière transitoire. Aucune conséquence irréversible ou sérieuse sur la santé liée à ces effets n'a été mise en évidence. Ils sont parfois désagréables, mais n'ont pas lieu chez tous les individus.

En revanche, une grande prudence est de rigueur pour les porteurs d'implants contenant du métal et pour tout autre effet indirect dû à l'attraction violente d'objets métalliques par l'aimant supraconducteur.

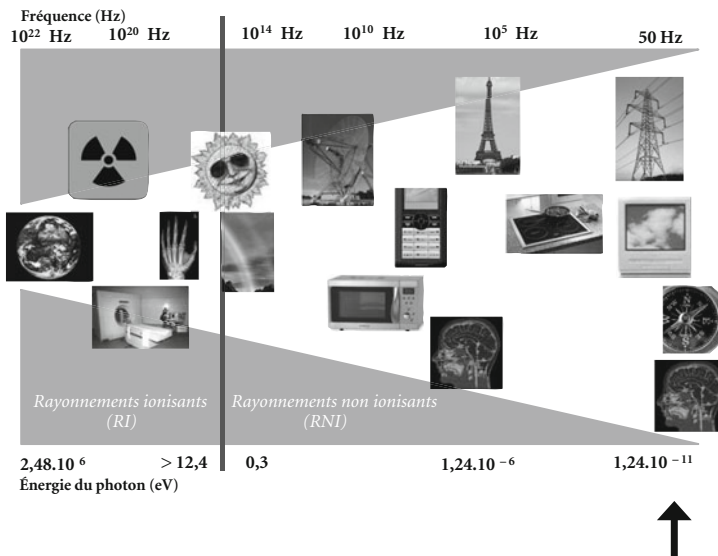
## Pour en savoir plus

- OMS (2006) Static Fields Environmental Health Criteria Monograph n° 232: <http://www.who.int/peh-emf/publications/reports/ehcstatic/en/index.html>
- OMS (2006) Aide-mémoire n° 299, Champs électromagnétiques et santé publique, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs299/fr/index.html>
- The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (2004) Medical Magnetic Resonance (MR) procedures : protection of patients, Health Physics, vol. 87, n° 2, 197-216: <http://www.icnirp.org/documents/MR2004.pdf>
- The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (2009) Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields, Health Physics, vol. 96, n° 4, 504-14: <http://www.icnirp.org/documents/MR2009.pdf>
- Brugère H. (2009) Comment les animaux perçoivent les champs magnétiques, Science et pseudo-science, n° 285, 25-31 : <http://www.pseudo-sciences.org/spip.php?article1154>
- IMRSEr, Institute for magnetic resonance, safety, education and research, <http://www.imrser.org/>



# L'électrochimiothérapie et les impulsions électriques

L. M. Mir



## Introduction

Dès la plus haute Antiquité, les effets biologiques et potentiellement thérapeutiques des impulsions électriques étaient mis à profit pour traiter certaines pathologies. Ainsi des bas-reliefs des murs de la tombe de Ti à Saqqarah, en Egypte, datant de 2750 avant J.-C. environ, nous rapportent le traitement d'une personne par exposition à des décharges électriques d'un poisson-chat électrique du Nil. Au milieu du 1<sup>er</sup> siècle de notre ère, Scribonius Largus traitait des malades souffrant de maux de tête ou de goutte en laissant se décharger une raie marbrée (*Torpedo marmorata*) sur le front du patient (maux de tête) ou sous ses pieds (goutte). Dès la découverte de l'électricité et de la capacité de l'homme à la maîtriser, Galvani montrait en 1791 que les impulsions électriques permettaient de provoquer la contraction des muscles. Depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, de très nombreuses applications biomédicales des impulsions électriques ont été développées.

## Rappels physiques

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser exclusivement à des impulsions de courant continu, qu'elles soient monopolaires (fig. 1A) ou bipolaires, et dans ce dernier cas, qu'elles soient symétriques (fig. 1B) ou asymétriques (fig. 1C) suivant que la partie positive et la partie négative ont ou n'ont pas la même forme et la même amplitude. Dès lors, le terme « fréquence » ne correspond plus à la fréquence d'une onde sinusoïdale (qui classiquement permet de définir et de caractériser un champ électromagnétique), mais à la fréquence de répétition des impulsions, car en général les impulsions sont de courte durée individuelle, mais répétées. Néanmoins, certains des effets de ces impulsions de courant continu peuvent être reproduits lorsqu'une porteuse électromagnétique à haute fréquence est délivrée de façon impulsionnelle, avec une basse fréquence de répétition de ces impulsions (fig. 1D).

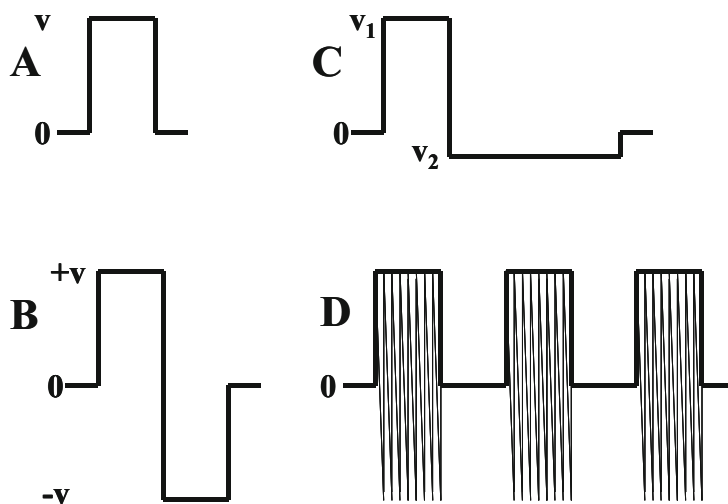


Fig. 1 – Représentation schématique des impulsions de courant continu.

## Sources naturelles et artificielles

Dans la nature, la foudre est une source bien connue d'impulsions électriques de très forte puissance. Des décharges électriques peuvent également être produites par les organes électriques de certains poissons. L'anguille électrique (*Electrophorus electricus*)

possède plusieurs organes électriques. Ce poisson (qui n'appartient pas à la famille des anguilles et qui peut atteindre jusqu'à 2,5 m de long et peser 20 kg) utilise l'organe électrique de Sachs comme source de communication entre poissons de cette espèce, comme instrument d'orientation et comme appareil pour localiser des proies (avec des signaux pulsatiles d'environ 10 V). Une fois la proie localisée, elle utilise les organes électriques de Main et Hunters (capables de délivrer une tension atteignant 650 V) pour étourdir cette proie et pouvoir l'avalier. Ces deux organes électriques servent aussi à la défense de l'anguille électrique face à ses prédateurs. Les poissons-chats électriques (genre *Malapterurus*), qui ont aussi de très petits yeux, sont capables de délivrer différents types de salves de décharges par leur organe électrique, pour leur défense propre ou celle de leur territoire, la détection des proies, la prédation (alimentation), ou la reconnaissance intraspécifique. Ces décharges peuvent atteindre 350 V.

Concernant les sources artificielles, il y a une myriade de générateurs d'impulsions électriques pour les laboratoires de recherche, dans l'industrie alimentaire (stérilisation de produits à haute valeur ajoutée) et certainement un bon nombre pour des applications biomédicales. De nombreuses applications sont développées pour les kinésithérapeutes (relaxation, stimulation musculaire) dont la preuve de l'efficacité n'a pas toujours été apportée, notamment du fait de l'impossibilité de faire des tests en aveugle en raison de la sensation occasionnée par les impulsions. Certaines applications thérapeutiques sont détaillées dans la partie « Applications médicales » de ce chapitre.

## Interactions avec la matière

Les impulsions électriques conduisent au déplacement de charges dans les tissus biologiques (sauf pour les impulsions ultracourtes, d'une durée inférieure à 10 nanosecondes (ns), qui commencent à être utilisées dans quelques laboratoires). En effet, tous nos fluides biologiques sont conducteurs, y compris l'intérieur des cellules, constitués par des milieux aqueux avec une concentration saline stable et bien définie. Néanmoins les tissus biologiques ont aussi un comportement capacitif car les membranes des cellules (qui isolent le contenu intérieur de la cellule de l'environnement extérieur) sont des isolants électriques.

Tous les effets biologiques des impulsions électriques découlent de ce déplacement de charges. En premier lieu, le déplacement des ions conduit à l'établissement d'un courant et donc à l'échauffement du tissu biologique lié à ce courant, à cause du classique effet Joule. Ensuite, les molécules biologiques chargées vont pouvoir être transportées par ce courant, ce qui est appelé « électrophorèse ». Cela peut conduire à la ségrégation d'espèces moléculaires à la surface de la cellule, et donc à sa polarisation, les espèces chargées positivement se déplaçant vers la cathode et celles chargées négativement vers l'anode.



Néanmoins le déplacement libre des charges se heurte à la membrane des cellules : sous un champ électrique, des charges électriques de signe opposé vont s'accumuler de part et d'autre de la membrane, conduisant à l'établissement d'une différence de potentiel transmembranaire\* dite « induite » (fig. 2). La membrane se charge avec des effets qui seront décrits dans le paragraphe suivant.

Finalement, il faut aussi noter que les effets délétères n'incluent pas uniquement l'échauffement éventuellement excessif des tissus par effet Joule. Effectivement, dans le cas de l'application des impulsions électriques par des électrodes en contact direct avec les tissus, il peut y avoir des effets électrochimiques, eux aussi délétères. Ces effets incluent le relargage des ions des métaux constituant les électrodes, ainsi que l'accumulation de charges se traduisant par des changements drastiques de pH, lesquels vont provoquer la nécrose\* des tissus autour des électrodes.

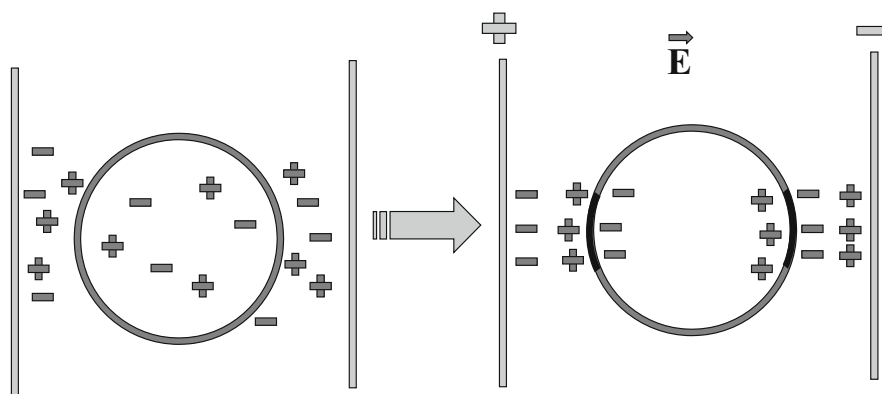


Fig. 2 – Différence de potentiel transmembranaire induite par un champ électrique.

## Interactions avec le vivant

Le lecteur doit considérer la différence entre effets biologiques, que nous pouvons mettre en évidence et utiliser dans les laboratoires, et effets sanitaires, qu'ils soient délétères ou bénéfiques, c'est-à-dire, par exemple, utilisables dans la pratique médicale.

### Effets biologiques

Les effets sont variables selon le type d'impulsion électrique.

*Effets sur des cellules en culture (in vitro)*

*Exemple de la migration des cellules :* à la surface des cellules, des protéines appelées « récepteurs de facteurs de croissance » sont déplacées avec des petits courants continus, par électrophorèse. En contrôlant la direction des impulsions électriques, nous savons alors orienter le mouvement des cellules ou diriger la croissance de prolongements cellulaires à partir du corps de la cellule (par exemple les axones des cellules nerveuses). À l'heure actuelle cet effet ne peut pas être reproduit *in vivo*\*, c'est-à-dire dans l'organisme.

*Effets sur l'organisme (in vivo)**La stimulation électrique*

Lorsque l'on expose des cellules à une ou à plusieurs impulsions électriques, l'accumulation de charges de part et d'autre de la membrane induit une différence de potentiel (champ électrique) au niveau de la membrane (on dit « transmembranaire »). L'activité métabolique des cellules provoque et maintient une différence de potentiel transmembranaire dite « de repos ». Dans les cellules excitables (neurones, muscles), c'est une variation (dite « potentiel d'action ») de cette différence de potentiel transmembranaire de repos qui est responsable de la transmission de l'influx nerveux ou de la contraction de la cellule musculaire. Donc, avec des impulsions électriques calibrées, la différence de potentiel transmembranaire induite (voir « Rappels physiques ») peut mimer le potentiel d'action et provoquer la contraction contrôlée des muscles. C'est le principe de la stimulation électrique fonctionnelle (voir « Applications thérapeutiques »).

*L'électroperméabilisation réversible*

L'effet précédent est obtenu avec des impulsions électriques de faible amplitude. Si l'intensité de champ électrique appliqué pendant l'impulsion est plus élevée (environ  $1000 \text{ V.cm}^{-1}$ ), la différence de potentiel transmembranaire atteint des valeurs telles que la membrane de la cellule ne peut plus maintenir sa structure moléculaire isolante. La membrane devient alors perméable aux molécules qui ne pouvaient pas la traverser. Pour des impulsions très courtes (de l'ordre de  $100 \mu\text{s}$ ), cette modification structurale de la membrane est réversible et ne dure que quelques minutes. La cellule a pu, entre-temps, internaliser (ou au contraire externaliser) des molécules qui normalement ne traversent pas la membrane par diffusion.

Cette électroperméabilisation (que l'on appelle aussi « électroporation »\*) peut être mise à profit pour faire rentrer dans la cellule des molécules d'intérêt thérapeutique, comme cela sera développé dans le paragraphe suivant.

*L'électroporation irréversible*

Si l'on augmente le nombre des impulsions électriques et l'amplitude des impulsions, les changements de structure de la membrane seront plus intenses et au-delà d'un certain

seuil, irréversibles : la cellule va alors mourir. Cela peut être un effet indésirable, mais c'est aussi une méthode en cours de développement pour provoquer, de façon maîtrisée, l'ablation sélective de certaines cellules de l'organisme comme les cellules cancéreuses. Ce procédé antitumoral étant non thermique, c'est-à-dire obtenu sans élévation de la température du tissu, il présente alors des avantages certains par rapport à l'ablathermie par radiofréquences\* ou à la cryothérapie.

#### *La nanoporation*

Il est aussi possible de modifier les propriétés des membranes avec des impulsions ultra-courtes d'une durée unitaire de quelques nanosecondes et une amplitude de champ électrique de 20 à 200 kV/cm. Il est très intéressant de signaler qu'avec ces impulsions électriques sont affectées, non seulement la membrane plasmique\* (comme avec les impulsions d'une durée d'une ou de quelques dizaines/centaines de microsecondes), mais aussi les membranes internes des cellules. Il est possible alors de perméabiliser les réservoirs de calcium du réticulum endoplasmique\*, d'augmenter la concentration du calcium cytoplasmique et de provoquer l'apoptose\* des cellules en culture. Aux États-Unis, deux groupes ont récemment montré qu'il était possible de tuer des cellules *in vivo* par ce procédé, et d'obtenir ainsi des effets antitumoraux sur des lésions de mélanome\* ou d'épithélioma basocellulaire\*<sup>1</sup>, même chez l'homme.

## **Effets sanitaires**

Chez les individus atteints par la foudre, outre les brûlures superficielles, les cellules musculaires sont tuées par une électroporation irréversible, ce qui peut mettre en danger le pronostic vital. Cependant, les applications bénéfiques des impulsions électriques sont nombreuses.

## **Applications médicales**

### **La stimulation électrique fonctionnelle**

Le principe de la stimulation électrique fonctionnelle a été rappelé dans la section précédente. Par la contraction sélective des muscles qui ont été dénervés, il est alors

---

1. « Épithélioma basocellulaire » est synonyme de « carcinome basocellulaire ».

possible de provoquer des mouvements chez les patients paraplégiques ou tétraplégiques. Avec des boîtiers de stimulation pilotés par des programmes adéquats, il est même possible de provoquer des mouvements coordonnés chez ces patients, qui peuvent acquérir ainsi une certaine mobilité. Le même principe s'applique aussi pour la rééducation fonctionnelle des masses musculaires, par exemple après l'immobilisation prolongée d'un membre pour cause de fracture. Le développement de cette application résulte d'expériences aussi vieilles et connues que celles de Luigi Galvani citées dans l'introduction.

## Autres applications d'impulsions électriques de faible amplitude

Le principe de fonctionnement du stimulateur cardiaque (pacemaker) est similaire à la stimulation électrique fonctionnelle. Il en est de même pour la neurostimulation, avec des électrodes internes ou externes, qui est utilisée pour soulager la douleur. Dans le cas des systèmes internes, destinés à traiter des douleurs neuropathiques\* chroniques irréductibles ayant résisté aux autres moyens thérapeutiques, une pile et une électrode sont placées sous la peau pour envoyer au système nerveux des impulsions électriques douces et contrôlées de manière précise. Celles-ci empêchent le signal de la douleur d'atteindre le cerveau et soulagent ainsi le patient. En revanche, en ce qui concerne la correction des stigmates de la maladie de Parkinson, la stimulation d'une zone profonde du cerveau, le noyau sous-thalamique, par des impulsions électriques à haute fréquence délivrées par des électrodes intracérébrales, vise à contrôler l'hyperactivité des neurones responsables des symptômes moteurs.

## Applications d'impulsions électriques de forte amplitude

Tout le monde connaît l'utilisation des défibrillateurs (choc électrique) en cas d'arrêt cardiaque. Mais il y a aussi des applications beaucoup plus récentes d'impulsions électriques de forte amplitude. Ainsi l'électroperméabilisation des cellules a pu être maîtrisée non seulement sur les cellules en culture, mais également *in vivo*, dans les organismes vivants. Avec des impulsions rectangulaires (dites aussi carrées) dans lesquelles l'amplitude, en volts, et la durée, en microsecondes, peuvent être sélectionnées de façon indépendante, les cellules sont perméabilisées sans être tuées par des impulsions aux paramètres correctement choisis. La combinaison de cette électroperméabilisation réversible et d'agents anticancéreux non perméants (qui ne traversent pas la membrane de façon « spontanée ») a permis de développer une nouvelle approche de traitement des tumeurs solides baptisée « électrochimiothérapie »\*.

## L'électrochimiothérapie : naissance d'une nouvelle méthode thérapeutique

### *Le concept et les premiers essais cliniques*

En 1987, des chercheurs du CNRS à l'institut Gustave-Roussy (Villejuif) ont montré que la bléomycine (médicament anticancéreux) était des milliers de fois plus toxique sur les cellules électropéabilisées que sur les cellules non exposées aux impulsions électriques<sup>2</sup>. Après des premiers essais très encourageants effectués chez la souris, aussi bien sur des tumeurs transplantées que sur des tumeurs spontanées, les premiers patients traités par électrochimiothérapie virent la plupart des petits nodules cancéreux de la tête et du cou disparaître en quelques jours<sup>3</sup>.

La méthode a été reprise dans d'autres centres en France et à l'étranger, avec des résultats de plus en plus intéressants, car des nodules plus gros et d'autres pathologies furent aussi traités. Dans le cas des épithéliomas basocellulaires, l'électrochimiothérapie peut même être considérée comme curative, en compétition avec la chirurgie, car cette technique non mutilante respecte le tissu environnant. Ainsi, des épithéliomas basocellulaires localisés sur le nez, les oreilles ou les lèvres ont été traités en Floride (États-Unis), avec près de 99 % de régressions complètes sans perte de matière.

En parallèle, les recherches sur les bases du procédé ont confirmé que cela était dû à un nouveau mécanisme de pénétration du médicament dans les cellules, résultant de l'électropéabilisation de leur membrane. Ces études ont aussi montré que la bléomycine administrée de cette façon tuait sélectivement les cellules en division, et donc les cellules tumorales, respectant les cellules normales voisines environnant la tumeur. Ultérieurement, il a été montré que la toxicité d'un autre agent anticancéreux (cisplatine) était également augmentée par l'électropéabilisation de la membrane de la cellule.

### *La mise en pratique en clinique*

Un générateur d'impulsions électriques, le Cliniporator™, a été développé, validé pour un usage en clinique, et des procédures opérationnelles standards définies pour les nodules cutanés et sous-cutanés. Le traitement de patients dans plusieurs centres anticancéreux a ensuite permis de comparer l'efficacité du traitement sur des nodules de mélanome ou des nodules d'autres origines histologiques\*, avec différents types d'électrodes et avec différentes formes d'administration du médicament antitumoral. Les

---

2. Orlowski S, Belehradek Jr J, Paoletti C and Mir LM (1998) Transient electroporation of cells in culture: increase of the cytotoxicity of anticancer drugs. *Biochemical Pharmacology*, 37, 4727-33.

3. Mir LM, Belehradek M, Domenge C *et al.* (1991) L'électrochimiothérapie, un nouveau traitement antitumoral : premier essai clinique – Electrochemotherapy, a novel antitumor treatment : first clinical trial. *Compte rendu de l'Académie des Sciences, série III*, 313, 613-8.

essais cliniques en cours portent sur l'extension du traitement au-delà des localisations superficielles actuelles.

L'électrochimiothérapie est très intéressante de par sa simplicité d'application, son innocuité, et son efficacité quelle que soit l'origine histologique du nodule à traiter. Son usage est en pleine expansion en Europe.

## Applications futures

Deux autres applications fondées sur le même principe sont en cours d'investigation et de développement dans les laboratoires.

### *L'électrotransfert de gènes*

La première concerne l'électrotransfert de gènes\* pour le développement d'un système de thérapie génique. Dans ce cas, les impulsions de 100  $\mu$ s doivent être combinées à des impulsions électriques beaucoup plus longues pour avoir un déplacement des brins d'ADN vers les membranes cellulaires électroporeabilisées par les impulsions courtes.

### *L'électroporation irréversible*

La seconde application consiste en des impulsions électriques conduisant à la mort de la cellule. C'est une nouvelle approche d'ablation de tissus, en particulier des tissus cancéreux. Cependant, contrairement à l'électrochimiothérapie qui est très sélective dans ses effets entre cellule tumorale et cellule non tumorale, l'électroporation irréversible tue toutes les cellules dans le volume soumis à ces champs électriques.

## Précautions, protection

Nous nous limiterons ici au cas de l'électrochimiothérapie.

Les études précliniques et les études cliniques, en particulier l'étude ESOPE, ont permis de déterminer les paramètres des impulsions électriques les plus appropriés et les plus sûrs pour une électrochimiothérapie efficace et sans danger pour les tissus sains. Ces paramètres ont été affinés à l'aide d'études *in silico* (avec l'ordinateur comme outil) en utilisant des modèles de distribution du champ électrique dans les tissus, modèles validés à l'aide d'un nombre limité d'expérimentations animales (cela pour répondre au besoin de limiter le recours à l'expérimentation animale dans la mesure du possible). Ces modèles prennent aussi en compte la géométrie des tumeurs et des électrodes. À partir de ces informations, les valeurs optimales de la tension à utiliser ont été définies

pour chaque type d'électrode utilisé avec le Cliniporator™. Aucune norme spécifique ne permettait d'autoriser ou non les impulsions électriques utilisées dans l'électrochimiothérapie. En règle générale, seulement huit impulsions de 100  $\mu$ s et de 1 000 V/cm (électrodes invasives) ou de 1 300 V/cm (électrodes transcutanées), sont délivrées à la fréquence de répétition de 5 000 impulsions par seconde. Le rapport bénéfice sur risque très largement favorable à l'électrochimiothérapie a permis à ces valeurs, dictées par l'expérience et la théorie, de s'imposer comme référence.

## Conclusion

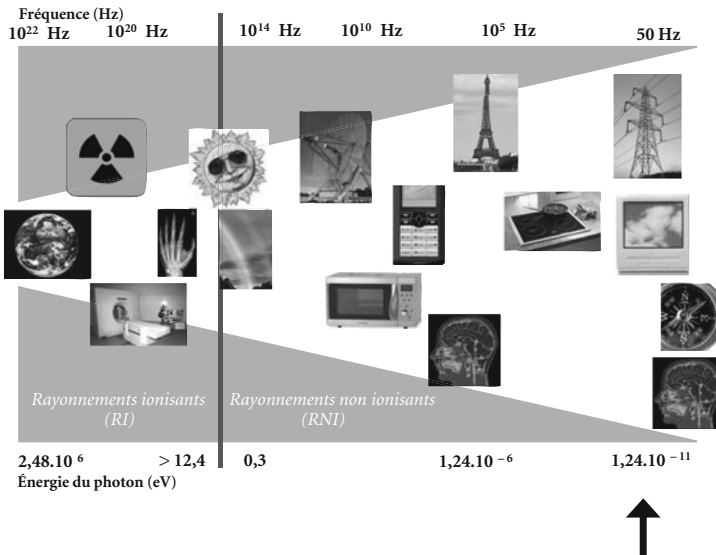
Les interactions entre les courants électriques et les impulsions électriques d'une part, les cellules et les tissus biologiques d'autre part, représentent un domaine de recherches fondamentales en expansion. D'ores et déjà, la maîtrise technologique de la génération de ces courants et impulsions électriques permet de proposer de nouvelles applications thérapeutiques, avec des risques extrêmement limités. Dans un futur proche, elles prendront encore plus d'importance.

## Pour en savoir plus

- Orłowski S, Mir LM (1998) Un nouveau traitement antitumoral : l'électrochimiothérapie. *Médecine/sciences*, 14, 1235-39.
- L'European Journal of Cancer, Supplements, novembre 2006, n° spécial « Electrochemotherapy ». Ce numéro comprend les Standard Operating Procedures (Mir LM *et al.*, EJC Suppl. 4 (11) 2006, 14-25), les résultats de l'essai clinique ESOPE (Marty M *et al.*, EJC Suppl. 4 (11) 2006, 3-13), quatre cas cliniques (tumeurs du sein, par Whelan MC *et al.*, mélanome, par Snoj M *et al.* et Gehl J *et al.*, Kaposi, par Garbay JR *et al.*), ainsi que les bases biologiques (par Mir LM), électriques (par Miklavcic D *et al.*) et historiques (par Sersa G).
- [www.cliniporator.com](http://www.cliniporator.com) ou [www.igea.it](http://www.igea.it).

# L'électricité et les champs électriques et magnétiques d'extrêmement basse fréquence

J. Lambrozo



## Introduction

Les champs électriques et magnétiques (CE&M) d'extrêmement basse fréquence<sup>1</sup> se situent entre 1 Hz et 300 Hz et font partie intégrante du spectre électromagnétique.

Il n'existe pas de source naturelle de ce type de champ. Les sources les plus communément rencontrées dans la vie quotidienne et dans les applications industrielles sont celles liées à la production, au transport et à l'utilisation de l'électricité (50 Hz en Europe, 60 Hz en Amérique du Nord et pour partie au Japon). C'est l'électricité qui a fait l'objet

1. En anglais, *extremely low frequency* : ELF.



des études que nous exposerons ici. Néanmoins, certains réseaux ferroviaires utilisent également d'autres fréquences extrêmement basses, comme en Suisse où les trains sont alimentés en 16,67 Hz.

Les effets et les risques de l'électricité chez l'homme ont rapidement été connus par la survenue d'accidents de gravité diverse. En revanche ce n'est que depuis la fin des années 1960 qu'a été posée la question des effets sur le vivant des CE&M de fréquence 50 ou 60 Hz, liés à la production, au transport et à l'utilisation du courant électrique.

L'électricité concernant tout un chacun sa vie durant, il était important de comprendre le phénomène physique, de connaître les sources et les niveaux d'exposition et de s'assurer de l'innocuité de ces champs ou d'en évaluer les effets potentiellement nocifs. Une activité de recherche exemplaire en biologie et en épidémiologie\* a été menée sur ce sujet depuis une trentaine d'années.

Après un bref rappel des principales bases physiques indispensables, nous envisagerons les données issues des études expérimentales\* et épidémiologiques avant d'en proposer une synthèse.

## **Le magnétisme avant l'électromagnétisme**

Avant même la découverte de l'électricité et de ses applications, le magnétisme avait suscité un intérêt pour ses possibilités curatives. Notamment au xvii<sup>e</sup> siècle le jésuite allemand Atanasius Kircher préconisait la guérison des maladies par cure magnétique. Mais c'est Franz-Anton Mesmer qui, au xviii<sup>e</sup> siècle, développa une théorie du magnétisme animal (« magnetisum animale »). La santé étant sous la dépendance d'un fluide universel dont la circulation serait perturbée en cas de maladie, l'usage d'un aimant pouvait permettre de rétablir la bonne circulation de ce fluide vital.

Après enquête et expérimentation conduites par une commission composée de membres de l'Académie royale des sciences et par la Société royale de médecine, il fut conclu que « l'imagination sans magnétisme produit des convulsions et le magnétisme sans imagination ne produit rien ». Le mesmérisme a connu ensuite d'autres développements comme les traitements d'Elisha Perkins, sans qu'un fondement scientifique puisse être démontré.

Pour sa part, l'« électromédecine » est devenue une discipline à part entière à travers des applications thérapeutiques prometteuses telles que les applications de l'électroporation\* permettant des chimiothérapies ciblées ou la stimulation magnétique transcrânienne.

## Les premiers repères scientifiques

Sans prétendre à l'exhaustivité, il convient de signaler quelques grandes étapes du cheminement de la recherche en électromagnétisme car elles permettent de mieux appréhender le paysage actuel.

C'est Hans Christian Oerstedt qui en 1820 relia expérimentalement l'électricité à une force magnétique en montrant que l'aiguille d'une boussole était déviée par le passage d'un courant électrique. De même, au XIX<sup>e</sup> siècle, Ampère, Coulomb, Biot, Faraday, Henry notamment se sont illustrés dans la physique des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques avant que les équations de James C. Maxwell en 1873 n'établissent le fondement quantitatif pour comprendre le rayonnement électromagnétique, équations qui sont toujours d'actualité.

## Rappels physiques

Dans cette gamme de fréquences, le champ électrique et le champ magnétique sont considérés séparément, car ils sont découplés (équations de Maxwell en régime quasi stationnaire). C'est pourquoi on parle ici de champ électrique et de champ magnétique (CE&M) plutôt que de champ électromagnétique. C'est le champ magnétique qui a été le plus étudié.

Le courant électrique génère deux types de champs du fait des charges électriques, oscillants à la même fréquence :

- un champ électrique (E) qui est proportionnel à la tension appliquée. Son intensité se mesure en volt par mètre (V/m). Il est arrêté par toutes sortes d'obstacles selon le principe de la cage de Faraday (constructions en béton armé, toiture métallique, et même constructions traditionnelles du fait de la présence de conduites métalliques de gaz ou d'eau). Il diminue rapidement quand on s'éloigne de la source ;
- un champ magnétique (H) qui est lié au déplacement des charges électriques. Comme cela est expliqué au chapitre concernant les champs électriques et magnétiques statiques, il est proportionnel à l'intensité du courant. Il se mesure en ampère par mètre, mais on utilise en fait la densité d'induction magnétique (B) suivant la relation :  $B = \mu H$ , où  $\mu$  correspond à la perméabilité absolue<sup>2</sup> du matériau ou milieu. B est exprimé en tesla (T). Par abus de langage l'induction magnétique ou densité de flux magnétique B est communément appelée « champ magnétique ». Ainsi, ce que l'on

---

2.  $\mu = \mu_0 \mu_r$ , où  $\mu_r = 1$  dans le vide, c'est la perméabilité relative (par rapport à  $\mu_0$ ) et  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  USI.

appellera « champ magnétique » dans la suite du chapitre est l'induction magnétique. Le gauss (G), qui est l'ancienne unité, continue d'être utilisé aux États-Unis.

$$\begin{aligned} 1 \text{ G} &= 10^{-4} \text{ T} \\ 1 \text{ mG} &= 0,1 \text{ } \mu\text{T} \end{aligned}$$

Comme le champ électrique, le champ magnétique diminue très rapidement quand on s'éloigne de la source. S'il s'agit d'un conducteur unique, il diminue comme l'inverse de la distance (1/d). Dans le cas des réseaux électriques, il diminue comme l'inverse du carré de la distance (1/d<sup>2</sup>). Dans le cas d'une source ponctuelle (ex. : appareil électroménager), il diminue comme l'inverse du cube de la distance (1/d<sup>3</sup>), l'intensité du champ est ici indépendante de la consommation électrique de l'appareil. Mais contrairement au champ électrique, il est peu atténué par les obstacles (excepté certains matériaux spécifiques).

### Sources artificielles

Les principales sources de champ 50 Hz sont les installations électriques : lignes de transport et de distribution, transformateurs, câbles électriques des habitations, systèmes anti-vol, appareils électroménagers (téléviseurs, grille-pain, rasoirs, etc.), appareils d'éclairage et, d'une manière générale, tout appareil produisant ou utilisant de l'électricité (alternateur de voiture, appareils de bricolage comme les perceuses, les photocopieurs, etc.).

**Tableau I** – Exemple de valeurs du champ magnétique mesurées à proximité d'appareils électroménagers.

<i>Applications domestiques</i>	<i>Champ magnétique (μT)</i>		
<i>Distance</i>	<i>3 cm</i>	<i>30 cm</i>	<i>1 m</i>
Télévision	30	2	0,1
Batteur électrique	50	1	0,05
Perceuse électrique	800	3	0,1
Rasoir électrique	1 000	6	0,2
Couverture chauffante électrique	10 à 20	3,6	
Micro-ordinateur		2	
Four à micro-ondes		1,60	
Lave-vaisselle		0,8	

Dans l’environnement professionnel, le niveau de champ magnétique est notablement plus important pour certains postes de travail (industrie de l’aluminium, soudure, électriciens travaillant au potentiel, télécommunications, chauffage par induction, etc.). Le tableau I présente quelques valeurs de champ magnétique dans les expositions quotidiennes, où il convient de tenir compte de la durée moyenne habituelle d’exposition. Le tableau II présente les valeurs habituellement rencontrées à proximité des lignes (aériennes) et des câbles (souterrains) très haute tension. Le champ électrique dépend de la tension qui ne varie pratiquement pas. Il est donc stable dans le temps. Le champ magnétique dépend du courant qui passe dans la ligne. Celui-ci varie continuellement dans le temps, en fonction de la demande en électricité. Les valeurs indiquées sont donc des valeurs moyennes annuelles, les maxima sont indiqués entre parenthèses.

**Tableau II** – Valeurs habituellement rencontrées à proximité des lignes de transport de l’électricité. Pour le champ magnétique, il s’agit de la moyenne annuelle et la valeur maximale est donnée entre parenthèses.

Valeur des champs	Champ magnétique (μT)			Champ électrique (kV/m)		
	À l’aplomb des conducteurs	À 30 m de l’axe	À 100 m de l’axe	Sous les conducteurs	À 30 m de l’axe	À 100 m de l’axe
Tension						
Lignes 400 kV	6 (30)	1,6 (12)	0,1 (1,2)	5	2	< 0,2
Lignes 225 kV	4,3 (20)	0,6 (3)	– (0,3)	4	0,4	–
Câbles 225 kV	4 (20)	– (0,3)	– (–)	–	–	–

NB : les valeurs non mentionnées sont inférieures au bruit de fond\* environnemental.

## Mesures des champs

À distance de toute source de transport électrique, la valeur moyenne du champ magnétique 50 Hz à l’intérieur d’une habitation, mesuré avec un appareil qui ne mesure que cette gamme de fréquences, varie entre 0,01 et 0,1 μT, c’est le bruit de fond. Il dépend de l’équipement électrodomestique et du câblage électrique du bâtiment, ce qui explique sa variabilité selon les pays concernés.

Du fait que le champ magnétique traverse pratiquement tous les matériaux sans être perturbé, sa mesure est facile à réaliser, avec un appareil adapté à cette gamme de fréquences. En revanche, l’interprétation en est délicate, car les sources de champ magnétique sont nombreuses, et les appareils mesurent la résultante de toutes les composantes dans l’espace.

Le champ électrique est plus difficile à mesurer, car il est perturbé par les matériaux. On observe une déformation des lignes de champs en fonction des obstacles (arbres,

poteaux, etc., mais aussi homme ou tout être vivant animal). De ce fait, des précautions particulières sont à prendre pour mesurer le champ électrique, comme déporter l'appareil de mesure par rapport à l'opérateur d'environ 2 m. De plus, la mesure du champ électrique est perturbée par un taux d'humidité trop important. En revanche, elle est facile à interpréter, car les sources de champ électrique importantes sont peu nombreuses, il s'agit essentiellement du réseau de transport de l'électricité dans l'environnement courant.

## Interactions avec la matière et propagation

Les mécanismes d'interaction des CE&M avec la matière peuvent être regroupés en deux catégories : les champs et les courants induits d'une part, les autres effets directs et indirects d'autre part. Certains mécanismes pourraient être spécifiques pour certaines parties du corps, par exemple les cellules nerveuses sont plus sensibles aux champs induits que les autres cellules.

À ce jour, en dehors des effets dus aux champs et aux courants induits servant de base à la réglementation, aucun mécanisme d'action des champs magnétiques sur le vivant n'a été démontré. Une vingtaine de mécanismes d'interaction ont été proposés pour expliquer des effets de ces champs à faible niveau d'exposition. La conclusion est que pour des valeurs du champ magnétique inférieures à 5  $\mu$ T aucun mécanisme plausible n'a été identifié<sup>3</sup>.

## Interactions avec le vivant

### Étude des effets biologiques

De nombreuses études *in vitro*\* ont porté sur l'étude d'un effet potentiellement cancérigène des CE&M. Les mécanismes de cancérogenèse sont complexes et imparfaitement connus. On distingue classiquement trois étapes : initiation\*, promotion\* et croissance tumorale. La phase d'initiation est l'étape essentielle, induite par un agent tumoral chimique ou physique. Des changements irréversibles se produisent dans la cellule initiée qui peut rester longtemps dans un état latent jusqu'à une étape de promotion. Les agents

---

3. Swanson J, Kheifets L (2006) Biophysical mechanisms: a component in the weight of evidence for health effects of power-frequency electric and magnetic fields. *Radiat Res.* 165:470-8.

promoteurs ne sont généralement pas eux-mêmes des cancérogènes (hormones, promoteurs spécifiques, facteurs de croissance, facteurs de l'inflammation, radicaux libres, etc.). La cellule peut alors passer dans une phase de croissance, son métabolisme change. Le processus tumoral est caractérisé par une prolifération cellulaire non régulée.

### *Génotoxicité*

À la différence d'agents physiques cancérogènes mutagènes\*, la majorité des publications n'a pas montré d'effet génotoxique direct ni de potentialisation de l'effet d'agents mutagènes connus (ultraviolets, rayonnements ionisants [RI], substances chimiques) à des niveaux d'exposition atteignant 50 kV/m ou 1000  $\mu$ T. Outre l'absence de cassure de l'ADN\*, il a été mis en évidence que le système de réparation de l'ADN n'était pas perturbé par ce type d'exposition.

D'ailleurs l'énergie photonique développée par les CE&M 50/60 Hz est de  $2,5 \cdot 10^{-13}$  eV, soit  $10^{14}$  fois inférieure à l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons covalentes de l'ADN.

### *Expression génique*

Pour aboutir à la synthèse de protéines qualitativement et quantitativement normales, le code génétique porté par l'ADN est transcrit en ARN\* messager qui porte l'information génique traduite en protéine par les ribosomes\* intracellulaires. L'ensemble de ces opérations représente l'expression génique\*.

Aucune donnée expérimentale dûment répliquée n'a montré que l'expression génique puisse être modifiée par l'exposition aux champs électriques ou magnétiques d'extrêmement basse fréquence.

### *Apoptose*

L'apoptose\*, ou mort cellulaire programmée, est essentielle à l'homéostasie\* de l'organisme puisqu'elle intervient comme un facteur de défense à l'égard des agents génotoxiques. Un déficit de l'apoptose pourrait contribuer au développement de cellules tumorales. L'exposition de cellules en culture à un champ magnétique, selon des modalités expérimentales différentes, peut induire une apoptose accrue, pour des niveaux d'exposition de 100  $\mu$ T ou plus. En revanche les résultats des quelques expérimentations réalisées avec des expositions combinées de champ magnétique 50/60 Hz avec des RI ou des agents chimiques ne sont pas concluants.

### *Croissance cellulaire*

La plupart des études n'ont pas montré d'effet sur la prolifération cellulaire, en utilisant plusieurs modèles cellulaires différents, dont des cellules souches sanguines à l'origine des leucémies, pour des expositions inférieures à 100  $\mu$ T.

Au-dessus de 100  $\mu$ T, des expérimentations ont montré un effet sur la croissance ou sur la différenciation cellulaire, mais les conditions expérimentales (choix des modèles

cellulaires, des modalités d'exposition et des critères d'appréciation) sont trop disparates entre les études pour permettre une conclusion définitive des résultats.

