

Figure 14.1 Observation dans une chambre de Wilson de la matérialisation d'un photon γ en une paire électron-positon, lors d'une interaction avec des noyaux de plomb. En haut, trajectoire de l'électron, en bas, du positon. En bas à gauche, coupes de 4 mm en tomographie par émission de positons révélant des lésions hypermétaboliques du foie. D.R.

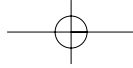
Les rayonnements de photons et de particules en santé

Ce chapitre précise la nature physique des différents rayonnements utilisés en médecine et en sciences de la vie. Il constitue un pré-requis indispensable à la compréhension des interactions de ces rayonnements avec un tissu vivant.

Par conséquent, ces notions seront utiles dans de nombreux domaines de la biologie et de la médecine. En particulier, elles permettront de comprendre comment se forme une image médicale et quelle information elle contient. Elles seront aussi à la base de la radiobiologie et de ses applications médicales, radioprotection et radiothérapie.

Ces prérequis sont repris lors de l'étude de la physiologie de la vue.

Nous étudierons successivement les rayonnements de particules massiques, puis les rayonnements électromagnétiques en abordant leur production et leurs interactions avec le vivant.



14•1 Les rayonnements corpusculaires (ou particulaires)

Nous regrouperons sous le terme de rayonnements corpusculaires ou particulaires les rayonnements constitués de particules élémentaires de masse au repos non nulle. Dans le domaine médical, il s'agira essentiellement de rayonnements constitués d'électrons, de noyaux d'hélium (particules α), de protons, plus rarement de neutrons. Ces particules peuvent être produites lors de désintégrations radioactives ou au moyen d'accélérateurs. Dans le domaine médical, ces rayonnements possèdent toujours des énergies largement capables d'ioniser des atomes. Leurs modes de production et les interactions avec un tissu biologique seront étudiés dans le chapitre suivant.

Nous avons vu précédemment qu'il était nécessaire pour décrire complètement les rayonnements d'associer une description ondulatoire à la description corpusculaire. Nous discuterons pour chaque particule de l'intérêt pratique d'une telle dualité.

14•1•1 Les particules chargées

Il s'agira essentiellement des particules chargées relativement lourdes (protons, particules, ions lourds) et des particules chargées plus légères (électrons).

a) Les particules chargées lourdes

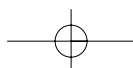
Les particules chargées lourdes utilisées en médecine ont des masses de l'ordre de celle d'un nucléon (environ 10^{-27} kg) et des énergies de l'ordre de la centaine de MeV. Ces valeurs correspondent à des longueurs d'onde de de Broglie ($\lambda = h/p = h\sqrt{2mE}$) de l'ordre du femtomètre. Les propriétés ondulatoires ne seront donc pas au premier plan.

Ces particules présentent deux applications particulièrement importantes dans le domaine médical. Utilisées pour irradier un tissu biologique, elles constituent un outil important en radiothérapie externe (transcutanée). D'autre part, lorsque certaines de ces particules sont accélérées, elles peuvent s'intégrer à un noyau atomique stable pour produire un isotope radioactif qui pourra être utilisé en diagnostic scintigraphique ou pour de la radiothérapie métabolique. Lorsque ces rayonnements sont utilisés en irradiation externe, ils ont la propriété d'interagir par mode électrostatique avec les électrons des atomes de la cible, principalement à une profondeur faible mais précise sous la peau. Ce mode d'interaction dominant permet donc de transférer une quantité importante d'énergie à une tumeur localisée à une faible profondeur sous la peau (quelques micromètres).

Les techniques de radiothérapie externe utilisent essentiellement des rayonnements de protons. Dans certains centres très spécialisés (Allemagne, Japon), on met aussi à profit des rayonnements de hadrons (noyaux atomiques) tels que le C^{6+} , afin d'appliquer en un endroit précis de plus fortes quantités d'énergie à des tumeurs particulièrement ré-

► Paragraphe 13.3.1

► Paragraphe 15.22a



sistantes à la radiothérapie. Ces techniques de *hadronthérapie* ont montré leur intérêt dans le traitement de carcinomes adénoïdes kystiques de la sphère ORL, de tumeurs des sinus de la face ou de certains sarcomes. Les indications de la hadronthérapie recouvrent aussi celles de la protonthérapie.

b) Les électrons (et positons)

Les *rayonnements d'électrons* sont utilisés en routine thérapeutique dans le cadre de radiothérapies. Les énergies mises en jeu varient de quelques dizaines de keV à quelques dizaines de MeV au maximum. Des faisceaux externes d'électrons peuvent ainsi être utilisés pour déposer à quelques millimètres sous la peau une dose d'énergie importante. Ils permettent donc d'irradier par voie transcutanée des tumeurs moins superficielles que celles pouvant bénéficier d'une irradiation par particules chargées lourdes. Lorsqu'ils proviennent d'isotopes radioactifs fixés sur une masse tumorale ou hypermétabolique, ils peuvent permettre d'obtenir une irradiation sélective de la masse en épargnant les tissus sains environnants (radiothérapie métabolique).

