

# Chapitre 3

## Observation des ondes

Une onde est une perturbation se propageant dans un milieu matériel ou dans le vide. (Nous verrons au chapitre suivant que ceci est en fait la définition d'une onde progressive). Il en existe de plusieurs natures : nous allons nous intéresser aux ondes mécaniques et électromagnétiques.

### 3.1 Ondes mécaniques

#### 3.1.1 Définition et exemples

La “perturbation” qui définit une onde mécanique est une déformation du milieu matériel dans lequel se propage l'onde. Une onde mécanique se propage uniquement dans un milieu matériel, pas dans le vide.

On distingue plusieurs types :

- onde longitudinale : la déformation est parallèle à la direction de propagation. Pour une onde mécanique on parle d'onde de compression ;
- onde transverse : la déformation est perpendiculaire à la direction de propagation. Pour une onde mécanique on parle d'onde de cisaillement.

Exemples :

- la houle est une perturbation du niveau de l'océan créée localement par le vent : on appelle ainsi les vagues se propageant au-delà de la zone de vent, dans la direction du vent ;
- la marée est une perturbation du niveau de l'océan créée par les effets conjugués de l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil, couplés à la rotation de la Terre ;
- le son est une onde mécanique, créée par la vibration des cordes vocales, de la membrane d'un haut-parleur, des cordes d'un instrument de musique, etc. Dans tous les cas la vibration est amplifiée par une caisse de résonance et transmise par l'air ;
- les vibrations des cordes d'un instrument de musique sont aussi des ondes mécaniques, dont la propagation le long de la corde est limitée par les points d'attache. Ces vibrations sont transmises aux autres parties de l'instrument et amplifiées par la caisse qui les transforme en ondes sonores.

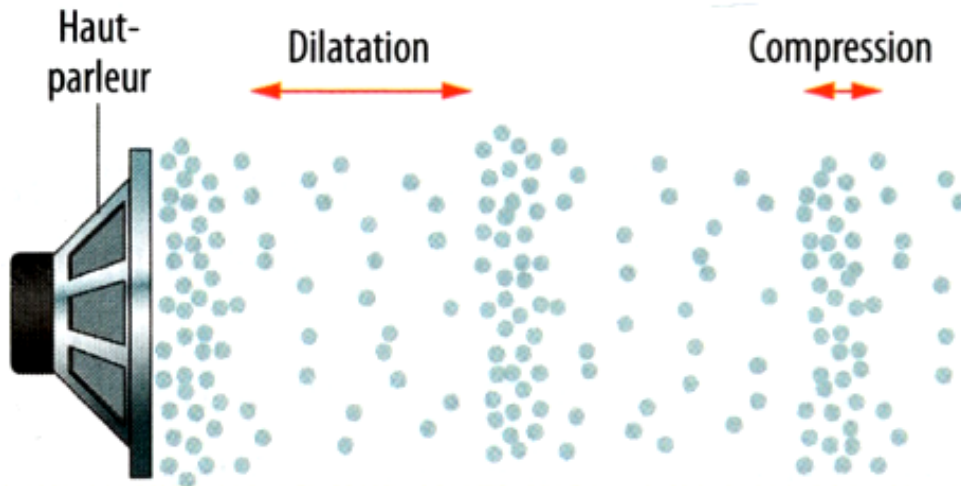


FIGURE 3.1 – Onde de compression transmise par l'air.

### 3.1.2 Ondes sonores

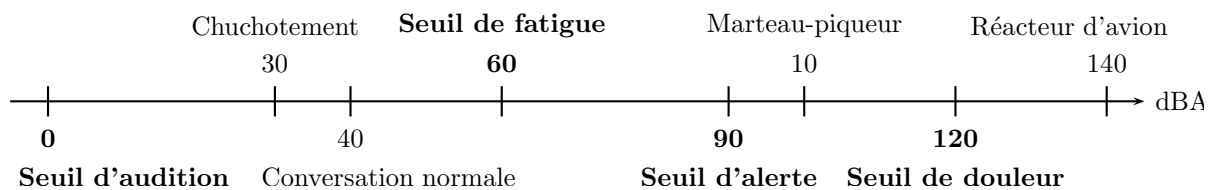
Une onde sonore est une onde de compression (cf. Fig. 3.1). L'oreille humaine est sensible aux ondes de fréquences situées entre 20 Hz et 20 kHz. Les ondes de plus hautes fréquences sont appelées ultrasons, que certains animaux peuvent entendre. Les ondes de plus basses fréquences sont appelées infrasons, et à défaut d'être entendue elles peuvent être ressenties (i.e. les vibrations sont transmises au liquide des organes internes, à partir d'un seuil d'intensité). La célérité du son dans l'air à 20°C vaut  $c_s = 340 \text{ m.s}^{-1}$ .