### *Signaux cellulaires*

La réponse cellulaire à un stimulus extérieur physique ou chimique est déterminée par la transmission et l'amplification du message à partir de l'activation de récepteurs membranaires entraînant, après une série complexe de réactions, la mise en jeu de messagers intracellulaires.

L'ornithine décarboxylase\* (ODC) est une enzyme active dans la prolifération cellulaire. Une augmentation de l'activité de l'ODC sur des cellules exposées serait donc un marqueur d'activité et de prolifération cellulaire accrue.

Dans des cellules tumorales exposées à un champ magnétique variant entre 100 et 500  $\mu\text{T}$ , une augmentation modeste et transitoire de l'activité de l'ODC est observée. L'effet disparaît alors même que l'exposition est maintenue.

Les ions calcium sont parmi les messagers les plus importants pour la cellule et sont les plus étudiés pour leur interaction avec les CE&M.

La concentration du calcium intracellulaire peut varier sous l'effet d'une modification de son passage à travers les canaux calciques de la membrane cellulaire, ou d'une libération accrue par les organites de stockage comme le réticulum endoplasmique\*. Des modifications des concentrations ou du passage transmembranaire de l'ion calcium peuvent être responsables d'une altération des mécanismes de régulation de la division cellulaire, de l'activité transcriptionnelle\*, de l'apoptose, et par là, de la croissance cellulaire.

Les premiers travaux sur des tissus nerveux, sous champ électrique, montrant un passage accru transmembranaire de l'ion calcium, avec un « effet fenêtre » portant à la fois sur la fréquence et sur l'intensité, n'ont pas été confirmés. Une modification du transport transmembranaire a été rapportée avec un champ magnétique de 22 mT (22 000  $\mu\text{T}$ ), correspondant à une densité de courant induit de 160 mA/m<sup>2</sup>.

À l'égard des variations de la concentration intracytosolique\* de calcium, une expérimentation a montré sur des cellules leucémiques en culture une élévation des concentrations, plus importante pour la fréquence 50 Hz, avec un seuil d'apparition à 0,04 mT (40  $\mu\text{T}$ ) et un plateau à 0,15 mT (150  $\mu\text{T}$ ). Mais ce résultat n'a pas été répliqué. Par ailleurs, la recherche de perturbations des oscillations de la concentration de calcium sur des systèmes cellulaires organisés tels que des îlots de Langerhans\* n'a pas montré de modification pour des expositions de 100 et 1 000  $\mu\text{T}$ .

De l'ensemble de plus de vingt expérimentations, il n'apparaît pas que l'exposition d'un système cellulaire à un champ électrique ou magnétique puisse perturber significativement les systèmes de signalisation intracellulaire.

Au total, à ce jour, aucun effet biologique des CE&M n'a été répliqué et ne peut être considéré comme validé.

## Champs électriques et magnétiques et expérimentation animale

### *Reproduction et tératogenèse*

Une quinzaine d'études portant sur des rongeurs, modèle classique en biologie, ont pris en compte une exposition au champ électrique pouvant atteindre 150 kV/m (le seuil de perception du champ par le rat varie entre 2 et 12 kV/m). Les résultats sont caractérisés par la rareté et l'inconsistance des effets observés, qu'il est difficile d'attribuer à une action directe du champ. Les conditions « d'hébergement » et d'entretien de l'animalerie sont des points particulièrement critiques dans l'interprétation des résultats, notamment du fait de la présence de courants induits dans le système d'alimentation en nourriture et en eau.

Les études menées avec différents niveaux de champ magnétique de 0,2 à 1 000  $\mu$ T n'ont pas montré d'incidence supérieure des malformations chez les animaux exposés. Chez la souris mâle, la recherche d'anomalies de la spermatogenèse sous exposition à un champ de 10 mT est négative. Ces résultats sont corroborés par l'absence d'effet mutagène et génotoxique *in vitro*, et par les études épidémiologiques ne retrouvant pas de corrélation entre exposition aux CE&M et survenue d'un retard de croissance intra-utérin, d'anomalies congénitales ou d'une réduction de la fertilité masculine aux niveaux habituels d'exposition environnementale.

### *Cancérogenèse*

Les données de biologie moléculaire ne plaident pas en faveur d'un mécanisme génotoxique, donc d'un effet initiateur de cancer. Quatre études, l'une canadienne, deux conduites aux États-Unis, la dernière japonaise, ont exposé des rats ou des souris en permanence pendant toute leur vie (deux ans) à différentes intensités de champ magnétique jusqu'à 5 000  $\mu$ T. Aucune différence significative n'a été observée, ni dans l'induction de tumeurs, ni dans la mortalité, par comparaison aux animaux témoins.

Les autres études ont recherché un effet promoteur où la croissance d'un cancer induit par un agent physique ou chimique est favorisé ou non par l'exposition au CE&M. Leur objectif est de comparer le nombre et la vitesse de développement des tumeurs induites dans le groupe exposé au champ par rapport aux témoins. À ce jour, la vingtaine d'études publiées concernent différents types de tumeurs solides (peau, foie, cerveau, mamelle) ou hématopoïétiques (leucémies, lymphomes). Dans leur ensemble, les résultats ne permettent pas de conclure à un effet promoteur des CE&M.



### *Mélatonine*

La mélatonine\* est une hormone essentiellement synthétisée dans le cerveau par la glande pinéale\* (épiphyse) à partir du tryptophane\*. Elle intervient physiologiquement comme « l'expression chimique de l'obscurité », informant l'organisme de la photopériode, pour lui permettre de vivre en harmonie avec l'environnement.

Sa sécrétion a lieu pendant la nuit, dans l'obscurité, avec un pic entre 2 et 4 heures du matin. Elle est inhibée par l'exposition à la lumière, onde électromagnétique de longueur d'onde variant entre 400 et 780 nm (500 lux peuvent suffire à cette inhibition). Comment, à l'image de l'effet de la lumière visible, les champs électriques et magnétiques d'extrêmement basse fréquence, dont la longueur d'onde est de près de 6000 km, pourraient-ils provoquer une diminution de la sécrétion de cette hormone ? La mélatonine est expérimentalement dotée de propriétés antigonadotropes (elle inhibe les hormones hypothalamo-hypophysaires contrôlant la libération d'oestrogènes), d'une activité oncostatique\* en ralentissant la croissance de cellules malignes et d'un rôle d'épurateur de radicaux libres. Aussi, toute réduction de son taux pourrait être créditée d'un effet favorisant la croissance tumorale, le développement de tumeurs mammaires ou les altérations de l'ADN. Chez le rongeur exposé à des champs électriques ou magnétiques d'intensité variable, il a été montré soit une réduction de sa synthèse intrapinéale, soit une réduction des niveaux sériques\*, soit une absence d'effet.

Chez le mammifère supérieur en exposition prolongée (l'agnelle, le babouin, la vache laitière), aucune modification de la sécrétion n'a été retrouvée. Chez l'homme, les expérimentations menées chez des volontaires des deux sexes n'ont pas montré de modification des taux, ni du cycle de la mélatonine à des niveaux pouvant atteindre 100  $\mu$ T, sur des périodes d'exposition professionnelle ou résidentielle prolongée.

Les études épidémiologiques en exposition résidentielle ou professionnelle étudiant le paramètre mélatonine n'ont pas apporté de donnée convaincante en faveur d'une perturbation de sa sécrétion.

Enfin et surtout, la sécrétion de mélatonine est régulée par certaines cellules « ganglionnaires » de la rétine reliées à la glande pinéale. Ces cellules ganglionnaires particulières contiennent une protéine appelée « mélanopsine » dont la structure est voisine des autres protéines réceptrices de l'œil. La mélanopsine absorbe les rayonnements électromagnétiques dont la longueur d'onde est comprise entre 300 et 600 nm (donc dans la gamme de la lumière visible et du proche UV). Seules ces longueurs d'onde peuvent interagir avec la mélanopsine et entraîner une diminution de la sécrétion de mélatonine.

À ce jour, l'hypothèse d'un effet des CE&M sur la mélatonine ne peut donc pas être retenue.

## Effets des expositions à court terme chez l'homme

Les travaux expérimentaux ont étudié la perception du champ électrique. Il est perçu par environ 10 % des adultes à partir d'un niveau de 10 à 15 kV/m.

Les paramètres hématologiques, biochimiques et hormonaux ne sont pas affectés pour des valeurs atteignant 20 kV/m. Les tests d'exploration fonctionnelle cérébrale ne sont pas perturbés au moins jusqu'à 20 kV/m. En revanche, de légères modifications du rythme cardiaque, qui restent dans les limites physiologiques\*, ont été décrites dans une expérimentation à 9 kV/m.

Le champ magnétique à la fréquence de 50/60 Hz est imperceptible au-dessous de 5 mT, valeur jamais atteinte dans les expositions humaines habituelles. Des magnétophosphènes\*, perceptions visuelles lumineuses sans conséquence pathologique, ont été décrits pour des expositions de 5 à 10 mT à 20 Hz. À 50/60 Hz, ce seuil serait de l'ordre de 15 mT.

Les paramètres hématologiques, biochimiques, hormonaux ainsi que les principaux tests de performance mentale n'ont pas été perturbés par des expositions allant jusqu'à 1 mT (1000  $\mu$ T).

Aux niveaux d'exposition résidentielle ou professionnelle habituels, les champs électriques ou magnétiques n'induisent pas de modification biologique ou comportementale décelable. Une expérimentation conduite sur des volontaires exposés à 1800  $\mu$ T pendant 45 min n'a pas montré de perturbation de l'électrocardiogramme\*, ni de l'électroencéphalogramme\*<sup>4</sup>.

## Données épidémiologiques

L'épidémiologie a l'avantage d'apprécier, directement sur la population « en situation », l'effet de l'agent suspecté. Elle connaît aussi des limites : ainsi en matière de cancer, la longue période de latence entre exposition et survenue de la maladie rend nécessaires des études rétrospectives où l'évaluation de l'exposition, plusieurs années avant le diagnostic, est délicate. De plus, l'exposition environnementale est un tout, et il est difficile d'isoler le facteur étudié avec certitude, surtout si l'exposition est ubiquitaire, ce qui est le cas pour les champs électriques et magnétiques. Enfin, la mesure de l'exposition est la donnée critique, car les résultats des études dépendent notamment de l'indicateur d'exposition choisi : exposition cumulée, moyenne arithmétique ou géométrique, médiane, mesure ou calcul du champ, etc.

4. – Mc Namee D.A. *et al.* (2010) The cardiovascular response to an acute 1800  $\mu$ T, 60 Hz magnetic field exposure in humans. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 83: 441-54.

– Legros A. *et al.* (2010) Exposition humaine à un champ magnétique 1800  $\mu$ T à 60 Hz : une étude neurocomportementale. *REE*, mai 2010, n° 5 : 44-55.

Chez l'adulte en exposition professionnelle comme en exposition résidentielle, aucune association n'a été établie à l'égard du risque de cancer (notamment du sein chez la femme), mais aussi de maladies cardio-vasculaires, de dépression ou de maladie neurodégénérative. En particulier, la question du risque de survenue accrue de maladie d'Alzheimer ou de sclérose latérale amyotrophique reste du domaine des hypothèses de travail et mérite des études complémentaires.

Chez l'enfant, bien que des études nord-américaines (McBride<sup>5</sup>, Linet<sup>6</sup>) et britannique (UKCCS<sup>7</sup>) n'aient pas montré de relation entre exposition au champ magnétique et augmentation du risque de survenue de leucémie, deux méta-analyses\* (Greenland<sup>8</sup>, Ahlbom<sup>9</sup>) ont montré, pour des expositions dépassant la valeur moyenne de 0,4  $\mu$ T, une augmentation du risque relatif\*, statistiquement significatif, de l'ordre de 2. Les expositions atteignant ou dépassant 0,4  $\mu$ T sont rares puisqu'elles concernent moins de 1 % de la population.

Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a, sur la base des résultats des méta-analyses, classé le champ magnétique d'extrêmement basse fréquence comme cancérigène possible (groupe 2B) pour le risque de leucémie de l'enfant en rapport avec des expositions élevées et prolongées. Les autres catégories d'exposition chez l'enfant et toutes les expositions chez l'adulte ont été classées dans le groupe 3, c'est-à-dire non classables en termes de cancérigénicité.

Sans remettre en cause la classification du CIRC, mais en prenant en compte les réserves méthodologiques décrites par les experts (biais de sélection, absence d'un mécanisme plausible, absence d'induction de cancer chez l'animal), les expertises collectives (ICNIRP 2003, OMS 2007, SCENIHR 2009) n'ont pas conclu à l'existence d'une relation causale\* entre ces niveaux d'exposition et le risque de leucémie de l'enfant. Plus récemment, une étude britannique (Draper<sup>10</sup>) a observé une association entre la survenue de leucémies chez l'enfant et la distance entre les résidences à la naissance et les lignes de transport de l'électricité, jusqu'à une distance de 600 m. De l'avis même des auteurs de

---

5. McBride ML *et al.* (1999) Power-frequency electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia in Canada. *Am J Epidemiol*, 149: 831-42.

6. Linet MS *et al.* (1997) Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *N Engl J Med*, 337: 1-7.

7. UK Childhood Cancer Study Investigators (1999) Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer. *The Lancet*, 354: 1925-31.

8. Greenland S *et al.* (2000) A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. *Epidemiology*, 11: 624-34.

9. Ahlbom, A *et al.* (2000) A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer*, 83: 692-8.

10. Draper G *et al.* (2005) Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study. *Br Med J*, 330: 1290-4.

l'étude : « *Il est surprenant de retrouver cet effet aussi loin des lignes [...] À cette distance, les champs calculés dus aux lignes sont inférieurs à 0,1  $\mu$ T, ce qui est encore moins que le niveau moyen de champ magnétique dans le domicile provenant d'autres sources que les lignes.* » Une réplication de ces travaux est en cours en France sous l'égide de l'INSERM.

## L'hypersensibilité à l'électricité

Ce terme, ou celui d'électrohypersensibilité (EHS), désigne tous les syndromes dits d'hypersensibilité aux champs électromagnétiques, que ceux-ci soient liés à l'électricité, aux écrans d'ordinateur, aux antennes relais ou aux téléphones mobiles.

L'EHS est un syndrome défini par l'individu lui-même et non pas par le médecin. Les personnes souffrant d'EHS présentent des manifestations que l'on retrouve dans la population générale, mais ils les ressentent plus souvent. Celles-ci varient fortement selon les individus, allant d'une hypersensibilité générale (symptômes multiples attribués à diverses sources) à une hypersensibilité spécifique (un ou quelques symptômes attribués à une ou à quelques sources). Il peut s'agir de maux de tête, de sensations de sécheresse cutanée, de troubles de sommeil, etc., pouvant prendre des proportions invalidantes. Aucun signe objectif n'est constaté à l'examen de ces sujets.

Les résultats des études publiées dans la littérature montrent que l'exposition réelle à un champ électromagnétique n'induit rien et que la capacité des sujets à détecter la présence du champ relève du hasard. Chez les personnes souffrant d'EHS, cette capacité n'est pas différente de celle d'individus témoins. D'autres études ont recherché un dysfonctionnement physiologique ; leurs résultats montrent que beaucoup de sujets ont une déviation des réponses de base aux stimuli, suggérant un dysfonctionnement du système nerveux autonome. Cela pourrait expliquer les plaintes les plus importantes. De plus, il apparaît probable que les facteurs psychogènes, l'effet nocebo (l'attente d'un effet négatif) et des facteurs sociaux divers peuvent grandement influencer et augmenter les symptômes d'EHS. Des études de provocation consistant à exposer des sujets souffrant d'EHS et des sujets témoins, en aveugle, voire en double aveugle\* ne montrent pas d'association de cause à effet entre l'exposition aux champs et l'apparition des symptômes évoqués. Par ailleurs, il est connu que la crainte de la maladie renforce, chez tout individu, la conscience qu'il a de son corps et l'attention portée à des symptômes qui se produisent normalement. Toutes ces caractéristiques combinées forment une boucle de réaction continue qui intensifie et renforce les autres réactions.

Au final, bien que la souffrance des patients soit réelle et justifie une prise en charge thérapeutique adaptée, les résultats des études scientifiques ne permettent pas de soutenir l'hypothèse que les CE&M jouent un rôle dans l'apparition des troubles associés à l'EHS.

## Interactions avec les implants médicaux actifs

Le fonctionnement des prothèses actives (cardiostimulateurs, implants cochléaires, pompes à insuline, etc.) peut être perturbé par une exposition à un champ électrique ou magnétique. Il s'agit avant tout d'un problème de compatibilité électromagnétique\* qui peut engendrer indirectement des conséquences sanitaires.

Les cardiostimulateurs peuvent être réglés en mode bipolaire ou unipolaire. En France, c'est le mode bipolaire qui est le plus fréquent. Dans ce cas, sur la base d'études expérimentales et de modélisations, aucune interférence directe n'a été rapportée avec un champ électrique inférieur à 7 kV/m. En ce qui concerne le champ magnétique, aucune interférence n'a été observée dans les études de provocation *in vivo*\*, réalisées jusqu'à un niveau d'exposition de 100  $\mu$ T, ce qui est largement au-dessus du niveau de champ ambiant rencontré dans l'environnement. En revanche, il est formellement déconseillé d'approcher et/ou d'appuyer un appareil électrique, une perceuse par exemple, contre le boîtier de l'implant cardiaque.

Les cardiostimulateurs en mode unipolaire sont plus sensibles, les seuils expérimentaux étant de 2 kV/m pour le champ électrique, de 45 à 50  $\mu$ T pour le champ magnétique 50 Hz. Les interférences peuvent entraîner une inhibition du fonctionnement de l'appareil ou un passage en mode de secours, réversibles avec l'arrêt de l'exposition.

## Valeurs limites d'exposition

La Commission européenne a publié en 1999 une recommandation pour l'exposition du public couvrant les fréquences de 0 à 300 GHz (1999/519/CE) visant à « *apporter un haut niveau de protection de la santé* ».

Plusieurs réexamens successifs, destinés à apprécier sa validité à la lumière des nouvelles études publiées, ont confirmé les valeurs initiales de 100  $\mu$ T pour le champ magnétique et de 5 kV/m pour le champ électrique à 50 Hz. Ces valeurs sont appliquées en France à la suite d'un arrêté technique du 17 mai 2001 pour tous les nouveaux ouvrages électriques.

En ce qui concerne l'exposition des travailleurs, une directive a été adoptée (2004/40/CE) qui doit être transposée dans les législations nationales respectives au plus tard en avril 2012. Les valeurs « *déclenchant l'action* », c'est-à-dire « *à partir desquelles il faut prendre une ou plusieurs mesures [...] techniques et/ou organisationnelles visant à empêcher que l'exposition ne dépasse les valeurs limites d'exposition* » sont de 500  $\mu$ T pour le champ magnétique et de 10 kV/m pour le champ électrique.

Ces valeurs découlent des travaux de l'ICNIRP publiés en 1998. Elles sont fondées sur les seuls effets démontrés à ce jour, c'est-à-dire l'induction de courants dans l'organisme. Elles visent à prévenir l'excitation des cellules nerveuses et celles du muscle cardiaque en maintenant le niveau des courants induits au-dessous de 10 mA/m<sup>2</sup>, valeur en deçà de laquelle aucun effet n'est à redouter (tableau III). Cependant, pour le public qui inclut des enfants et des sujets plus fragiles, cette valeur limite de densité de courant induit a été réduite à 2 mA/m<sup>2</sup> par application d'un facteur de sécurité plutôt que d'incertitude.

**Tableau III** – Courants induits et effets sur l'excitabilité neuronale et myocardique (OMS 1987).

Entre 1 et 10 mA/m <sup>2</sup>	effets biologiques mineurs transitoires
Entre 10 et 100 mA/m <sup>2</sup>	effets sur la rétine et le système nerveux
Entre 100 et 1 000 mA/m <sup>2</sup>	une stimulation des tissus excitables est observée
Au-dessus de 1 000 mA/m <sup>2</sup>	des extrasystoles ou une fibrillation ventriculaire peuvent survenir

Des modalités de gestion du risque ont été proposées par l'OMS (Aide-mémoire n° 322 de juin 2007<sup>11</sup>) qui vont plus loin que la stricte application des valeurs limites d'exposition :

- l'industrie électrique et les pouvoirs publics doivent maintenir leur implication dans la recherche afin de réduire les incertitudes scientifiques persistantes ;
- un effort d'information accru s'impose à l'égard de toutes les parties prenantes pour permettre une prise de décision en toute connaissance de cause, notamment lors des projets d'installation d'ouvrages électriques, en vue d'une meilleure coordination et concertation entre les industriels, les pouvoirs publics à l'échelle locale et les citoyens ;
- des solutions techniques en amont doivent être recherchées et la concertation avec les autorités locales et les riverains doit être développée dans le but de réduire les expositions lorsque cela est possible à un coût raisonnable, car « *les politiques basées sur l'adoption de limites d'exposition arbitrairement faibles ne sont pas justifiées* ».

## Conclusion

Après plus de trente années de recherches, le bilan des données acquises est rassurant en termes de risque sanitaire éventuel, ce qui était au départ l'objet principal des

11. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs322/fr/index.html>

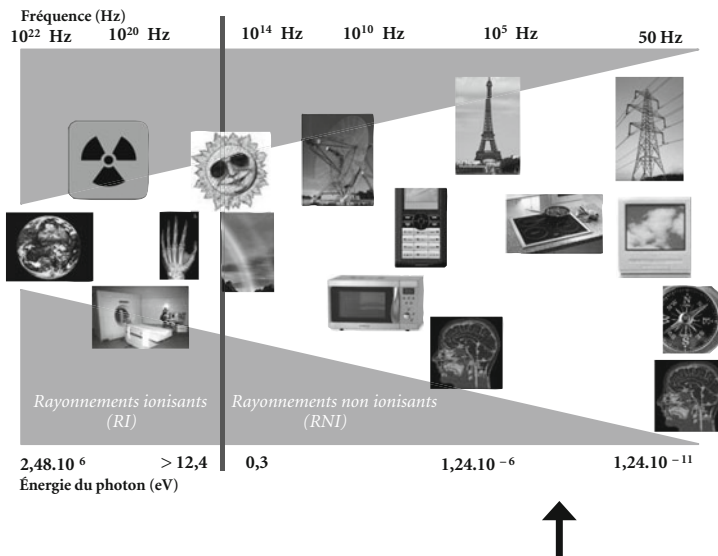
préoccupations ; même si des incertitudes persistent sur certaines expositions, au demeurant rares. Ces recherches ont aussi permis d'ouvrir un nouveau chapitre de connaissances sur l'interaction entre les CE&M et le vivant qui pourrait à l'avenir permettre des développements prometteurs en termes d'applications médicales.

## Pour en savoir plus

- Environmental Health Criteria Monograph n° 238, en ligne sur le site de l'OMS : [http://www.who.int/peh-emf/publications/elf\\_ehc/en/index.html](http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html)
- Bernhardt JH, Matthes R, McKinlay A *et al.* (2003) Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0-100 kHz) – Review of the scientific evidence and health consequence. ICNIRP.
- Conseil des Communautés européennes (1999) Recommandation 1999/519/CE du Conseil du 12 juillet 1999 relative à la limitation du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz). Journal officiel des Communautés européennes. L199 (30 juillet 1999): 59-70.
- Conseil des Communautés européennes (2004) Directive 2004/40/CE du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relative à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (dix-huitième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE). Journal officiel des Communautés européennes. L159 (30 avril 2004): 1-26.
- Aide-mémoire de l'OMS sur les champs magnétiques basses fréquences et les leucémies de l'enfant : <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs322/fr/index.html>
- Aide-mémoire de l'OMS sur les champs magnétiques et l'hypersensibilité : <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs296/fr/index.html>
- Afsset (mars 2010) Les extrêmement basses fréquences. Effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences. Avis de l'Afsset, rapport d'expertise collective : [http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/421986772256552219388663380233/10\\_03\\_11\\_ED\\_EBF\\_Rapport\\_saisine\\_n\\_2008\\_006\\_20100407.pdf](http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/421986772256552219388663380233/10_03_11_ED_EBF_Rapport_saisine_n_2008_006_20100407.pdf)
- Raoul D. (mai 2010) Les effets sur la santé et l'environnement des champs électromagnétiques produits par les lignes à haute et très haute tension. Rapport de l'Opecst : <http://www.senat.fr/notice-rapport/2009/r09-506-notice.html>

# L'induction et les fréquences intermédiaires

M. Souques et R. de Seze



## Introduction

L'induction, pour le public, est un nouveau mode de cuisson qui se développe de plus en plus. Avec une plaque à induction, il y a moins de risques de se brûler après retrait de l'ustensile, car la surface de la plaque reste presque froide, seulement chauffée par la casserole elle-même. Les plaques à induction sont très attractives à plusieurs titres : tout comme le gaz, elles n'ont pas d'inertie thermique et lorsque l'on coupe l'alimentation électrique, la chauffe cesse immédiatement. Il n'y a pas d'émission de chaleur ailleurs que dans la casserole, de fait leur rendement énergétique, situé entre 80 % et 90 %, est excellent. Le principe de cette technologie est fondé sur les courants de Foucault, qui sont des courants électriques créés dans une masse conductrice soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique extérieur traversant ce milieu, soit par un déplacement de cette masse dans un champ magnétique constant.



Les fréquences des ondes électromagnétiques de l'induction sont utilisées depuis longtemps dans d'autres applications largement répandues, telles que la radio, grandes et moyennes ondes, les écrans de télévision et d'ordinateurs (technologies antérieures aux cristaux liquides ou LCD), certains systèmes antivol, etc.

## Rappels physiques et sources

Les fréquences utilisées dans la technologie des plaques de cuisson à induction font partie de la gamme des fréquences dites « intermédiaires », entre les basses et les hautes fréquences, de 300 Hz à 10 MHz. Elles font intervenir les mécanismes liés aux fréquences extrêmement basses (courants induits) et les mécanismes liés aux radiofréquences (RF)\* (absorption diélectrique).

Il n'existe pas de relation simple entre les composantes électrique et magnétique du champ, la prévalence de l'un ou l'autre dépend de la technologie mise en jeu. Schématiquement, si le champ est émis par une boucle, comme dans le cas des plaques à induction, c'est la composante magnétique qui prédomine ; si le champ est émis par un élément linéaire, comme dans le cas des antennes grandes ondes, c'est la composante électrique qui prédomine.

Néanmoins, à l'exception de la radiodiffusion et des écrans cathodiques, la majorité des technologies utilise le champ magnétique pour créer des courants de Foucault dans les matériaux. C'est la raison pour laquelle les fréquences intermédiaires sont aussi appelées « fréquences inductives ».

Comme pour tous les rayonnements non ionisants, l'intensité du champ décroît rapidement, de façon exponentielle, avec l'éloignement de la source donc de la plaque à induction. Les principales applications des fréquences intermédiaires sont détaillées à la fin de ce chapitre, il n'y a pas de source naturelle dans cette gamme de fréquences.

## Mesures et dosimétrie

Dans le domaine des fréquences intermédiaires comme dans celui des RF, la dosimétrie fait largement appel à la modélisation numérique. Le DAS ne peut être mesuré directement dans les tissus, il est calculé en fonction de leurs paramètres physico-chimiques.

## Interactions avec le vivant et effets biologiques

### Mécanismes biophysiques

Il convient de distinguer les mécanismes aboutissant à une stimulation des tissus excita-  
bles de ceux qui entraînent une agitation moléculaire.

La stimulation des tissus excitables résulte des courants induits, prédominants dans les basses fréquences. Dans ce cas, les mécanismes biophysiques répondent à des modèles légèrement différents selon que le champ magnétique ou électrique prédomine, mais se traduisent dans tous les cas par des courants induits qui conditionnent des effets physiologiques\*. Ces courants sont décrits dans le chapitre « Rappels physiques sur les rayonnements électromagnétiques ».

Le phénomène d'agitation moléculaire provoque un échauffement par l'intermédiaire de l'absorption diélectrique ; il est prédominant dans les fréquences plus élevées. Le champ électromagnétique produit un échauffement d'autant plus élevé que la durée de l'exposition est longue. Le paramètre identifié comme déterminant à l'égard d'un effet biologique est la puissance absorbée par unité de masse, appelée « débit d'absorption spécifique » (DAS, ou SAR en anglais). Cette notion est décrite dans le chapitre « Rappels physiques sur les rayonnements électromagnétiques ».

En dessous de 100 kHz, l'absorption d'énergie par relaxation diélectrique est négligeable, et au-dessus de 10 MHz, la stimulation tissulaire n'est plus efficace, en raison de l'effet capacitif\* des tissus. La superposition de ces deux mécanismes se manifeste donc essentiellement entre 100 kHz et 10 MHz, la transition de l'un à l'autre se fait progressivement au fur et à mesure que la fréquence augmente. Vers les plus basses fréquences, les mécanismes d'induction sont d'autant plus prononcés que la composante magnétique du champ est importante.

### Mécanismes physiologiques

#### *Stimulation nerveuse*

Les courants induits sont susceptibles de produire une stimulation physiologique des tissus excitables, plus ou moins importante en fonction de la fréquence et de l'intensité du champ interne produit dans les tissus.

Au-delà de 1000 Hz, le seuil d'apparition de la stimulation nerveuse augmente également en raison du temps de réponse limité des canaux ioniques membranaires et de la constante de temps de charge capacitive des membranes cellulaires. En d'autres termes, les courants traversent les membranes trop rapidement pour avoir le temps d'interagir efficacement.

En dessous de 10 kHz, le courant nécessaire pour stimuler un nerf est de l'ordre de 0,6 à 1 mA puis le seuil augmente rapidement en fonction du carré de la fréquence : il

est de 2-3 mA à 10 kHz, de 60 mA à 100 kHz et de 100 mA à 400 kHz (ICNIRP). Les valeurs seuils correspondantes de champ ou de densité de courant entre 100 et 10 000 Hz sont différentes selon le type de fibre nerveuse, allant de 6 à 24 V/m et de 1 à 5 A/m<sup>2</sup>. Les fibres les plus épaisses sont les plus sensibles (fibres de 20 µm de diamètre).

Au-delà de 10 kHz, le seuil du champ électrique efficace *in situ* augmente régulièrement, jusqu'à 100 V/m à 100 kHz, correspondant à un courant induit de 20 A/m<sup>2</sup>.

#### *Stimulation de la rétine et du muscle cardiaque*

Le champ magnétique peut stimuler la rétine, créant des sensations lumineuses appelées magnétophosphènes\* (équivalent de l'acouphène pour l'œil). En dessous de 10 kHz, le seuil d'excitabilité de la rétine est plus faible que celui des nerfs périphériques.

Le seuil d'excitabilité du muscle cardiaque est supérieur à celui des nerfs périphériques et s'élève rapidement avec la fréquence dès qu'elle dépasse 100 Hz. Ainsi, le fonctionnement du cœur est moins susceptible d'être perturbé que les nerfs périphériques en cas d'exposition intense accidentelle (au-delà des normes).

#### *Échauffement*

Dans la gamme des RF, le mécanisme physiologique connu est l'absorption d'énergie entraînant une élévation de température des tissus. Des brûlures peuvent être produites lors d'un échauffement localisé supérieur à 5 °C. À des niveaux de l'ordre de 4-5 °C, le risque de cancer lors d'une exposition chronique répétée a été montré dans quelques études. Un risque augmenté de cataracte\* a également été mis en évidence. Avec des échauffements prolongés de 2-3 °C, il peut se produire un œdème cérébral éventuellement accompagné d'une perméabilisation de la barrière hémato-encéphalique\*.

Le seuil d'échauffement à l'origine de troubles fonctionnels, de l'ordre de 1 °C, est à la base des recommandations de l'ICNIRP.

#### *Émissions par impulsions*

Au fur et à mesure que la fréquence augmente, la stimulation sensorielle est relayée par la perception thermique. Plus la durée de l'impulsion est faible, plus la sensibilité de perception par stimulation neuromusculaire peut augmenter (seuil plus faible) sans que la perception thermique soit mise en jeu.

### **Études *in vivo* chez l'animal**

De nombreux travaux ont été réalisés à des fréquences proches de celles utilisées dans les écrans vidéo, jusqu'à 20 kHz, mais aucun au-delà. Quelques résultats montrent une légère augmentation de malformations morphologiques mineures, du type « bec-de-lièvre », mais ils concernent des souches animales spécifiques, ce qui laisse penser que ces

effets ne sont pas extrapolables à d'autres espèces et entre autres à l'homme. Globalement, la majorité des études ne suggèrent pas de risque pour la santé humaine à des niveaux inférieurs aux valeurs recommandées.

## Interactions avec les implants médicaux actifs

Quelques d'études ont été réalisées dans cette gamme de fréquences sur le fonctionnement des implants cardiaques (stimulateurs et défibrillateurs cardiaques implantables).

Pour les stimulateurs cardiaques, citons l'étude expérimentale\* réalisée par le Dr Frank<sup>1</sup> sur cinquante sujets volontaires porteurs d'un stimulateur cardiaque (ou *pace-maker*), invités à utiliser une plaque de cuisson du commerce. Cette plaque fonctionnait avec des champs magnétiques de fréquences 20 à 50 kHz. Les champs mesurés au niveau de l'implant étaient inférieurs aux limites d'exposition recommandées pour le public. Aucune perturbation n'a été détectée ni avec le réglage de base du stimulateur cardiaque, ni avec le réglage le plus défavorable, que la plaque fonctionne à faible ou à forte puissance, ou en mode séquentiel. Il n'y a pas eu d'autre étude similaire pour confirmer ou infirmer ce résultat.

Par ailleurs des études systématiques menées *in vitro*\* sur des implants cardiaques placés dans un « fantôme »<sup>2</sup> ont été conduites au Laboratoire d'instrumentation électronique de Nancy (LIEN, université Henri-Poincaré, Nancy, France). Le domaine de fréquences testées s'étendait de 10 à 25 kHz et seize *pacemakers* ont été testés sous bobines de Helmholtz en cage de Faraday. Les résultats montrent que, pour les stimulateurs cardiaques, des interférences n'apparaissent que pour des champs rayonnés dont les valeurs sont supérieures aux limites d'exposition recommandées pour le public et pour les travailleurs. Ces interférences dépendent fortement des technologies électroniques des fabricants, de la géométrie et de la configuration des sondes. Les dysfonctionnements observés sont réversibles.

Il n'existe pas d'étude *in vivo*\* avec les défibrillateurs cardiaques implantés. Comme pour les stimulateurs, la même équipe du LIEN conduit des études sur des défibrillateurs cardiaques implantables. Les résultats préliminaires permettent de dire que les champs électromagnétiques n'induisent pas de dysfonctionnement pour des amplitudes allant jusqu'à 129  $\mu\text{T}$  à 10 kHz et 85  $\mu\text{T}$  à 25 kHz (ce qui est supérieur aux limites d'exposition pour le public et pour les travailleurs). D'autres travaux sur un plus grand nombre d'implants sont en cours avec des niveaux de champ largement supérieurs aux limites normatives.

---

1. Frank R, Souques M, Himbert C *et al.* (2003) Effets des champs magnétiques de 50 et 60 Hz et de 20 à 50 kHz sur le fonctionnement des cardiostimulateurs implantés. Archives des Maladies du Cœur et des Vaisseaux, t. 96, n° spécial III : 35-41.

2. Moulage en gélatine dont les propriétés diélectriques sont similaires à celles du cœur.

## Valeurs d'exposition, normalisation et recommandations

L'expérience montre que les niveaux de champ provoquant une stimulation biologique ne sont habituellement pas rencontrés dans notre environnement, qu'il soit public ou professionnel.

La recommandation européenne du 12 juillet 1999 (1999/519/CE) fixe des limites d'exposition pour le public, « afin de garantir un haut niveau de protection de la santé ». Ces limites dépendent de la fréquence.

Les restrictions de base représentent les valeurs fondamentales à ne pas dépasser au niveau du système nerveux central de la tête (le cerveau) et du tronc (la moelle épinière). En pratique, ces grandeurs ne sont pas directement mesurables, et des niveaux de référence en champ électrique et en champ magnétique, plus facilement mesurables, ont donc été calculés en intégrant une marge de sécurité. Dans ces conditions :

- les restrictions de base sont toujours respectées quand les niveaux de référence ne sont pas dépassés ;
- un dépassement minime des niveaux de référence n'est toutefois pas dangereux pour la santé, car des facteurs de sécurité ont été pris en compte dans la modélisation ;
- un dépassement des niveaux préconisés pour une autre région du corps (les mains par exemple) ne pose pas de problème pour la santé.

Ces valeurs sont indiquées dans les tableaux I (restrictions de base) et II (niveaux de référence).

L'évolution des valeurs limites recommandées de champ électrique ou magnétique selon la fréquence résulte d'un compromis entre l'efficacité d'induction de courants dans les tissus et leur seuil de sensibilité biologique à ces courants. Les niveaux de références sont en pratique plus élevés aux plus faibles fréquences, à peu près stables entre 1 et 100 kHz, puis continuent à baisser jusque dans la gamme des RF à 10 MHz (tableau II).

**Tableau I** – Restrictions de base pour l'exposition du public dans les fréquences de l'induction. D'après la recommandation européenne 1999/519/CE. ( $f$  est la fréquence en Hz)

Fréquences	Courant induit dans l'organisme (mA/m <sup>2</sup> )	Débit d'absorption spécifique (W/kg)
300 Hz-1 000 Hz (1 kHz)	2	–
1 kHz-100 kHz	$f/500$	–
100 kHz-10 MHz	$f/500$	0,08

**Tableau II** – Niveaux de référence pour l'exposition du public dans les fréquences de l'induction. D'après la recommandation européenne 1999/519/CE (f est dans la même unité que celle indiquée dans la colonne de fréquence).

<i>Fréquences</i>	<i>Champ électrique (V/m)</i>	<i>Champ magnétique (A/m)</i>	<i>Induction magnétique (μT)</i>
250 Hz-800 Hz	250/f	4/f	5/f
800 Hz-3 000 Hz (3 kHz)	250/f	5	6,25
3 kHz-150 kHz	87	5	6,25
0,15 MHz (150 kHz)-1 MHz	87	0,73/f	0,92/f
1 MHz-10 MHz	$87 \cdot f^{1/2}$	0,73/f	0,92/f

## Principales applications utilisant les fréquences intermédiaires

Les technologies mettant en œuvre ces fréquences sont relativement peu nombreuses mais concernent la grande majorité de la population.

### La cuisson par induction

Les plaques à induction utilisent des fréquences de 20 à 50 kHz. Leur principe de fonctionnement est le suivant : un générateur de courant permet d'alimenter des inducteurs situés sous la vitrocéramique. Le champ magnétique variable engendre des courants induits dans le récipient placé sur la plaque. La variation de puissance se fait à amplitude constante, mais en agissant tantôt sur la fréquence, tantôt sur le nombre de périodes de courant transitant dans l'inducteur.

- À forte puissance, le réglage se fait par variation continue de la fréquence d'alimentation entre 20 et 50 kHz.
- À faible puissance, des trains d'ondes sont envoyés par intermittence dans l'inducteur. Le réglage se fait par variation de la durée de ces trains d'onde.
- En fonctionnement simultané de deux foyers, deux inducteurs sont alimentés. La puissance maximale est alors envoyée au dernier foyer programmé, le premier ne recevant plus qu'une faible puissance. La régulation entre les deux foyers se fait par trains d'ondes.

Les niveaux de champ magnétique dépendent de nombreux paramètres, comme le type de plaque (il en existe plusieurs générations), la fréquence, les réglages (nombre de plaques allumées, utilisation de booster, etc.), la position de la casserole sur le foyer (le champ magnétique est plus important si la casserole est décentrée). Cela explique que les niveaux de champs ne sont pas rapportés dans la littérature.

## La radiodiffusion

La radiodiffusion en ondes longues et moyennes est fondée sur la propagation des ondes par le sol et par onde ionosphérique en période nocturne. En effet, la couverture est plus importante la nuit, car les ondes, au lieu d'être absorbées dans des couches atmosphériques ionisées par l'action du Soleil, sont alors réfléchies vers le sol. Les ondes longues (encore appelées « ondes kilométriques » en rapport avec leur longueur d'onde) entre 148 et 283 kHz permettent de couvrir des distances jusqu'à 1 000 km alors que les ondes moyennes (encore appelées « ondes hectométriques ») entre 526 et 1 606 kHz permettent de couvrir une surface équivalente à une région française. Les antennes sont en polarisation verticale, émettant un champ électromagnétique qui se propage relativement bien au niveau du sol.