14•1•2 Les particules non chargées

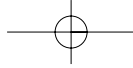
Dans le domaine médical, nous n'aurons à considérer que les *rayonnements de neutrons*. Sans charge électrique, un faisceau de neutrons sera un excellent moyen pour incorporer des neutrons dans des noyaux ou pour observer des collisions avec ceux-ci. Compte tenu du volume très limité du noyau au sein de l'atome, ces chocs seront cependant peu fréquents, ce qui explique qu'un faisceau de neutrons pourra pénétrer profondément au sein d'un organisme. L'interaction neutron-matière pourra cependant augmenter significativement si la longueur d'onde de de Broglie associée aux neutrons est de l'ordre des dimensions de l'atome (10^{-10} m). Compte tenu de la *relation de de Broglie pour des particules non relativistes*, $\lambda = h/p = h/\sqrt{2mE}$, cela aura lieu pour des énergies relativement faibles, inférieures à 1 eV. De tels neutrons seront qualifiés de *neutrons thermiques*, car ayant des énergies cinétiques de l'ordre de celle donnée par l'agitation thermique. Les neutrons de plus de 0,8 MeV sont appelés neutrons rapides. Entre 1 eV et 0,8 MeV, on parlera de neutrons épithermiques.

La protonthérapie

L'utilisation de *rayonnements de protons* se justifie essentiellement lorsqu'il est nécessaire de transférer une quantité d'énergie importante à des tumeurs superficielles proches de tissus radiosensibles susceptibles d'être lésés par d'autres rayonnements plus diffusants. Ainsi, certains centres disposant d'un synchrotron utilisent des rayonnements de protons d'énergie de l'ordre de 200 MeV pour traiter certaines tumeurs oculaires (mélanomes de la choroïde) ou de la base du crâne (chordomes, chondrosarcomes). Des essais thérapeutiques ont été également réalisés avec succès dans certains cas d'angiomes cérébraux inaccessibles à la chirurgie ou de petits adénomes hypophysaires. Au-delà de ces utilisations en radiothérapie, des faisceaux de protons accélérés au moyen de cyclotrons jusqu'à une énergie de 10 MeV permettent également de fabriquer des radioéléments artificiels tels que les isotopes émetteurs de positons (cf. § 15.2.1a).

La BNTC

Des essais cliniques sont en cours pour évaluer l'intérêt des neutrons thermiques dans le traitement de certains cancers (glioblastome multiforme par exemple). La BNTC (*boron neutron capture therapy*) consiste à bombarder par des neutrons thermiques une tumeur enrichie par un composé à base de bore. Les neutrons s'incorporent aux noyaux de bore, provoquant la désintégration de ces noyaux en particules α et en isotopes du lithium dont l'énergie (2,5 MeV) permet d'apporter une irradiation extrêmement localisée, de l'ordre de 10 μ m de portée.



14•2 Les ondes électromagnétiques

14•2•1 Nature corpusculaire, ondulatoire et propagation

D'un point de vue ondulatoire, la notion d'onde électromagnétique est une conséquence de l'unification de l'électricité et du magnétisme élaboré par James Clerk Maxwell vers 1865. Ce dernier fut le premier à énoncer les quatre équations différentielles qui décrivent la propagation d'ondes électromagnétiques. L'existence de telles ondes fut confirmée expérimentalement par Heinrich Hertz en 1887.

De la théorie de Maxwell, il résulte qu'une *onde électromagnétique* est la propagation (dans un milieu matériel ou dans le vide) d'un champ électrique et d'un champ magnétique associés, perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation.