Pour faire de la radiodiffusion sur des distances très importantes (vers l'outre-mer par exemple), il faut utiliser les propriétés de propagation des ondes courtes (encore appelées « ondes décamétriques ») entre 2 et 26 MHz. Dans cette bande, les émissions se font en direction de l'ionosphère qui réfléchit les ondes vers la zone de réception, ce qui permet d'obtenir des distances considérables. Cependant, cette propagation n'est possible qu'à certaines fréquences en fonction des lieux à atteindre, des heures de la journée, et des saisons. Les antennes d'émission sont en polarisation horizontale pour profiter de la réflexion importante du sol.

La radiodiffusion en ondes longues est la première à avoir été utilisée en Europe. Les émetteurs les plus connus sont par exemple France Inter sur 162 kHz, la BBC sur 198 kHz, ou RMC sur 216 kHz. Les puissances de ces émetteurs sont de l'ordre du MW (1 000 kW). La radiodiffusion en ondes moyennes utilise des émetteurs de quelques centaines de kW, il en existe une vingtaine en France pour assurer la couverture du territoire par la radio France Info. La radiodiffusion en ondes courtes se fait essentiellement par des antennes orientables qui permettent de viser un continent étranger, et à l'aide d'émetteurs de 500 kW.

Le niveau de champ immédiatement en périphérie des installations peut parfois atteindre plus d'une dizaine de volts par mètre (V/m) en des endroits où des personnes sont susceptibles de passer. Les installations sont conçues pour que les niveaux de champ à l'extérieur des limites d'accessibilité publique ne dépassent pas les valeurs recommandées par les normes. Ces recommandations garantissent l'absence de risque d'effets sanitaires

aigus tels que des échauffements localisés ou des stress électriques. Quelques études épidémiologiques n'apportent pas de preuve consistante d'un rôle éventuel d'une exposition chronique sur le développement à long terme de pathologies. Bien qu'elles puissent être plutôt considérées comme exploratoires en raison de leur taille limitée, le recul de cette technologie utilisée depuis plus de cinquante ans ne génère pas d'inquiétudes particulières chez les professionnels ou au sein de la population.

## Les lampes fluocompactes (LFCs) basse consommation

Les LFCs fonctionnent selon le principe des tubes fluorescents, bien connus (« néons »). Elles émettent des champs électromagnétiques dans plusieurs gammes de fréquences, de 50 Hz à 10 MHz. Les mesures effectuées dans ces différentes gammes de fréquences, sur mandat de deux organismes suisses, l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) et l'Office fédéral de la santé publique (OFSP)<sup>3</sup>, sont inférieures aux niveaux indiqués dans la recommandation européenne de juillet 1999 sur l'exposition du public aux champs électromagnétiques (1999/519/CE).

C'est également l'avis rendu le 23 septembre 2008 par le SCENIHR<sup>4</sup>. Ce comité a examiné trois caractéristiques de ces lampes : l'éclat, les champs électromagnétiques et les UV. Le comité a identifié, en l'absence d'étude précise sur les LFCs, que le léger rayonnement UV/lumière bleue pourrait être un facteur de risque pour l'aggravation des symptômes chez quelques patients sensibles à la lumière, dans le cas d'exposition prolongée et rapprochée, à moins de 20 cm. Aucune indication n'a été retrouvée qui indiquerait que les champs électromagnétiques ou le scintillement pourraient avoir des conséquences sur la santé (voir aussi le chapitre « La lumière et le rayonnement visible »).

Depuis, à la suite de la publication de recherches financées par le NIH<sup>5</sup>, les experts du NIEHS<sup>6</sup> ont rendu un avis en novembre 2008, qui est que les LFCs n'aggravent pas les symptômes cutanés chez les personnes ayant des affections dermatologiques.

Au total, ces données suggèrent que les lampes à basse consommation sont sûres et peuvent être substituées aux ampoules à incandescence standard<sup>7</sup>, contribuant ainsi de manière non négligeable aux économies d'énergie. En revanche, il faut avoir conscience

3. <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00673/02326/index.html?lang=fr>

4. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, Light Sensitivity. The SCENIHR adopted this opinion at the 26<sup>th</sup> Plenary, on 23 September 2008.

5. The National Institute of Health (États-Unis).

6. The National Institute of Environmental Health Sciences (États-Unis) (2008) Environmental Factor.

7. Chignell CF, Sik RH, Bilski PJ (2008) The photosensitizing potential of compact fluorescent vs. incandescent light bulbs. *Photochem Photobiol*, 84 (5): 1291-93.



que ces lampes basse consommation doivent partir dans le circuit du recyclage en raison du mercure qu'elles contiennent.

### **Les écrans de visualisation : télévision, ordinateur, etc.**

Le balayage de l'écran par un faisceau d'électrons est produit par un champ magnétique alternatif en dents de scie à une fréquence de 15 à 25 kHz, avec des harmoniques à plus faible intensité jusqu'à 125 kHz. Les champs maximaux mesurés aux environs de 30 cm autour des écrans sont de l'ordre de 0,06  $\mu\text{T}$ . Ces valeurs sont très inférieures à la valeur limite de 6,25  $\mu\text{T}$  recommandée dans cette gamme de fréquences. De ce fait, les écrans vidéo sont considérés comme une source d'exposition négligeable aux champs électromagnétiques, d'autant plus qu'ils sont maintenant remplacés par des écrans plats qui ne produisent pas de tels champs.

### **Les lecteurs de proximité**

Les lecteurs de proximité fonctionnent avec des badges portés dans la poche ou dans un sac, sans nécessité de contact direct avec la plaque de lecture. Le badge peut être actif : il contient dans ce cas une batterie qui fournit l'énergie nécessaire à l'émission du signal ; ou passif : l'énergie est fournie dans ce cas par couplage magnétique à partir d'une source de champ externe. Ce sujet est traité plus en détail dans le chapitre « RFID ».

### **Les systèmes antivol**

Le principe des systèmes de surveillance électronique d'articles (SEA) est similaire à celui des badges à lecture distante, mais la durée de passage, aux caisses des magasins par exemple, peut être significativement plus longue, de l'ordre de plusieurs minutes. Les fréquences utilisées sont très diverses, de quelques dizaines de Hz à quelques MHz. Pour assurer la détection des marques quelle que soit leur position, l'intensité du champ magnétique doit être suffisamment élevée en n'importe quel point de la zone de contrôle. Les niveaux de champ magnétique comme les valeurs de courants induits peuvent parfois dépasser les niveaux de références mais non les restrictions de base.

### **Autres sources**

D'autres sources existent, mais pour lesquelles il n'y a pas encore d'information précise et exhaustive sur les niveaux d'exposition qu'elles produisent : on peut citer les lampes

à induction, les haut-parleurs, les détecteurs de métaux, certains appareils médicaux. Il existe également de nombreuses applications professionnelles industrielles et militaires.

## Conclusion

Les sources d'émission des fréquences dites « intermédiaires » sont aussi nombreuses que variées. Les technologies employées aujourd'hui respectent les limites d'exposition du public émises par les instances internationales, ce qui garantit l'absence d'effet aigu sur la santé des expositions dans cette gamme de fréquences. D'après les études publiées, il n'y a pas de preuve d'un effet nocif potentiel de ces expositions à long terme.

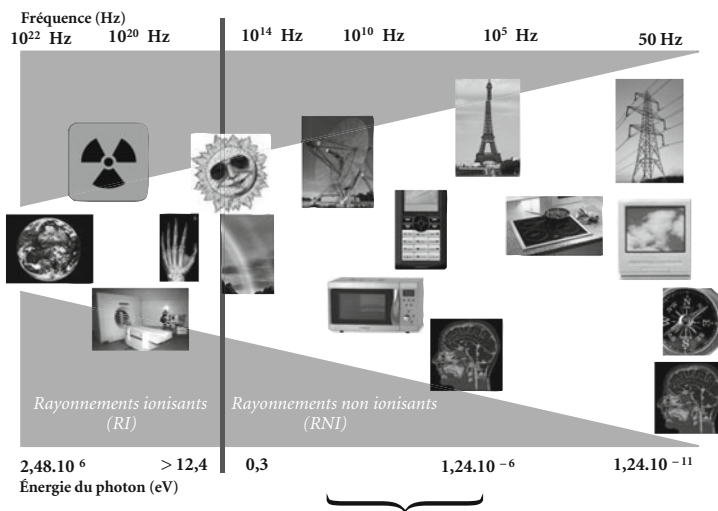
## Pour en savoir plus

- Bergqvist UO, Knave BG (1984) Video display terminals and health. A technical and medical appraisal of the state of the art. *Scand J Work Environ Health* 10 (Suppl. 2), 1-87.
- Foster KR (1999) Mechanisms – Setting limits for electromagnetic field exposure: scaling considerations based on mechanisms. In Matthes R, Van Rongen E, Repacholi MH (eds.) *Health Effects of Electromagnetic Fields in the Frequency Range 300 Hz to 10 MHz*, Munich : International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 55-68.
- Hietanen M (1999) Human studies – Review of epidemiological studies at intermediate frequencies. In Matthes R, Van Rongen E, Repacholi MH (eds.) *Health Effects of Electromagnetic Fields in the Frequency Range 300 Hz to 10 MHz*, Munich : International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 147-54.
- ICNIRP (1998) Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, vol. 74, n° 4: 494-522.
- Juutilainen J, Eskelinen T (1999) Laboratory studies – *In vivo* studies on the health effects of electromagnetic fields in the frequency range 300 Hz to 10 MHz. In Matthes R, Van Rongen E, Repacholi MH (eds.) *Health Effects of Electromagnetic Fields in the Frequency Range 300 Hz to 10 MHz*, Munich : International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 123-32.
- <http://www.emf-portal.de/>
- <http://www.icnirp.org/>
- <http://www.ineris.fr/>
- <http://www.pom2pin.net/radiodiffusion.php>



# Les communications sans fil et les radiofréquences

B. Veyret



## Introduction

Des craintes concernant de possibles effets sur la santé ont été exprimées dès 1993 en raison du développement rapide des communications sans fil et à la suite d'un procès très médiatisé aux États-Unis, envers un constructeur de téléphones mobiles accusé d'être responsable du décès d'une femme par cancer. Depuis cette date, des recherches ont été menées à grande échelle afin d'évaluer les risques sanitaires potentiels associés aux radiofréquences\* (RF).

C'est surtout la téléphonie mobile qui a généré ce questionnement du fait de l'exposition massive qu'elle engendre, avec maintenant plus de quatre milliards d'utilisateurs dans le monde, et également en raison du positionnement de l'appareil contre la tête durant les communications.

Pourtant, les réseaux sans fil et les technologies de communications ne se limitent pas aux téléphones mobiles et leurs stations de base. Ils continuent d'évoluer sans cesse, les conditions d'exposition sont chaque fois différentes et suscitent de nouvelles interrogations.

On ne compte plus le nombre d'articles de vulgarisation, d'interviews, d'émissions à la radio et à la télévision faisant état de risques pour la santé dus aux rayonnements radiofréquences.

## Rappels physiques

Les ondes et champs électromagnétiques considérés dans ce chapitre ont une fréquence située entre 10 MHz et 300 GHz (RF), mais l'essentiel des applications des communications sans fil utilise une onde de fréquence autour du GHz. Ces ondes se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière, et la puissance qu'elles transportent décroît avec le carré de la distance.

Quand elles sont absorbées par les tissus biologiques, elles interagissent surtout avec l'eau (environ 60 % de la masse des tissus). Si la puissance est suffisamment élevée, comme dans un four à micro-ondes, l'absorption conduit à un échauffement conséquent, également mis à profit dans des applications médicales ou industrielles qui ne seront pas développées ici. Contrairement aux fours à micro-ondes domestiques qui sont étanches et puissants (environ de 700 à 1 000 W), les applications des communications sans fil sont conçues pour ne pas générer d'échauffement dans les tissus en produisant des champs électromagnétiques à faible niveau de puissance.

## Sources artificielles

Il n'existe pas de sources naturelles de RF. Ce chapitre sur les RF est illustré par les communications sans fil, c'est-à-dire les systèmes communicants où des informations sont échangées entre deux éléments à la fois émetteurs et récepteurs. Certains RFID en font partie, mais un chapitre à part leur est consacré.

Néanmoins, les systèmes où l'information ne passe que dans un sens (le récepteur ne réémet pas) utilisent aussi les bandes RF. De nombreux radars fonctionnent également dans les bandes RF. Sans entrer dans le détail, nous mentionnerons toutefois la radio-diffusion (*broadcast*) qui est une composante importante de l'exposition ambiante.

## La radiodiffusion FM/TV

Depuis les années 1950, la radio FM et la télévision constituent la très grande majorité des sites de radiodiffusion. Les antennes sont positionnées sur des pylônes de 40 à 350 m de haut et couvrent le territoire par plaques de 30 km de rayon.

Le réseau principal de télévision analogique en UHF (470-860 MHz) est actuellement en pleine mutation vers le numérique terrestre (TNT) avec comme échéance l'arrêt complet en mars 2011 pour une diffusion tout numérique. La couverture est assurée principalement par un réseau de sites de grande hauteur ( $> 100$  m) et d'émetteurs de fortes puissances (jusqu'à 25 kW par canal TV en analogique et 10 kW en numérique). Cependant, leur nombre est très limité, de l'ordre de la centaine. Ce réseau est complété par des sites où les émetteurs font moins de 10 W. Les antennes situées au sommet du pylône sont constituées de panneaux de dipôles horizontaux fixés devant des réflecteurs métalliques. Elles sont réparties sur plusieurs étages et souvent sur les quatre faces du pylône pour donner de l'omnidirectionnalité, c'est-à-dire sans privilégier une direction de propagation et aussi pour accroître la zone de couverture. Le champ électrique mesuré au sol est inférieur à 1 V/m.

Les premiers déploiements des radios FM dans les années 1960 furent réalisés selon le même schéma. La puissance des émetteurs FM peut atteindre 10 kW et le niveau de champ électrique FM au sol est de l'ordre du V/m.

L'essor des radios privées dans les années 1980 et l'urbanisation grandissante ont rendu nécessaire l'installation de pylônes de plus petite taille à proximité des zones urbaines. Ces pylônes de 30 à 70 m diffusent souvent plusieurs radios FM à partir d'une seule antenne émission grâce à la technique du multiplexage fréquentiel\*. Les puissances des émetteurs vont typiquement de 100 à 1000 W. Ces installations induisent un champ électrique au sol, faible au pied du pylône, qui croît jusqu'à une distance pratiquement égale à celle de la hauteur de l'antenne dans le pylône, puis décroît ensuite. Au niveau du sol, le champ électrique est de l'ordre de 1 à 2 V/m.

## Présentation générale des applications de communications sans fil

Les sources RF associées aux communications sans fil sont nombreuses et variées (téléphonie mobile de deuxième et troisième générations, DECT, Wi-Fi, Bluetooth, ULB, RFID, télécommandes, etc.)<sup>1</sup>. Elles sont omniprésentes dans notre environnement et, régulièrement, de nouvelles technologies sont mises en œuvre et déployées (tableau I).

---

1. ICNIRP (2008) Statement on EMF-emitting New Technologies. Health Physics, 94: 376-92. [www.icnirp.org](http://www.icnirp.org)

**Tableau I** – Présentation des applications de communication sans fil et leur bande de fréquence.

<i>Types de service</i>	<i>Technologies</i>	<i>Bandes de fréquences</i>
Service mobile	PMR	30-87,5 MHz / 406,1-470 MHz / 915-921 MHz / etc.
	ERMES	169,4-169,825 MHz
	DECT	1 880-1 900 MHz
	GSM Uplink	880-915 MHz / 1 710-1 785 MHz
	GSM Downlink	925-960 MHz / 1 085-1 880 MHz
	GSM-R Uplink	876-880 MHz
	GSM-R Downlink	921-925 MHz
	UMTS TDD	1 900-1 920 MHz / 1 920-1 980 MHz / 2 010-2 025 MHz
	UMTS FDD Uplink	1 920-1 980 MHz
	UMTS FDD Downlink	2 110-2 170 MHz
	UMTS / IMT-2000	2 500-2 690 MHz
Service mobile par satellite	Satellite IMT-2000	1 980-2 010 MHz / 2 170-2 200 MHz
	MSS Earth Stations	1 525-1 660 MHz / 19,7-21,2 GHz / 29,5-31 GHz
Service spécial : accès fixe hertzien	RLAN	2 400-2 483,5 MHz
	RLAN	5 150-5 350 MHz / 5 470-5 725 MHz
	BLR (Wimax)	3,4-3,8 GHz

Downlink : voie descendante, de l'antenne de station de base vers le mobile ; Uplink : voie montante, du mobile vers l'antenne de station de base.

## La téléphonie mobile

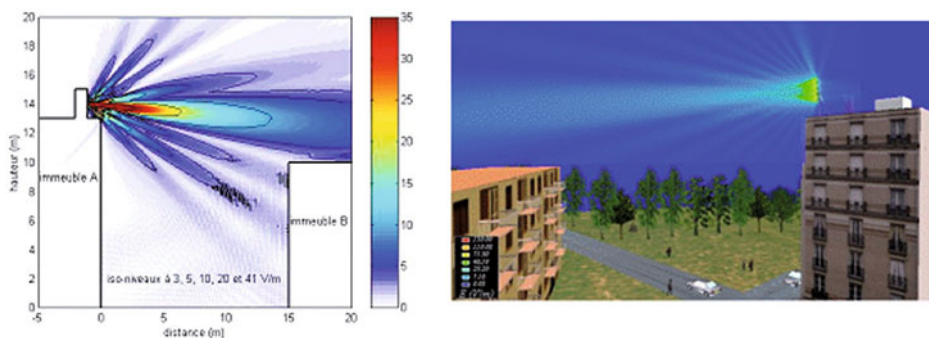
Différents systèmes sont utilisés en téléphonie mobile, mais tous sont fondés sur le principe du découpage du territoire en cellules « nid-d'abeilles ». Au centre de chaque cellule, une station de base émet vers les téléphones mobiles des utilisateurs et reçoit les signaux des portables actifs dans sa cellule (jusqu'à 50 environ). En France, il y a environ 70 000 stations de base exploitées par trois réseaux distincts (bientôt quatre). L'information vocale ou le transfert de données est codée numériquement par modulation de phase\*. Une information très complète sur le fonctionnement des réseaux et sur les mesures de champs RF est fournie sur le site de l'Agence nationale des fréquences ([www.anfr.fr](http://www.anfr.fr)).

Chaque téléphone mobile est un émetteur-récepteur radio opérant également dans des bandes de fréquences de 800 à 2100 MHz. Dans le système GSM 900 par exemple, la puissance maximale d'émission du portable est de 2 W, mais la puissance moyenne est toujours inférieure à 1/8 de cette valeur (0,25 W) et le contrôleur de puissance réduit l'émission à la valeur minimale nécessaire pour une bonne réception. Environ la moitié de la puissance émise par le combiné est absorbée dans la tête de l'utilisateur. Du fait du changement d'usage du téléphone (par exemple de plus en plus de SMS échangés), le combiné est de moins en moins souvent placé contre l'oreille et le débit d'absorption spécifique (DAS) dans la tête diminue d'autant.

Les antennes des stations de base macrocellulaires ont une puissance de l'ordre de 1 W pour les picocellules à 20-30 W pour les macrocellules. Les antennes sont directives et leur onde est rayonnée majoritairement dans un lobe (faisceau principal). Elles sont souvent placées sur le toit d'immeubles et le faisceau émis a la forme d'un disque quasi horizontal. Au niveau du sol où se trouvent les usagers, l'exposition maximale a lieu à environ 200 m de la station de base. Elle est pratiquement nulle au bas de l'immeuble ou du mât sur lequel est érigée l'antenne (fig. 1). L'exposition du public au rayonnement de l'émetteur est typiquement 1/10 000 de la limite recommandée en termes de puissance incidente, qui est par exemple de 4,5 W/m<sup>2</sup> à 900 MHz, et souvent inférieure à celle qui est due aux stations de radio FM.

Dans les zones dites de champ proche, à proximité immédiate des émetteurs, la répartition du champ électromagnétique est plus complexe, et l'évaluation du DAS est indispensable pour estimer l'exposition des personnes. C'est le cas pour le téléphone mobile lui-même, pour lequel la valeur de DAS maximale pouvant être atteinte doit maintenant être fournie par le constructeur.

La plupart des technologies de communications sans fil fonctionnent sur le même principe que la téléphonie mobile, c'est-à-dire avec une « base » et des émetteurs-récepteurs



**Fig. 1** – Différentes représentations de calculs du champ électromagnétique émis par une antenne relais obtenues par simulations numériques (Images Orange Télécom).



(ex. : DECT, Wi-Fi). La technologie RFID utilisant des « tags » récepteurs et parfois émetteurs placés sur des objets ou des personnes est détaillée au chapitre « Les RFID ».

## Interactions avec la matière et propagation

Les ondes RF se propagent dans les tissus biologiques et y sont rapidement atténuées, de manière exponentielle. À des fréquences autour du GHz, la profondeur de pénétration est de l'ordre de 3 cm. La propagation à l'intérieur des tissus (absorption et réflexion) dépend beaucoup des propriétés électriques, plus exactement « diélectriques », des tissus, elles-mêmes fonction de la teneur en eau et de la fréquence. Ainsi, les liquides biologiques (sang, liquide céphalo-rachidien\*, etc.) absorbent plus que les os qui contiennent peu d'eau.

## Mesures et dosimétrie

Les ondes électromagnétiques qui sont produites par des sources lointaines du corps, comme les stations de base, sont caractérisées par leur fréquence, leur direction et leur puissance,  $S$ , exprimée en watt par mètre carré ( $W/m^2$ ). Ces ondes sont à la fois réfléchies par l'organisme (environ 50 % de réflexion autour du GHz) et absorbées à l'intérieur des tissus. L'absorption des ondes RF est quantifiée à l'aide d'une grandeur, le DAS, exprimé en watts par kilogramme ( $W/kg$ ). Il s'agit, au niveau du corps entier ou localement, de la puissance absorbée par unité de masse de tissu. Tant que le corps peut dissiper la chaleur par thermorégulation, grâce à la circulation sanguine en particulier, il n'y a pas d'élévation de température.

Des mesures de champs électromagnétiques sont effectuées pour vérifier que les niveaux d'exposition des personnes sont inférieurs aux limites préconisées par la réglementation. Des antennes et des sondes de champ électrique existent qui peuvent être miniaturisées. Grâce à des analyseurs de spectre, il est possible de savoir, en un point donné, quels sont les niveaux de champs instantanés en fonction de la fréquence.

Des calculs sont effectués sur des modèles numériques de têtes et de corps (animal, homme), en fonction du sexe et de l'âge, qui permettent de connaître la déposition de l'énergie dans les tissus et éventuellement l'échauffement produit. La qualité de ces calculs s'est grandement améliorée durant ces dernières années grâce à la meilleure précision des modèles (couramment des voxels<sup>2</sup> de 0,5 mm de côté), à l'utilisation de logiciels et de

---

2. Volume représenté par un cube, pixel lorsque c'est une délimitation en deux dimensions.

méthodes mathématiques perfectionnés, et à l'augmentation de puissance des ordinateurs. Des modèles ou « fantômes » numériques d'enfants et de fœtus *in utero*\* sont maintenant disponibles.

## Interactions avec le vivant et effets biologiques

### Les recherches

Les normes existantes d'exposition sont fondées sur des effets aigus reconnus comme étant dus à l'échauffement à partir d'une certaine puissance. En particulier, des altérations du comportement d'animaux exposés à partir de niveaux dépassant 4 W/kg ont servi de référence. Puisque l'échauffement dans les tissus est négligeable lors des expositions liées aux applications de communications sans fil, la recherche d'effets sanitaires des RF doit se tourner vers la mise en évidence d'éventuels effets d'origine non thermique.

Le développement rapide de la téléphonie mobile et des communications sans fil a suscité un effort considérable et mondial de recherches sur le sujet auquel plus de dix millions d'euros par an ont été consacrés. C'est en Europe que cette recherche a été la plus active (Grande-Bretagne, Allemagne, Italie et Finlande en particulier), mais aussi au Japon, en Corée du Sud, aux États-Unis et en Australie. La plupart des gouvernements ont pris très au sérieux l'impact éventuel de ces technologies sur la santé. Plusieurs comités nationaux et internationaux ont rédigé des rapports bien circonstanciés sur le sujet (voir « Pour en savoir plus »). En mai 2009, la base de données de l'OMS a répertorié plus de 1 000 études concernant la téléphonie mobile et la technologie Wi-Fi (Tableau II). Au sein de ce corpus de savoir, plus de 550 études ont trait à la téléphonie mobile.

**Tableau II** – Études sur les effets biologiques des RF (téléphonie mobile et Wi-Fi) répertoriées par l'OMS en mai 2009.

Type d'étude	En cours	Non encore publiées	Publiées
Physique	67	12	425
Épidémiologie	33	10	147
Études humaines	42	14	189
Études animales	37	18	203
Études in vitro*	52	24	192
<b>Total</b>	<b>231</b>	<b>78</b>	<b>1 156</b>

Depuis que la recherche est active dans ce domaine, l'analyse du risque, qui est fondée sur les résultats publiés dans les journaux scientifiques, a montré l'importance des études de réplication, qui permettent de s'assurer que les effets biologiques décrits par une équipe de recherche sont reproduits par une ou plusieurs autres équipes indépendantes. Les résultats qui ne peuvent être répliqués après plusieurs tentatives ne sont plus pris en compte dans l'analyse du risque. Cela n'est du reste pas spécifique de ce domaine de recherche, mais commun à toutes les études visant à mettre en évidence les effets des faibles doses\*. La qualité des recherches et des évaluations a progressé très sensiblement durant les dix dernières années, notamment grâce au progrès dans la maîtrise des systèmes d'exposition et la dosimétrie. Néanmoins, de nombreuses lacunes méthodologiques persistent encore comme en témoigne la récente analyse réalisée dans le rapport de l'Afsset 2009. C'est notamment le cas pour la grande majorité des publications qui font état d'effets biologiques des RF, ainsi que pour une partie de celles qui n'en montrent pas.

## Études cellulaires

Les études *in vitro*\*, faites sur des cultures de cellules (animales ou humaines), permettent de préparer des études animales et d'approfondir la compréhension de certains mécanismes.

Les effets des champs RF de faible DAS sur l'activité de l'enzyme ornithine décarboxylase\* (ODC), décrits par le groupe de Litovitz aux États-Unis<sup>3</sup>, n'ont pas été confirmés dans les études approfondies réalisées dans le cadre du programme européen « Perform B »<sup>4</sup>.

L'absence d'effets génotoxiques (sur l'ADN\*) des RF à faible DAS a été confirmée par les études les plus récentes. Des résultats publiés dans le cadre du programme européen « Reflex » ont entretenu l'incertitude et de nombreuses polémiques, mais ils n'ont pu être reproduits par d'autres équipes.

Les études sur le processus d'apoptose\* semblent contradictoires, car des modèles très différents ont été utilisés, et il est difficile de comparer les résultats. Toutefois, il ne semble pas exister d'effet inducteur non thermique des RF sur l'apoptose cellulaire. Il est important de noter que les études utilisant des cellules d'origine cérébrale, les plus exposées en cas d'utilisation d'un téléphone mobile, ne montrent pas d'effet des RF sur les taux d'apoptose.

---

3. Penafiel LM, Litovitz T, Krause D *et al.* (1997) Role of modulation on the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity in L929 cells. *Bioelectromagnetics* 18: 132-41.

4. Höytö A, Juutilainen J, Naarala J (2007) Ornithine decarboxylase activity is affected in primary astrocytes but not in secondary cell lines exposed to 872 MHz RF radiation *Int. J. Radiat. Biol.*, 83: 367-74.

De nombreuses études ont également porté sur l'expression génique\*, les protéines de choc thermique\* ou de stress, les radicaux libres sans que se dégage non plus une action précise des RF à faible niveau de puissance.

En conclusion, aucun effet biologique n'a été scientifiquement établi à des niveaux non thermiques dans les études *in vitro*.

## Études animales

L'utilisation de modèles animaux est extrêmement précieuse, car elle permet d'obtenir des informations sur les effets biologiques et sanitaires d'exposition à des agents physiques ou chimiques, que l'on ne peut acquérir chez l'homme pour des raisons éthiques évidentes.

Un grand nombre d'études sur des animaux ont été conduites faisant surtout appel aux différentes fréquences et modulations de la téléphonie mobile. Il apparaît clairement, à partir des données publiées, que la grande majorité des effets biologiques rapportés relèvent d'effets thermiques apparaissant à des niveaux de DAS élevés. Les effets biologiques trouvés seraient dus soit à une élévation de température des tissus, soit aux réponses physiologiques\* visant à minimiser l'élévation de la température (thermorégulation). Depuis dix ans, des améliorations des systèmes d'exposition pour les animaux ainsi que les progrès de la dosimétrie ont rendu possible une meilleure caractérisation du DAS à l'intérieur des organismes.

Il est maintenant possible de mieux cerner les effets éventuels d'expositions locales en simulant l'utilisation de sources ponctuelles telles que le téléphone mobile, et de mieux prendre en compte le cas d'exposition du corps entier de l'animal en relation avec les émissions des stations de base.

Une grande partie des études animales a porté sur des modèles de cancer. Toutes les études à long terme ou celles dans lesquelles les tumeurs étaient provoquées indiquent que les RF ne sont pas cancérogènes chez l'animal. Dans la seule étude montrant un effet cancérogène, des souris transgéniques étaient utilisées afin d'augmenter l'incidence de lymphomes. Une augmentation de l'incidence des tumeurs était constatée après l'exposition à des rayonnements GSM. Ces résultats n'ont pas été confirmés dans deux études similaires de réplication, dont l'une était réalisée au sein du programme européen « Perform A »<sup>5</sup>. Sous réserve des conditions de transposition des études animales chez l'homme, il n'apparaît pas que l'exposition aux signaux de la téléphonie mobile augmente l'incidence des tumeurs à court ni à long terme.

---

5. [http://cordis.europa.eu/data/PROJ\\_FP5/ACTIONeqDndSESSIONeq112482005919ndDOCeql1513ndTBLeqEN\\_PROJ.htm](http://cordis.europa.eu/data/PROJ_FP5/ACTIONeqDndSESSIONeq112482005919ndDOCeql1513ndTBLeqEN_PROJ.htm)

Les résultats de la plupart des travaux ne concernant pas le cancer n'ont pas révélé d'effets délétères pour des conditions expérimentales non thermiques, comparables à l'exposition humaine réelle (mémoire, EEG\*, audition, barrière hémato-encéphalique\*, etc.).

## Études humaines

Les études humaines en laboratoire consistent à exposer, en double aveugle\*, des volontaires à des champs électromagnétiques et à effectuer des tests soit biologiques (niveaux d'hormones par exemple), soit de comportement (perception, mémoire, apprentissage, etc.). Divers tests et protocoles ont été utilisés concernant essentiellement l'exposition au téléphone mobile.

Ainsi, deux groupes, l'un anglais et l'autre finlandais, ont soumis des enfants à des tests de comportement avec ou sans exposition à des signaux de téléphones mobiles. Dans ces expériences pratiquées en double aveugle, aucune différence n'a été observée entre sessions exposées et sessions non exposées.

Des effets faibles et de l'ordre des variations physiologiques normales ont été observés sur le débit sanguin cérébral chez un nombre limité de sujets dans deux études<sup>6</sup> en utilisant des techniques d'imagerie cérébrale. Ces études n'ont pas été répliquées et ce ne sont pas les mêmes zones du cerveau qui sont concernées dans les deux cas.

En ce qui concerne l'exposition aux ondes de faible niveau issues des stations de base, les conclusions du colloque organisé par l'OMS en 2005 étaient négatives, c'est-à-dire qu'aucun effet sanitaire n'est causé par l'exposition<sup>7</sup>. Aucune donnée nouvelle ne permet de remettre en cause cette conclusion.

L'une des questions essentielles qui se pose aujourd'hui concerne la sensibilité des enfants aux rayonnements RF du téléphone mobile. Des questionnements sont justifiés par le fait que leur système nerveux central est en cours de développement et que leur tête pourrait absorber le rayonnement RF du téléphone différemment des adultes. Il est aujourd'hui difficile de répondre à ces questions par l'expérimentation en laboratoire ou par simulation numérique. La répartition du DAS à l'intérieur de la tête des enfants est en principe différente de celle des adultes en raison de la moindre épaisseur de l'oreille et du crâne. Il est donc possible que le DAS à la périphérie du cerveau soit augmenté chez l'enfant, même s'il n'y a pas de consensus actuellement sur ce sujet parmi les spécialistes.

---

6. Huber R, Treyer V, Schuderer J *et al.* (2005) Exposure to pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields affects regional cerebral blood flow. *Eur J Neurosci.* 21(4): 1000-6.

Aalto S, Haarala C, Brück A *et al.* (2006) Mobile phone affects cerebral blood flow in humans. *J Cereb Blood Flow Metab.* 26(7): 885-90.

7. WHO/EMF-NET (2008) Base stations and wireless networks : exposures and health consequences. Repacholi, Van Devanter, Ravazzani eds.

L'OMS a défini des recommandations de recherche concernant les enfants. En particulier, elle recommande de réaliser des études épidémiologiques prospectives de cohorte\* sur les enfants et des études en laboratoire sur des animaux *in utero* ou jeunes.

Dans l'ensemble, les résultats des études humaines sont négatifs ou difficiles à reproduire, y compris à l'intérieur d'un même laboratoire, les quelques résultats positifs étant toujours de faible amplitude et ne convergeant pas vers un effet particulier.

À ce jour, aucun fait établi à partir des études humaines ne permet donc de conclure que les signaux RF représentent un problème de santé publique.

## Études épidémiologiques

Pour étudier la relation entre un facteur de risque et une maladie, l'approche la plus informative est celle de l'épidémiologie\* qui porte sur des populations dans leur environnement réel. Cependant, les résultats de ces études doivent être interprétés avec précaution compte tenu de la multiplicité des facteurs de risque potentiels existants dans l'environnement, qui ne sont pas tous maîtrisables.

Jusqu'en 2003, la majorité des études épidémiologiques, de type cas-témoins\*, avait porté sur l'incidence de tumeurs chez les utilisateurs de téléphones mobiles. Elles n'avaient pas permis de conclure à un effet délétère mais elles étaient peu informatives, parce que les données de l'exposition étaient toujours entachées d'incertitudes importantes, et parce que la puissance statistique était le plus souvent insuffisante. Une étude internationale multicentrique a donc été réalisée dans le cadre du programme Interphone associant 13 pays<sup>8</sup>. La mise en commun de l'ensemble des données permet d'avoir une grande puissance statistique, c'est-à-dire une meilleure confiance dans les résultats. Interphone a été pilotée par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC)<sup>9</sup> et portait sur les tumeurs de la tête et du cou. En raison de la difficulté de connaître avec une précision suffisante le niveau d'exposition des utilisateurs, des moyens importants ont été mis en œuvre pour obtenir la meilleure classification possible. Pour le neurinome de l'acoustique\*, tumeur rare et bénigne, certains résultats montrent, pour une utilisation de plus de 10 ans, une augmentation de l'incidence du côté d'utilisation du téléphone mobile, sans que les auteurs concluent à une relation causale\* entre exposition et développement des neurinomes. Les résultats globaux de l'étude Interphone sur les gliomes et méningiomes viennent d'être publiés<sup>10</sup> :

---

8. Allemagne, Australie, Canada, Danemark, Finlande, France, Israël, Italie, Japon, Norvège, Nouvelle-Zélande, Grande-Bretagne, Suède.

9. [www.iarc.fr/FR/Units/RCAd.html](http://www.iarc.fr/FR/Units/RCAd.html)

10. THE INTERPHONE Study GROUP *et al.* (2010). Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the Interphone international case-control study. *International Journal of Epidemiology*, 39(3) : 675-94.

l'étude ne montre aucun risque significatif de gliome ou de méningiome pour ceux qui utilisent un portable depuis plus de quatre ans mais elle montre un effet protecteur que les auteurs attribuent à des biais et erreurs méthodologiques.

Parmi les personnes ayant utilisé le téléphone mobile depuis un à quatre ans, l'étude montre un risque significatif de gliome, uniquement pour les très gros utilisateurs (plusieurs heures par jour). Les auteurs et l'ICNIRP notent que cette catégorie d'utilisateurs comprend des personnes ayant rapporté des temps d'utilisation hautement improbables.

Deux études de même type, c'est-à-dire cas-témoins, sur les cancers chez l'enfant, sont en cours : CEFALO<sup>11</sup> et MOBI-KIDS<sup>12</sup>.

Par ailleurs, de rares études épidémiologiques ont porté sur les stations de base ou les stations FM mais n'apportent pas de données probantes.

De façon générale les études épidémiologiques disponibles présentent des biais méthodologiques ; en particulier l'exposition des personnes est rarement suffisamment bien connue, ce qui a pour effet de réduire artificiellement les intervalles de confiance sur les facteurs de risque ; le nombre de cas est faible dans certaines catégories d'exposition, la population témoin est mal identifiée, etc. La mise en œuvre d'études prospectives, de type cohorte, est donc nécessaire même si elles sont associées à d'autres difficultés de réalisation et d'interprétation, telles que la durée, le coût, une faible puissance pour étudier les maladies rares par exemple. De telles études ont été lancées dans plusieurs pays d'Europe du nord en 2008 (COSMOS)<sup>13</sup>.

## L'hypersensibilité aux champs électromagnétiques RF

Certains sujets se disent hypersensibles à l'électricité ou électrohypersensibles (EHS en anglais, ou syndrome micro-ondes) et souffrent également de symptômes en présence des sources de RF. Plusieurs études ont été réalisées sur ces personnes sensibles. Un rapport, issu du laboratoire néerlandais TNO<sup>14</sup>, avait en 2003 attiré l'attention des médias et de la communauté scientifique. Il faisait état d'altérations de faible amplitude sur le bien-être de volontaires exposés aux rayonnements provenant de stations de base du type UMTS.

---

11. Feychting M *et al.* 2006. CEFALO: A Case-Control Study of Brain Tumors in Children and Adolescents and Mobile Phone Use. *Epidemiology*, 17 : S74. (Danemark, Grande-Bretagne, Norvège, Suède et Suisse).

12. [www.mbkds.com](http://www.mbkds.com) : Allemagne, Australie, Autriche, Canada, Espagne, France, Grèce, Israël, Italie, Nouvelle-Zélande, Pays-Bas et Taïwan.

13. [www.ukcosmos.org](http://www.ukcosmos.org) : Danemark, Finlande, Pays-Bas, Grande-Bretagne et Suède.

14. Zwamborn APM, Vossen SHJA, Van Leersum BJAM *et al.* (2003) Effects of global communication system radiofrequency fields on well being and cognitive functions of human subjects with and without subjective complaints. The Hague: TNO Physics and Electronics Laboratory, FEL-03- C148.

Ce travail a suscité de nombreuses critiques et son protocole a servi de base pour des études plus approfondies dont les résultats, en Suisse<sup>15</sup> et en Grande-Bretagne<sup>16</sup>, n'ont pas confirmé ces observations. D'autres études similaires ont été réalisées au Danemark<sup>17</sup> et au Japon<sup>18</sup>, qui sont également négatives.

En complément des études du type TNO, de nombreuses études ont été réalisées sur des sujets hypersensibles à l'électricité. Les conclusions du congrès organisé sur ce thème par l'OMS en 2004<sup>19</sup> étaient que la réalité d'une telle hypersensibilité à l'électricité et aux RF n'est pas démontrée. Depuis, plusieurs articles de revue de la littérature sur le sujet ont conclu à l'absence de preuves d'un lien causal entre exposition RF et symptômes. En revanche, tout le monde s'accorde sur le fait que les souffrances des personnes sont réelles et doivent être prises en compte.

## Interactions avec les implants et stimulateurs

De nombreuses études ont été réalisées pour déterminer si des expositions aux champs électromagnétiques des communications sans fil modifiaient le fonctionnement des implants passifs (broches métalliques par exemple) ou actifs (stimulateurs cardiaques...). Il existe de très nombreuses combinaisons de modes d'exposition et de dispositifs placés à l'intérieur du corps, dans les milieux familial, professionnel ou médical.

Les dispositifs implantés actifs ont été constamment améliorés du point de vue de leur compatibilité avec les champs électromagnétiques environnants. Aujourd'hui, on peut dire que cette immunité est satisfaisante pour les appareils modernes même si l'on conseille de placer les portables à une distance de plus de 15 cm du stimulateur ou du défibrillateur cardiaque. Dans les hôpitaux, des incertitudes demeurent quant aux interférences possibles entre émissions RF et certains dispositifs sensibles et vitaux pour la santé des

---

15. Regel SJ, Negovetic S, Roosli M *et al.* (2006) UMTS base station-like exposure, well-being, and cognitive performance. *Environ Health Perspect* 114(8): 1270-5.