Dans le vide, ces deux champs indissociables l'un de l'autre se déplacent à la célérité $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, la vitesse de la lumière dans le vide. Cette constante est liée à deux autres caractéristiques du vide, sa *permittivité électrique* ϵ_0 et sa *perméabilité magnétique* μ_0 suivant la relation : $\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$, où $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ et $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

Lorsque l'on s'intéresse à une onde électromagnétique se déplaçant dans un milieu matériel, la célérité c_n dans ce milieu s'exprime au moyen de la même relation $\epsilon \mu c_n^2 = 1$, mais en faisant intervenir la permittivité électrique $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ et la perméabilité magnétique $\mu = \mu_r \mu_0$ de ce milieu matériel particulier. Les coefficients multiplicatifs ϵ_r et μ_r sont la permittivité électrique relative et la perméabilité magnétique relative du milieu matériel de propagation. On a donc :

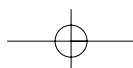
► Paragraphe 14.3.3

$$c_n = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r} \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c}{n}$$

où $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ sera appelé *indice de réfraction* du milieu. Cet indice est supérieur ou égal à 1. L'indice de réfraction est égal à 1 dans le vide et très proche de cette valeur dans de l'air. Il est de l'ordre de 4/3 dans l'eau et de 1,6 dans le verre.

Une des conséquences des équations de Maxwell est que les champs électrique et magnétique d'une onde électromagnétique sont liés par la relation $\vec{B} = \frac{1}{c} \vec{u} \wedge \vec{E}$: ces deux champs sont donc à tout instant perpendiculaires entre eux et leur plan est lui-même perpendiculaire à la direction de propagation \vec{u} . On parlera donc d'ondes vectorielles transversales. Lorsque la direction du vecteur champ électrique (et donc du vecteur champ magnétique) est constante, on dira que l'onde possède une *polarisation* rectiligne ou linéaire. Si ces champs possèdent une direction qui tourne à vitesse angulaire constante autour de la direction de propagation, on parlera de polarisation circulaire ou elliptique.

Lorsque l'intensité des champs électrique et magnétique varie avec le temps de façon sinusoïdale (c'est-à-dire que leur variation de norme



Les rayonnements d'intérêt biomédical

peut être modélisée au moyen d'une fonction sinus, d'une fonction cosinus ou plus généralement d'une exponentielle complexe du type $e^{i\omega t}$, on parlera d'onde électromagnétique pure ou, ce qui est synonyme, d'onde monochromatique (cf. fig. 14.2).

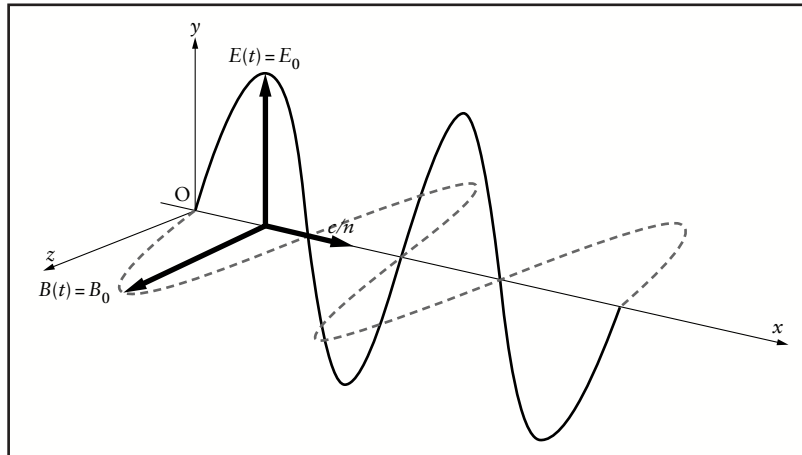


Figure 14.2
Illustration d'une onde électromagnétique sinusoïdale polarisée linéairement suivant l'axe (Oy) et se propageant dans la direction (Ox) d'un milieu de propagation d'indice de réfraction n . Ce schéma ne tient pas compte des intensités relatives des champs électrique et magnétique.

Conformément aux résultats de la mécanique quantique, une particule est associée à la propagation d'une onde électromagnétique. Cette particule se déplace avec l'onde à une vitesse c dans le vide et elle présente une masse au repos nulle. Elle est appelée photon. Chaque photon associé à une onde électromagnétique pure de fréquence ν transporte une énergie égale au quantum d'énergie E :

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \text{ (relation de Planck)}$$

où h est la constante de Planck ($h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$) et c la célérité de la lumière dans le vide. Cette relation peut se démontrer, par exemple, à partir des équations de Maxwell et des hypothèses de la mécanique quantique.