16. Eltiti S, Wallace D, Ridgewell A *et al.* (2007) Does Short-Term Exposure to Mobile Phone Base Station Signals Increase Symptoms in Individuals Who Report Sensitivity to Electromagnetic Fields? A Double-Blind Randomized Provocation Study. *Environ Health Perspect*. 115: 1603-8.

17. Riddervold IS, Pedersen GE, Andersen NT *et al.* (2008) Cognitive function and symptoms in adults and adolescents in relation to RF radiation from UMTS base stations. *Bioelectromagnetics*. 29: 257-67.

18. Furubayashi T, Ushiyama A, Terao Y *et al.* (2009) Effects of short-term W-CDMA mobile phone base station exposure on women with or without mobile phone related symptoms. *Bioelectromagnetics* 30: 100-13.

19. WHO/EMF-NET (2006) Electromagnetic hypersensitivity. Hanson Mild, Repacholi, van Devanter, Ravazani Eds.



malades hospitalisés. Ainsi, les téléphones mobiles ont été interdits dans les services ayant de nombreux équipements électroniques vitaux. Cependant, ces interdictions sont en train d'être annulées, en tout cas hors de salles sensibles telles que celles de réanimation. En ce qui concerne les implants passifs métalliques, des échauffements sont à craindre quand le niveau de champ est élevé, ce qui n'est pas le cas des communications sans fil.

## Réglementation, recommandations

Les normes actuelles en Europe sont issues de la recommandation européenne de 1999 sur les RF qui est elle-même fondée sur les recommandations de l'ICNIRP de 1998<sup>20</sup> (fig. 2). L'ICNIRP a pris en compte les données de la publication de l'étude « Interphone »<sup>21</sup> dès sa publication et considère que, venant s'ajouter aux données scientifiques disponibles, « les résultats de l'étude Interphone ne donnent aucune raison de modifier les recommandations actuelles concernant les limites d'exposition ».

En milieu de travail, les valeurs des limites en termes de restriction de base (DAS) ne dépendent pas de la fréquence (tableau III). Des niveaux de référence visant à respecter ces limites et pouvant être mesurés sur le terrain leurs sont associés (tableau IV). La directive européenne limitant les expositions professionnelles doit être retranscrite dans les pays communautaires d'ici le 30 avril 2012.

La limite d'exposition du public est exprimée en termes de restriction de base (DAS corps entier inférieur de 0,08 W/kg et DAS de 2 W/kg sur 10 g en exposition locale, pour la tête). Elle est également assortie de niveaux de référence définis en fonction de la fréquence (ex. :  $S = 4,5 \text{ W/m}^2$  ou  $E = 41 \text{ V/m}$  à 900 MHz). Ces valeurs sont cinq fois moindres que pour les travailleurs (tableaux III et IV). En France, un décret du 3 mai 2002 reprend exactement les termes de la recommandation européenne de 1999 pour les limites d'exposition du public.

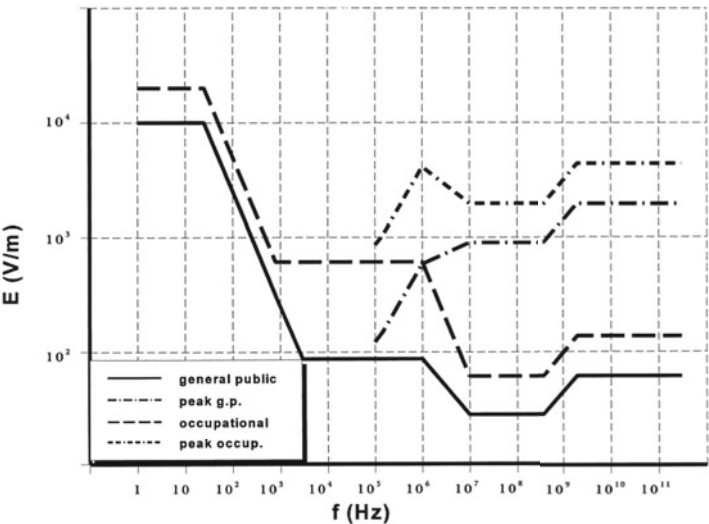
Les normes IEEE, qui sont à la base de la réglementation américaine, sont analogues<sup>22</sup>.

---

20. ICNIRP (1998) Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz) Health Physics 74 (4): 494-522 (<http://www.icnirp.de/PubEMF.htm>).

21. <http://www.icnirp.org/documents/ICNIRPnote.pdf>

22. IEEE (2005) IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. IEEE Std C95.1 (Revision of IEEE Std C95.1-1991) 238 pages.



**Fig. 2** – Limites d'exposition pour le public et les travailleurs (exposition professionnelle) recommandées par l'ICNIRP pour des fréquences allant de 1 Hz à 300 GHz. Ces limites varient selon la fréquence (ICNIRP guidelines).

**Tableau III** – Valeurs des limites fondamentales proposées par l'ICNIRP pour l'exposition du public et des travailleurs (non mesurables) : valeur moyenne à respecter sur une durée de 6 minutes sur 10 g.

	<i>DAS moyen dans le corps</i>	<i>DAS tête et tronc</i>	<i>Texte législatif</i>
Effet établi	4 W/kg		
Limite pour les travailleurs	0,4 W/kg	10 W/kg	Directive 2004/40/CE
Limite pour le public	0,08 W/kg	2 W/kg	RE 1999/519/CE

**Tableau IV** – Exemples de valeurs des limites mesurables proposées par l'ICNIRP pour l'exposition du public et des travailleurs.

<i>Fréquences</i>	<i>Champ électrique</i>	<i>Champ magnétique</i>	<i>Population</i>
De 10 à 100 MHz	61 V/m 28 V/m	0,2 µT 0,092 µT	Travailleur Public
915 MHz	91 V/m 42 V/m	0,3 µT 0,14 µT	Travailleur Public
1 800 MHz	127 V/m 58 V/m	0,4 µT 0,2 µT	Travailleur Public

## Précautions, protection

Dans le cas d'un effet à seuil, thermique pour les RF, il faut bien évidemment se placer en dessous du niveau de puissance qui l'engendre, et cela est garanti par la réglementation. Néanmoins des recommandations d'usage ont été données, correspondant à des décisions libres des utilisateurs pour diminuer l'exposition. Elles concernent le téléphone mobile qui est de loin la principale source d'exposition à l'heure actuelle.

Pour cela il suffit :

- de diminuer le niveau d'exposition en téléphonant dans des zones de bonne réception ;
- d'éloigner le téléphone de la tête (et d'autres organes potentiellement sensibles) ;
- de diminuer la durée d'exposition.

Ces mesures relèvent de la précaution et non de la prévention dans la mesure où le risque n'est pas avéré. Les différentes recommandations émises par les pouvoirs publics et les industriels reprennent ces trois mesures et les traduisent en conseils pratiques.

## Conclusion

Les communications sans fil, en développement accéléré, ont suscité à juste titre des questions en termes d'effets sanitaires. En parallèle, plusieurs pays et organismes internationaux diffusent l'information disponible et communiquent sur le risque. Néanmoins, nous sommes face à une situation paradoxale : les recherches effectuées sont globalement négatives et l'incertitude se réduit, mais les craintes perdurent alors que les téléphones mobiles se vendent très bien et que le déploiement d'autres réseaux de communications est en cours.

À la question : « communications sans fil, y a-t-il danger sanitaire ? », à l'issue d'une période très active de recherche internationale, il est aujourd'hui possible de conclure que l'ensemble des données scientifiquement établies n'est nullement en faveur d'un risque significatif pour la santé humaine dans des conditions normales d'utilisation. Cependant, au vu du nombre très important d'utilisateurs, une augmentation minime du risque pourrait se traduire par un problème de santé publique, ce qui justifie de poursuivre une activité de recherche dans les domaines où des questions restent en suspens. Notons qu'elle concerne l'exposition au téléphone mobile avant tout, car c'est la source principale d'exposition. Les sources lointaines (stations de base, Wi-Fi, Wimax) ne posent pas de problème sanitaire, même en tenant compte de l'addition des expositions issues des différentes sources, car le niveau d'exposition qui en résulte est très bas. De plus,

il n'apparaît aucun mécanisme susceptible d'étayer un effet nocif sur la santé dû à des rayonnements RF d'aussi faible intensité que ceux exploités en communications sans fil, car il n'y a pas de transfert thermique suffisant.

À ce jour, les résultats des recherches, portant aussi bien sur des études épidémiologiques que sur des animaux en laboratoire exposés ponctuellement ou tout au long de leur vie, n'apportent aucune preuve que l'exposition soit cause de cancers ou d'autres maladies. Il reste quelques questions, en particulier en ce qui concerne la sensibilité des enfants aux champs RF émis par le téléphone mobile. Les recherches en cours devraient aider à lever ces incertitudes dans les années qui viennent.

Pour l'avenir, face à l'impact éventuel de la multiplication des sources RF utilisées en communications sans fil, il s'agira de répondre à des questions de santé publique sans que la panoplie lourde des approches épidémiologique et animale soit mise en œuvre systématiquement pour chaque type de signal. Il faudra donc extrapoler à partir des connaissances acquises, en particulier à partir des études nombreuses conduites sur les effets des signaux de la téléphonie mobile.

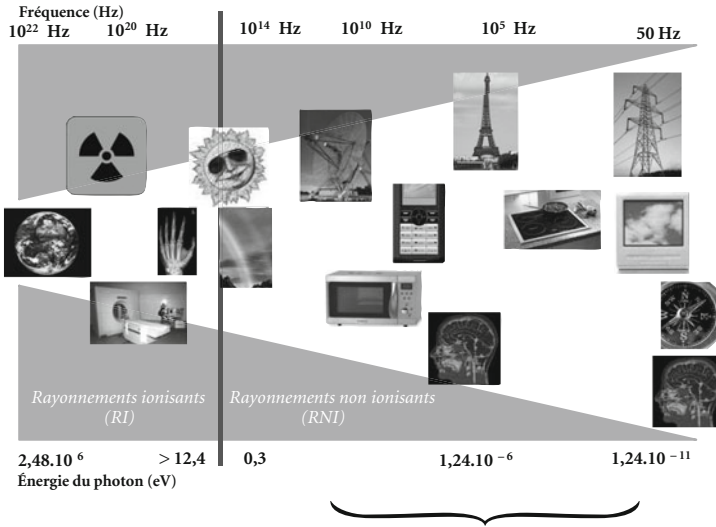
## Pour en savoir plus

- Afsset : rapport « les Radiofréquences », octobre 2009 : [www.afsset.fr/index.php?pageid=2456&parentid=424](http://www.afsset.fr/index.php?pageid=2456&parentid=424)
- Avis des Académies de médecine, des sciences et des technologies (2009) : [www.academie-medicine.fr/detailPublication.cfm?idRub=26&idLigne=1752](http://www.academie-medicine.fr/detailPublication.cfm?idRub=26&idLigne=1752)
- Fondation Santé-Radiofréquences : [www.sante-radiofrequences.org/](http://www.sante-radiofrequences.org/)
- Fornel (de) F, Favennec PN (2007) Mesures en électromagnétisme, Revue des systèmes, série Instrumentation, mesure, métrologie (I2M), Lavoisier, vol. 7, n° 1-4.
- OMS, Base de données : [www.who.int/peh-emf/research/database/fr/index.html](http://www.who.int/peh-emf/research/database/fr/index.html) ; Recommandations de recherche : [www.who.int/peh-emf/research/agenda/en/index.html](http://www.who.int/peh-emf/research/agenda/en/index.html)
- ICNIRP (2009) “Blue book” Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz) – Review of the Scientific Evidence and Health Consequences. Munich. [www.icnirp.de/documents/RFReview.pdf](http://www.icnirp.de/documents/RFReview.pdf)
- Wiart J, Bravo A (2010) Téléphonie mobile et protection des personnes : dosimétrie et gestion des risques, une approche constructiviste et citoyenne, REE, n° 25 : 1-7.



# Les RFID

J.-C. Debouzy et A. Perrin



## Introduction

Le développement des systèmes d'identification par radiofréquences\* (RFID), également appelés « étiquettes intelligentes à radiofréquence » ou « étiquettes RFID », est en pleine expansion. Ils peuvent prendre des formes multiples pour s'adapter à de nombreux supports. Le terme « RFID » est l'acronyme de l'expression anglaise « radiofrequency identification » et regroupe tous les systèmes d'identification par communication sans fil à l'aide de radiofréquences.

Il s'agit d'une technologie d'identification et de traçage à l'aide d'une étiquette et d'un lecteur comme pour les codes-barres. Contrairement à ces derniers qui doivent être placés dans l'axe d'un laser, la lecture ne nécessite que la présence de l'étiquette dans un champ électromagnétique. Le terme de « lecteur » est impropre bien que parfois employé, le terme « interrogateur » est celui retenu par l'ISO\*.

L'ensemble fonctionnel comprend l'émetteur RFID proprement dit, ou station de base (fixe ou mobile), et les étiquettes (appelées également « tag »<sup>1</sup>). Ce système plus résistant que les codes-barres est facilement intégrable et présente une capacité de stockage supérieure. Son contenu peut être modifié et il peut intégrer un système de géolocalisation. Il y a plusieurs catégories de tags : actifs, c'est-à-dire capables d'émettre des signaux pour envoyer des informations, et passifs qui nécessitent obligatoirement un lecteur pour accéder aux données.

## Rappels physiques et sources

### *La station de base ou interrogateur*

Les RFID concernent une large gamme de fréquences. L'interrogateur est le principal dispositif émetteur radiofréquences du système. Les bandes de fréquences utilisées se répartissent essentiellement en quatre groupes<sup>2</sup> (tableau I).

Selon la gamme de fréquences, les portées maximales varient en fonction de la puissance émise, de la forme de l'émetteur et selon les pays.

**Tableau I** – Répartition en fréquence, caractéristiques et usage des RFID en Europe.

<i>Fréquence</i>	<i>Portée</i>	<i>Exemples d'applications</i>	<i>Réception</i>
<b>125-140 kHz (BF)</b>	> 1 m	Instrumentation	Bobine
<b>13,56 MHz (HF)</b>	De 0,9 à 2,5 m, sans restriction de puissance	Marquages textiles Instrumentation Kits opératoires Item tagging (médicaments) Identification de patients Puces de marquage d'animaux	Boucle
<b>400-900 MHz, 2,45 GHz (UHF)</b>	De 0,6 à 8 m selon la puissance	Colis, palettes	Boucle
<b>4,8 et 5,8 GHz (SHF)</b>	De 0,6 à 8 m selon la puissance	Identification de patients Télépéages	Antenne

BF : basses fréquences ; HF : hautes fréquences ; UHF : ultra-hautes fréquences ; SHF : super hautes fréquences.

---

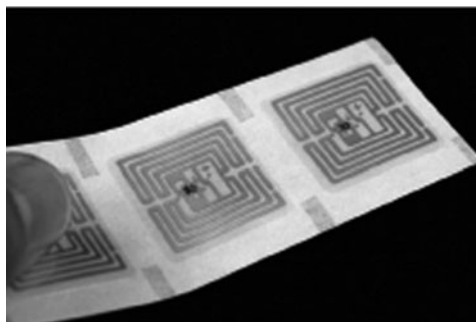
1. Le terme « tag » utilisé en anglais, pour « étiquette RFID » est retrouvé dans de nombreuses publications francophones.

2. Comité international ISO SC31, CN31 France.

### *Les étiquettes (tag)*

Ce sont les éléments déportés du système. Selon les applications, ils sont nommés « cartes à puce sans contact », « étiquettes électroniques » ou « badges d'accès électronique », par exemple. Le terme général de « tag » est fréquemment rencontré.

Ces étiquettes comprennent une puce électronique où sont mémorisées les données d'identification et une antenne pour la transmission des informations. L'antenne est généralement enroulée pour gain de place (fig. 1). La mémoire est accessible en lecture seule ou en lecture/écriture. Comme il n'est pas nécessaire que l'étiquette soit visible, celle-ci peut être fixée (collée, insérée) dans un objet, à l'intérieur de matériaux ou même d'êtres vivants.



**Fig. 1** – Tag avec antenne enroulée.

Selon qu'elles possèdent ou non un système d'alimentation, les étiquettes sont dites actives ou passives. Dans le cas des systèmes actifs, l'étiquette intègre également un émetteur permettant l'envoi d'informations à la base en produisant un champ électromagnétique. Ces étiquettes peuvent être réparties en cinq classes en fonction de leurs performances (tableau II).

**Tableau II** – Liste et caractéristiques des différentes classes d'étiquettes.

	<i>Type</i>	<i>Système</i>	<i>Utilisation type</i>
Classe 0	Passive	Préprogrammé	Antivol : code d'identification d'items
Classe I	Passive	Programmable une fois : WORM ( <i>write once read many</i> )	Portique d'identification (accès)
Classe II	Passive/active	Modifiable	Minibase de données
Classe III	Semi-passive	Transfert permanent d'informations sur sollicitation du lecteur RFID	Couplées à des capteurs
Classe IV	Active	Communication entre étiquettes	Possibilité de mise en réseau des étiquettes



## Mesures et dosimétrie

Le niveau d'exposition du public est souvent inconnu, mais très faible en comparaison d'autres sources (de 100 mW à 2 W, sauf cas particulier comme des systèmes de surveillance d'animaux par exemple). Cependant, le nombre d'expositions simultanées peut être élevé et les sources diffuses.

Le niveau d'exposition du personnel affecté à une tâche, de durée plus importante (personnel de caisse, magasiniers, employés aux péages autoroutiers, stations essence, personnel soignant, etc.) est peu connu, mais peut être déduit de critères physiques (fréquence, puissance, durée, etc.) comme pour les autres sources de rayonnements électromagnétiques. Il n'y a pas d'étude publiée sur les expositions professionnelles.

## Interactions avec le vivant et effets biologiques

### Effets biologiques

Les effets biologiques pris en compte et les critères de protection ont été établis en fonction des restrictions de base proposées par l'ICNIRP pour les bandes de fréquences utilisées :

- jusqu'à 100 kHz, il s'agit des champs et des courants pouvant entraîner la stimulation de tissus excitables (systèmes nerveux et muscles) ;
- au-dessus de 10 MHz, l'absorption des radiofréquences devient prédominante et l'échauffement le mécanisme essentiel.

Entre les deux, les deux mécanismes coexistent (voir chapitre « Rappels physiques sur les rayonnements électromagnétiques »).

Il n'y a pas eu de travaux de recherche spécifiques sur les effets biologiques induits par les technologies RFID. Néanmoins, les connaissances acquises dans les gammes de fréquences concernées sont applicables aux RFID. Une expertise collective a été réalisée par l'Afsset pour évaluer les impacts éventuels des technologies RFID sur la santé humaine. La publication des conclusions début 2009 précise qu'en l'état actuel des connaissances, l'existence d'un risque sanitaire lié à l'exposition des champs électromagnétiques RFID n'a pu être établi, sous réserve de poursuivre l'évaluation, en particulier dans le cadre de l'exposition professionnelle.

## Interactions avec les implants cardiaques

Les possibilités d'interférence entre les implants cardiaques (stimulateurs et défibrillateurs cardiaques implantés) sont à prendre en compte, notamment dans le cas des portiques antivol. Il s'agit d'appareils dont les fréquences sont multiples et couvrent toute la gamme. Chacun a sa signature. Ces interférences se manifestent, dans le cas des stimulateurs cardiaques, par des inhibitions de la stimulation ou un passage en mode de secours, transitoire et réversible dès que l'on s'éloigne de l'appareil. Il s'agit d'un dysfonctionnement de l'implant. Ces interférences sont plus fréquentes quand le stimulateur est réglé en mode unipolaire. Les autres facteurs de risque sont la durée de l'exposition et les fréquences utilisées dans ces appareils.

Dans le cas des défibrillateurs cardiaques implantés, des chocs inappropriés reçus par des personnes stationnant à l'intérieur des portiques ou s'appuyant contre une de ses parois ont été décrits. L'exemple typique est la personne qui s'appuie sur le portique pour lire une revue dans une librairie.

En conclusion, il est conseillé de ne pas stationner inutilement à l'intérieur du portique. Ce qui sous-entend, bien entendu, de rendre le portique antivol visible ! Si une personne a un malaise en rapport avec une station à l'intérieur du portique et que ce malaise est dû à une interférence avec son implant cardiaque, il faut impérativement l'éloigner du portique, ce qui suffit à faire repartir le stimulateur cardiaque. La devise pour les portiques antivol et les implants cardiaques devrait être : « *Ne vous penchez pas, ne stationnez pas, traversez seulement.* »

## Réglementation, recommandations

Les limites d'expositions en vigueur sont celles des gammes de fréquences correspondant à l'application concernée, préconisées par la directive européenne et le décret du 3 mai 2002<sup>3</sup>.

---

3. Décret français n° 2002-775 du 3 mai 2002, pris en application notamment de la directive européenne 1999/05/CE et de la recommandation 1999/519/CE du Conseil de l'Union européenne.

## Applications

Les progrès technologiques considérables des systèmes RFID, notamment dans la taille des étiquettes, du grain de sable au portique, ont permis une grande diversification des applications. Les utilisations principales couvrent des domaines aussi divers que la gestion de stocks, les antivol de voiture, le marquage et la surveillance d'animaux, les contrôles d'accès, les modes de paiement et de magasinage. Leur emploi est également envisagé pour le contrôle des détenus en liberté conditionnelle. D'autres domaines d'utilisation se développent comme le contrôle des bagages, la gestion de bibliothèques et de librairies, l'authentification de documents, de passeports et de permis d'accès, le suivi de palettes, de conteneurs industriels ou d'objets précieux.

Un usage particulier au milieu hospitalier tient à la surveillance des patients, aussi bien en ce qui concerne leurs déplacements et leurs paramètres biologiques que le suivi des équipements médicaux et des traitements.

## Précautions, protection

Comme dans les autres gammes de fréquences, l'évaluation de l'exposition réelle est complexe, voire impossible du fait de la grande diversification des systèmes. Sauf cas particulier comme les systèmes de surveillance d'animaux (quelques W), le niveau d'exposition du public est faible (de l'ordre de la centaine de mW) et ponctuel. Il s'agit généralement de passages brefs dans le champ à l'entrée de lieux publics, aux péages autoroutiers, devant les portiques antivol des magasins, etc.

Certaines applications de plus grande taille (portiques de magasinage, interrogateurs industriels) peuvent produire des expositions à plus grande distance (plusieurs mètres) pour lesquelles des risques d'interférence avec les porteurs de dispositifs médicaux actifs peuvent exister. Les systèmes de contrôles de bagages peuvent mettre en œuvre des champs électromagnétiques de plus forte intensité qui n'intéressent qu'occasionnellement la population générale.

## Conclusion

Aujourd'hui, ce moyen d'identification est en plein essor. Certaines applications bien maîtrisées sont déjà très répandues et concernent différents domaines allant de la télé-détection (identification d'animaux, etc.) aux transactions de la vie courante (cartes

bancaires, titres de transport en commun, etc.) et à la traçabilité des produits et des marchandises. La plupart des dispositifs RFID sont des étiquettes passives qui n'émettent pas de champ électromagnétique. Des effets indirects peuvent survenir en cas d'interférence de systèmes émetteurs avec des appareillages médicaux. D'une façon générale, les spécifications techniques ne sont pas standardisées, de nombreux systèmes étant en cours de développement.

Peu d'études ont porté sur l'effet sanitaire des RFID en particulier. En tout état de cause, il n'existe aucune spécificité des RFID par rapport aux autres sources opérant aux mêmes fréquences et aux mêmes niveaux d'exposition.

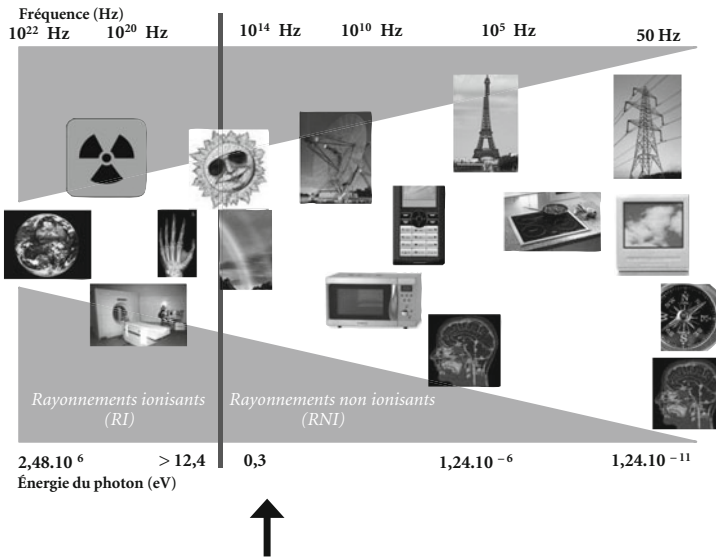
## Pour en savoir plus

- Les systèmes d'identification par radiofréquences. Évaluation des impacts sanitaires. Afsset, Rapport d'expertise collective, 2009 : [http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/630148019705674025035610854841/Avis\\_RFID\\_260109.pdf](http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/630148019705674025035610854841/Avis_RFID_260109.pdf)
- ICNIRP (2004) Statement related to the use of security and similar devices utilising EMF, Health Physics, 87(2) : 187-96.
- RTTE 1999/05: EN 50364: Limitation de l'exposition humaine aux champs électromagnétiques émis par un dispositif fonctionnant dans la gamme 0-10 GHZ utilisés pour la surveillance d'objets (EAS), l'identification par radiofréquences (RFID) et les applications similaires.
- Commission des communautés européennes (CCE) 2004/40/CE, Limitation de l'exposition public et règles d'exposition des travailleurs.
- ICNIRP (2002) Possible health risk to the general public from the use of security and similar devices EC concerted action QLK4-19999-01214.
- ISO SC31 CN31 France.
- Rapport DSCI/ICCP/REG (2007) RFID, Sécurité informatique et protection de la vie privée. Portail de l'Union européenne (<http://europa.eu>) : <http://ec.europa.eu/geninfo/query/resultaction.jsp?page=1>
- Paret D (2001) Identification Radiofréquence et cartes à puce sans contact, Dunod, Paris.



# Le rayonnement infrarouge

L. Court



## Introduction

En 1666, Newton décrivait l'existence d'un rayonnement au-delà du spectre visible, à côté du rouge. En 1800, Sir William Herschel le mettait en évidence dans le rayonnement solaire dispersé par un prisme, en mesurant l'augmentation de la température. Après la formulation d'Ampère, en 1836, du principe de l'origine vibratoire commune de la lumière visible et invisible, en 1847, Fizeau et Foucault déterminaient les longueurs d'onde du rayonnement infrarouge (IR) à l'aide d'expériences d'interférence.

Tout corps, par le fait qu'il est à une certaine température, émet un rayonnement IR qui a pour origine les vibrations et les rotations des atomes et des molécules. Cette émission obéit à une loi dite du corps noir, selon laquelle les corps chauds émettent un spectre continu avec un pic dont la longueur d'onde  $\lambda$  (en  $\mu\text{m}$ ) est donnée par la relation  $\lambda_{\text{max}} = 2897/T$ ,  $T$  étant la température en degrés Kelvin. Lorsque la température de la source s'élève, la position de ce pic évolue vers les plus courtes longueurs d'onde et, après émission de l'IR non visible, la couleur du corps passe au rouge sombre puis au blanc.

## Rappels physiques

Dans le spectre des rayonnements électromagnétiques, le rayonnement IR se situe aux longueurs d'onde comprises entre 780 et  $10^6$  nanomètres (nm). La Commission internationale de l'éclairage (CIE) a subdivisé le rayonnement IR en trois bandes par rapport au rayonnement visible : proche ou IR-A (de 780 à 1400 nm), moyenne ou IR-B (de 1400 à 3000 nm) et lointaine ou IR-C (de 3000 à  $10^6$  nm).

## Sources naturelles et artificielles

Les sources de rayonnement IR sont naturelles ou artificielles et, à l'exception des lasers, la plupart d'entre elles émettent également dans les spectres visible et ultraviolet (UV). Le rayonnement IR est nécessaire à la vie et apporte des effets utiles dans ses applications médicales. Le Soleil, la nature, les volcans, entre autres choses, comme tous les êtres vivants émettent un rayonnement IR ; le Soleil, en particulier, produit un éclairage énergétique qui, aux limites de l'atmosphère terrestre, est en moyenne de  $1,37 \text{ kW/m}^2$  dont la moitié dans l'IR. À la fin du  $\text{xx}^{\text{e}}$  siècle (1983-1998), les satellites astronomiques ont permis la découverte des galaxies « *starburst* » qualifiées de galaxies ultralumineuses IR. Elles se caractérisent par la production de « flambées » d'étoiles et l'émission de 99 % de leur rayonnement dans l'IR ainsi que par leur très grande luminosité (100 milliards de fois la luminosité solaire).

Les sources artificielles sont très nombreuses, depuis l'émission très intense des fours utilisés dans l'industrie des métaux et du verre jusqu'aux sources de chaleur (feux, appareils de chauffage ou de séchage) ou aux lampes à incandescence de haute intensité. Les diodes électroluminescentes (LEDs) telles que celles utilisées dans les systèmes de transmission de données, les télécommandes, les écrans de visualisation, etc., émettent à des longueurs d'onde comprises dans une bande spectrale relativement étroite (de 670 à 900 nm), ne provoquant pas de fort stimulus visuel.

Les applications de l'IR sont à la fois la production d'énergie calorifique, la détection et la mesure du rayonnement émis de sources les plus diverses, dans tous les domaines (industriels, scientifiques, domestiques, médicaux et militaires). En particulier, la spectroscopie IR a des applications très diversifiées dues au fait que les fréquences d'absorption et d'émission sont spécifiques des molécules et de leur structure. Les caméras pour l'IR permettent l'observation de tout corps émettant dans ce type de rayonnement. Dans les cabines saunas (humides) ou les cabines sèches, le rayonnement IR est utilisé pour obtenir la chaleur souhaitée.

## Mesures et dosimétrie

Pour évaluer l'exposition au rayonnement IR, on utilise les mêmes grandeurs radiométriques et les mêmes appareils de mesure que dans le cas du rayonnement visible : *l'éclairement énergétique*  $E$  en  $\text{W/m}^2$  et *l'exposition énergétique*  $H$  en  $\text{J/m}^2$ , qui rendent compte du débit de dose et de la dose reçus au niveau de la cornée\*. Dans le proche IR où le rayonnement pénètre jusqu'à la rétine, l'exposition sera appréciée à partir de la *luminance énergétique efficace*  $L_R$  de la source, en  $\text{W}/(\text{m}^2.\text{sr})$ , mesurée au niveau de la rétine.

Les protocoles de mesure et d'évaluation de l'exposition des personnes au rayonnement IR sont définis dans la norme AFNOR (2006) : NF-EN 14255-2.

## Effets biologiques

Le rayonnement IR possède toutes les propriétés des rayonnements électromagnétiques en matière de propagation, d'absorption, de réflexion, de transmission, de réfraction, de diffraction, de diffusion, de polarisation et d'interférences : les effets biologiques sont fonction de ces interactions.

L'énergie des photons\* IR étant très faible, il n'existe pas d'interaction photochimique et les effets induits sont de nature thermique. Le rayonnement IR est peu pénétrant (jusqu'à quelques millimètres dans la peau) et sa profondeur de pénétration décroît lorsque la longueur d'onde croît. Les effets produits peuvent être soit directs et localisés au niveau des organes cibles, l'œil et la peau, soit indirects et entraîner une réaction généralisée dans un environnement défavorable. Dans tout endroit sec ou chargé en vapeur d'eau et peu ventilé, le rayonnement IR peut, en effet, créer les conditions d'un échauffement susceptible de perturber sinon de détruire les mécanismes de thermorégulation chez les êtres vivants, provoquant ainsi des troubles discrets et un inconfort, ou des troubles majeurs parfois mortels (coup de chaleur). Cependant, dans la plupart des cas, la sensation de chaleur ressentie entraînera une réaction d'aversion permettant d'éviter une atteinte dangereuse.

Une température d'au moins  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  est, en général, nécessaire pour produire une lésion thermique. L'éclairement énergétique permettant d'atteindre cette température dépend du volume de tissu irradié, de sa température initiale, de sa capacité de refroidissement par irrigation et de la durée de l'exposition.

## Effets sur l'œil

Le rayonnement IR n'étant pas perceptible par l'œil humain, en l'absence de rayonnement visible, seule la sensation de chaleur au niveau de la cornée peut faire intervenir le réflexe



palpébral\* de protection. Partant du spectre visible, au fur et à mesure que la longueur d'onde croît, les milieux transparents de l'œil (cornée, humeur aqueuse, cristallin, humeur vitrée) absorbent une fraction de plus en plus importante du rayonnement IR incident sur la cornée et seul l'IR proche (IR-A) parvient jusqu'à la rétine. Au-delà de 1400 nm, la cornée et l'humeur aqueuse absorbent pratiquement tout le rayonnement incident. L'énergie ainsi absorbée, transformée en chaleur, élève la température de la cornée et des structures intérieures de l'œil, en particulier du cristallin. Sachant qu'une élévation de la température de la cornée à 45 °C, correspondant à un éclairage énergétique d'environ 100 kW/m<sup>2</sup>, provoque en une fraction de seconde une réaction douloureuse et un réflexe d'évitement, il est exceptionnel de constater des brûlures de la cornée. En revanche, une lésion rétinienne par effet thermique peut être produite dans le proche IR (de 780 à 1400 nm) par suite de la focalisation du rayonnement sur la rétine. Cet effet est surtout à craindre lorsqu'on manipule des lasers émettant dans l'IR. Des atteintes thermiques du cristallin ont été observées par exposition au rayonnement IR de 800 à 3000 nm.

Les lésions du cristallin (apparition de cataractes\*) ont été décrites depuis de très nombreuses années chez les travailleurs exposés à des sources intenses de rayonnement IR. La cataracte serait due à deux mécanismes associés, l'absorption directe d'IR dans le cristallin et l'échauffement dû à l'absorption de l'IR dans l'iris et l'humeur aqueuse. Cependant, des facteurs héréditaires, toxiques, immunologiques, nutritionnels ou l'influence de différentes maladies exercent une action plus ou moins indirecte sur l'évolution de la maladie. Il importe de distinguer exposition aiguë et exposition chronique ou répétée. Les études épidémiologiques sur les verriers ou les fondeurs de métaux ont donné des résultats contradictoires. Certains auteurs ont mis en évidence que, chez des travailleurs du verre et de l'acier, l'exposition chronique et répétée à des éclairages énergétiques de 0,8 à 4 kW/m<sup>2</sup>, chaque jour pendant dix à quinze ans, était susceptible de provoquer des opacités du cristallin plus ou moins importantes, alors que d'autres auteurs n'ont pas observé d'atteinte du cristallin à ces mêmes niveaux. Ces résultats tendent à montrer l'importance de facteurs associés. Toutefois, il faut noter que, dans ces études, il est difficile d'évaluer avec exactitude l'éclairage énergétique au niveau de la cornée, celui-ci étant fortement influencé à la fois par la position relative du travailleur et de la source et par le degré de fermeture de la paupière. On a établi que, dans l'IR-A, le seuil d'apparition de modifications dans le cristallin correspondait à une exposition de l'ordre de 50 mégajoules par mètre carré (5 kJ/cm<sup>2</sup>) et que, pour des expositions de courte durée, le seuil d'éclairage énergétique pour la production de lésions était de 40 kW/m<sup>2</sup>, entraînant une élévation de température de plusieurs degrés. Bien que, dans une expérimentation par laser IR, il ait été montré qu'un éclairage énergétique de 1 kW/m<sup>2</sup> n'augmentait pas la température de la chambre antérieure de l'œil de plus de 1 °C, il n'a pas paru acceptable d'exposer la tête et une grande partie du corps au rayonnement émis à un tel niveau par une source non cohérente (lampe ou chauffage à IR)

pendant un temps prolongé. Des cas de conjonctivite et de troubles de la lacrymation\* ont été signalés pour des éclairagements énergétiques de  $650 \text{ W/m}^2$  et des luminances de  $30 \text{ kW}/(\text{m}^2.\text{sr})$  ; il s'agit en fait de la sensation d'œil sec, bien connue des travailleurs des fonderies et des souffleurs de verre.

## Effets sur la peau

La peau joue un rôle majeur dans le système de thermorégulation du corps humain. Ce dernier peut être perturbé par des éclairagements énergétiques inférieurs à ceux qui provoquent des brûlures cutanées. Face à une agression thermique, la peau se refroidit par conduction, convection et émission de rayonnement. L'émission d'énergie IR sera d'autant plus élevée que l'absorption sera plus importante.

Lorsque la peau est exposée au rayonnement IR, une fraction plus ou moins importante du rayonnement incident est réfléchi, le reste est absorbé dans les tissus à une profondeur qui varie en fonction de la longueur d'onde. Le pouvoir réfléchissant de la peau est maximal aux longueurs d'onde comprises entre 700 et 1200 nm, mais varie avec la pigmentation et le flux sanguin. Au-dessus de 2000 nm, la réflexion est faible et invariable. Compte tenu de la profondeur de pénétration du rayonnement, il existe deux modes d'action : l'un dans le proche IR avec un pic à 1200 nm, l'autre au-dessus de 2000 nm et indépendant de la longueur d'onde. Le proche IR (IR-A) pénétrant dans le derme est, par action directe, le plus dangereux et provoque des brûlures classiques. La sensation douloureuse de brûlure ne dépend que de l'intensité du stimulus, c'est-à-dire de l'augmentation de température. Le seuil de brûlure apparaît à  $45^\circ\text{C}$  lorsque l'exposition dure plusieurs secondes et le dommage tissulaire est indiscutable à partir de  $46$  à  $47^\circ\text{C}$ . L'importance de la brûlure est fonction à la fois de la température et de la durée de l'exposition. Dans la plupart des cas, cependant, la sensation de chaleur limitera la durée d'exposition avant que le seuil de brûlure ne soit atteint, et seules des expositions de très courte durée à des éclairagements énergétiques très élevés (sources pulsées, incendies) présentent un risque de lésion de la peau.

L'IR moyen et lointain, absorbé dans les couches superficielles de la peau, contribue à une atteinte des systèmes de thermorégulation en provoquant l'échauffement général du corps, et ce d'autant plus que la température ambiante est plus élevée. Mais l'inconfort dû à la contrainte thermique limitera, en général, la durée d'exposition avant que ne survienne un « coup de chaleur ».

Très récemment des expériences réalisées sur une bactérie\* ont montré que le rayonnement IR de 700 à 2000 nm, en l'absence d'une élévation thermique, apportait une défense importante contre la cytotoxicité\* induite par les UV solaires, accompagnée d'une réduction des divisions cellulaires. Cette protection s'étend au moins sur 24 h et

paraît être un phénomène cumulatif. L'existence de ce processus naturel vient d'être mise en évidence dans les cellules de l'épiderme humain. Il pourrait jouer un rôle dans la protection contre les dommages induits par les UV. Par ailleurs, le rayonnement IR ne protège pas contre la peroxydation\* des membranes cellulaires agressées par les UVA.

## Valeurs limites d'exposition

Comme l'énergie émise par les sources conventionnelles à large bande dans l'IR lointain (IR-C > 3000 nm) est très faible et ne présente pas de risque pour la santé, les limites d'exposition recommandées par les divers organismes nationaux et internationaux ne concernent que le rayonnement IR A et B (de 780 à 3000 nm).

Au plan international, la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants a proposé les premières limites d'exposition au rayonnement optique non cohérent, à large bande spectrale, compris entre 380 et 3000 nm (ICNIRP 1999). L'œil étant plus facilement lésé que la peau et son atteinte entraînant des conséquences plus graves, les limites d'exposition fixées pour l'œil sont plus sévères, notamment dans l'IR-A qui peut provoquer des lésions thermiques de la rétine.

## Valeurs limites d'exposition pour l'œil

### *Cornée et cristallin*

Pour éviter les atteintes immédiates de la cornée ou d'éventuels effets retardés au niveau du cristallin, l'éclairement énergétique dû au rayonnement IR de longueur d'onde comprise entre 780 et 3000 nm, ne devrait pas dépasser :

–  $E_{ir} \leq 100 \text{ W/m}^2$  dans le cas d'exposition prolongée, de durée  $t > 1000 \text{ s}$   
et

–  $E_{ir} \leq 1,8 \cdot 10^4 \cdot t^{-0,75} \text{ W/m}^2$  si l'exposition est plus brève,  $t \leq 1000 \text{ s}$ .

Dans les environnements froids, lorsque les sources de rayonnement IR sont utilisées comme moyen de chauffage, la limite d'éclairement énergétique peut être relevée à  $400 \text{ W/m}^2$  à  $0^\circ\text{C}$  et à  $300 \text{ W/m}^2$  à  $10^\circ\text{C}$ . Cette relaxation de la limite est fondée sur des considérations d'échange thermique au niveau de la tête, de telle manière que la température du cristallin soit toujours maintenue à  $37^\circ\text{C}$ .

### *Rétine et IR-A*

Dans le cas d'une source émettant dans l'IR proche (lampe de chauffage à IR, par exemple), pour protéger la rétine contre une lésion thermique en l'absence d'une forte stimulation visuelle, la *luminance énergétique efficace* ( $L_R$ ) résultant de la sommation des

produits de la luminance spectrique ( $L_\lambda$ ), mesurée au niveau de l'œil, par le facteur de risque thermique ( $R_\lambda$ )<sup>1</sup> correspondant à chaque longueur d'onde, devra respecter les conditions ci-dessous :

- pour  $t > 10$  s,  $L_R$  devra être inférieur ou égal à  $6.10^3/\alpha$  W/(m<sup>2</sup>.sr), où  $\alpha$  est l'angle en radians (rad) sous lequel l'œil voit la source.  $\alpha$  est utilisé pour évaluer la luminance moyenne et ne doit pas être inférieur à 11 mrad ; pour des sources très étendues,  $\alpha$  est limité à 100 mrad ;
- pour  $t \leq 10$  s,  $L_R$  devra être inférieur ou égal à  $5.10^4/\alpha.t^{0.25}$  W/(m<sup>2</sup>.sr), la limite appliquée étant la même que dans le cas du rayonnement visible.

## Valeurs limites d'exposition pour la peau

Pour protéger la peau contre une lésion thermique, toute exposition de durée inférieure à 10 s devra être limitée à l'exposition énergétique :

$$H \leq 2 \cdot 10^4 \cdot t^{0.25} \text{ J/m}^2.$$

Aucune limite n'est proposée pour des durées d'exposition plus longues, celles-ci étant limitées par une réaction normale d'aversion qui dépend de la température de la peau et de la température ambiante.

## Conclusion

En résumé, devant une source industrielle très puissante, il importe toujours, pour une bonne ergonomie, d'analyser l'éclairement énergétique au niveau de la cornée et la luminance énergétique spectrique de la source, ainsi que la durée, la fréquence et la répétition des expositions. Par ailleurs, en présence de sources intenses (four de fonderie, incendie), il sera nécessaire de se protéger contre les effets immédiats des rayonnements IR par le port de systèmes de protection appropriés (lunettes munies de filtre, vêtements ventilés, etc.) dont l'efficacité doit s'exercer dans le spectre d'émission de la source considérée.

On retiendra que lorsqu'une surface importante du corps est exposée pendant une durée plus ou moins prolongée, l'équilibre thermique de l'organisme risque d'être perturbé, et il conviendra d'observer les règles prescrites pour les séjours en ambiance chaude.

---

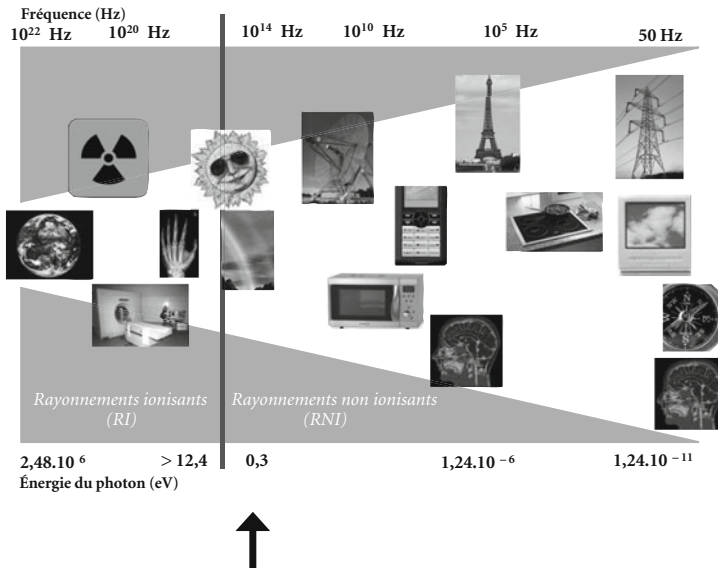
1.  $R_\lambda$  : de 780 à 1200 nm, le facteur de pondération  $R_\lambda$  varie de 0,69 à 0,02 ; au-delà de 1200 nm, sa valeur est si faible qu'il devient négligeable.

## Pour en savoir plus

- Combes F, Boissé P, Mazure A, Blanchard A (2003) Galaxies et Cosmologie. EDP Sciences, Les Ulis.
- Hadni A (1975) L'infrarouge. « Que sais-je ? » Paris, Presses Universitaires de France.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (1999) Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0,38 to 3  $\mu\text{m}$ ). In : Matthes R, Bernhardt JH, McKinlay AF (éd.) Guidelines on limiting exposure to non-ionizing radiation. D-85764 Oberschleißheim : ICNIRP 7, 171-206.
- Matthes R, Sliney D (éd.) Measurements of Optical Radiation Hazards. CIE X016-1998 ; D-85764 Oberschleißheim : ICNIRP 6/98, 762 p.
- Sliney DH, Wolbarsht ML (1980) Safety with lasers and other optical radiation sources. New York : Plenum Press.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association (1982) Lasers and Optical Radiation. Environmental Health Criteria 23. Genève: OMS.
- ICNIRP (2006) Statement on far infrared radiation exposure, in Health Physics, 91(6): 630-45.
- Norme NF-EN 14255-2. Mesurage et évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements optiques incohérents (2006). Partie 2 : Rayonnements visible et infrarouge émis par des sources artificielles sur les lieux de travail. Partie 4 : Terminologie et grandeurs utilisées pour le mesurage de l'exposition aux rayonnements ultraviolet, visible et infrarouge.

# La lumière et le rayonnement visible

L. Court



## Introduction

La portion visible du spectre des rayonnements électromagnétiques s'étend de 400 à 780 nm. La définition du mot « lumière » est liée à la perception de ces longueurs d'onde par les systèmes oculaires des êtres vivants ; la lumière est ainsi distincte des rayonnements ultraviolet (UV) ou infrarouge (IR) non perçus par l'œil. Elle est une condition essentielle de la vie à la surface de la Terre. Le présent chapitre traite des effets de sources lumineuses intenses sur la santé et de la définition des limites d'exposition au rayonnement visible *non cohérent* émis par le Soleil ou les sources artificielles conventionnelles, à l'exclusion des lasers qui sont traités dans un chapitre particulier.

## Rappels physiques

Les photons\* qui constituent ce rayonnement sont émis de façon non cohérente, c'est-à-dire pas en phase, à des fréquences comprises entre 750 et 385 THz et l'énergie qui leur est associée varie entre 3,1 et 1,59 eV, respectivement  $4,97 \cdot 10^{-19}$  et  $2,56 \cdot 10^{-19}$  J.

## Sources naturelles et artificielles

Le Soleil est la source naturelle de rayonnement visible la plus importante. Le rayonnement visible parvient à la surface de la Terre après absorption par l'atmosphère terrestre qui bloque totalement ou partiellement certaines portions du spectre solaire : l'épaisseur de l'atmosphère traversée dépend essentiellement de l'heure, de la latitude et de la saison. Le rayonnement UVC (en dessous de 290 nm) est totalement absorbé alors que les rayonnements UVA et B ne le sont que partiellement. Les rayonnements visible et IR sont relativement peu absorbés. La lumière du jour résulte de l'addition du rayonnement solaire direct et de sa diffraction par l'atmosphère variable.

Le rayonnement des sources artificielles dépend essentiellement des technologies utilisées pour sa production. On distingue d'une part les technologies destinées à produire de la lumière visible pour l'éclairage et d'autre part les technologies industrielles où l'émission lumineuse accompagne l'effet recherché : la fonderie ou la soudure par arc électrique à très haute température s'accompagne d'une lumière visible très intense, et qui n'est qu'un effet secondaire indésirable.

Les sources destinées à l'éclairage mettent en œuvre des technologies différentes relevant de trois principes fondamentaux :

- l'échauffement d'un filament de tungstène dans le vide d'une ampoule de verre (0,03 atmosphère), produit par le passage du courant électrique émet un spectre visible continu. L'enveloppe de verre absorbe la quasi-totalité de l'émission ultraviolette. Ces ampoules sont vouées à disparaître progressivement d'ici 2012, car seul 1/10<sup>e</sup> de l'énergie électrique est converti en énergie visible, le reste est converti sous la forme de rayonnement IR. Le rendement de ces dispositifs est amélioré dans les sources dites halogènes dont l'enveloppe en quartz laisse passer les rayonnements UV A, B et C ;
- l'ionisation\* d'atomes de mercure sous l'action d'une décharge électrique entre deux pôles est le principe des lampes à décharge. Une tension différentielle de l'ordre de 10 000 volts est produite par un starter (ballast électronique). Les collisions dans un gaz chaud d'électrons libres accélérés avec les atomes de mercure produisent une émission de rayonnement UV qui est converti en lumière visible par l'excitation du revêtement

fluorescent déposé à l'intérieur de l'enveloppe de verre. La composition chimique du revêtement détermine la qualité du spectre visible désiré. Le diamètre et la longueur de l'enveloppe, sous forme de tubes, varient en fonction des applications. Le rendement lumineux de ces tubes est bien meilleur que celui des lampes tungstène, car l'émission IR est pratiquement négligeable. Des lampes fluorescentes compactes (LFCs) sont depuis quelques années disponibles sur le marché : selon la pureté du verre de l'enveloppe, un rayonnement UV significatif peut être mesuré, mais une double enveloppe élimine ce rayonnement parasite ;

- l'émission de lumière visible apparaît lorsqu'une différence de potentiel\* de quelques volts est appliquée entre deux points d'un cristal de carbure de silicium. C'est un phénomène décrit en 1916 qui est à la base de la technologie des diodes électroluminescentes (LEDs). Ces lampes se révèlent une source d'éclairage d'avenir, car en cinquante ans leur coût économique a été divisé par 1000 et le flux lumineux produit multiplié par le même facteur. La durée de vie et la consommation électrique des LEDs en font la technologie du futur destinée à remplacer les lampes classiques à incandescence ou à décharge électrique, car leur spectre d'émission très étroit peut varier à l'infini en fonction de la nature du cristal, et elles n'émettent ni dans l'UV ni dans l'IR.

## Mesures et dosimétrie

Pour mesurer le rayonnement visible, il existe deux systèmes de grandeurs et unités :

- les grandeurs radiométriques et spectroradiométriques, relatives aux caractéristiques énergétiques du rayonnement, employées pour l'ensemble des rayonnements optiques ;
- les grandeurs photométriques qui rendent compte de l'impression visuelle produite et ne s'appliquent qu'au rayonnement visible.

Cependant, les propriétés optiques comme les effets biologiques potentiels des sources conventionnelles varient selon l'étendue plus ou moins large de leur spectre d'émission, et les effets produits par les différentes longueurs d'onde seront additifs. Aussi l'analyse du risque d'une « source à large bande » exigera-t-elle toujours l'évaluation de ses caractéristiques spectroradiométriques, c'est-à-dire des données énergétiques de la source en fonction de sa composition spectrale.

Les principales *grandeurs radiométriques*, utilisées pour évaluer les effets induits par le rayonnement et déterminer les limites d'exposition, comprennent :

- la *luminance énergétique*  $L$ , exprimée en watt par mètre carré et par stéradian [ $\text{W}/(\text{m}^2.\text{sr})$ ] et la *luminance énergétique intégrée*  $K$  (produit de la luminance par la durée d'exposition), en joule par mètre carré et par stéradian [ $\text{J}/(\text{m}^2.\text{sr})$ ], qui décrivent la brillance de la source et sont indépendantes de la distance séparant la source de l'observateur ;



– l'*éclairement énergétique*  $E$ , exprimé en watt par mètre carré ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), et l'*exposition énergétique*  $H$  (produit de l'éclairement par la durée d'exposition), en joule par mètre carré ( $\text{J}/\text{m}^2$ ), qui décrivent l'illumination d'une surface et correspondent aux notions de débit de dose et de dose.

Les grandeurs spectroradiométriques sont : la *luminance énergétique spectrique*<sup>1</sup>  $L_\lambda$ , en  $\text{W}/(\text{m}^2.\text{sr}.\text{nm})$  et l'*éclairement énergétique spectrique*  $E_\lambda$ , en  $\text{W}/(\text{m}^2.\text{nm})$ . Elles sont utilisées pour pondérer le spectre de la source par l'efficacité biologique relative des différentes longueurs d'onde pour un effet donné.

Les *grandeurs photométriques* comme la *luminance visuelle* (luminosité de la source), exprimée en candela par mètre carré ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ), et l'*éclairement lumineux* (lumière incidente sur une surface), en lumen par mètre carré ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ) ou lux, donnent les niveaux lumineux pondérés par un coefficient de visibilité qui varie selon la longueur d'onde. La courbe de référence de ce coefficient est différente pour la vision de jour (vision *photopique*), avec un pic à 555 nm pour l'œil humain correspondant à la réponse maximale des cônes\* de la rétine, et pour la vision de nuit (vision *scotopique*), avec un pic à 505 nm, longueur d'onde de la réponse maximale des bâtonnets\* de la rétine.

Il n'existe pas de facteur simple et unique de conversion entre les grandeurs radiométriques et les grandeurs photométriques. L'efficacité lumineuse du rayonnement (quotient du flux lumineux par le flux énergétique correspondant) varie de 15 à 50 lumens par watt ( $\text{lm}/\text{W}$ ) pour une source incandescente, à environ 100  $\text{lm}/\text{W}$  pour le Soleil ou un arc au xénon et de 250 à 300  $\text{lm}/\text{W}$  pour une lampe ou un tube à fluorescence.

L'ICNIRP, en 2000, a classé le rayonnement émis par les LEDs dans les sources non cohérentes, en les différenciant des lasers. Avec des spécifications applicables à la sécurité de leur usage, elle recommande que la mesure de leur émission soit faite dans les conditions prévues par la norme NF-EN 14255-1,2,4 et que les limites maximales les concernant correspondent au standard EN 62471.

## Interactions avec la matière

La lumière et les rayonnements optiques en général pénètrent peu le tissu biologique, seuls l'œil et la peau sont menacés par une surexposition. Les effets pathologiques induits par le rayonnement visible sont liés soit à un processus d'interaction photochimique, soit à un mécanisme thermique.

---

1. L'adjectif spectrique indique qu'il s'agit du quotient de la grandeur considérée dans un intervalle de longueur d'onde infiniment petit par cet intervalle.

L'*effet photochimique* présente deux caractéristiques qui le différencient d'un effet thermique : d'une part, son spectre d'action, d'autre part, la relation de « réciprocité » existant entre l'éclairement énergétique (le débit de dose) et la durée d'exposition. Le spectre d'action correspond à la variation de l'efficacité relative des différentes longueurs d'onde qui produisent cet effet. Pour l'œil normal, le maximum d'efficacité apparaît à 440 nm. La relation de « réciprocité » entre l'éclairement énergétique et la durée d'exposition traduit le fait que la quantité d'énergie (la dose) nécessaire pour produire un effet donné est constante quel que soit le débit de dose. Ainsi un effet photochimique donné sera, en général, le même qu'il soit produit par exposition à une source intense pendant un temps court ou par exposition à une source plus faible pendant un temps plus long.

L'*effet thermique*, en revanche, exige toujours un éclairement énergétique suffisamment intense en un temps très court pour provoquer une augmentation importante de la température dans le tissu concerné. Il dépend avant tout de la dissipation de la chaleur dans les tissus voisins et sera d'autant plus important que l'organe sera peu vascularisé.

## Interactions avec le vivant et effets biologiques

On sait que la lumière est nécessaire à la vie, mais l'énoncé de l'ensemble de ses effets dépasse le cadre de cet ouvrage<sup>2</sup>. Aussi, nous n'envisagerons ici que les effets directs du rayonnement susceptibles d'entraîner des dommages pour la santé humaine, à l'exclusion des effets indirects en relation avec un mauvais éclairage.

### Lésions oculaires

Le rayonnement visible traverse les milieux antérieurs de l'œil avant d'atteindre la rétine où une faible fraction est utilisée par les cônes et les bâtonnets pour produire le phénomène général de vision colorée. La fraction la plus importante est absorbée par la couche sous-jacente de l'épithélium\* pigmentaire (fig. 1). Il est important de noter la grande sensibilité des récepteurs de la rétine, sachant qu'un seul photon peut produire un changement détectable dans le courant sodium (de l'ordre de  $10^{-12}$  A) en réduisant le flux net d'ions traversant la membrane du segment externe du bâtonnet de  $10^7$  à  $10^6$  charges par seconde. Si la lumière est trop intense, l'éblouissement précède la destruction du pigment,

---

2. Signalons, cependant, l'utilisation thérapeutique de la lumière bleue pour détruire l'excès de bilirubine\* chez les nouveau-nés atteints d'ictère et de la photothérapie en spectre large dans certains états dépressifs.

les lésions profondes de la rétine provoquent une ophtalmie\* passagère ou définitive selon la gravité de l'agression (ex. : l'ophtalmie des neiges). Ce type de réaction ne se produit cependant que dans des conditions exceptionnelles, car l'œil est généralement bien adapté à la lumière et met en œuvre son propre système de protection automatique. Lorsque la source est brillante, la quantité de lumière entrant dans l'œil est immédiatement limitée par le réflexe photomoteur, c'est-à-dire le rétrécissement de la pupille et par une réponse d'aversion plus complexe provoquant en moins de 0,25 s le réflexe palpébral\*, c'est-à-dire l'occlusion de l'œil par la paupière, éventuellement complété par la mobilisation de la tête. Ces mécanismes de protection sont toutefois insuffisants pour éviter tout dommage à la rétine quand l'œil perçoit des sources lumineuses très intenses telles que le Soleil, les lampes à arc, les lampes au xénon, la boule de feu d'une explosion nucléaire, etc. L'atteinte de la rétine définitive accompagnée de scotome, amputation plus ou moins étendue du champ visuel, à la suite de l'observation directe du Soleil est connue depuis longtemps.

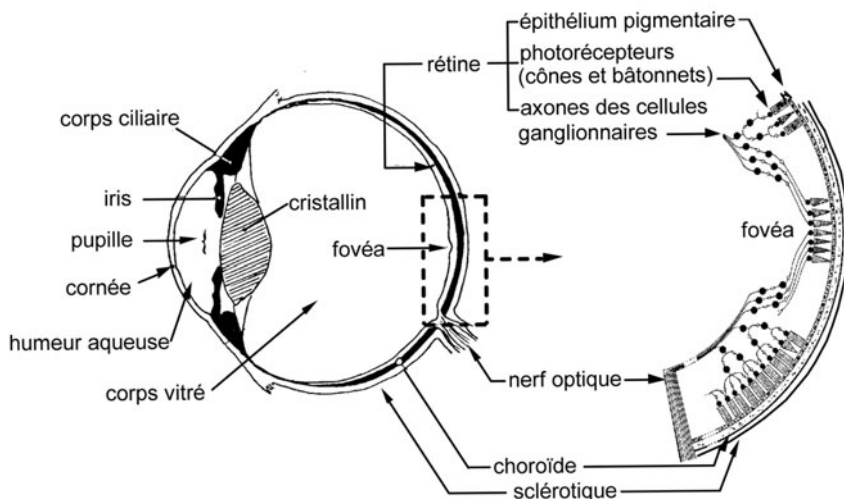


Fig. 1 – Schéma de l'œil.

L'atteinte photochimique, dite « de lumière bleue », domine aux longueurs d'onde de 400 à 550 nm pour l'œil normal et de 305 à 550 nm pour l'œil aphake (sans cristallin, par exemple après opération de la cataracte\*), en particulier pour les expositions chroniques à des sources brillantes.

Certains auteurs pensent que la lumière accélérerait le vieillissement de la rétine. De même, on a montré que le cristallin normal contient des composés chromophores\* (kynurénines) ayant un haut pouvoir d'absorption dans la région de 400 à 500 nm, si bien que le rayonnement visible pourrait contribuer à la formation de cataractes.

Par ailleurs, il est bien établi que la portion bleue (400-500 nm) du rayonnement visible stimule spécifiquement certains cônes et bâtonnets : ainsi, l'énergie véhiculée par ces longueurs d'onde est transférée aux pigments spécifiques, et cette énergie est suffisante pour provoquer radicaux libres et oxygène singulet. Aussi, des sources intenses riches en rayonnement bleu peuvent induire au niveau rétinien des lésions limitées et passagères phototoxiques, et même, pour des énergies très fortes, des lésions plus ou moins définitives. Il est possible que des lésions phototoxiques répétées puissent faire le lit de la dégénérescence maculaire\* liée à l'âge (DMLA).

Pour les expositions accidentelles de brève durée, de l'ordre de 1 ms à 10 s, la lésion de la rétine est due surtout à l'*effet thermique* et résulte essentiellement d'une dénaturation des protéines, de l'inactivation d'enzymes et de la désorganisation plus ou moins complète des structures cellulaires. L'augmentation de température nécessaire pour produire une lésion est d'autant plus grande que la durée d'exposition est plus courte : une température de 45 à 47 °C maintenue pendant 10 s entraîne une lésion rétinienne, alors que pour provoquer une lésion en 1 ms, la température devrait atteindre de 57 à 60 °C. Toutefois, l'éclairement énergétique nécessaire pour obtenir une telle élévation de la température dépend étroitement de la température du tissu environnant, de sa vascularisation et des dimensions de l'image de la source sur la rétine.

## Lésions de la peau

L'atteinte thermique de la peau due à des rayonnements émis dans le visible est extrêmement rare. Seules des sources de très haute intensité peuvent exceptionnellement provoquer des lésions et seulement si la durée d'exposition est très inférieure au temps de réaction à la sensation de brûlure (de l'ordre de la seconde) ou si le sujet est immobilisé sous la source et ne peut se dégager.

Toutefois, à la différence des multiples études ayant démontré les effets nocifs de la portion UV du spectre solaire sur la peau, les effets du rayonnement visible sur le revêtement cutané ont été peu étudiés. Or les rayonnements de 400 nm atteignent 90 µm de profondeur, zone des capillaires sanguins, et ceux de 800 nm pénètrent le derme et l'hypoderme jusqu'à 2 mm. Ainsi, si les effets biologiques du rayonnement UVA dans la bande 300-400 nm sont importants jusqu'à 385 nm, ceux du rayonnement visible dans la bande 380-460 nm ne sont pas négligeables. Des travaux récents (Zastrow *et al.*) ont établi le spectre d'efficacité de production radicalaire par le rayonnement visible dans le tégument et montré que la moitié de l'agression oxydative de la peau était produite par la portion visible du spectre électromagnétique reçue lors d'exposition à la lumière solaire. En attendant la confirmation de ces résultats, il est possible de dire que les cancers cutanés sont à la fois la conséquence de nombreux facteurs, essentiellement

celle du rayonnement UVA/UVB et du stress oxydatif total auquel participe le rayonnement visible dans la bande 380-400 nm. De même, la pénétration de la portion visible jusqu'aux vaisseaux capillaires est susceptible d'induire des effets systémiques.

La lumière peut également entraîner une lésion de la peau par suite d'un processus de photosensibilisation dû à la présence de photosensibilisateurs endogènes et exogènes tels que la bilirubine\* et la phénothiazine\*. Bien que cet effet soit beaucoup plus rare que dans le cas du rayonnement UV, il peut être produit par certaines molécules contenues dans les aliments, les médicaments ou les produits cosmétiques.

## Valeurs limites d'exposition

Des données expérimentales obtenues chez l'animal, corroborées par des observations faites chez l'homme, ont permis de déterminer les seuils de lésion de la rétine et de la peau. En appliquant certains facteurs de sécurité pour tenir compte de l'imprécision avec laquelle sont déterminés les seuils d'effets biologiques, les conditions d'exposition dans lesquelles aucun effet nocif n'était à craindre ont été déduites. L'œil étant plus sensible au rayonnement visible que la peau et les conséquences d'une lésion de la rétine étant plus graves, les limites d'exposition destinées à protéger la rétine sont plus sévères que celles préconisées pour la peau.

Les valeurs limites recommandées par la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP, 1997) s'appliquent aussi bien à l'exposition des travailleurs qu'à celle du public. Dans le cas des sources de lumière à large bande spectrale, le respect des recommandations nécessite la connaissance de la luminance énergétique spectrique  $L_\lambda$  ou de l'éclairement énergétique spectrique  $E_\lambda$  mesurés au niveau de l'œil, ainsi que des dimensions de la source. La détermination de ces grandeurs impose des connaissances précises en radiométrie et ne peut être effectuée que par des spécialistes. En pratique, cependant, il n'est pas nécessaire d'effectuer ces mesures pour la plupart des sources de lumière couramment utilisées dont la luminosité ne dépasse pas  $10^4$  cd/m<sup>2</sup>.

Les limites destinées à protéger la rétine contre une surexposition à la lumière s'appliquent en général à la luminance de la source. Celle-ci devra cependant être pondérée par une fonction représentative de l'efficacité biologique relative des différentes longueurs d'onde composant le spectre à l'égard de l'effet thermique ou photochimique considéré. Si cela est nécessaire, l'éclairement de la rétine peut être déduit de la luminance de la source ( $L_s$ ) par la relation :  $E_R = \pi L_s \tau d_0^2 / 4f^2$  W/m<sup>2</sup>, où  $d_0$  est le diamètre de la pupille (par convention égal à 3 mm dans le spectre visible),  $\tau$  la transmittance des milieux antérieurs de l'œil et  $f$  la distance focale (pour l'œil humain adulte,  $\tau = 0,9$  et  $f = 17$  mm).

## Valeurs limites d'exposition pour les risques rétinien dus à l'effet thermique (400-780 nm)

Pour protéger la rétine contre une lésion thermique, la *luminance énergétique efficace* de la source ( $L_R$ ), résultant de la sommation des produits de la luminance spectrique ( $L_\lambda$ ), mesurée au niveau de l'œil, par le facteur de *risque thermique* ( $R_\lambda$ )<sup>3</sup> correspondant à chaque longueur d'onde, ne doit pas dépasser la valeur donnée par la relation :

$$L_R \leq 5 \cdot 10^4 / (\alpha \cdot t^{0.25}) \text{ W/(m}^2 \cdot \text{s)}, \text{ pour } 10 \mu\text{s} \leq t \leq 10 \text{ s}$$

où  $t$  est la durée d'exposition et  $\alpha$ , exprimé en radians, l'angle sous lequel l'œil voit la source. L'angle  $\alpha$  est égal au quotient du diamètre de la source (ou pour une source non circulaire la moyenne arithmétique de la plus grande et de la plus petite dimension) par la distance séparant l'œil de la source. Il ne doit pas être confondu avec l'angle solide  $\Theta$ , en stéradians, correspondant à l'extension du faisceau émis par la source. Pour évaluer le risque thermique, l'angle  $\alpha$  a une valeur maximale de 100 mrad et une valeur minimale de 1,7 mrad. Pour  $t < 10 \mu\text{s}$  ou  $t > 10 \text{ s}$ , la luminance efficace  $L_R$  devra respecter les limites établies respectivement pour 10  $\mu\text{s}$  ou 10 s.

## Valeurs limites d'exposition pour les risques rétinien dus à l'effet photochimique de lumière bleue (400-700 nm)

Pour protéger l'œil contre une photorétinite, la limite devra s'appliquer à la *luminance énergétique efficace de lumière bleue* ( $L_B$ ), c'est-à-dire à la somme des produits de la luminance spectrique ( $L_\lambda$ ) émise dans chaque longueur d'onde par le facteur de *risque photochimique* ( $B_\lambda$ ) correspondant<sup>4</sup>.

Lorsque la durée d'exposition  $t$  est inférieure ou égale à  $10^4 \text{ s}$  ( $\approx 2 \text{ h } 50$ ) au cours de la journée de travail, la luminance efficace de lumière bleue multipliée par la durée d'exposition ( $K_B = L_B \cdot t$ ) ne doit pas dépasser  $10^6 \text{ J/(m}^2 \cdot \text{s)}$ .

La durée maximale de fixation de la source est alors donnée par la relation :

$$t_{\max} \text{ (en secondes)} = 10^6 / L_B$$

Pour  $t$  supérieur à  $10^4 \text{ s}$ , la luminance efficace de lumière bleue ( $L_B$ ) de la source ne doit pas dépasser  $100 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{s)}$ .

3.  $R_\lambda$  croît de 1 à 10 de 400 à 435 nm, décroît de 10 à 1 entre 440 et 500 nm, est égal à 1 de 500 à 700 nm et décroît de nouveau au-delà de 700 nm.

4.  $B_\lambda$  croît de 0,1 à 1 de 400 à 435 nm et décroît de 1 à 0,001 de 440 à 590 nm.

Dans le cas de sources ponctuelles ou très petites, vues sous un angle  $\alpha \leq 11$  mrad, l'exposition énergétique ( $H = E_B \cdot t$ ) ne devra pas dépasser  $100 \text{ J/m}^2$ .

Aux longueurs d'onde inférieures à 440 nm, des limites plus sévères doivent être utilisées pour les enfants âgés de moins de 2 ans (dont le cristallin est plus transparent à la lumière) et pour les adultes privés de cristallin (aphakes).

## Précautions, protection

Il est important d'éviter l'observation directe de sources lumineuses intenses. Il ne faut pas regarder le Soleil directement ou à l'occasion d'éclipses, *a fortiori* en utilisant des instruments d'optique sans précaution ou avec des systèmes de protection insuffisants : on sait que l'énergie parvenant sur la rétine, si elle diminue avec la transmittance du système, augmente avec le carré du grossissement. Dans le cadre du travail, il est déconseillé d'observer sans précaution des travaux de fonderie, de découpage et de soudure de métaux, des lampes à arc utilisées en recherche, des lampes éclair utilisées en photographie, dans l'industrie du spectacle, dans certaines applications médicales, etc. Il est également déconseillé de vivre continuellement dans une ambiance lumineuse trop élevée, afin de limiter dans la mesure du possible les phénomènes de vieillissement du système oculaire. Il est important d'utiliser des lunettes de protection contre toutes les sources lumineuses intenses et de vérifier avant usage leur qualité et leurs caractéristiques physiques qui doivent être mentionnées sans ambiguïté. Enfin si les processus de photosensibilisation cutanée sont complexes et plus rares dans le spectre visible, très variables selon les individus, il est bon de se renseigner avant usage sur l'utilisation de certains médicaments ou cosmétiques.

La directive économique des produits consommateurs d'énergie (2005/32/EC) a imposé aux pays de l'Union européenne la réduction progressive de l'usage des ampoules à tungstène et leur remplacement par un éclairage à lampes fluorescentes, à LEDs et à halogènes : le comité scientifique du SCENIHR a conclu sans ambiguïté que l'émission des lampes compactes fluorescentes (LFCs) dans les conditions normales d'utilisation est sans danger et a recommandé d'équiper ces lampes d'une double enveloppe.

Le développement exponentiel des puissances de la technologie nouvelle à LEDs s'est fait sans réel contrôle des effets biologiques et psychologiques résultant de leur très fort éclairement énergétique et de leur extrême diffusion dans le monde de l'éclairage. La course au rendement lumineux implique que le maximum d'émission des LEDs se rapproche de la région bleue du spectre visible, qui n'est pas sans danger pour l'œil et pour la peau. Des mesures récentes faites sur des LEDs puissantes tendraient à montrer que les limites recommandées par l'ICNIRP peuvent être dépassées. Compte tenu du manque de

recul quant à d'éventuels effets sanitaires, l'Anses prépare actuellement un rapport pour évaluer les dangers potentiels de ces sources d'éclairage et fournir, le cas échéant, des recommandations pour leur utilisation.

La protection oculaire contre un excès de rayonnement visible est assurée par des lunettes dont la qualité de filtration répond aux exigences de la norme NF-EN1936 (2007). On distingue cinq classes de verres filtrant le rayonnement visible et le rayonnement UVB (tableau I). Les lunettes solaires vendues en France doivent être obligatoirement revêtues du marquage CE. Les lunettes de glacier et les masques de ski sont munis de jaquettes latérales empêchant une forte lumière latérale d'atteindre les structures oculaires. En condition de fort éclairage, en extérieur, lors de la pratique de sport de plein air, il est recommandé de porter des lunettes munies de larges branches latérales ou mieux, enveloppantes. En effet, le rayonnement latéral oblique peut endommager le cristallin (effet Coronéo). Les risques de cet éclairage oblique sont décrits dans le chapitre « Le Soleil et le rayonnement ultraviolet ».

**Tableau I** – Définition des classes de verres filtrants en fonction de la transmission de rayonnement visible et du rayonnement UVB.

<i>Catégorie de verre</i>	<i>Transmission (%) de rayonnement visible</i>	<i>Transmission (%) de rayonnement UVB</i>	<i>Transmission (%) de rayonnement UVB, masque de ski</i>
S0	80-100 %	8-10 %	< 3 %
S1	43-80 %	4,3-8 %	< 1,3-2,4 %
S2	18-43 %	1,8-4,3 %	< 0,5-1,3
S3*	8-18 %	0,8-1,8 %	< 0,2-0,5
S4**	3-8 %	0,3-0,8 %	< 0,1-0,2

\* Il convient que les conducteurs porteurs de verres S3 soient particulièrement vigilants lors d'un passage en tunnel.

\*\* Ce type de verre est incompatible avec la conduite automobile.

## Conclusion

La lumière, terme privilégié des poètes, des mystiques, des philosophes et de tout être à la découverte du monde est, depuis l'écrivain de la Genèse jusqu'au penseur du XVIII<sup>e</sup> siècle, le principe et le symbole de la vie, de la vérité, du renouveau et de la société en marche.



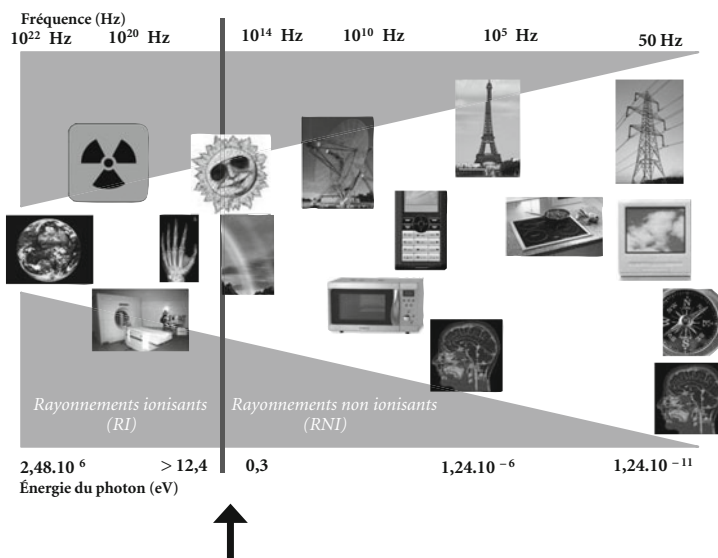
C'est pour le physicien un rayonnement dont la nature, la mesure et les effets physiques et biologiques sont connus. Cette connaissance physique précise du rayonnement visible comme l'ensemble des mécanismes biologiques qui sous-tendent son action ont permis de préciser les conditions de son usage. Ce dernier doit être mesuré, respecter l'alternance du jour et de la nuit et s'éloigner de tout excès : à cet égard, la grande diffusion des technologies nouvelles d'éclairage énergétique très puissant, à toute heure du jour, doit faire l'objet d'une surveillance accrue.

## Pour en savoir plus

- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (1999) Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0,38 to 3  $\mu\text{m}$ ). In : Matthes R, Bernhardt JH, McKinlay AF (éd). Guidelines on limiting exposure to non-ionizing radiation. D-85764 Oberschleißheim : ICNIRP 7, 171-206.
- ICNIRP (2000) Statement on light emitting diodes (LEDs) and laser diodes : implications for hazard assesment. Health Physics, 78: 744-752.
- Matthes R, Sliney D, (éd.) Measurement of Optical Radiation Hazards. CIE  $\times$  016-1998. D-85764 Oberschleißheim : ICNIRP 6/98 ; 762.
- AFNOR, norme NF 14255, Mesurage et évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements optiques incohérents. Partie 2 : Rayonnements visible et infrarouge émis par des sources artificielles (2005). Partie 4 : Terminologie et grandeurs utilisées pour le mesurage de l'exposition aux rayonnements ultraviolet, visible et infrarouge (2006).
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association (1982) Lasers and Optical Radiation. Environmental Health Criteria 23. Genève : OMS.
- Commission Internationale de l'éclairage. Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes CIE S 009/E:2000.
- CIE standard EN 62471 : Photobiological safety of lamps and lamps systems.
- Césarini JP (2009) Risques oculaires du rayonnement bleu. Radioprotection. 44: 463-78.
- Zastrow L, Groth N, Klein F *et al.* (2009) The missing link – Light-induced (280-1,600 nm) free radical formation in human skin. Skin Pharmacol Physiol, 22: 31-44.

# Le Soleil et le rayonnement ultraviolet

J.-P. Césarini



## Introduction

Le rayonnement ultraviolet (UV) est une composante importante du rayonnement solaire dans notre environnement. Il est également émis par les appareils de bronzage et par de nombreuses sources utilisées dans l'industrie. L'énergie véhiculée par ce rayonnement d'une part et son absorption par certaines molécules du vivant d'autre part déclenche des réactions importantes, surtout au niveau du patrimoine génétique des cellules exposées. Les conséquences de ces réactions à court, moyen et à long terme sont capitales en termes de santé publique.

Non perçu par l'œil, non ressenti par les capteurs sensitifs cutanés, le rayonnement UV est souvent négligé, ce qui renforce sa dangerosité.

## Rappels physiques

Dans le spectre des rayonnements électromagnétiques, le rayonnement UV s'étend de 100 nanomètres (nm) à 400 nanomètres (nm) où commence l'émission violette du domaine visible. Son énergie étant du même ordre de grandeur que celle des liaisons chimiques, il est susceptible d'affecter chimiquement les milieux biologiques dans lesquels il est absorbé. Du point de vue de ses effets biologiques, le rayonnement UV est subdivisé en trois fractions, désignées en partant du domaine visible : l'UVA (400-315 nm), l'UVB (315-280 nm) et l'UVC (280-100 nm) (tableau I).

**Tableau I** – Rayonnements UV dans le spectre solaire. CIE (1935).

Bande spectrale	Longueur d'onde (nm)	Énergie des photons* en électronvolts (eV)
UVA	400,0-315	3,1-4,0
UVB	315,0-280	4,0-4,4
UVC	280,0-100	4,4-12,4
UV (Vide)*	100,0-10	12,4- 124,00
* ainsi appelé car ces longueurs d'onde sont totalement absorbées dans l'air.		

## Sources naturelles et artificielles

### Source naturelle d'UV

Le Soleil est la principale source de rayonnement optique dans notre univers. Le spectre solaire à la surface de la Terre comprend non seulement la lumière, qui est la forme d'énergie radiante perçue par l'œil humain, mais également les rayonnements invisibles, UV et infrarouge, de part et d'autre du domaine visible.

Lors de la traversée de la stratosphère et de l'atmosphère, le rayonnement solaire est modifié par l'oxygène moléculaire, l'ozone et l'enuagement. L'UVC, absorbé par l'oxygène, ne parvient pas à la surface de la Terre. L'UVB est absorbé partiellement par l'ozone et l'air : au-dessous de 295 nm il est totalement absorbé, alors qu'au-dessus de 295 nm, l'absorption varie avec la longueur d'onde et l'épaisseur de la couche d'ozone. L'UVA est peu modifié. De plus, l'atmosphère diffuse les rayonnements qui sont réfléchis par

l'environnement (végétation, neige, eau, etc.). Selon l'inclinaison du Soleil sur l'horizon, les épaisseurs d'atmosphère et de couche d'ozone traversées varient dans des proportions importantes, ce qui affecte la répartition spectrale du rayonnement reçu à la surface de la Terre. Par exemple, dans l'hémisphère Nord, en zone tempérée, une quantité d'UVB importante parvient à la surface de la Terre lorsque le Soleil est au-delà de 45° au-dessus de l'horizon. La qualité du rayonnement varie selon l'heure de la journée et les saisons. Il existe également des variations selon l'altitude (augmentation de 4 % du rayonnement UVB tous les 300 m).