Dans le domaine médical, il est souvent pratique de calculer en électronvolts l'énergie transportée par les photons associés à la propagation d'une radiation électromagnétique. En exprimant la longueur d'onde en nanomètres, on obtient l'expression suivante, qui n'est qu'une application numérique de la précédente mais permet de faire des calculs approchés de façon commode :

$$E(\text{eV}) \approx \frac{1240}{\lambda(\text{nm})}$$

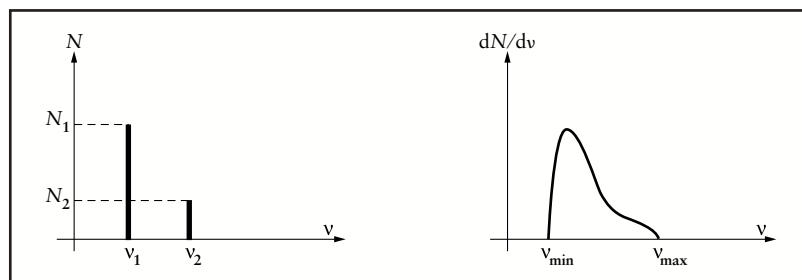
Un rayonnement électromagnétique est donc associé à un faisceau de photons. Dans le cas d'un rayonnement monochromatique, les photons ont tous la même énergie. Au contraire, un rayonnement polychromatique est constitué de photons d'énergies différentes. Il est capital, en

► Paragraphe 13.3.2b

médecine en particulier, de pouvoir caractériser qualitativement et quantitativement les énergies des photons qui constituent un rayonnement électromagnétique. Dans ce but, on utilise un graphe appelé spectre de rayonnement où l'on reporte, pour chaque fréquence ν de photon (ou pour chaque énergie de photon, ou pour chaque longueur d'onde), la proportion de photons de fréquence ν présents dans ce rayonnement. D'un point de vue pratique, le spectre d'un rayonnement électromagnétique caractérise donc sa composition.

Un rayonnement monochromatique ne comporte qu'une seule raie correspondant à la fréquence (unique) des photons qui le constituent. Un spectre comprenant un nombre fini de raies caractérisera un faisceau constitué d'un nombre fini de fréquences de photons $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$. Dans ce cas, les champs électrique et magnétique varient dans le temps suivant une fonction complexe obtenue en superposant (additionnant) des fonctions sinus et cosinus de fréquences correspondantes $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$.

Figure 14.3
Exemples d'un spectre de raies (constitué de deux populations de photons de fréquences différentes, à gauche) et d'un spectre continu (à droite).



Enfin, il existe des situations où une onde électromagnétique correspondra à un faisceau de photons possédant de façon continue toutes les énergies possibles entre une énergie minimale $h\nu_{\min}$ et une énergie maximale $h\nu_{\max}$ (cf. fig. 14.3). On parle alors de spectre continu. Le chapitre suivant fournira de nombreuses occasions d'utiliser ces différentes catégories de spectres.

14.2.2 La gamme des fréquences et leurs utilisations

Les énergies observables pour un photon recouvrent une plage exceptionnellement étendue, variant du pico- au téraélectronvolt (10^{-12} à 10^{12} eV). Cette très large gamme d'énergies correspond à des fréquences variant de l'hertz à la centaine de yottahertz (10^2 à 10^{26} Hz), à des longueurs d'onde variant du millier de kilomètres au millième de femtomètre (10^6 à 10^{-18} m), et à des domaines d'utilisation variés (rayonnements X et γ , lumière ultraviolette, visible et infrarouge, microondes, ondes hertziennes). Tous ces domaines de la physique relèvent de la même théorie électromagnétique et ne diffèrent que par la fréquence des ondes impliquées (cf. fig. 14.4).

L'énergie de liaison d'un électron atomique est de 13,6 eV pour l'électron d'un atome d'hydrogène dans son état fondamental. Elle est du

Les rayonnements d'intérêt biomédical

même ordre pour les électrons des orbitales moléculaires covalentes de l'oxygène, de l'azote, de H_2O , c'est-à-dire de l'air ou de l'eau. Pour des atomes plus massifs et pour différentes couches électroniques, cette énergie peut passer de quelques électronvolts à un peu plus d'une centaine de keV. En transférant une énergie de cet ordre à un électron sur son orbite, il est donc possible de l'ioniser, c'est-à-dire de le soustraire au potentiel électrostatique du noyau. Selon certains mécanismes, cette énergie peut être apportée par un photon, c'est-à-dire par une radiation électromagnétique (cf. § 15.3.2).

Dans cette situation, une partie seulement de l'énergie globale des photons incidents sera réellement utilisée pour ioniser des atomes ou des molécules. En effet, une partie de l'énergie de ces photons est transmise aux molécules irradiées sous forme de différents modes d'excitation et de chaleur. On peut mesurer qu'en moyenne l'énergie nécessaire pour produire une ionisation est de l'ordre de 32 eV dans l'eau et 34 eV dans l'air.

a) Les rayonnements ionisants

Dans le cadre des rayonnements électromagnétiques utilisés, le caractère ionisant concerne, par ordre d'énergie décroissante, les rayonnements X et γ et les rayonnements ultraviolets.

Rayonnements X et γ recouvrent à peu de chose près la même gamme d'énergie et ne se différencient que par leur origine. Les rayons X sont produits de différentes façons par des phénomènes physiques qui mettent en jeu le nuage électronique d'atomes ou le voisinage de noyaux atomiques. Les rayons γ proviennent soit directement du noyau de certains atomes, soit secondairement de l'annihilation d'antiparticules produites par des noyaux atomiques (annihilation électron-positon en particulier). Ces rayonnements présentent des énergies très variables qui s'étendent de la centaine d'électronvolts à des valeurs dépassant le million d'électronvolts. Dans le domaine médical, les rayonnements X sont utilisés en radiothérapie transcutanée, lorsque le tissu à irradier n'est pas superficiel. En imagerie radiologique, ils permettent d'obtenir des images de la densité des tissus traversés. Les isotopes émetteurs de rayonnements γ sont mis à profit lors d'examen scintigraphiques des-

Rayonnements et risques biologiques

Quiconque se destine à une profession médicale doit assimiler un élément essentiel : le principal risque qu'un rayonnement électromagnétique puisse faire courir à un sujet qui y est exposé est d'ioniser certains de ses atomes ou molécules.

On sait en effet qu'une telle ionisation peut rompre les liaisons covalentes des molécules biologiques, donc les dénaturer. Lorsque cette rupture de liaison covalente a lieu sur une molécule porteuse d'information comme une molécule d'ADN, elle peut, dans certaines situations, occasionner des erreurs non réparées au sein du génome, erreurs pouvant être à l'origine de pathologies cancéreuses ou de mutations. Une seule particule, ou un seul photon, est suffisant pour ioniser un atome au sein d'une molécule.

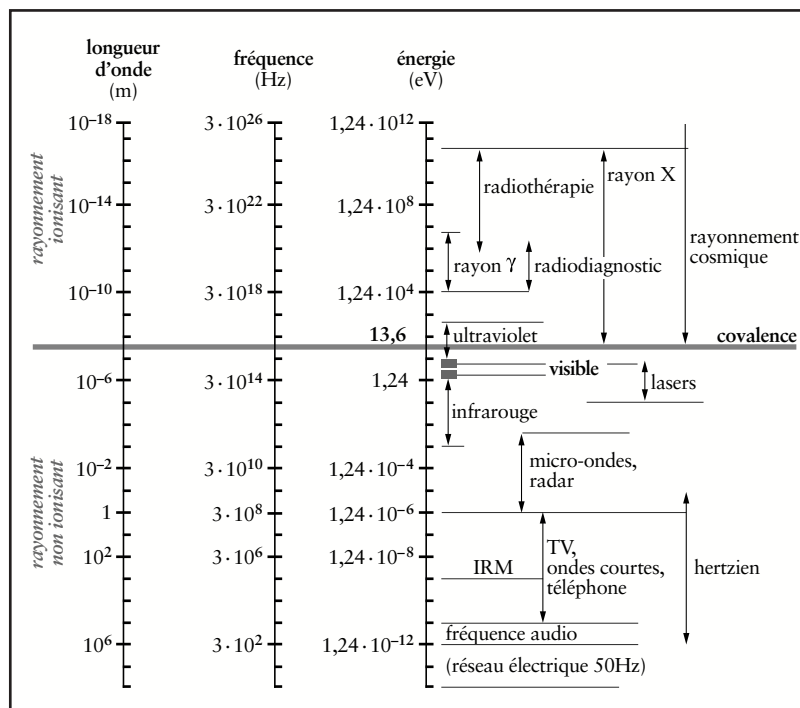
Rayonnements ionisants et non ionisants

Par convention, le seuil d'ionisation de 13,6 eV permet de classer les radiations électromagnétiques en deux catégories principales.