## Sources artificielles d'UV

L'homme est exposé aux UV émis par de nombreuses sources artificielles : certains types de lampes à incandescence et fluorescentes, les arcs de soudure, les photocopieurs, etc. Selon la température de couleur de la source (corps noir chauffé) et la technologie mise en œuvre, les émissions d'UV sont très différentes. Un corps noir porté à haute température, de 2700 à 3400 °K, émet un rayonnement UV plus ou moins important. Dans l'industrie, l'utilisation du rayonnement UV est largement répandue, mais le rayonnement UVC est peu utilisé ; cependant, sa dangerosité réside dans des fuites accidentelles hors des sources enfermées (tableau II).

En éclairage artificiel, c'est l'élévation de température d'une substance (par exemple, un filament de tungstène), traversée par un courant électrique, qui produit l'émission. Si l'enveloppe de la lampe est en silice fondue (résistant à l'échauffement), la totalité des rayonnements est transmise (lampe tungstène-halogène). Dans les lampes ou tubes fluorescents, le rayonnement est généré par décharge électrique dans un mélange de vapeur de mercure et d'un gaz rare sous basse pression. L'émission à 253,7 nm, caractéristique du mercure, est ensuite convertie en lumière par absorption par une poudre de phosphore couvrant la face interne de l'enveloppe de verre, d'où est réémis un rayonnement de plus grande longueur d'onde (fluorescence). Selon la nature du phosphore et le type d'enveloppe, les lampes fluorescentes peuvent produire une large gamme d'émissions spectrales couvrant les domaines du rayonnement visible, de l'UVA et de l'UVB et permettent ainsi de répondre à de nombreuses applications.

Dans l'environnement industriel, la peau et l'œil peuvent être soumis à des UV provenant des postes de soudure électrique (soudure à l'arc).

En médecine, on utilise les rayonnements produits par des lampes fluorescentes adaptées pour produire essentiellement de l'UV afin de traiter certaines pathologies cutanées (psoriasis, eczéma, vitiligo). Les lampes germicides émettent dans l'UVC ; elles sont utilisées pour stériliser les instruments chirurgicaux, les blocs opératoires hospitaliers, pour aseptiser les aliments, l'air des armoires frigorifiques, etc.

**Tableau II** – Domaines technologiques, industriels et commerciaux, utilisant des sources émettrices de rayonnement UV.

<i>Domaine industriel</i>	<i>Applications</i>	<i>Lampes</i>	<i>Émissions utiles</i>
Imprimerie	Polymérisation* des encres Séchage des encres	Hg <sup>1</sup> haute pression Métalloïdes Incandescence	UVA, B, C UVA IR
Photolithographie	Plaques	Xe <sup>1</sup> haute pression Métalloïdes Tungstène halogène	UVA, visible UVA UVA, visible
Photocopie Système diazo	Exposition	Fluorescence Hg haute pression	UVA, bleu UVA
Photocopie Papier/ZnO	Exposition Séchage	Fluorescence Tungstène Halogène	Bleu, vert Visible & IR
Hygiène alimentaire	Attractant	Fluorescence	UVA
Peintures	Polymérisation Séchage	Hg haute pression Incandescence Halogène	UVA, UVB, UVC IR IR
Semi-conducteurs	Exposition	Hg haute pression	UVA
Circuits imprimés	Exposition	Hg haute pression Fluorescence	UVA UVA
Réactions chimiques	Réacteur photochimique	Hg haute pression Métalloïdes	UVA UVA, visible
Soudures	Soudure à l'arc	Arc électrique	UVA, UVB, UVC, visible
Technologie du vide	Plasma	Arc xénon	UVA, UVB, UVC, visible
Étude des surfaces	Détection fuites	Fluorescence	UVA
Analyses de laboratoire	Spectrométrie Recherche génome	Hg haute pression Fluorescence	UVA, UVB, UVC UVA
Désinfection	Surfaces, air, eau	Hg haute pression	UVA, UVB, UVC
Traitements médicaux	Dermatologie Luminothérapie	Hg basse pression Incandescence	UVA, UVB Visible
Instituts de bronzage artificiel	Solarium	Fluorescence	UVA, UVB

<sup>1</sup> Hg : mercure ; Xe : xénon.

## Mesures et dosimétrie

Pour détecter et mesurer les UV, trois types d'appareils sont utilisés : radiomètres, spectroradiomètres et dosimètres. Les deux premiers types sont des instruments à lecture directe qui utilisent des détecteurs électro-optiques pour convertir les rayonnements incidents en signaux électriques. Les radiomètres mesurent l'énergie totale incidente dans une large bande spectrale, alors que les spectroradiomètres indiquent, en plus, la distribution de cette énergie en fonction de la longueur d'onde ( $\text{W.m}^{-2}$ ).

En pondérant les données physiques de ces appareils par la fonction d'efficacité pour un effet donné et en intégrant la notion de temps, on obtient des instruments de mesure directe de la dose (dosimètres) au niveau de l'organe concerné ( $\text{J.m}^{-2}$ ).

Les dosimètres sont largement employés pour des mesures ambiantes ou individuelles. Les dosimètres individuels résultent de la miniaturisation des dosimètres à poste fixe. L'étalement de ces appareils par des réactions photochimiques est une étape critique. Généralement, des sources tungstène-halogène normalisées sont utilisées comme référence.

## Interactions avec le vivant

### Interactions au niveau moléculaire

Lorsque le corps humain est exposé au rayonnement UV, ce dernier est absorbé, au niveau de la peau et des yeux, par différents constituants cellulaires appelés chromophores\*. Les photons\* ainsi absorbés peuvent déclencher des réactions photochimiques entraînant un ensemble de processus bénins ou délétères. L'énergie des photons associée à la longueur d'onde du rayonnement est déterminante pour la réponse biologique aux rayonnements optiques. Les effets biologiques sont induits soit par absorption directe des photons, soit par photosensibilisation\* d'une substance endogène ou exogène, produisant des espèces de très courte durée de vie, mais très réactives telles que des formes excitées de l'oxygène ou des radicaux libres (tableau III).

Les acides nucléiques, en particulier l'ADN du noyau des cellules, forment le matériel génétique dont l'intégrité doit être respectée pour assurer l'équilibre vital. Les UV sont capables d'y induire des dégâts importants, conduisant à des mutations, quand les altérations induites par le rayonnement ne sont pas réparées. Le gène *p53* est activé par le rayonnement UV. Porté par chacun des deux chromosomes 17, il code pour une protéine *p53*, dotée d'un rôle pivot dans le contrôle des divisions cellulaires. Ce gène *p53*, nommé à juste titre « gardien du génome », permet à la cellule de contrôler et de réparer par

des mécanismes spécifiques des lésions induites dans l'ADN après exposition au rayonnement. Si les dommages sont trop importants, il peut décider de la mort de la cellule par un phénomène d'apoptose\*. Il peut faire l'objet de mutations qui favorisent les divisions anarchiques, s'exprimant cliniquement par des kératoses actiniques\* (états précancéreux cutanés) et les cancers cutanés les plus fréquents (épithéliomas spinocellulaires\* et basocellulaires\*). Ces mutations ne se produisent pas au hasard sur le chromosome porteur de *p53*, mais sur des zones « fragiles », spécifiques du rayonnement UV. Les cancers cutanés induits par le rayonnement UV portent donc une « signature » génétique que l'on retrouve dans plus de 80 % des cas. Dans les mélanocytes\*, un autre gène, *p16*, est impliqué de manière similaire pour les mélanomes\* malins.

Ces mutations sont le prélude au processus complexe de la photocarcinogenèse. Le rayonnement UV agit également de façon indirecte en induisant la formation d'espèces réactives de l'oxygène (le radical hydroxyle, l'ion superoxyde, les peroxydes) qui réagissent chimiquement avec les molécules biologiquement actives (enzymes). Celles-ci sont détruites ou dans l'incapacité de fonctionner. Ces modifications se traduisent par des effets immédiats ou retardés, proportionnels aux intensités de rayonnement reçues, et aux équilibres agression-réparation spécifiques à chaque cellule, tissu et individu.

Dans le passé, il était admis que les UVB étaient nettement plus dangereux que les UVA, en particulier quand le Soleil est au zénith (moment du pic de l'agression). Dans la dernière décennie, les progrès technologiques (spectrométrie de masse, HPLC<sup>1</sup>) ont permis de mieux apprécier les lésions induites par les UVA et les UVB. Ils induisent des dimères de pyrimidine\* qui représentent les lésions prédominantes à l'origine de la carcinogenèse. En utilisant une technique de transfection\* d'un gène bactérien bien connu dans les cellules humaines en culture, on a pu montrer que les mutations induites par les UVA solaires étaient aussi importantes que celles induites par les UVB solaires, compte tenu du rapport UVA/UVB sous les latitudes tempérées.

**Tableau III** – Principales cibles et interaction biologique du rayonnement UV.

<i>Bande spectrale</i>	<i>Constituant cellulaire</i>	<i>Interaction</i>
UVA	Protéines Lipides (membranes) Acides nucléiques (ADN*, ARN*)	Absorption, action indirecte par photosensibilisation et production d'espèces activées de l'oxygène
UVB	Acides nucléiques Acides aminés aromatiques	Absorption et action directe
UVC	Tous constituants cellulaires	Absorption et action directe

1. HPLC : technique de chromatographie liquide à haute pression.

## Interactions au niveau tissulaire

### Effets sur la peau

La peau, composée de l'épiderme et du derme, absorbe les rayonnements parvenant à sa surface. L'épiderme absorbe 90 % du rayonnement UVB et 50 % du rayonnement UVA, le reste est absorbé dans le derme superficiel (fig. 1).

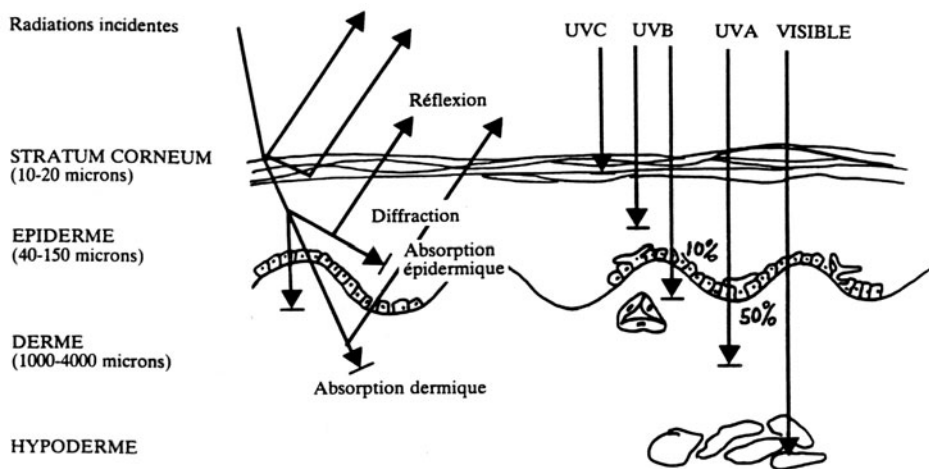


Fig. 1 – Schéma de la peau et absorption des rayonnements UV.

### Érythème actinique

Dans l'épiderme, les couches cornées inertes absorbent ou réfléchissent les UV, mais c'est la couche basale, zone de multiplication des kératinocytes et de production de la mélanine\* par les mélanocytes, qui est la plus affectée par le rayonnement. L'absorption de ce rayonnement déclenche la production de cytokines\* par les cellules et la cascade de médiateurs de l'inflammation, ce qui se traduit par l'érythème actinique\* ou coup de soleil. Selon la dose reçue par l'épiderme et plus particulièrement par sa zone active, l'érythème produit est plus ou moins intense et d'apparition plus ou moins rapide, son intensité culmine à la vingt-quatrième heure. Le consensus scientifique a établi, de manière informelle, une gradation dans l'intensité : un érythème à peine décelable « + » correspond à une dose érythémale minimale (DEM), « ++ » à un érythème fort et « +++ » à un érythème violacé, douloureux et oedémateux, signant l'atteinte vasculaire plus profonde. Un érythème important, intéressant une grande surface, s'accompagne de phénomènes généraux (frissons, fièvre). Au-delà, pour cinq DEM, apparaissent des phlyctènes (bulles). L'érythème actinique persiste de trois à sept jours selon les sujets et selon son intensité.



Les sujets sont répartis en quatre classes en fonction de leur sensibilité (phototypes I à IV). L'érythème actinique est fréquemment observé chez les sujets à peau claire (type caucasien). Il atteint plus rarement les sujets d'origine asiatique (type mongoloïde) et pratiquement jamais les sujets à peau très sombre (type négroïde). Ces différences de réaction sont essentiellement dues à la qualité et à la quantité de mélanine naturellement présente dans l'épiderme.

#### *Spectre de l'efficacité érythémale actinique*

Pour mesurer l'agression du rayonnement UV sur la peau, on utilise le spectre d'efficacité érythémale actinique. Le spectre de référence couramment utilisé, reproduit dans la figure 2, a été publié par la Commission internationale de l'éclairage (CIE) en 1987. Il exprime le rendement érythémal de chaque longueur d'onde du rayonnement UV par rapport à la longueur d'onde la plus efficace. Cette approche est capitale pour évaluer les risques liés aux UV.

En zone tempérée, le maximum d'efficacité du rayonnement solaire pour générer l'érythème se situe autour de 308 nm (UVB).

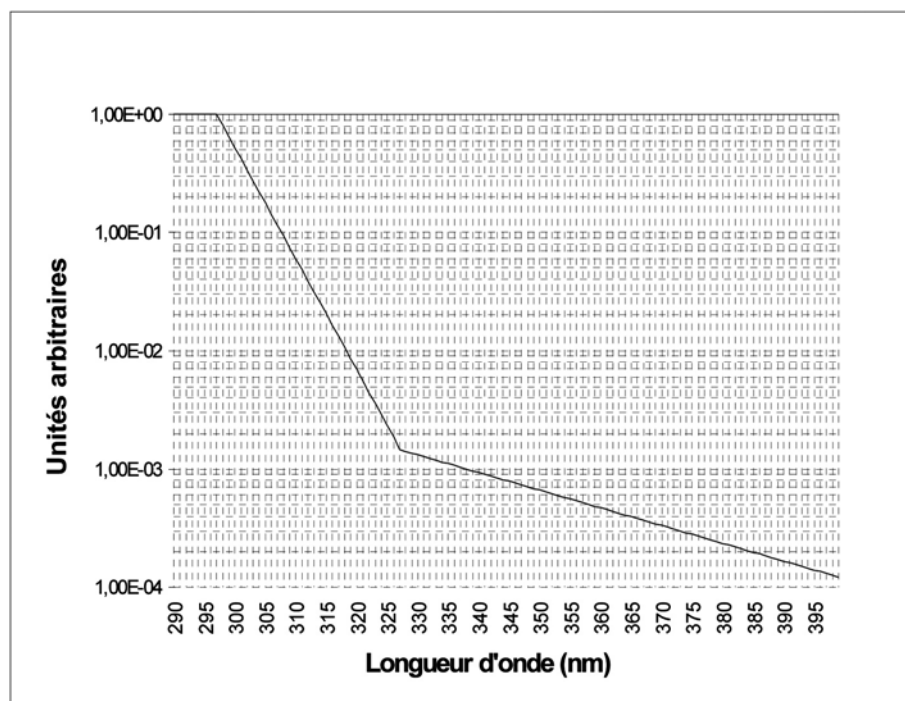


Fig. 2 – Spectre d'efficacité érythémale (CEI 1987).

*Pigmentation naturelle et pigmentation immédiate*

Les mélanines sont des pigments produits en permanence par les mélanocytes de la peau et transférés aux kératinocytes voisins. Ceux-ci sont éliminés par la desquamation naturelle. Ils déterminent la couleur de la peau par action conjuguée de nombreux gènes qui régulent la composition des mélanines, la taille des grains transférés ainsi que leur vitesse de dégradation. Les mélanines absorbent les UV et subissent, pour les phaeomélanines, une dégradation ou, pour les eumélanines, une polymérisation\*. Sous l'action de l'UVA, les pigments naturellement présents dans la peau subissent une réaction chimique responsable d'une coloration immédiatement observable, mais transitoire, distincte de la coloration tardive (mélanogénèse) plus persistante.

*Pigmentation acquise*

Les UV déclenchent l'épaississement de l'épiderme et la production de néomélanines. Ces deux processus constituent une réaction d'adaptation de la peau à l'agression lumineuse. Les UVB déclenchent préférentiellement l'épaississement cutané et les UVA sont responsables de l'hyperproduction de pigment.

La sensibilité solaire des sujets blancs varie dans une fourchette de 1 à 4 (phototypes I à IV) selon le rapport phaeomélanine/eumélanine. Si ce dernier est à prédominance phaeomélanique, la protection acquise sera faible. S'il est à prédominance eumélanique, la protection acquise sera importante, se rapprochant de la protection naturelle des types mongoloïde et négroïde. C'est ainsi que chez les types caucasiens, les sujets dits « mélanocompromis » présentent de faibles capacités d'adaptation, et les sujets dits « mélanocompétents » présentent une bonne adaptation, réduisant considérablement les effets délétères des UV, à court et à long terme.

*Effets sur l'immunité*

Les défenses immunitaires cutanées subissent de la part des UV une agression qui se traduit par une dépression dont la durée est d'au moins trois semaines. Ce phénomène, reconnu récemment, est induit pour des doses d'UV relativement modestes, inférieures à la DEM. Il joue certainement un rôle important dans les infections cutanées virales ou mycosiques et, à plus long terme, sur le contrôle de la multiplication des cellules cancérisées par les UV.

*Phototoxicité, photoallergie*

Certaines molécules d'origine endogène, résultant d'anomalies métaboliques, ou exogènes, provenant du contact avec des produits chimiques (cosmétiques, parfums, certains médicaments), sont susceptibles d'absorber les UV et de déclencher des phénomènes toxiques pour les cellules (irritation de la peau) : c'est la phototoxicité. Ces réactions, parfois violentes et d'installation rapide, sont proportionnelles à la quantité de produit et à la dose d'UV absorbée. Lorsqu'il y a intervention du système immunitaire, les réactions

sont de nature différente, et retardées : c'est la photoallergie, en principe indépendante de la quantité de réactifs. La plupart de ces réactions répondent à un mécanisme indirect et sont produites par la fraction UVA du spectre. Elles dépendent dans une large mesure du spectre d'absorption des molécules impliquées.

Chez des sujets prédisposés, les premières expositions au soleil de printemps ou d'été, mêmes minimales, peuvent déclencher des réactions anormales ou lucites, communément qualifiées d'« allergies solaires », plus fréquentes chez la femme.

### *Cancers cutanés*

Les modifications génétiques induites par les UV provoquent le dérèglement de la fréquence normale de division des cellules composant l'épiderme. Après un délai variable (de dix à trente ans), des proliférations anarchiques de cellules cancéreuses émergent sous la forme de tumeurs. Schématiquement, des états précancéreux (kératoses actiniques, mélanoses) précèdent l'apparition des cancers dont l'évolution est en partie modulée par le système immunitaire. On distingue, selon la cellule d'origine, les épithéliomas basocellulaire (EBC) localement envahissants, les épithéliomas spinocellulaires (ESC), peu métastasants, et les mélanomes malins, tumeurs très agressives d'origine mélanocytaire. Dans 90 % des cas, les cancers cutanés apparaissent chez les sujets définis plus haut comme mélanocompromis.

Pour les EBC et les ESC, un spectre d'action a été proposé, fondé sur la transposition à l'homme des données expérimentales obtenues sur l'animal. Il est proche du spectre d'efficacité érythémale. Pour les mélanomes malins, il n'existe pas de modèle expérimental permettant de construire un spectre d'action précis ; outre les UVB, les UVA semblent jouer un rôle important ainsi que les expositions importantes dans l'enfance. Lorsque les mélanomes malins atteignent une épaisseur critique ( $> 0,75$  mm), ils sont susceptibles d'essaimer à distance (métastases). Le pronostic est alors très sombre.

### *Vieillessement actinique ou héliodermatose*

L'accumulation des effets des UV produit dans le derme des modifications des vaisseaux et des constituants fibrillaires (collagènes, élastines). Ces modifications d'origine extrinsèque s'ajoutent aux modifications d'origine intrinsèque (vieillessement chronobiologique). La participation des UV à cet effet à long terme est importante, mais un spectre d'action précis n'a pas pu être obtenu à ce jour. Quel que soit le type de peau, le bronzage répété peut entraîner ultérieurement un risque de vieillissement accéléré de la peau et même de cancer cutané.

### *Vitamine D*

Le cholestérol, naturellement présent dans l'épiderme, absorbe les UVB qui le transforment en prévitamine D dont le passage sanguin et hépatique contribue à l'homéostasie\* des os, en complément des apports alimentaires. La concentration sanguine en vitamine

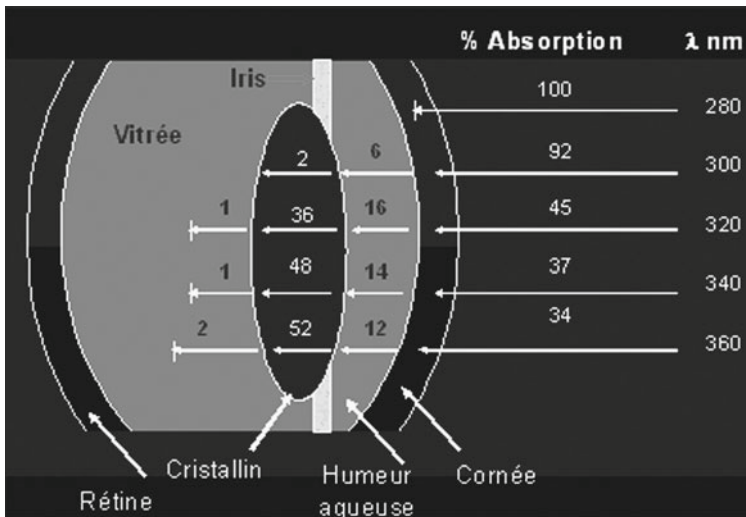
D est particulièrement critique lors des étapes de croissance des os (le déficit est cause de rachitisme) et lors de la seconde période de la vie (lutte contre l'ostéoporose). L'exposition des zones naturellement découvertes, une fois par semaine pendant quelques minutes, suffit à assurer cette homéostasie pour les peaux blanches.

### Effets sur l'œil

L'œil est naturellement protégé des rayonnements solaires ou artificiels par des structures géométriques efficaces (paupières, cils, arcades sourcilières, arête nasale) qui réduisent considérablement la pénétration des rayonnements incidents.

### Photokératite, photoconjonctivite

À la différence de la surface de la peau, qui est protégée par la couche cornée, l'œil, recouvert d'une mince couche de larmes, est directement en contact avec le milieu extérieur. L'inflammation de la cornée\* (kératite) ou de la conjonctive\* (conjonctivite) est déclenchée pour des doses inférieures à l'érythème cutané. Les photokératites dues à la forte réflexion des UV sur le sable ou sur la neige disparaissent en général au bout de quelques jours, en raison du renouvellement rapide des cellules de la cornée. En environnement industriel, les UVC produits par les sources artificielles sont à l'origine de lésions importantes de la cornée. Les UVB, partiellement absorbés par la cornée, sont complètement arrêtés par les structures constituant la chambre antérieure de l'œil. Les UVA, en revanche, pénètrent jusqu'au cristallin (fig. 3).



**Fig. 3** – Pénétration du rayonnement UV dans l'œil (d'après Sliney et Wolbarsht 1980).  $\lambda$  est la longueur d'onde en nanomètres.

*Cataractes\**

Les cataractes affectent le cristallin qui s'opacifie progressivement de manière plus ou moins homogène. L'UVA, en particulier, est aujourd'hui nettement impliqué dans l'épidémiologie\* de cette affection fréquente chez le sujet âgé. Chez les sujets jeunes, placés dans un environnement riche en UV, la cataracte se développe plus particulièrement dans le cadran interne, malgré le port de lunettes sombres, souvent incapables d'empêcher une pénétration latérale des rayonnements et favorisant même leur incidence en entraînant une large ouverture de l'iris.

Notons que chez les jeunes enfants et les sujets privés de cristallin (aphakes), les UVA et la fraction visible du spectre peuvent induire des lésions de la rétine.

*Dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA)*

La DMLA est une cause de cécité de plus en plus fréquemment observée, probablement en raison de l'allongement de la durée de vie. Ce handicap très sévère pourrait être prévenu par la réduction de l'agression lumineuse et la lutte contre les phénomènes oxydatifs qui y sont liés.

## Réglementation, recommandations

Tous les effets observés chez l'homme ont pu être observés chez différentes espèces d'animaux de laboratoire pour lesquels l'utilisation de sources artificielles, par exemple le simulateur solaire, permet une dosimétrie exacte ainsi que l'observation précise des conséquences à court, à moyen et à long terme. Cela a permis d'établir les spectres de l'efficacité érythémale, de la dépression immunitaire et de l'induction des cancers cutanés chez l'animal. En rapprochant ces informations des données épidémiologiques chez l'homme, les seuils de déclenchement des lésions à court terme ainsi que des valeurs limites d'exposition aux UV pour la peau et pour l'œil ont été fixés.

Les nombreuses données épidémiologiques accumulées depuis vingt ans sur les cancers cutanés et les cataractes ont permis de déterminer, avec peu de marge d'erreur, le rapport existant entre les doses totales cumulées et l'incidence de ces pathologies. En France, on estime à 80 000 le nombre de nouveaux cas de cancers cutanés annuels, dont 8 000 cas de mélanomes malins. De plus, 100 000 nouveaux cas annuels de cataractes pourraient être dus aux UV.

La CIE a défini une *dose érythémale normalisée* chez l'homme, ou *SED* (standard erythema dose), destinée à servir d'unité dans le domaine de la protection (ISO 1999). Une SED est équivalente à une exposition érythémale efficace de  $100 \text{ J.m}^{-2}$  selon la courbe d'efficacité érythémale, le spectre étant normalisé à 297 nm. La DEM est donc un multiple variable de la SED ; pour les sujets du type I à IV, elle est comprise entre

1,5 et 6 SED. À des fins de protection, il est souhaitable que toute source naturelle ou artificielle de rayonnement UV soit, à l'avenir, caractérisée par son émission exprimée en unités SED par heure.

Les valeurs limites d'exposition représentent les niveaux au-dessous desquels on estime que les travailleurs peuvent être exposés régulièrement sans que leur santé en soit affectée. Toutefois, il existe de larges variations de la susceptibilité individuelle ; l'absorption inconsciente de certains agents photosensibilisants peut provoquer une réaction adverse. Les expositions répétées peuvent aggraver une condition pathologique préexistante. Aussi ces limites ne peuvent-elles être que conseillées à titre indicatif pour le public lorsqu'il s'expose aux UV solaires ou artificiels.

La *limite de dose fondamentale* admise pour l'exposition professionnelle journalière aux UV incidents sur la peau ou sur l'œil est de  $30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$  ( $3 \text{ mJ/cm}^2$ ) *efficaces*, lorsque l'éclairement énergétique ( $E_\lambda$ ) dû à chaque longueur d'onde composant le spectre est pondéré par le facteur d'efficacité biologique relative ( $S_\lambda$ )<sup>2</sup> correspondant. L'éclairement énergétique pondéré ou *éclairement énergétique efficace* ( $E_{\text{eff}}$ ) produit par une source est obtenu par la relation :  $E_{\text{eff}} = \sum E_\lambda S_\lambda \Delta\lambda \text{ W/m}^2$ . Cette limite correspond au dixième de la dose érythémale moyenne des sujets caucasiens. La durée d'exposition journalière aux UV pouvant être considérée comme tolérable dépend étroitement de l'éclairement énergétique efficace :  $t_{\text{max}} (\text{s}) = 30 (\text{J/m}^2) / E_{\text{eff}} (\text{W/m}^2)$  (tableau IV). Les limites d'exposition relatives aux différentes longueurs d'onde sont obtenues par la relation :  $H = 30 / S_\lambda$  ; cependant, dans l'UVA, qui est absorbé par le cristallin, la dose totale reçue en une journée par l'œil non protégé ne doit pas dépasser  $10^4 \text{ J/m}^2$ .

Ces limites ont été établies pour des individus à peau claire et ne tiennent pas compte des facultés d'adaptation. Elles sont souvent dépassées par les travailleurs exposés au soleil au cours d'une journée de travail en extérieur.

À la requête de l'OIT et de l'OMS, l'ICNIRP a publié en 2007 un guide pour la protection des travailleurs vis-à-vis du rayonnement UV. Les recommandations contenues dans cet ouvrage devraient être répercutées dans le Code du travail en France et dans les pays de la Communauté européenne.

---

2.  $S_\lambda$  est égal à 1 pour  $\lambda = 270 \text{ nm}$  et décroît de part et d'autre de cette valeur. À  $315 \text{ nm}$ ,  $S_\lambda$  n'est plus que de 0,003 et de 0,00013 à  $360 \text{ nm}$  au milieu de l'UVA. Pour plus de détails sur les limites de dose, le lecteur est prié de se reporter au texte de l'ICNIRP (1999) ou de l'UNEP/WHO/ICNIRP (1994) : Environmental Health Criteria 160.

**Tableau IV** – Durée maximale d'exposition UV, fondée sur les limites d'exposition pour l'œil, pour les travailleurs en lumière artificielle.

<i>Durée de l'exposition par jour</i>	Éclairement énergétique efficace	
	$E_{eff}(W/m^2)$	$E_{eff}(\mu W/cm^2)$
8 heures	0,001	0,1
4 heures	0,002	0,2
2 heures	0,004	0,4
1 heure	0,008	0,8
30 minutes	0,017	1,7
15 minutes	0,033	3,3
10 minutes	0,05	5
5 minutes	0,1	10
1 minute	0,5	50
30 secondes	1,0	100
10 secondes	3,0	300
1 seconde	30,0	3 000
0,5 seconde	60,0	6 000
0,1 seconde	300,0	30 000

## Précautions, protection

La protection contre les UV (photoprotection) fait appel à plusieurs techniques dont la mise en jeu dépend essentiellement de la nature de la source. L'agression par les UV est particulièrement insidieuse et mal reconnue du public, car l'érythème actinique ne survient généralement que quelques heures après la fin de l'exposition, et les effets à long terme sont d'installation progressive (vieillessement) ou d'apparition brutale mais retardée (tumeur).

## L'index UV

L'information du public sur les risques liés au rayonnement solaire passe par la mise en œuvre d'un outil de communication représentatif de l'agression solaire. L'« index UV solaire » rend compte du niveau de rayonnement UV naturel existant ou prévu en un

lieu donné et du risque potentiel qu'il présente pour la santé. L'index UV est exprimé numériquement sur une échelle de 1 à l'infini :  $I_{UV} = 40 \times E_{eff}$  (exprimé en  $W/m^2$ ).

L'énergie solaire normalisée à la longueur d'onde 297 nm, soit  $210 J/m^2$  ( $21 mJ/cm^2$ ) selon le spectre d'efficacité érythémale de référence de la CIE, a été retenue comme valeur correspondant à une DEM, soit 2,1 SED.

Un index UV de 1 à 3 correspond à un soleil faible, de 4 à 6 à un soleil moyen et de 7 à 9 à un soleil fort. Au-delà de 10, l'énergie solaire est extrême. L'index UV est recommandé par l'OMS pour faciliter l'efficacité de la protection antisolaire. Dans de nombreux pays dont la France, il est largement utilisé grâce à la diffusion médiatique de bulletins météorologiques pour alerter les populations sur les risques que présentent les expositions solaires excessives estivales au bord de mer ou en altitude (ski). On rappelle que l'efficacité érythémale solaire est identique que l'on soit le 21 avril ou le 21 août.

## Protection physique

Le plus simple consiste à éviter l'exposition directe aux UV pendant les heures de la journée où l'agression solaire est la plus importante. Le port d'un chapeau à bord de 7 cm au moins, de vêtements légers ( $SPF > 25$ ) et de lunettes sont des mesures relativement faciles à mettre en œuvre et très efficaces (fig. 4). Pour un sujet debout, cela permet de réduire de plus de 80 % les doses reçues. De plus, des lunettes enveloppantes permettent d'éviter le rayonnement oblique (fig. 5).



Fig. 4 – Mesures de protection solaire.

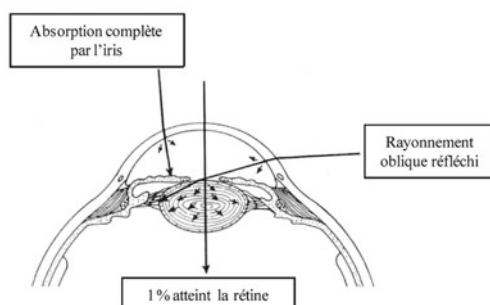


Fig. 5 – Agression du cristallin.

## Protection par produits antisolaires

Les produits antisolaires contiennent des filtres organiques et/ou des particules minérales. Ils sont appliqués à la surface de la peau avant les expositions et doivent être renouvelés



largement pendant les expositions. Ces filtres laissent toujours passer une certaine dose d'UV, inversement proportionnelle au facteur de protection qui les caractérise. Les produits antisolaires ne doivent pas être utilisés dans le but de prolonger les expositions, mais bien de réduire l'agression. La puissance de filtration doit être adaptée à la force du soleil d'une part et à la sensibilité solaire individuelle d'autre part. Ces données représentent l'essentiel de l'éducation solaire telle qu'elle est promue par l'association « Sécurité solaire » dont les conseils sont portés à la connaissance du public soit par Internet ([www.infosoleil.com](http://www.infosoleil.com)), soit à travers différents médias. Le tableau V résume les conseils de protection par les produits antisolaires recommandés en fonction des valeurs de l'index UV.

**Tableau V** – Facteurs de protection (SPF ou IP) recommandés en fonction de l'index UV.

<i>Index UV</i>	<i>Intensité solaire</i>	<i>Facteur de protection recommandé pour peau sensible et enfant</i>	<i>Facteur de protection recommandé pour peau normale</i>
1-2	Faible	8	–
3-5	Moyenne	15/25	15
6-7	Forte	40/50	25
8-10	Très forte	50 et plus	40/50
10 et +	Extrême	50 et plus (ombre)	50 et plus

## Protection systémique

Pour certaines pathologies liées au Soleil (porphyries, lucites par exemple) la prise orale de bêta-carotène a permis une vie extérieure pratiquement normale à ces patients fortement handicapés.

Par ailleurs, pour tenter d'optimiser les réponses cellulaires aux agressions solaires vers une meilleure tolérance, une prise de cocktail de vitamines (A, E, C) et de métaux (sélénium, zinc) préalable aux expositions solaires est proposée. Il ne s'agit pas là de véritable photoprotection. Il est bien entendu trop tôt pour juger de l'efficacité, surtout à long terme, de ces substances absorbées comme compléments alimentaires.

## Exposition aux rayonnements UV artificiels

Une partie de la population s'expose volontairement à des doses supplémentaires d'UV en utilisant soit à domicile, soit dans des installations à but lucratif (salons de beauté, centres de mise en forme) des appareils délivrant principalement des UVA pour bronzage

qui, aux dires de certains professionnels, garantiraient pratiquement une absence de danger et promettaient même une meilleure santé (production de vitamine D). Il faut s'élever fermement contre de telles assertions puisqu'il est connu aujourd'hui que les UVA sont aussi agressifs pour la peau que les UVB. Ces pratiques doivent être découragées et pour le moins sérieusement encadrées. Ce n'est que depuis 1997 qu'une législation, réclamée par les responsables de la santé, a été mise en place. Elle permet un meilleur contrôle de la qualité des appareils, de la formation des opérateurs et de l'information des usagers. En limitant la puissance des appareils et le nombre de séances, les doses annuelles totales d'UV peuvent être réduites dans des limites compatibles avec les capacités de résistance individuelle, afin de contribuer dans le futur à la réduction du nombre des cancers cutanés.

## Conclusion

Sur l'initiative de l'OMS, à travers la mise en œuvre de son programme « INTERSUN », relayé par l'action du ministère de la Santé, des dermatologues (prévention secondaire) et de « Sécurité solaire » (prévention primaire), une prise de conscience de la nécessité de réduire les surexpositions solaires et les expositions aux UV artificiels semble avoir été perçue par la population. Les médias font désormais une large place aux moyens de prévention (mannequins peu bronzés, conseils de prudence). On peut observer sur les plages des comportements plus raisonnables (port de chapeau, de tee-shirt, surtout chez les enfants). Enfin, l'incidence des mélanomes a pratiquement cessé d'augmenter durant les dix dernières années, ce qui constitue un signe encourageant de promotion pour les campagnes de prévention.

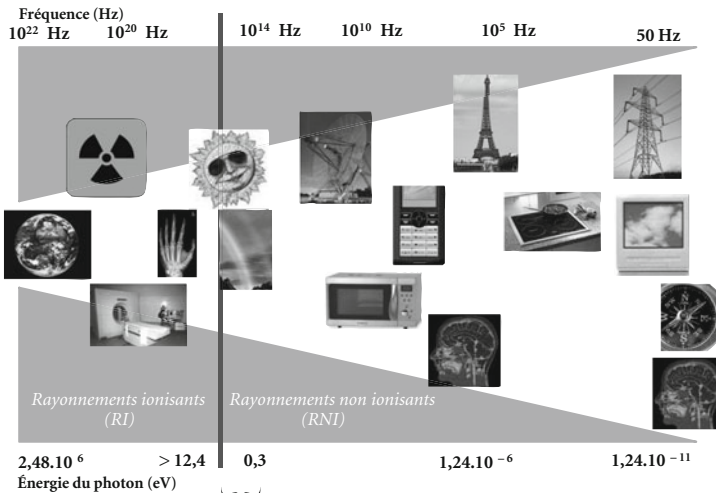
## Pour en savoir plus

- Césarini JP (1990) La Peau. « Que sais-je ? » Paris, Presse Universitaire de France ; 2<sup>e</sup> éd.
- CIE/ISO. Spectre d'action érythémale de référence et dose érythémale normalisée. Norme internationale ISO/FDIS 17166, 1999 (F) ; CIE S 007/F-1998.
- Gallagher RP *et al.* (2005) tanning beds, sunlamps, and risk of cutaneous malignant melanoma. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 14: 562-66.
- Guide national de la Météo Solaire, Sécurité solaire (éd), Paris, 1995.
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) (1999) Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). In : Matthes R, Bernhardt JH, McKinlay AF (ed.) Guidelines on limiting exposure to non-ionizing radiation. ICNIRP 7/1999: 207-26 - D-85764 Oberschleißheim.

- ICNIRP, ILO (International Labour Organization), WHO (World Health Organization) (2007), Guide protecting workers from ultraviolet radiation, ICNIRP 14/2007 - D-85764 Oberschleißheim.
- ICNIRP, UNEP (United Nations Environment Programme) /WHO (1994) Ultraviolet Radiation. Environmental Health Criteria 160: OMS, Genève.
- ICNIRP/CIE (1998) Measurements of Optical Radiation Hazards. Matthes R, Sliney D (ed). CIE × 016- ICNIRP 6/98 (762 p) - D-85764 Oberschleißheim.
- IEC (International Electrotechnic Committee) Norme 60-335-2-27 (1995) Safety of household and similar electrical appliances. Part 2. Particular requirements for appliances for skin exposure to ultraviolet and infrared radiation. Central Bureau IEC, Genève.
- Journal officiel de la République française. Décret n° 97-617 du 30 mai 1997, relatif à la vente et à la mise à disposition du public de certains appareils de bronzage utilisant des rayonnements ultraviolets. JO du 1<sup>er</sup> juin 1997. Complété par les textes parus au JO 216 du 17 septembre 1997 p. 13484 et du JO 293 du 18 décembre 1997.
- Laruche G, Césarini JP (1992) Photodermatoses et photoprotection de l'enfant. Paris : Solal.
- Mouret S *et al.* (2006) Cyclobutane pyrimidine dimers are predominant DNA lesions in whole human skin exposed to UVA radiation. PNAS 103: 13765-70.
- WHO, INTERSUN (2003) – The Global UV Project. A guide and compendium. 2003 WHO, Genève.
- WHO, WMO (World Meteorological Organization, UNEP, ICNIRP (2002) Global solar UV INDEX. A practical guide, WHO, Genève.
- WHO (2003) Regional office for Europe; UV radiation and health, OMS, Genève.
- Young AR (2004) Tanning devices – fast track to skin cancer? Pigment Cell Res 17: 2-9.
- [www.infosoleil.com](http://www.infosoleil.com)
- [www.who.dk/tech/eh/ehs02e.htm](http://www.who.dk/tech/eh/ehs02e.htm)
- AFNOR norme NF-EN 14255 : Mesurage et évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements optiques incohérents. Partie 1 : Rayonnements ultraviolets émis par des sources artificielles sur les lieux de travail (2005). Partie 3 : Rayonnement ultraviolet émis par le soleil (2008). Partie 4 : Terminologie et grandeurs utilisées pour le mesurage de l'exposition aux rayonnements ultraviolet, visible et infrarouge (2006).

# Les lasers

D.Courant



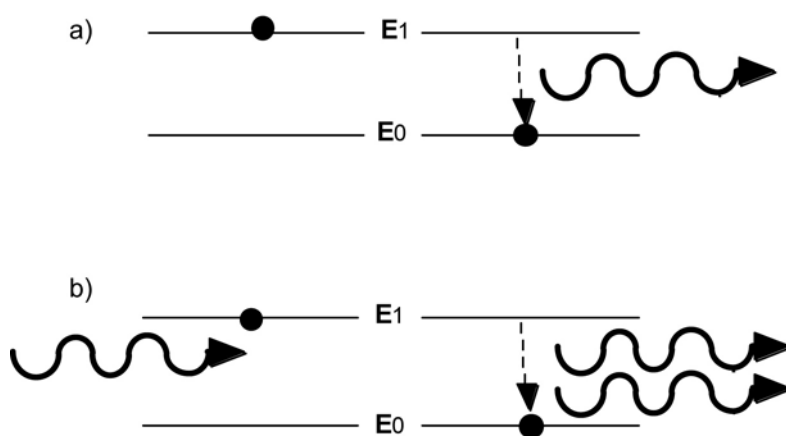
## Introduction

Le mot « laser » est un acronyme qui signifie « *light amplification by stimulated emission of radiation* » : amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement.

C'est en 1960, dans le laboratoire du Pr Maiman à Pasadena en Californie, que jaillit pour la première fois un mince faisceau de lumière rouge, le rayonnement laser, qui concrétisait à la fois l'hypothèse d'Einstein à propos de l'émission stimulée et aussi plus de quarante années de travaux théoriques et expérimentaux. Depuis, les applications du laser ont très vite dépassé le domaine du laboratoire. Elles se sont faites de plus en plus nombreuses et de plus en plus diverses dans l'industrie, les activités militaires et spatiales, les télécommunications, la médecine, le spectacle, mais aussi dans les produits d'usage domestique. Les lecteurs de CD ou de DVD présents dans les baladeurs, les chaînes hi-fi ou les ordinateurs individuels sont probablement, avec les lecteurs de codes-barres des caisses de supermarchés, les exemples les plus fréquents de l'utilisation quotidienne du rayonnement laser.

## Rappels physiques

L'émission de lumière par un corps quelconque est fondée sur la propriété d'un atome ou d'une molécule, porté dans un état excité, de revenir à son état initial stable en émettant un photon\*. Cette émission peut se produire de manière spontanée ou stimulée. Dans le premier cas, les désactivations s'effectuent de façon aléatoire. La fréquence, la direction et la phase des ondes associées aux photons peuvent être différentes. Cette lumière, qualifiée d'incohérente, est celle que nous recevons du Soleil ou d'une source d'éclairage conventionnelle. En revanche, lorsqu'un photon, produit par le retour à un état désactivé, rencontre un autre atome ou une autre molécule à l'état excité, l'interaction aboutit à l'émission d'un deuxième photon rigoureusement en phase avec le premier (fig. 1). Si l'onde formée par ces deux photons rencontre un autre atome excité, celui-ci émettra un troisième photon en phase avec les deux premiers. Ces photons sont de même longueur d'onde si les niveaux excités sont les mêmes. Ces interactions vont donner naissance à une lumière cohérente telle que tous les rayons émis par la source, en des points et des instants différents, sont en phase (cohérence spatiale et temporelle).

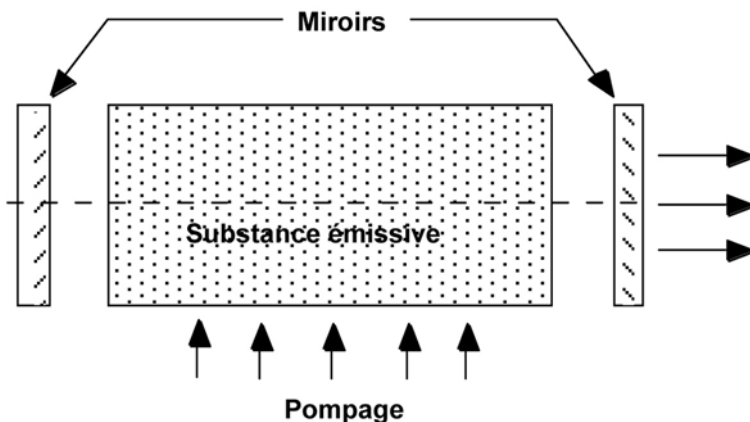


**Fig. 1** – a) Émission spontanée. Le transfert de l'électron d'un niveau excité  $E_1$  à un niveau désexcité  $E_0$  entraîne une émission de lumière incohérente. b) Émission stimulée. Un photon atteignant un électron situé à un niveau d'excitation  $E_1$  va induire la désexcitation de cet électron vers un niveau  $E_0$  accompagnée de l'émission d'un deuxième photon rigoureusement identique et en phase avec le premier.

Toutefois, une émission stimulée ne peut se produire que sous certaines conditions. En premier lieu, il importe d'obtenir une véritable synchronisation des processus de désactivation : cela n'est possible que si une proportion majoritaire des atomes ou des molécules se trouve dans le même état excité. Normalement, la majorité de la population

électronique des atomes et des molécules est à l'état fondamental. L'inversion de l'état de la population électronique nécessite un apport extérieur d'énergie fourni par un processus de pompage (excitation) adapté au milieu émissif. Le pompage optique réalisé à l'aide de sources lumineuses est particulièrement adapté aux lasers à milieu solide, le pompage électronique par décharge électrique ou par faisceau d'électrons est utilisé pour les lasers à gaz tandis que le pompage par injection de courant de polarisation est spécifique des lasers à semi-conducteur. Enfin, si le flux de photons est contraint de traverser un grand nombre de fois la substance émissive placée entre deux miroirs, multipliant artificiellement les rencontres entre photons et atomes excités, l'émission est de plus en plus riche en photons cohérents et « amplifiée ». Cette émission lumineuse intense et cohérente est l'effet laser (fig. 2).

Parmi les nombreux matériaux utilisés comme substance émissive pour produire l'effet laser, on peut citer les isolants dopés où le milieu actif est constitué par des ions métalliques (chrome :  $\text{Cr}^{3+}$ , nickel :  $\text{Ni}^{2+}$ , titane :  $\text{Ti}^{4+}$ ...) ou des terres rares (néodime :  $\text{Nd}^{3+}$ , holmium :  $\text{Ho}^{3+}$ ...) entrant en substitution dans le réseau d'une matrice solide isolante en cristal ou en verre, les semi-conducteurs, les gaz ionisés (krypton :  $\text{Kr}^{2+}$ , hélium-néon : HeNe, argon :  $\text{Ar}^{2+}$ ...) ou moléculaires (gaz carbonique :  $\text{CO}_2$ , azote :  $\text{N}_2$ , monoxyde de carbone : CO, excimères\* : ArF, KrF, XeCl...), les colorants en solution, etc. Les lasers peuvent avoir des formes et des dimensions très variées comme les diodes ou les semi-conducteurs, intégrés aux circuits optiques miniaturisés, ou les grands lasers de puissance qui peuvent remplir une salle entière, voire un bâtiment. Pour de plus amples détails sur les différents types de laser et leur fonctionnement, le lecteur pourra se reporter aux ouvrages de A. Orszag et G. Hepner (1980) ou de F. Hartmann (1991).



**Fig. 2** – Principe du laser. Les photons cohérents sont contraints de traverser de nombreuses fois la substance émissive. La lumière est amplifiée par les passages successifs, et un flux de photons, formant le faisceau laser, jaillit à travers l'un des miroirs, légèrement moins réfléchissant.

**Tableau I** – Caractéristiques de quelques lasers. Les performances énergétiques et les applications mentionnées sont susceptibles d'évoluer en fonction de l'évolution technologique des sources laser.

<i>Milieu actif</i>	<i>Longueur d'onde (nm)</i>	<i>Durée émission (s)</i>	<i>Énergie, puissance</i>	<i>Mécanisme interaction</i>	<i>Applications</i>
Lasers à solide					
Grenat d'aluminium et d'yttrium dopé au néodyme (Nd :YAG)	1 064	de $5 \cdot 10^{-11}$ à $2 \cdot 10^{-3}$ continu	de 10 mJ à 100 J 400 W	disruptif, ablatif, thermique	micro-usinage, chirurgie, labo recherche, soudage, perçage
Matrice cristalline en saphir dopée d'ions $Ti^{3+}$ ( $Ti^{3+}:AlO_3$ )	de 660 à 1 050	de $10^{-11}$ à $10^{-14}$ continu	0,1 $\mu J$ 2 W	disruptif, ablatif, thermique	ophtalmologie, métrologie, spectroscopie temporelle
Semi-conducteurs (GaAs, InAs, etc.)	de 400 à 30 000	de $10^{-8}$ à $10^{-6}$ continu	de 1 à 50 $\mu J$ de 0,1 à 2 W	thermique	télécommunications, pompage, CD-DVD
<i>Lasers à gaz</i>					
Dioxyde de carbone ( $CO_2$ )	10 600	de $10^{-7}$ à $10^{-3}$ continu	100 mJ de 10 W à 20 kW	ablatif, thermique	découpe, soudage, traitement thermique, chirurgie
Helium-Néon (HeNe)	633	continu	de 0,5 à 150 mW	photochimique, thermique	alignement, guidage, télémétrie
Argon ( $Ar^{2+}$ )	Multi raies 488, 514	$6 \cdot 10^{-11}$ continu	0,01 $\mu J$ de 10 mW à 10 W	disruptif, thermique, photochimique	spectroscopie, dermatologie, ophtalmologie, spectacle
Excimères* (ex. : ArF)	193	$5 \cdot 10^{-9}$	de 10 mJ à 1 J	photoablatif	lithographie, chirurgie réfractive
<i>Lasers à liquide</i>					
Colorant (coumarines, pyridines, rhodamines, etc.)	de 350 à 1 000	de $10^{-8}$ à $10^{-3}$ continu	de 0,1 $\mu J$ à 10 J de 5 à 10 W	disruptif, thermique, photochimique	spectroscopie, photochimiothérapie

## Sources artificielles

Il n'existe pas de source naturelle de rayonnement laser. En revanche, une centaine de sources laser artificielles sont recensées entre 180 et  $10^6$  nm. Quelques lasers, parmi les plus répandus, sont décrits dans le tableau I en fonction du milieu actif, de la longueur d'onde et du mode d'émission, de l'énergie ou de la puissance délivrée, du mécanisme d'interaction et de leurs applications.

## Interactions avec la matière et propagation

La variété des applications des lasers reflète, bien sûr, leur évolution technologique, mais s'explique également par les caractéristiques exceptionnelles du rayonnement émis : monochromaticité\*, faible divergence, cohérence spatiale et temporelle, très grande énergie ou très grande puissance, possibilité de délivrer le rayonnement de manière continue ou par impulsion ultracourte, possibilité de faire varier la longueur d'onde. Ces divers paramètres confèrent au faisceau laser la possibilité d'induire, dans les matériaux et les tissus biologiques, des effets évidemment comparables à ceux produits par les sources conventionnelles de rayonnement ultraviolet (UV), visible ou infrarouge (UV), mais aussi des mécanismes d'interaction beaucoup plus spécifiques. Des exemples empruntés au génie biomédical permettront de mieux comprendre les effets thermiques, photochimiques, photoablatifs ou disruptifs du rayonnement laser sur les tissus vivants (fig. 3).

### L'effet thermique

Il résulte de l'absorption par les tissus de l'énergie transportée par le faisceau laser et de sa dégradation locale en chaleur. Les paramètres modulant ce mécanisme d'action sont l'énergie apportée par le faisceau, l'absorption tissulaire et la durée de l'irradiation. Cette action constitue de très loin le mécanisme prédominant dans les applications thérapeutiques du laser, en particulier en chirurgie. Les effets obtenus varient de l'hyperthermie à la coagulation, voire à la volatilisation du tissu irradié, en fonction du degré d'échauffement et de la durée de l'exposition. La photocoagulation à l'aide de laser est utilisée en ophtalmologie pour prévenir le décollement de la rétine. De multiples petites brûlures effectuent, à la périphérie du fond d'œil, une véritable soudure par points de la rétine sensorielle à la choroïde\*.



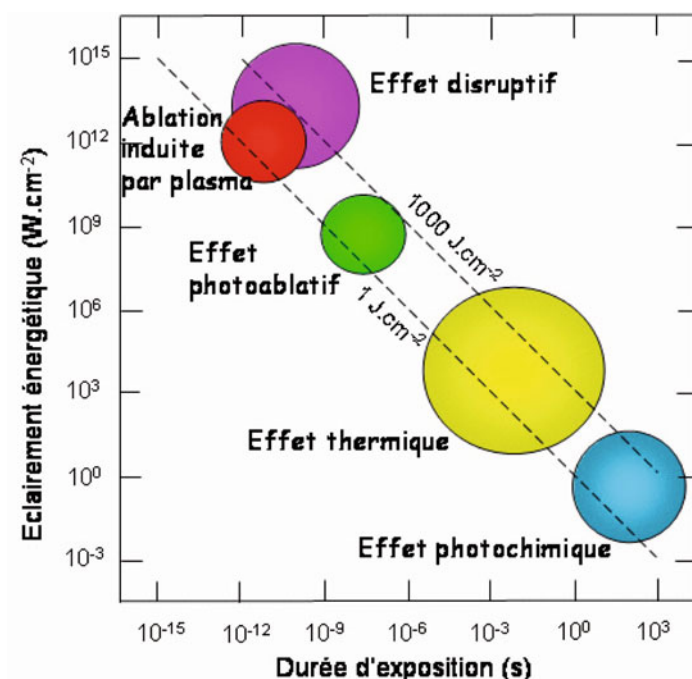


Fig. 3 – Mécanismes d'interaction entre le rayonnement laser et les tissus vivants en fonction de la durée de l'exposition et de la densité de puissance du faisceau.

## L'effet photochimique

À la différence de l'effet thermique, l'énergie d'excitation apportée par le rayonnement est absorbée plus sélectivement au niveau cellulaire où, au lieu de se dissiper en chaleur, elle va provoquer des réactions chimiques *in situ*. Ainsi, le rayonnement laser peut induire la production de composés toxiques, voire létaux\*, mais aussi l'activation ou l'inhibition d'un métabolisme particulier. Ce mode d'action photochimique est caractéristique du domaine UV et du spectre visible. En médecine, la photochimiothérapie utilise un effet photochimique provoqué artificiellement : un agent photosensibilisateur, peu ou non toxique à l'obscurité, induit des processus photochimiques létaux sous irradiation lumineuse dans les tissus où il est concentré. Il est ainsi possible de traiter par laser des cellules cancéreuses qui concentrent certains photosensibilisateurs comme l'hématoporphyrine. Ce colorant possède une bande d'absorption dans le rouge à 630 nm. À cette longueur d'onde, la lumière pénètre de plus de 1 cm de profondeur dans les tissus et entraîne une nécrose des tissus cancéreux qui ont fixé le colorant, laissant indemnes les

tissus sains. La destruction des tissus pathologiques est la conséquence d'une réaction photochimique produisant, au niveau intracellulaire, un oxygène singulet hautement toxique. La photochimiothérapie n'est pas limitée à la cancérologie.

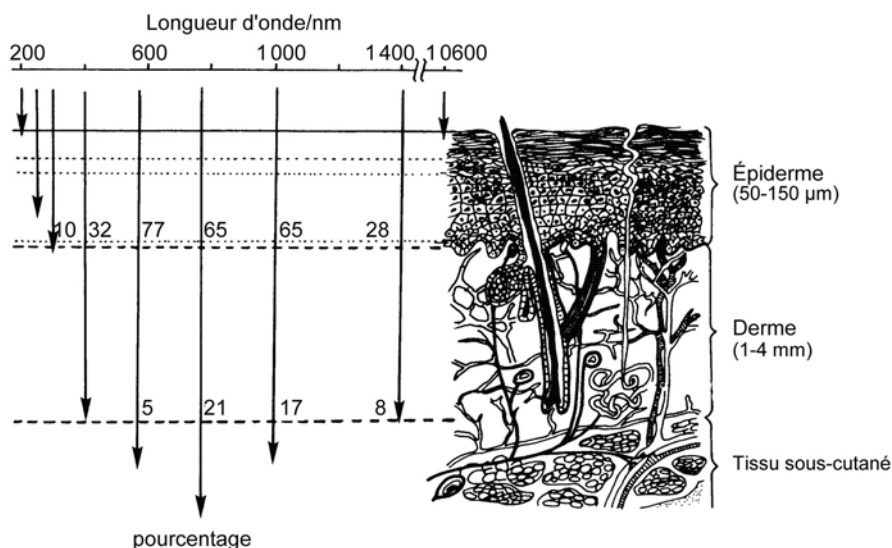
## L'effet photoablatif

Des impulsions d'énergie brèves et intenses, émises dans l'UV, sont susceptibles de provoquer une désorption\* ou « photodécomposition ablativ » de la surface d'un tissu absorbant. La haute énergie des photons UV provoque directement la rupture d'un certain nombre de liaisons moléculaires, et l'éjection des fragments s'effectue sans diffusion thermique aux tissus adjacents à l'ablation. L'application la plus spectaculaire de cet effet est l'utilisation du laser à excimères\* à 193 nm pour modifier le rayon de courbure de la cornée\* dans la chirurgie de la myopie.

## L'effet disruptif

L'effet, décrit sous ce terme, est obtenu lorsque l'on concentre, sur de très petites surfaces de matière, le flux intense que produisent certains lasers en de très brèves impulsions ( $< 10^{-9}$  s). Dans ce cas, un atome de la substance irradiée peut absorber à la fois plusieurs photons du rayonnement laser et perdre un ou plusieurs de ses électrons qui, par un processus multiplicatif, engendrent un gaz ionisé ou plasma. L'onde de choc qui accompagne la détente du plasma devient le moteur de l'effet mécanique constaté, lequel peut être assimilé à une microexplosion. Cet effet disruptif, caractérisé par une absence presque totale d'effet thermique, est utilisé actuellement en ophtalmologie pour effectuer une chirurgie non invasive du globe oculaire comme les ouvertures de membranes, la section de brides vitréennes ou le traitement de certains glaucomes. La très forte absorption du plasma induit peut également engendrer un phénomène d'ablation.

La plupart des mécanismes d'échange énergétique dépendent de l'absorption du rayonnement laser. L'étude du spectre d'absorption des tissus montre que l'énergie absorbée varie considérablement en fonction de la longueur d'onde. L'absorption est déterminée pour une part par l'eau tissulaire, sensible au rayonnement IR, mais aussi par la présence de chromophores\* endogènes aux spectres d'absorption plus spécifiques comme l'hémoglobine, les caroténoïdes, les acides nucléiques, la mélanine\*, etc. Par exemple, les grains de mélanine présentent une absorption de 80 % pour la raie à 514 nm du laser à argon, mais de 23 % seulement pour celle à 1064 nm du laser à néodyme. Cette différence d'absorption détermine une pénétration variable du rayonnement laser dans les tissus suivant la longueur d'onde utilisée (fig. 4).



**Fig. 4** – Pénétration des différentes longueurs d'onde dans la peau (adapté d'Ippen in *The biologic effect of Ultraviolet radiation* F. Urbach ed, Pergamon Press New York, 1969).

## Mesures et dosimétrie

Les appareils utilisés pour la dosimétrie des faisceaux laser sont des détecteurs de rayonnement qui transforment un signal optique incident, en fonction de paramètres d'espace et de temps, en un signal électrique qui peut prendre la forme d'une tension, d'un courant ou d'une puissance.

Les détecteurs thermiques comme les bolomètres, les calorimètres, les thermopiles ou les détecteurs pyroélectriques restituent un signal électrique proportionnel à la variation de température induite par l'absorption du rayonnement. Ils présentent l'avantage d'avoir une réponse à peu près uniforme de 200 nm à  $10^5$  nm, soit de l'UV à l'IR lointain. En revanche, ce sont des détecteurs lents, sensibles à la variation de température ambiante, peu appropriés à la mesure des impulsions courtes. Les détecteurs pyroélectriques sont toutefois capables de mesurer des impulsions de l'ordre de la nanoseconde ( $10^{-9}$  s), mais sans dépasser la fréquence de 1 kHz. Ils sont sensibles aux perturbations acoustiques.

Les détecteurs quantiques restituent un signal correspondant à la mesure de l'excitation directe de leurs particules par les photons incidents. Ils sont relativement onéreux, mais ne sont pas influencés par la température ambiante et sont plus sensibles que les

détecteurs thermiques dans la gamme de 200 nm à 1 500 nm. Les détecteurs au silicium sont largement utilisés entre 450 et 950 nm tandis que ceux au germanium le sont dans le proche IR jusqu'à 1 500 nm, voire 1 900 nm. Ces derniers sont plus appropriés à la mesure des impulsions courtes délivrées avec une grande fréquence.

## Effets biologiques

Les effets décrits ne doivent pas être considérés comme de simples mécanismes isolés. L'importance relative de ces effets dépend de plusieurs paramètres : longueur d'onde, durée de l'exposition, énergie délivrée et, bien entendu, nature du tissu exposé. Les effets photoablatifs et disruptifs s'observent avec des impulsions inférieures à 1  $\mu$ s, les premiers ne sont obtenus que dans l'ultraviolet, les seconds avec des rayonnements variant de l'UV au proche IR. Les effets thermiques sont caractéristiques du rayonnement IR, mais aussi du spectre visible dans la gamme des expositions de 1  $\mu$ s à 10 s. Les effets photochimiques sont prédominants aux longueurs d'onde inférieures à 400 nm ainsi que de 400 à 650 nm pour des durées d'exposition supérieures à 10 s. Ces exemples sont schématiques, car il n'existe pas de frontières précises entre ces phénomènes. À des degrés divers, plusieurs effets différents peuvent être simultanément présents.

Les dangers présentés par l'utilisation des lasers, et plus particulièrement ceux dus au faisceau, sont liés aux atteintes oculaires et cutanées. La peau est moins sensible que l'œil, car il y a absence de système d'autofocalisation qui augmente considérablement la densité d'énergie ou de puissance délivrée par le faisceau laser au niveau de la rétine. Le risque cutané est également considéré comme moins important, car la surface lésée est en général petite par rapport à l'ensemble du revêtement tégumentaire. Les atteintes de la peau produites par de courtes expositions aux rayonnements IR lointains et UV lointains n'intéressent que la couche cornée de l'épiderme tandis que les rayonnements du visible et du proche IR sont susceptibles d'atteindre le derme et les tissus musculaires (fig. 5). Il existe de nombreux lasers émettant dans le visible et l'IR capables de produire, en moins d'une seconde, une brûlure de la peau variant de l'érythème\* à la carbonisation ou à la volatilisation des couches superficielles. Des lésions aux organes sous-jacents peuvent être induites par des éclaircissements énergétiques extrêmement puissants. Les faisceaux émis dans l'UV peuvent induire un érythème comparable à un « coup de soleil », une sénescence précoce de la peau et favoriser l'apparition de cancers cutanés.

L'œil est l'organe de la vision, le récepteur privilégié des rayonnements optiques visibles. Il est donc normal qu'il soit l'organe cible des rayonnements laser et le plus sensible à leur effet (fig. 5). Les seuils les plus faibles concernent les rayonnements de longueur d'onde comprise entre 400 et 1 400 nm, susceptibles de traverser les milieux

oculaires et d'être focalisés sur la rétine. Ainsi, l'éclairement énergétique de la rétine peut être 500 000 fois supérieur à celui mesuré au niveau de la cornée. Une lésion rétinienne peut être produite par une impulsion de quelques microjoules ou par le faisceau d'un petit laser HeNe à émission continue, de quelques milliwatts seulement, qui est sans danger pour la peau (fig. 6).

Les propriétés optiques des milieux oculaires vont conditionner de manière importante le risque d'atteinte par le faisceau laser. L'épithélium\* pigmentaire de la rétine et la choroïde absorbent fortement les longueurs d'onde dans le spectre visible et l'IR proche (fig. 7). Les seuils de brûlure rétinienne sont en général beaucoup plus bas pour les émissions de faible longueur d'onde : il existe au moins un facteur 10 entre l'énergie nécessaire pour provoquer une lésion avec un laser à argon (488 nm) et avec un laser au néodyme (1064 nm). La brûlure de l'épithélium pigmentaire, qui résulte de l'absorption du rayonnement, endommage les photorécepteurs situés au voisinage immédiat et peut, selon l'importance de l'exposition, s'étendre aux autres couches de la rétine. À l'examen du fond d'œil, la gravité de la lésion varie de la dépigmentation à peine perceptible à l'hémorragie envahissant le vitré. L'épithélium pigmentaire peut se reformer par division des cellules demeurées intactes alors que les cellules nerveuses ne se renouvellent pas. Les cônes\* et les bâtonnets\* dont les corps cellulaires sont lésés dégénèrent et meurent. À cet endroit, la fonction visuelle est définitivement perdue. Cela montre l'importance de la localisation de l'image. L'acuité visuelle et la vision des couleurs étant l'apanage de la fovéa, petite zone de 0,3 mm de diamètre, on conçoit que sa destruction, même partielle, soit particulièrement invalidante.

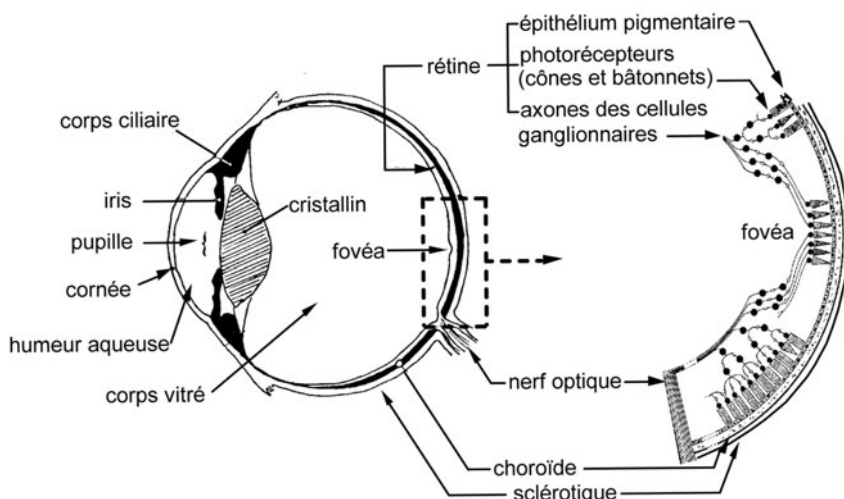
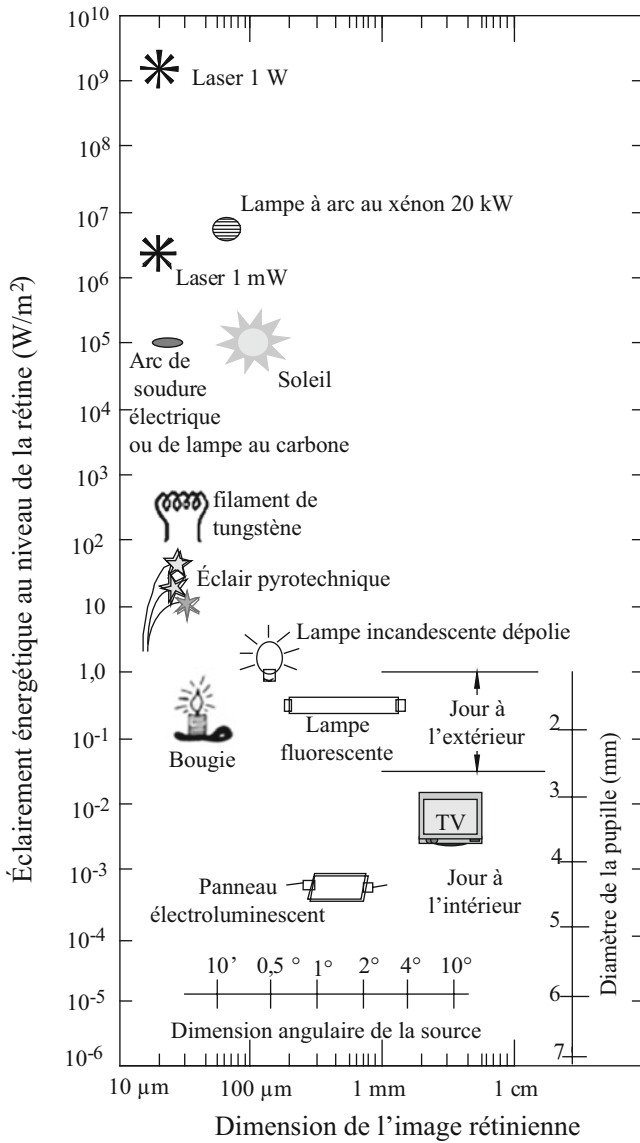
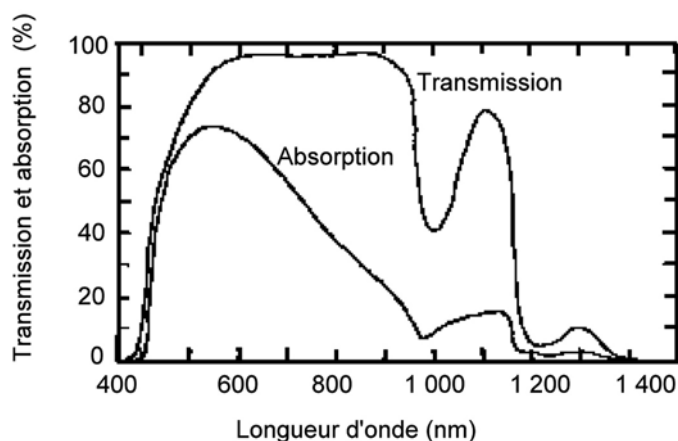


Fig. 5 – Structure oculaire et détails de la rétine.



**Fig. 6** – Éclairement énergétique produit au niveau de la rétine par différentes sources lumineuses (d'après Sliney et Wolbarsht, Safety with Lasers and other Optical Sources, Plenum Press New York and London, 1980).



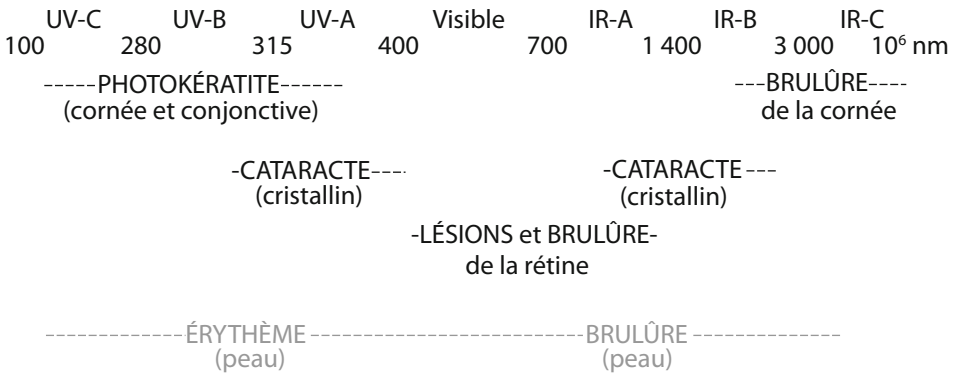
**Fig. 7** – Transmission des milieux oculaires et absorption au niveau de l'épithélium pigmentaire rétinien et de la choroïde, en fonction de la longueur d'onde, donc de l'énergie délivrée au niveau de la cornée (d'après Geeraets et Berry, *Am J Ophthalmol*, 66, 15-20, 1968).

## Valeurs limites d'exposition

Les valeurs limites d'exposition aux rayonnements laser dans la gamme de 180 nm à  $10^6$  nm sont celles recommandées par la directive européenne 2006/25/CE du 5 avril 2006 relative à l'exposition des travailleurs aux rayonnements optiques artificiels. La majeure partie des seuils de lésion a été déterminée chez le porc, le lapin ou le primate et parfois chez des sujets volontaires. Au niveau cutané, le critère d'atteinte retenu est l'apparition d'un érythème dans un intervalle d'environ 48 h suivant l'exposition. Au niveau oculaire, les critères sont presque toujours les lésions décelables 24 h après l'exposition par un examen ophtalmoscopique conventionnel, à l'exception de la cataracte\* d'apparition plus tardive (fig. 8).

Dans l'état actuel de nos connaissances, les valeurs limites d'exposition sont censées représenter le niveau de rayonnement laser auquel les personnes peuvent être exposées sans risque de dommage immédiat ou à long terme. Les limites d'exposition sont exprimées en exposition énergétique  $H$  ( $J/m^2$ ) ou en éclairement énergétique  $E$  ( $W/m^2$ ). Elles sont évaluées au niveau de la peau ou de la cornée en fonction de la longueur d'onde, de la durée de l'exposition et de la fréquence de répétition des impulsions. Dans le spectre visible et le proche IR (de 400 à 1400 nm), l'influence de la dimension de l'image introduit des limites différentes pour les sources ponctuelles et étendues. Le risque cutané est généralement considéré comme identique à celui de la cornée, ce qui implique des limites

d'exposition pour la peau semblables à celles de l'œil pour les rayonnements UV et IR lointain. Dans le spectre visible et le proche IR, le risque cutané, évidemment inférieur au risque oculaire, est considéré comme identique d'une extrémité à l'autre du spectre, alors que le risque oculaire varie en fonction de la longueur d'onde. Les limites d'exposition les plus faibles correspondent au risque rétinien, défini pour la plage spectrale de 400 à 1400 nm.



**Fig. 8** – Critères de lésion oculaire et cutanée servant à la détermination des limites d'exposition au faisceau laser en fonction de la longueur d'onde en nanomètres (nature des lésions et structures anatomiques concernées).

## Précautions, protection

La norme française NF-EN 60 825-1 comprend des prescriptions de fabrication, des règles d'utilisation et une classification des appareils à laser. En effet, les fabricants de lasers sont tenus de classer leurs appareils destinés à la vente en fonction du risque présenté par le faisceau en utilisation normale. La classification est assurée par le fabricant qui en est responsable. La classe doit être indiquée dans le guide d'utilisation et sur l'appareil lui-même grâce à un étiquetage réglementé.

Le rayonnement sortant effectivement de l'appareil est comparé à des limites d'émission accessibles (LEA), fondées sur les limites d'exposition, qui délimitent les classes. Les LEA sont exprimées en énergie rayonnée totale émise (J) ou en puissance totale rayonnée (W). L'intérêt de ces classes est pour l'utilisateur de préciser immédiatement, au seul vu de la classe, les dangers d'un système laser sans avoir à recourir à des mesures radiométriques et à des comparaisons avec les valeurs limites d'exposition. Le fabricant



d'appareils à laser est tenu selon la classification d'incorporer certains dispositifs de sécurité et de respecter un certain nombre de spécifications techniques. Depuis le 2 mai 2007, tous les appareils à laser doivent être en conformité avec la norme NF-EN 60 825-1/A2. Les appareils à laser sont groupés en sept classes ou sous-classes par niveau de risque croissant : classe 1, classe 1M, classe 2, classe 2M, classe 3R, classe 3B et classe 4.

**La classe 1** comprend des lasers de très faible risque, intrinsèquement sans danger en raison de leur conception technique ou de leur mode d'utilisation.

- *Classe 1* : ces lasers, dans la gamme de 180 à 10<sup>6</sup> nm, ne présentent aucun danger dans les conditions d'utilisation raisonnablement prévisibles même lorsque la vision du faisceau s'effectue à l'aide d'optiques (loupe, télescope ou jumelles). Les LEA ne peuvent en aucun cas dépasser les limites d'exposition les plus restrictives.
- *Classe 1M* : ces lasers émettent dans la gamme de longueurs d'onde de 302,5 nm à 4 000 nm et ne présentent pas de danger dans les conditions d'utilisation raisonnablement prévisibles, mais la vision du faisceau à l'aide d'optiques peut se révéler dangereuse.

**La classe 2** comprend des dispositifs à faible puissance émettant un rayonnement visible (de 400 à 700 nm). Ils ne sont pas intrinsèquement sans danger.

- *Classe 2* : la protection de l'œil est normalement assurée par les réflexes de défense comprenant le réflexe palpébral\*. Cette réaction est censée fournir une protection appropriée dans les conditions d'utilisation raisonnablement prévisibles, même dans le cas de vision du faisceau à l'aide d'instruments d'optique. Toutefois, il est important de signaler que la vision trop prolongée de tels faisceaux peut dépasser la limite d'exposition. Il est donc dangereux de garder intentionnellement l'œil dans l'axe du faisceau. La puissance ou l'énergie émise par ces systèmes est limitée aux LEA de la classe 1 pour des durées d'exposition allant jusqu'à 0,25 s. Pour un laser continu, la LEA est de 1 mW.

Les pointeurs à lasers, utilisés à des fins de démonstration et autres applications similaires, doivent satisfaire à l'arrêté du 23 avril 1999 qui limite leur puissance à celle de la classe 2. L'utilisation normale des lasers de classe 2 ne présente pas de risque de lésion oculaire permanente. Toutefois, la vision directe du faisceau, à un niveau inférieur à la limite d'exposition, peut entraîner un éblouissement ou un trouble passager qui ne sera pas sans conséquence sur la conduite d'un véhicule ou d'une machine. Il semble raisonnable que les appareils à laser de classe 2 ne soient pas utilisés comme jouets par les enfants.

- *Classe 2M* : la protection de l'œil est normalement assurée par les réflexes de défense comprenant le réflexe palpébral. Comme pour la classe 2, il peut être dangereux de garder intentionnellement l'œil dans l'axe du faisceau. De plus, la vision du faisceau avec des optiques (loupe, télescope ou jumelles) peut se révéler dangereuse. La LEA est identique à celle de la classe 2.

**La classe 3** comprend des lasers de puissance moyenne pour lesquels le risque incendie est négligeable et pour lesquels l'exposition momentanée de la peau n'entraîne pas de dommage. Elle est divisée en deux sous-classes :

- *classe 3R*. Ces lasers émettent dans le domaine de longueur d'onde de 302,5 nm à  $10^6$  nm. La vision directe du faisceau n'est dangereuse que si elle est supérieure à 0,25 s ou si elle se fait à travers des instruments d'optique. La LEA est de 5 mW en continu ou de cinq fois la LEA de classe 2 pour les lasers impulsionsnels dans le spectre visible. Pour les autres régions spectrales, le rayonnement ne doit pas dépasser cinq fois les LEA de la classe 1 ;
- *classe 3 B*. La vision directe dans le faisceau de ces lasers émettant entre 180 et  $10^6$  nm est toujours dangereuse. Les lasers continus ne peuvent dépasser 0,5 W et l'exposition énergétique provenant des lasers impulsionsnels doit être inférieure à  $10^5$  J/m<sup>2</sup>.

**La classe 4** concerne les lasers émettant entre 180 et  $10^6$  nm, de puissance suffisante pour créer des dommages cutanés et oculaires en vision directe ou diffuse, et pouvant aussi constituer un danger d'incendie. Ce sont des lasers toujours dangereux dont l'utilisation exige de très grandes précautions.

**Note concernant les lasers des classes 1M, 2M et 3R :** des précautions sont surtout requises pour empêcher la vision directe et continue du faisceau. Une vision momentanée (0,25 s) du rayonnement, dans la gamme de 400 à 700 nm, comme cela peut se produire de manière accidentelle, n'est pas considérée comme dangereuse. Cependant, le faisceau laser ne doit pas être intentionnellement pointé sur les personnes. L'utilisation d'aides optiques à la vision (comme des jumelles) avec des lasers de classe 1M, 2M et 3R augmente le risque oculaire. Des précautions supplémentaires doivent être prises.

## Conclusion

Il n'existe que des sources artificielles de rayonnement laser dans l'UV, le visible et l'IR, de 180 nm à  $10^6$  nm. Ces rayonnements monochromatiques, faiblement divergents sont susceptibles de délivrer des densités d'énergie ou de puissance à de grandes distances, de manière continue ou par impulsions ultracourtes. Ces paramètres du faisceau laser induisent des actions très variées sur les matériaux, mais aussi sur les tissus biologiques qui ne sont pas sans risque. Les dangers présentés par l'utilisation du rayonnement laser sont liés aux atteintes oculaires et cutanées. La peau est moins sensible que l'œil, car il y a absence de système d'autofocalisation qui augmente considérablement la densité d'énergie ou de puissance délivrée sur la rétine par le faisceau laser aux longueurs d'onde comprises entre 400 nm et 1400 nm. Les dangers dus au faisceau ont imposé la définition de valeurs limites d'exposition qui, dans l'état actuel de nos connaissances, sont censées

nous protéger contre les dommages immédiats ou à long terme. La classification déterminée par le fabricant permet à l'utilisateur de préciser immédiatement, au seul vu de la classe, les dangers d'un système laser sans avoir à recourir à des mesures radiométriques et à des comparaisons avec les valeurs limites d'exposition.