Les photons d'énergie supérieure à ce seuil sont qualifiés de *rayonnements ionisants*. Ceux de moindre énergie sont qualifiés de *rayonnements non ionisants*.

Cette distinction est essentielle car elle permet de différencier les photons non ionisants de ceux, ionisants, susceptibles de briser des liaisons covalentes, donc de dénaturer des molécules biologiques et d'entraîner des pathologies variées. Une radiation sera donc considérée comme ionisante dès qu'elle implique des photons d'énergie supérieure au seuil, soit encore dès que la fréquence de l'onde électromagnétique dépasse $3 \cdot 10^6$ GHz ou que sa longueur d'onde est inférieure à une centaine de nanomètres environ.

Figure 14.4
 Panorama des ondes
 électromagnétiques.
 (D'après A. Duchêne
 et J. Jousset-Dubien,
 les Effets biologiques
 des rayonnements
 non ionisants,
 Flammarion médecine-
 Sciences, 2001.



tinés à produire une image du fonctionnement d'un organe. Dans certains centres très spécialisés en radiochirurgie, des rayonnements γ externes sont utilisés pour le traitement radiothérapeutique de tumeurs cérébrales ou malformations artérioveineuses inopérables (*gamma knife*).

Par définition, les *rayonnements ultraviolets* concernent des longueurs d'onde s'échelonnant entre 400 nm (limite inférieure du rayonnement bleu visible par un être humain) et 10 nm. Il s'agit donc de photons d'énergies comprises entre 3 eV et 124 eV. Ils chevauchent la limite entre rayonnements ionisants et non ionisants. Découverts par Johann Wilhelm Ritter en 1801 lors de réactions chimiques, ils peuvent être produits au moyen de matériaux excités par une source d'énergie (arc électrique, lampe à vapeur de mercure) ou de lasers. Les radiations ultraviolettes sont utilisées par exemple en dermatologie (traitement du psoriasis), mais peuvent aussi être pathogènes (cancers cutanés).

b) Les rayonnements non ionisants

Les rayonnements non ionisants recouvrent une gamme étendue de rayonnements électromagnétiques qui vont de l'ultraviolet proche du visible aux ondes hertziennes, en passant par le visible, les infrarouges et les micro-ondes.

Le *rayonnement visible* (pour un être humain) concerne une bande étroite de longueurs d'onde situées entre 400 et 760 nm. Ceci correspond à des photons de 1 à 3 eV environ. Chaque longueur d'onde

Les rayonnements d'intérêt biomédical

est associée par le cerveau humain à une couleur donnée du spectre visible, du bleu au rouge en passant par le vert, le jaune et l'orange, suivant l'ordre observable dans un arc-en-ciel.

Le *rayonnement infrarouge* est caractérisé par des longueurs d'onde qui s'étalent de la limite supérieure des longueurs d'onde visibles, soit 0,76 mm (couleur rouge), jusqu'à quelques millimètres. Ce rayonnement fut découvert en 1800 par William Herschel et est généralement produit par des sources de chaleur, plus rarement par des lasers. En médecine, il a été testé en diagnostic pour détecter une augmentation locale de chaleur pouvant orienter vers une pathologie tumorale (thermographie infrarouge), et en thérapeutique pour donner un effet thermique anti-inflammatoire.

Le *rayonnement micro-onde* (ou hyperfréquence) correspond à des longueurs d'onde évoluant entre quelques millimètres et un mètre. Lorsqu'il traverse un matériau, ce rayonnement électromagnétique de fréquence relativement élevée (GHz) peut transférer une partie de son énergie par effet Joule et provoquer ainsi un échauffement rapide qui dépend de la nature du matériau où a lieu la dissipation de l'énergie. Dans le domaine médical, le rayonnement micro-onde a lui aussi fait l'objet d'études en thermographie.

Enfin, les *rayonnements hertziens* présentent des longueurs d'onde qui peuvent varier du mètre au kilomètre et constituent le domaine des ondes radio (radiophonie, télévision, téléphonie, etc.). Elles permettent, depuis les premières expériences de Guglielmo Marconi en 1897, de transmettre des informations sur de longues distances. Naturellement, l'énergie des photons qui les constituent est très largement insuffisante ($E < 1 \mu\text{eV}$) pour provoquer la moindre pathologie secondaire à un phénomène d'ionisation. Dans la pratique médicale courante, elles sont utilisées pour les études de résonance magnétique nucléaire, tant en imagerie qu'en spectroscopie.