## Pour en savoir plus

- Orszag A, Hepner G (1980) Les lasers et leurs applications. Masson, Paris.
- Hartmann F (1991) Les lasers. « Que sais-je ? » 5<sup>e</sup> éd., Presse Universitaire de France, Paris.
- Farcy R (1993) *Applications des lasers. Principes optiques*. Masson, Paris.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (1999) Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1000 µm, and: Revision of the laser guidelines. In : Matthes R, Bernhardt JH, McKinlay AF (éd.) *Guidelines on limiting exposure to non-ionizing radiation*. D-85764 Oberschleißheim : ICNIRP 7, 227-78.
- Matthes R, Sliney D (éd.) *Measurements of Optical Radiation Hazards*. CIE × 016-1998. D-85764 Oberschleißheim : ICNIRP 6/98, p. 762.
- *Directive 2006/25/CE du Parlement européen et du Conseil du 5 avril 2006 relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels)*, JOUE du 27 avril 2006.
- Norme française NF-EN 60 825-1 (2006). Sécurité du rayonnement des appareils à laser, classification des matériels, prescriptions et guide de l'utilisateur. UTE-AFNOR, 1994 et amendement A2 2006.
- Décret n° 2007-665 du 2 mai 2007 relatif à la sécurité des appareils à laser sortant. JORF du 4 mai 2007.
- <http://icb.u-bourgogne.fr/universitysurf/ressources-laser>
- <http://www.microscopyu.com/articles/fluorescence/lasersafety.html>

# Présentation des auteurs

**André AURENGO** est polytechnicien, docteur en médecine et docteur ès sciences physiques, ancien interne des hôpitaux de Paris. Sa thèse de sciences portait sur l'obtention de spectres Raman de couches monomoléculaires grâce à des ondes électromagnétiques évanescentes. Il est professeur de biophysique à la faculté de médecine Pierre-et-Marie-Curie et dirige le service de médecine nucléaire du groupe hospitalier Pitié-Salpêtrière. Il a présidé la SFRP de 2005 à 2007 et la section de radioprotection du Conseil supérieur d'hygiène publique de France de 2002 à 2007. Il a été administrateur d'EDF de 1999 à 2009. Il est membre de l'Académie de médecine depuis 2005 et du Haut Conseil de la santé publique depuis 2008. Il est coauteur d'un rapport sur les effets des champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence à la demande de la direction générale de la Santé (2004) et d'un rapport sur les causes du cancer en France rédigé avec le Centre international de recherche sur le cancer (OMS), les Académies de médecine et des sciences et la Fédération nationale des centres de lutte contre le cancer (2007).

**Jean-Pierre CESARINI** est médecin anatomo-pathologiste. Il a été assistant hospitalo-universitaire dans le cadre du centre anti-cancéreux de Marseille. Il a été professeur de pathologie à Temple University et attaché scientifique du Wistar Institute à Philadelphie (Pennsylvanie, USA), puis a intégré l'INSERM en 1972. Directeur du Laboratoire de recherche sur les tumeurs de la peau humaine à Paris et attaché de consultation dans le département de Dermatologie à la Fondation ophtalmologique Adolphe-de-Rothschild, il a été membre de la Commission 6 de la CIE et de l'ICNIRP pendant 12 ans. Il a créé l'association « Sécurité solaire » en 1994, aujourd'hui centre collaborateur de l'OMS pour l'enseignement et la diffusion des risques liés au rayonnement UV. Il est expert auprès de la commission « Agents physiques » de l'Anses et participe à de nombreuses commissions internationales et européennes concernant notamment la mesure des rayonnements optiques (CEN/CENELEC TC169 WG8) et la sécurisation des pratiques du bronzage par les sources artificielles (IEC MT16, CEN TC61). Dans le cadre de la formation professionnelle, il assure des cours spécialisés auprès de l'INSTN et du CNAM.

**Daniel COURANT** est docteur en neurosciences. En tant que chercheur, il a étudié les effets des rayonnements laser sur la fonction visuelle au CRSSA puis comme chef de projet à la Direction des sciences du vivant du Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Ses résultats expérimentaux, obtenus au niveau de la rétine, ont contribué aux modifications en 1994 des limites d'exposition au rayonnement laser, proposées par les différentes normes internationales, pour la vision des sources étendues. Il a contribué à une meilleure connaissance des effets cellulaires et moléculaires induits sur la cornée par les rayonnements laser ultraviolet et infrarouge. Daniel Courant, expert senior CEA, a participé jusqu'en décembre 2008 à plusieurs groupes de travail chargés de la révision des normes de protection contre le rayonnement laser comme la publication 60825-1 de la Commission électrotechnique internationale (IEC/TC 76). Il a participé à de nombreux enseignements universitaires sur les effets biologiques des rayonnements laser et l'utilisation des normes de protection. Il fait partie du comité d'experts spécialisés sur les Agents physiques de l'Anses.

**Louis COURT**, ancien élève de l'École du service de santé des armées et de l'INSTN, est Médecin Général Inspecteur, médecin de l'armée de l'air et maître de recherches du Service de santé des armées, ancien directeur du CRSSA à Grenoble. Chef de laboratoire au CEA dans le groupe du Service de santé des armées, Département de protection sanitaire, puis Direction des sciences du vivant, il s'est consacré à l'étude des effets des rayonnements ionisants et non ionisants sur le système nerveux central. À ce titre il fut chargé de l'analyse des effets luminothermiques des armes modernes, nucléaires, laser et conventionnelles, de la recherche et de la mise au point des moyens de protection, et plus généralement des effets des armes nouvelles à rayonnement dirigé. Il a créé en collaboration avec l'ETCA (Fontenay aux Roses, 94) un laboratoire d'études des effets biologiques des lasers, en particulier de leurs effets oculaires. Il a ensuite créé un laboratoire consacré à l'analyse des effets physiopathologiques et de la radiorésistance des virus non conventionnels (prions). Expert laser à l'OTAN, il a été membre de l'ICNIRP. Il a dirigé le Service de radioprotection d'EDF-GDF et a créé avec L. Stricker et J. Lambrozo, la section Rayonnements non ionisants de la SFRP en 1993.

**René de SEZE** est médecin, spécialisé en radiologie (IRM). Il est titulaire d'un DEA de physique et d'une thèse de biologie en sciences de la vie. De 1991 à 2001, il a été assistant puis directeur de recherche au Laboratoire de biophysique médicale de la faculté de médecine de Nîmes, où il a conduit des recherches sur les applications thérapeutiques des rayonnements non ionisants, puis sur les effets sur la santé des champs radiofréquences utilisés en téléphonie mobile. Depuis, il continue ce travail de recherche et d'expertise dans le cadre de l'INERIS, où il est maintenant chef de l'unité de Toxicologie expérimentale pour l'étude des risques sanitaires liés aux produits chimiques, aux nanoparticules

et aux champs électromagnétiques. Il a participé à plusieurs programmes de recherches français et européens, (COMOBIO, RAMP2001, ADONIS), ainsi qu'aux programmes de la Fondation santé et radiofréquences et de l'Anses. Il a été président de l'EBEA, président de la section Rayonnements non ionisants de la SFRP, vice-président du COST 281 (programme européen d'action concertée), et membre de plusieurs groupes d'experts sur la téléphonie mobile (DGS, Afsset, OPECST, SCENIHR, Commission de sécurité des consommateurs). Il est membre du Comité consultatif de l'OMS, de la commission Biologie de l'ICNIRP, du comité d'experts spécialisé de l'Anses sur les Agents physiques.

**Jean-Claude DEBOUZY** est médecin en chef, ancien élève de l'école de santé navale de Bordeaux, actuellement chef du département de radiobiologie du CRSSA, Professeur agrégé du Val de Grâce. Il est titulaire d'une thèse de Sciences de Paris-VI portant sur l'application des méthodes de résonance magnétique nucléaire à l'étude de problèmes biologiques. Ses travaux portent sur les interactions drogues-membranes et drogues-ADN, par méthodes spectroscopiques (RMN-RPE), sur la décontamination/chélation des ions lourds en milieu biologique au moyen de cyclodextrines modifiées. Depuis 1995, s'est mise en place la thématique portant sur les effets biologiques des rayonnements non ionisants. À ce titre il est vice-président du comité d'experts spécialisé Agents physiques et membre du groupe d'experts « Radiofréquences » de l'Anses. Il participe aux commissions de l'OTAN portant sur les rayonnements radio-radar (RADHAZ).

**Jacques LAMBROZO** est médecin spécialiste en médecine interne et en endocrinologie, ancien interne des hôpitaux de Paris. Il est titulaire d'un diplôme d'hygiène industrielle et de médecine du travail, d'économie de la santé, de réparation du dommage corporel. D'abord chef de clinique à la faculté de médecine, il occupe actuellement le poste de directeur du Service des études médicales d'EDF depuis 1989. À ce titre il est en charge des questions concernant l'environnement et la santé pour le groupe EDF. Il a présidé la section Rayonnements non ionisants de la SFRP de 1995 à 1999. Par ailleurs, il est membre de la BEMS, de l'EBEA, et de la Société nationale française de médecine interne. Il est aussi expert auprès de la Cour d'appel de Paris et assure un enseignement universitaire de 3<sup>e</sup> cycle à INSTN (université de Grenoble) ainsi qu'au diplôme inter-universitaire de santé et environnement (Paris 5- Paris 6- Paris 7)

**Lluis M. MIR** est ancien élève de l'École normale supérieure de Paris (Ulm), docteur en sciences biologiques et directeur de recherches au CNRS. Il dirige actuellement le laboratoire de Vectorologie et thérapeutiques anticancéreuses (UMR 823 du CNRS et de l'université Paris-sud) à l'Institut de cancérologie Gustave-Roussy de Villejuif. Il est également professeur adjoint de l'université de Ljubljana, en Slovénie, depuis 2003, et sénateur honoraire de cette université où il assure la co-direction d'un cours sur

l'électroperméabilisation des cellules et ses applications médicales et technologiques. Il a eu diverses activités éditoriales scientifiques (éditeur associé de Bioelectrochemistry, éditeur invité de plusieurs journaux). Il a commencé à travailler sur l'électroporation (électroperméabilisation) des cellules en 1985 et il est l'un des spécialistes mondiaux de l'application en biologie et médecine de cette technologie. Il a conçu et développé l'électrochimiothérapie antitumorale.

**Anne PERRIN** est docteur en biologie moléculaire et cellulaire, diplômée en philosophie (master culture et santé), chercheur en biophysique. Après avoir mené des recherches fondamentales sur les régulations cellulaires endocrines, entre autre par RMN, à l'INSERM (U244, CEA-Grenoble), elle a intégré le département de radiobiologie, à l'Institut de recherches biomédicales des armées (IRBA)-antenne CRSSA à Grenoble en 1994. Coordinatrice du groupe de travail « RMN et cultures cellulaires » et membre du comité directeur de l'Institut fédératif de recherches « RMN biomédicale : de la cellule à l'homme » durant 10 ans, elle a promu le développement de recherches par IRM au CRSSA. L'intérêt s'est porté progressivement sur les effets biologiques des micro-ondes. En 2000, elle devient responsable des projets liés aux rayonnements non ionisants du domaine radio-radar pour la DGA. Elle est actuellement vice-présidente de la section Rayonnements non ionisants de la SFRP et présidente de la commission K « Bioélectromagnétisme et médecine » de l'URSI-France. Elle a participé à la réalisation du rapport d'expertise de l'Afsset sur les radiofréquences en 2009.

**Martine SOUQUES** est médecin de santé publique, ancien interne des hôpitaux de Paris. Elle a obtenu le diplôme du Centre d'enseignement de la statistique appliquée à la médecine (CESAM), option épidémiologie, en 1989. Depuis 1991, elle a en charge le suivi du dossier « Champs électriques et magnétiques 50 Hz et santé » au sein du Service des études médicales d'EDF qui a pour mission d'apprécier les conséquences sanitaires éventuelles de l'activité de l'entreprise sur l'environnement. Dans ce cadre, elle suit la bibliographie sur le sujet depuis près de 20 ans et a focalisé ses recherches sur les interférences entre les champs magnétiques et les implants cardiaques (stimulateurs et défibrillateurs implantés). Elle est présidente de la section Rayonnements non ionisants de la SFRP depuis 2007. Le Docteur Martine Souques a également participé pendant 17 ans aux travaux de recherche des facteurs individuels de risque de cancer au sein du Service de prévention et dépistage des tumeurs de la Ville de Paris, ainsi qu'au travaux de l'association PETRI (Prévention et épidémiologie des cancers en région Île-de-France), essentiellement sur l'incidence des mélanomes et la survie des malades atteints de cancer dans cette région. Elle assure des conférences auprès de multiples organismes dont l'EHESP.

**Bernard VEYRET** est ingénieur physicien diplômé de l'ESPCI (Paris). Il a travaillé comme chercheur en photochimie à Boston aux USA. En 1979, il est entré au CNRS à Bordeaux au sein du laboratoire de photochimie dans l'équipe de chimie troposphérique. À la suite d'un stage postdoctoral au département de chimie de l'université de Cambridge en Angleterre, il a développé son activité de recherche au laboratoire de Physique des interactions ondes-matière (PIOM) à Bordeaux, dans l'équipe de bioélectromagnétisme, qu'il anime depuis 1985. Cette équipe fait maintenant partie du laboratoire de l'Intégration au système (IMS) du CNRS. Il est actuellement directeur de recherche au CNRS et directeur d'études cumulant de l'École pratique des hautes études. Lors d'une année sabbatique à Rome en 2005, il a collaboré avec le groupe de bioélectromagnétisme de l'université La Sapienza. Bernard Veyret a coordonné le programme français COMOBIO du RNRT et le programme européen Perform B. Il a participé à la rédaction de nombreux rapports européens et français sur le thème « champs électromagnétiques et santé » (DGS, Afsset, Union européenne, OMS, etc.). Il a été président de la commission K « Bioélectromagnétisme et médecine » de l'URSI de 2002 à 2005. Bernard Veyret est membre de l'ICNIRP depuis 2000.





# 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 à 13,6 eV

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

Joule (J) : unité légale de travail et d'énergie ( $1 \text{ J} = 1 \text{ Kg.m}^2./\text{s}^{-2}$ ). Par exemple 1 J est l'énergie requise pour élever 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 États-Unis l'ancienne unité qui est le Gauss ( $1 \text{ T} = 10\,000 \text{ G}$ ,  $1 \mu\text{T} = 10 \text{ mG}$ ) est encore utilisée

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

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

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

W/m : densité de puissance



# Acronymes

3G, third generation (3G) wireless communications

ADN, acide désoxyribonucléique

Afsset, Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail incluse en juillet 2010 dans l'Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

AMPS, American Mobile Phone Service in the USA

ARM, angiographie par résonance magnétique

ARN, acide ribonucléique

BEMS, Bioelectromagnetic society

BLR, boucle locale radio

BOLD, blood oxygenation level dependent

CD, compact disc

CDMA, Code Devision Multiple Access scheme

CE&M, champ électrique et magnétique (en anglais, ELF)

CIE, Commission internationale de l'éclairage

CIRC (en anglais IARC), Centre international de recherche sur le cancer

CNAM, Conservatoire national des arts et métiers

CNRS, Centre national de la recherche scientifique

CRSSA, Centre de recherche du service de santé des Armées

DAS, débit d'absorption spécifique (SAR)

DECT, digital enhanced cordless telephone (téléphone sans fil numérique amélioré)

DEM, dose érythémale minimale

DGA, Direction générale de l'armement

DGS, Direction générale de la santé

DMLA, dégénérescence maculaire liée à l'âge

DVD, digital versatile disc (disque numérique polyvalent, anciennement digital video disc)

EBC, épithélioma basocellulaire

EBEA, European Bioelectromagnetics Association

ECG, électrocardiogramme  
 EHESP, École des hautes études en santé publique  
 EHS, hypersensibilité électromagnétique (HSE, ou IEI, idiopathic environmental intolerance)  
 ELF, extremely low frequency  
 ERMES, norme de radiomessagerie  
 ESC, épithélioma spinocellulaire  
 ESCPI, École supérieure de physique et de chimie industrielles  
 ESOP, European Standard Operating Procedures of Electrochemotherapy  
 ETCA, Établissement technique central de l'armement  
 FDD, frequency-division duplexing  
 FM, modulation de fréquence  
 GFSK, gaussian frequency shift keying  
 GPRS, general packet radio service  
 GPS, global positioning system  
 GSM, global system for mobile communications  
 GSM-R, radiotéléphonie numérique pour le réseau ferré  
 HPLC, high performance liquid chromatography  
 HSCSD, high-speed circuit switched data  
 ICNIRP, Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants  
 IEC, International Electrotechnical Commission (CEI), Commission internationale électrotechnique  
 IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers  
 ILO, International labor Organization (OIT en français)  
 IMS, Laboratoire de l'Intégration du matériau au système  
 IMT (satellite IMT-2000), sigle choisi par l'Union internationale des télécommunications (UIT) pour désigner les cinq technologies d'accès radio des systèmes cellulaires de la troisième génération qui sont retenues parmi les dix technologies proposées par les différents organismes de standardisation des membres de l'UIT  
 INERIS, Institut national de l'environnement industriel et des risques  
 INSERM, Institut national de la santé et de la recherche médicale  
 INSTN, Institut national des sciences et techniques nucléaires  
 IP, indice de protection  
 IR, infrarouge  
 IRM, imagerie par résonance magnétique  
 IRPA, Association internationale de radioprotection (International Radiation Protection Association)  
 ISM, Industrial, scientific, and medical bands  
 ISO, Organisation internationale de normalisation (International Organization for Standardization)

LEA, limite d'émission accessible  
 LED, diode électroluminescente  
 LFC, lampe fluocompacte  
 LIEN, Laboratoire d'instrumentation électronique de Nancy  
 MMS, multimedia messaging service  
 MSS, mobile satellite service earth station  
 NIEHS, National Institute of Environmental Health Sciences (USA)  
 NIH, National Institute of Health (USA)  
 NMT, Nordic Mobile Telephony, principalement dans les pays du Nord  
 ODC, ornithine décarboxylase  
 OFEN, Office fédéral de l'énergie (Suisse)  
 OFSP, Office fédéral de la santé publique (Suisse)  
 OIT, Organisation internationale du travail  
 OMS, Organisation Mondiale de la Santé (en anglais, WHO : World Health Organization)  
 OPECST, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques  
 OTAN, Organisation du traité de l'Atlantique nord  
 PMR, professional mobile radio ou réseaux radio mobiles professionnels  
 RNRT, Réseau national de recherche en télécommunications  
 RF, radiofréquences  
 RFID, radiofrequency identification  
 RI, rayonnements ionisants  
 RLAN, Radio LAN, c'est-à-dire un réseau local wifi  
 RMN, résonance magnétique nucléaire  
 RNI, rayonnements non ionisants  
 SCENIHR, Scientific committee of environmental newly identified health risks  
 SEA, surveillance électronique d'articles  
 SED, standard erythema dose  
 SFRP, Société française de radioprotection  
 SMS, short message service  
 SPF, sunburn protection factor ou facteur de protection solaire  
 SRM, spectroscopie par résonance magnétique nucléaire  
 TDD, time-division duplexing  
 TDMA, time division multiple access technique  
 TNO, nom flamand du laboratoire à l'origine de l'étude sur la 3G. En français : Laboratoire de physique et d'électronique.  
 TNT, télévision numérique terrestre  
 UHF, ultrahaute fréquence  
 UIT, Union internationale des télécommunications  
 ULB, ultra large bande (en anglais UWB)

UMTS, universal mobile telecommunications system

URSI, Union radio-scientifique internationale

UV, ultraviolet

W-CDMA, wideband coded division multiple access

Wi-Fi, Wireless fidelity, pour désigner une technique où les connexions au sein d'un réseau informatique sont réalisées sans fil. Un réseau sans fil est appelé WLAN, ou wireless local area network

WLAN, wireless local area network

WPAN, wireless personal area networks

# Glossaire

*Actinique* : se dit de rayonnements ayant la propriété (actinisme n. m.) d'exercer une action chimique sur certaines substances. Par extension, qui se rapporte ou est dû à la lumière.

*Activité transcriptionnelle* : transcription de l'ADN en ARN, qui sera à son tour traduit en une chaîne d'acides aminés appelée « protéine ».

*ADN* : longues molécules situées dans le noyau des cellules. Propre à chaque espèce, elles constituent les chromosomes qui contiennent toute l'information génétique (génome).

*Angiographie* : initialement radiographie des vaisseaux après injection d'un liquide opaque aux rayons X.

*Apoptose* : mort cellulaire génétiquement programmée.

*Appareil vestibulaire* : appelé aussi *organe vestibulaire*, partie de l'oreille interne constituée par les canaux semi-circulaires, l'utricule et le saccule, organe de l'équilibre.

*ARN* : copie de l'ADN qui va servir à la fabrication des protéines.

*Bactérie* : organismes unicellulaires dits « procaryotes », dont le matériel génétique n'est pas localisé dans un noyau, contrairement aux cellules animales ou végétales plus complexes, qui en possèdent un, et sont dites « eucaryotes ».

*Barrière hémato-encéphalique (BHE)* : concept fonctionnel inhérent au système vasculaire cérébral permettant un passage contrôlé des molécules du sang vers le cerveau.

*Bâtonnet* : type de cellule de la rétine, sensible à la luminosité, qui permet la vision nocturne.

*Bilirubine* : produit de dégradation de l'hémoglobine dans la rate et le foie, son accumulation anormale se traduit par un ictère (jaunisse).

*Bruit de fond* : dans la mesure d'un signal, le bruit de fond représente des fluctuations observées même en l'absence de tout signal. Il est dû à des imperfections du détecteur et/ou à des signaux parasites. La mesure n'est fiable que si le signal est significativement supérieur au bruit de fond, généralement d'un facteur 2 (c'est-à-dire deux fois le bruit de fond).



*Cataracte* : affection de l'œil aboutissant à l'opacité du cristallin.

*Choroïde* : tissu vasculaire dans le fond du globe oculaire.

*Chromophore* : molécule colorée. Plus précisément, ce terme désigne le groupement d'atomes au sein de cette molécule qui est responsable de sa couleur.

*Compatibilité électromagnétique* : tout équipement électrique ou électronique, y compris les équipements radioélectriques, mis en vente sur le marché européen doit satisfaire aux normes de compatibilité électromagnétique données dans la directive européenne 2004/108/CE transposée en droit français par le décret n° 2006-1278 du 18 octobre 2006. Ces normes reposent sur les deux principes suivants :

- un équipement électrique ou électronique ne doit pas produire des perturbations électromagnétiques à un niveau tel que cela empêcherait le fonctionnement normal des équipements situés à proximité ;

- réciproquement, un équipement doit pouvoir fonctionner normalement en présence du niveau de champ électromagnétique qu'il peut rencontrer dans son environnement. Le cas particulier de la conformité électromagnétique des dispositifs médicaux implantables actifs (stimulateurs cardiaques, défibrillateurs implantables, etc.) est traité spécifiquement par la directive 90/385/CE et les normes EN 45502.

*Cône* : type de cellule de la rétine. Chaque type de cône a une bande passante limitée, dans des longueurs d'onde correspondant à ce qui est perçu comme des couleurs. Ils permettent la vision de jour.

*Conjonctive* : membrane muqueuse transparente qui tapisse l'intérieur des paupières et le globe oculaire jusqu'à la cornée (le blanc de l'œil).

*Cornée* : partie antérieure, transparente, de l'œil.

*Cryptochromes* : protéines contenant des pigments impliqués dans des réactions photo-chimiques d'oxydoréduction (flavoprotéines) qui font intervenir des radicaux libres. Elles contiennent trois molécules d'acide aminé tryptophane impliqué dans cette réaction et sont localisées au niveau de la rétine, notamment dans un des yeux chez certains oiseaux.

*Cytokines* : substances produites par les cellules en réponse à une agression.

*Cytotoxicité* : action toxique au niveau de la cellule.

*Déoxyhémoglobine* : l'hémoglobine des globules rouges est une protéine constituée de quatre sous-unités (deux alpha et deux bêta) similaires qui transporte l'oxygène ; on parle d'oxy- ou de déoxyhémoglobine selon que la molécule soit chargée ou non en oxygène.

*Désorption* : départ d'une molécule, d'un ion ou d'un atome d'une surface solide ou liquide où il était adsorbé.

*Diamagnétiques* : propriété d'une substance dont l'aimantation est colinéaire au champ magnétique inducteur et de sens opposé.

*Différence de potentiel transmembranaire* : tension mesurable due à une différence de concentration des ions sodium et potassium entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule, de part et d'autre de la membrane cellulaire. L'activité métabolique des cellules vivantes provoque et maintient une différence de potentiel de part et d'autre de la membrane en enrichissant l'intérieur de la cellule en ions potassium, alors que les fluides biologiques entourant les cellules sont, eux, riches en ions sodium. L'accumulation de charges de part et d'autre de la membrane induit une différence de potentiel (champ électrique) au niveau de la membrane (on dit « transmembranaire »).

*Double aveugle (étude en)* : étude dans laquelle ni le volontaire, ni l'examineur ne savent si l'exposition est présente ou non. Ce type d'étude permet d'éliminer les effets subjectifs des participants (volontaires et examinateurs).

*Effet capacitif* : lorsqu'on applique une différence de potentiel à deux conducteurs isolés les uns des autres, on assiste à une accumulation de charges par influence électrostatique. C'est l'effet capacitif.

*Électrocardiogramme (ECG)* : enregistrement de l'activité électrique du cœur.

*Électrochimiothérapie* : méthode qui consiste à favoriser le passage des médicaments dans les cellules tumorales par un courant électrique.

*Électroencéphalogramme (EEG)* : enregistrement de l'activité électrique du cerveau, le plus souvent par l'application d'électrodes sur le cuir chevelu intact.

*Électroporation* : perméabilisation des cellules par un fort courant électrique « *in situ* » (100 kV/m), qui crée des pores transitoires dans la membrane.

*Électrorétinogramme* : enregistrement de l'activité électrique de la rétine.

*Électrotransfert de gènes* : méthode physique de transfert de molécules d'ADN ou ARN dans les cellules, *in vitro* ou *in vivo*, qui utilise des impulsions électriques intenses de courte durée. Ces impulsions électriques perméabilisent transitoirement la membrane des cellules, rendant le cytoplasme accessible aux acides nucléiques.

*Épidémiologie* : étude de la distribution et des déterminants des états de santé et des maladies dans les populations humaines ainsi que des influences qui déterminent cette distribution. (Voir aussi *Étude de cohorte* et *Étude cas témoin*.)

*Épithélium* : feuillet de cellules formant le revêtement externe de l'organisme (couche superficielle de la peau) ou le revêtement interne des organes creux (ex. : muqueuse buccale).

*Épithélioma basocellulaire* : type de cancer de la peau, le plus fréquent.

*Épithélioma spinocellulaire* : type de cancer de la peau, de gravité moyenne.

*Érythème actinique* : coup de soleil.

*Érythème* : rougeur, un des signes de l'inflammation s'accompagnant généralement de sensations douloureuses et de chaleur.

*Étude expérimentale* : étude permettant de comparer deux groupes (de cellules, d'animaux) qui ne diffèrent que par le facteur d'exposition. (Voir aussi *Étude in vitro* et *Étude in vivo*.)

*Étude de cohorte* : étude épidémiologique qui compare un groupe de personnes exposées non malades et un groupe de personnes non exposées non malades au facteur de risque étudié, les deux groupes étant suivis dans le temps. L'analyse statistique recherchera si le nombre de cas de maladie qui apparaît au cours du temps est plus ou moins important ou équivalent dans les deux groupes.

*Étude cas témoin* : étude épidémiologique qui compare un groupe de malades et un groupe de personnes indemnes de cette maladie, les témoins. L'analyse statistique recherchera dans le passé des personnes si l'exposition au facteur de risque considéré a été plus ou moins importante ou équivalente dans les deux groupes.

*Étude in vitro* : étude expérimentale sur des cellules ou des tissus.

*Étude in vivo* : étude expérimentale sur des animaux.

*Excimère* : provient de la contraction des mots anglo-saxons « *excited dimers* ». L'interaction entre un atome de gaz rare (Ar, Kr, Xe) dans son état fondamental et un halogène (F, Cl) dans un de ses premiers états excités peut donner naissance à un état moléculaire excité stable. La transition vers un état désexcité s'accompagne d'une émission laser dans l'ultraviolet dont la longueur d'onde est fonction du mélange gazeux.

*Expression génique* : ensemble des processus biochimiques par lesquels l'information héréditaire stockée dans un gène est lue pour aboutir à la fabrication de molécules qui auront un rôle actif dans le fonctionnement cellulaire, comme les protéines ou les ARN.

*Faible(s) dose(s)* : appellation devenue générique pour parler des expositions de niveau faible aussi bien à des agents chimiques que physiques, dont les effets sur la santé sont mal connus ou inconnus.

*Fuseau mitotique* : structure interne à la cellule spécifiquement présente à la division cellulaire permettant la répartition égale de l'ADN (sous forme de chromosomes) dans les deux cellules « filles ».

*Glande pinéale* : ou épiphyse. Glande située au centre du cerveau qui secrète la mélatonine.

*Hématopoïèse* : processus de fabrication des différentes cellules du sang à partir des cellules souches, qui se déroule dans la moelle osseuse.

*Histologique* : L'histologie est la branche de la biologie qui étudie les tissus, à mi-chemin entre la biologie cellulaire et l'anatomie. On parlait autrefois d'« anatomie microscopique ». Elle a pour but d'explorer la composition, la structure, le renouvellement des tissus, ainsi que les échanges cellulaires en leur sein.

*Homéostasie* : capacité que peut avoir un système quelconque (ouvert ou fermé) à conserver son équilibre de fonctionnement en dépit des contraintes qui lui sont extérieures.

*Îlots de Langerhans* : cellules du pancréas, spécialisées dans la fabrication de l'insuline.

*In utero* : dans l'utérus, pendant la grossesse.

*Initiation tumorale* : étape de la cancérogenèse qui permet le passage de la cellule normale à la cellule cancéreuse.

*Intracytosolique* : à l'intérieur de la cellule.

*ISO* : Organisation internationale de normalisation.

*Ionisation* : tout processus par lequel un atome ou une molécule neutre acquiert une charge électrique, positive ou négative.

*Isotrope* : invariance des propriétés physiques d'un milieu en fonction de la direction.

*Lacrymation* : fait de pleurer.

*Létal (létaux)* : qui entraîne la mort.

*Liquide céphalo-rachidien (LCR)* : liquide contenu dans les espaces délimités par les méninges (membranes de protection et de recouvrement du système nerveux central). Son examen est possible grâce à un prélèvement qui se pratique par ponction lombaire.

*Maculaire* : de « macula », partie centrale de la rétine où sont concentrées les cellules sensibles à la lumière.

*Magnétite* : cristaux d'oxyde de fer.

*Magnétophosphène* : perception oculaire réversible, sous forme de points ou d'éclair lumineux, due à des courants induits au niveau de la rétine.

*Magnétoréception* : fonction sensorielle responsable de la perception de champs magnétiques, en particulier du champ magnétique terrestre.

*Mélanines* : biopolymères rouges ou bruns synthétisés essentiellement par les mélanocytes.

*Mélanocyte* : cellule épithéliale de l'épiderme (couche superficielle de la peau) qui synthétise la mélanine (pigment brun foncé), responsable de la pigmentation de la peau, et qui joue un rôle de protection à l'égard des rayons ultraviolets.

*Mélanome* : type de cancer de la peau, le plus grave.

*Mélatonine* : hormone sécrétée par la glande pinéale, régulant les rythmes chronobiologiques.

*Membrane plasmique* ou *cytoplasmique* : membrane qui entoure la cellule.

*Méta-analyse* : regroupement de plusieurs études épidémiologiques ayant pour but d'augmenter le nombre de sujets inclus.

*Modulation* : un signal est transmis en faisant varier un des paramètres physiques de l'onde électromagnétique (ou « porteuse ») qui se propage entre l'émetteur et le récepteur. La modulation est le processus qui consiste à adapter le signal à transmettre à l'onde électromagnétique. Par exemple dans le cas d'une modulation de phase, le signal à transmettre est converti en variation de la phase de l'onde électromagnétique.

*Modulation de phase* : transformation d'un signal périodique qui consiste à faire varier non pas l'amplitude ou la fréquence, mais la phase. La modulation de phase transporte une information qui peut être décodée par un dispositif adéquat.

*Monochromaticité* : caractère d'un rayonnement monochromatique, d'une seule fréquence ou d'une seule couleur.

*Multiplexage fréquentiel* : technique utilisée en radiodiffusion pour ajouter des programmes radio (FM) ou TV (UHF) sur une seule antenne.

*Mutagène* : capable d'entraîner une mutation sur les gènes.

*Nécrose* : forme principale de mort d'une cellule d'un tissu ou d'organe.

*Neurinome de l'acoustique* : tumeur bénigne située sur le nerf auditif et entraînant une surdité.

*Neuropathique* : causé par une atteinte du système nerveux (nerfs, moelle épinière, cerveau).

*Oncostatique* : se dit d'une substance qui freine le développement des tumeurs.

*Ophthalmie* : nom générique de toutes les affections inflammatoires de l'œil.

*Ornithine décarboxylase (ODC)* : enzyme active dans la prolifération cellulaire.

*Palpébral* : de la paupière.

*Paramagnétique* : qui s'aimante comme le fer, mais beaucoup plus faiblement.

*Peroxydation* : formation d'un oxyde contenant plus d'atomes d'oxygène qu'une molécule normale (ex. : peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) = eau oxygénée)

*Phénothiazine* : classe de médicaments comprenant notamment des antipsychotiques et des antihistaminiques.

*Photon* : particule élémentaire (quantum) de la lumière.

*Photosensibilisation* : état anormalement sensible de la peau qui réagit à la lumière solaire par des manifestations allergiques.

*Physiologique* : dans les limites du fonctionnement normal de l'organisme.

*Polymérisation* : réaction chimique ou procédé permettant la synthèse d'une grosse molécule ou polymère à partir de monomères identiques ou non.

*Promotion tumorale* : étape de la cancérogenèse qui permet la multiplication d'une cellule cancéreuse et la croissance de la tumeur.

*Protéines de choc thermique* : ou protéines de stress (HSP en anglais). Elles ont un rôle de protection sur les autres protéines de l'organisme et sont fabriquées lorsque l'organisme est soumis à des agressions telles que la chaleur ou des substances toxiques.

*Pyrimidine* : molécule azotée hétérocyclique dont les dérivés sont des constituants de base de la molécule d'ADN : thymine et cytosine. Les deux molécules complémentaires dans la double hélice d'ADN sont les bases adénine et guanine dérivées de la purine.

*Radiofréquences* : partie du spectre électromagnétique concernant les fréquences des communications sans fil.

*Relation causale* : relation de cause à effet.

*Réticulum endoplasmique* : réseau de tubules et de vésicules situés à l'intérieur de la cellule, ayant des fonctions de sécrétion et de stockage.

*Ribosome* : organite cellulaire intervenant dans la fabrication des protéines.

*Risque relatif* : association statistique entre un facteur de risque (ou un facteur d'exposition) et une maladie. Il ne préjuge pas d'une relation causale.

*Sérique* : dans le sang.

*Spin* : caractéristique d'une particule, au même titre que sa masse et sa charge électrique, qui caractérise la rotation sur elle-même. Cette propriété joue un rôle important dans le comportement de la particule dans un champ magnétique.

*Transfection* : technique consistant à introduire un ADN étranger dans une cellule eucaryote.

*Tryptophane* : acide aminé essentiel à la vie, non fabriqué par l'organisme humain.



# Index

## A

absorption spécifique 10  
ADN 24, 39, 47, 50, 119  
apoptose 36, 47, 48, 76, 120  
ARN 47, 120

## B

bronzage 115, 118, 124, 130

## C

cancer cutané 124  
cancérogène 49  
cataracte 60, 98, 108, 126, 144  
compatibilité électromagnétique 55  
courant induit 20, 60, 62  
croissance cellulaire 47  
cuisson par induction 63

## D

débit d'absorption spécifique (DAS) 10, 13, 58, 59, 62, 73, 74, 76, 77, 78, 82  
décret du 3 mai 2002 91  
défibrillateur cardiaque 27, 61, 81, 91  
dégénérescence maculaire liée à l'âge 109, 126  
densité de courant 13, 48, 54, 60  
densité de flux magnétique 5, 16, 23, 28, 43  
directive européenne 28, 54, 82, 91  
dispositifs implantés actifs 81

dose érythémale minimale (DEM) 121, 123, 126, 129  
dose érythémale normalisée 126

## E

échauffement 33  
éclairage énergétique 7, 96, 97, 98, 100, 106, 107, 109, 110, 112, 114, 127, 142, 144  
éclairage lumineux 106  
effet photochimique 107, 111, 138  
effets électrochimiques 34  
effets thermiques 10  
électrochimie 18  
électrolyse 18  
électrophorèse 33  
électroporation 35  
ELF 9, 11  
épidémiologie 42, 51, 126  
épithélioma 36, 38, 120, 124  
érythème 121, 125, 128, 141, 144  
exposition énergétique 97, 106, 144, 147

## F

FM 71, 73  
foudre 32  
four à micro-ondes 70



## G

grandeurs photométriques 105  
grandeurs radiométriques 97, 105  
grandeurs spectroradiométriques 105  
GSM 73, 77

## H

héliodermatose 124  
HSE 53, 80

## I

index UV 128, 130  
indice de réfraction 7  
induction magnétique 13, 16, 22, 28, 43, 63  
infrarouge (IR) 9, 11, 95, 104, 116, 137, 140, 141, 144  
intensité énergétique 7, 10  
interactions électroniques 22  
interactions magnétomécaniques 22  
interphone 82  
ions calcium 48  
IRM interventionnelle 21

## L

lampes fluocompactes 65  
leucémie de l'enfant 52  
LFCs 65, 112  
longueur d'onde 6, 8, 9, 10  
lumière 25, 50, 54, 65  
lumière bleue 65, 107, 108, 111  
luminance énergétique 97, 100, 105, 110, 111  
luminance visuelle 106

## M

magnétite 25  
magnétosphères 23  
magnétoréception 25

mélanine 121, 139  
mélanome 36, 38, 120, 124, 126, 131  
mélatonine 50  
micro-ondes 80

## N

niveaux de référence 62, 82

## O

onde électromagnétique 5, 8, 12, 16, 19, 50, 58, 74  
organes électriques 32

## P

période 6  
perméabilité magnétique 5  
photoablatifs 137  
photoallergie 123  
photocarcinogénèse 120  
photochimiothérapie 138  
photochimiques 137  
photoconjonctivite 125  
photokératite 125  
photon(s) 5, 8, 9, 13, 97, 104, 107, 116, 119, 134, 139, 140  
photoprotection 128, 130  
photosensibilisation 110, 112, 119  
phototoxicité 123  
phototypes 122, 123  
pigmentation 99, 123  
pointeurs à lasers 146  
protection antisolaire 129, 130  
puissance crête 6

## Q

quanta, quantum 8

## R

radars 7, 11, 70

radiodiffusion 58, 64, 71  
radiofréquences (RF) 10, 16, 20, 24, 27, 36,  
58, 60, 62, 69, 87, 88, 90  
rapport cyclique 6  
rayonnements non ionisants 9, 12, 58  
rayonnement solaire 95, 104, 115, 116, 122,  
128  
recommandation européenne du 12 juillet  
1999 (1999/519/CE) 54, 62  
reproduction et tératogenèse 49  
réseaux ferrés 18  
résonance magnétique nucléaire 19  
restrictions de base 13, 62, 66, 90

## S

Sécurité solaire 130  
SED 126, 129  
spectre d'efficacité érythémale 122, 124, 129  
spectre électromagnétique 10, 12, 41, 109  
spectroscopie 19

stations de base 72  
stimulateur cardiaque 27, 37, 61, 91  
stimulation électrique fonctionnelle 35  
sustentation magnétique 18  
systèmes antivol 66

## T

tag 89  
téléphone mobile 11, 53, 69, 71 *et sq.*  
télévision 11, 44, 58, 66, 71  
transitions énergétiques 9  
tubes cathodiques 18

## U

ultraviolet (UV) 9, 50, 65, 96, 99, 103 *et sq.*,  
115 *et sq.*, 137  
UVA 100, 104 *et sq.*, 115 *et sq.*  
UVB 104, 110, 113, 116 *et sq.*  
UVC 104, 116 *et sq.*