On définit le niveau sonore par la relation suivante :

$$L = \log \left( \frac{I}{I_0} \right)$$

où  $I$  est l'intensité sonore reçue, mesurée en  $\text{W.m}^{-2}$ ,  $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$  est le seuil d'audibilité à 1 kHz. Le niveau sonore  $L$  est une grandeur sans dimension mais une unité lui est associée : le décibel acoustique, noté dB ou dBA. Pour une même amplitude de vibration, des sons de différentes fréquence ne sont pas perçus avec la même intensité par l'oreille. On définit donc le niveau sonore (d'une conversation, d'un bruit, comprenant donc des sons de plusieurs fréquences) d'après une référence prise à 1kHz, au milieu du spectre audible et au voisinage de la fréquence de meilleure sensibilité (4 kHz).

L'échelle de décibels représentée ci-dessous associe niveau sonore et sensation de bruit, avec quelques exemples.



### 3.1.3 Ondes sismiques

Des ondes sismiques sont produites par des tremblements de terre ou des explosions souterraines. Le foyer est le point d'émission (généralement en profondeur) de ces ondes mécaniques, et on appelle épïcêtre le point situé en surface, à la verticale du foyer.

On en distingue plusieurs types, classées par ordre d'arrivée à un point d'observation éloigné de l'épicentre (cf. Fig. 3.2) :

- les ondes P, ou premières, longitudinales et se propageant dans les milieux solides, liquides, et l'atmosphère (fréquences  $< 1,5 \text{ Hz}$ );
- les ondes S, ou secondes, transverses et se propageant dans les liquides (fréquences  $< 1,5 \text{ Hz}$ );
- les ondes L, ou longues, transverses (fréquences  $< 0,1 \text{ Hz}$ ).

Les ondes P se propagent plus rapidement que les ondes S, qui se propagent plus rapidement que les ondes L. Les ondes P et S sont des ondes de volume, dont la manifestation (compression ou cisaillement) en un point donné dépend de l'angle entre les segments (foyer – épicentre) et (foyer – point d'observation). Les ondes L sont des ondes de surface : on distingue les ondes de Love (cisaillement horizontal) et les ondes de Rayleigh (cisaillement vertical).

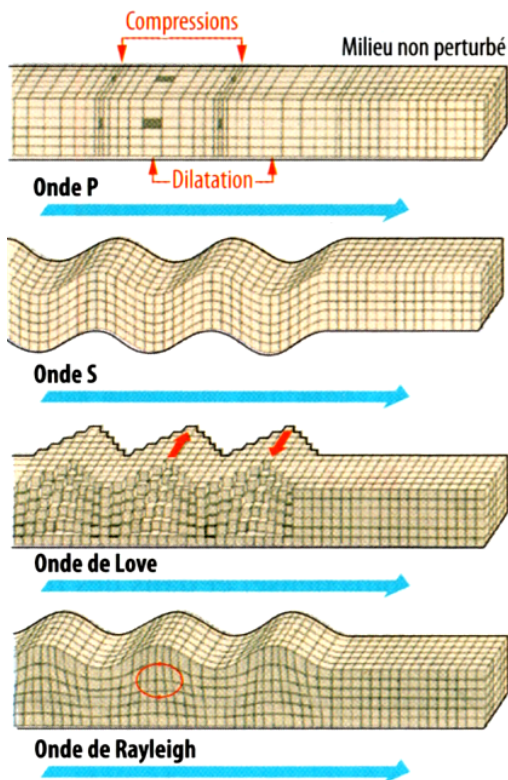


FIGURE 3.2 – Différents types d'ondes sismiques.

On mesure l'énergie mise en œuvre par un séisme par sa magnitude. La définition suivante s'applique aux ondes P et S uniquement et définit la magnitude sur l'échelle de Richter :

$$M = \log \left( \frac{A}{A_{\text{ref}}} \right)$$

où  $A$  est l'amplitude mesurée en un point situé à 100 km de l'épicentre, et  $A_{\text{ref}}$  est l'amplitude mesurée (au même point et par le même appareil) pour un séisme de référence. Ces amplitudes correspondent à la méthode de mesure utilisée, pour un sismogramme il s'agit généralement d'une distance : l'amplitude du déplacement du stylet traçant sur la feuille. Le "séisme de référence" définit la magnitude zéro, il correspond donc à l'activité sismique enregistrée en l'absence de fort séisme ou d'explosion proche. Cette magnitude "absolue" définit la force de chaque séisme et permet de comparer des événements différents.

On définit de la même manière la magnitude locale  $M_L$  d'un séisme donné en un lieu (situé à distance quelconque de l'épicentre), d'après l'amplitude mesurée en ce lieu. La magnitude locale d'un séisme diminue à mesure qu'on s'éloigne de l'épicentre.

*Remarque :* Il existe d'autres échelles de magnitude, notamment l'échelle de Mercalli basée sur les dégâts occasionnés par un séisme. L'ampleur des dégâts occasionnés lors d'un séisme dépend de son intensité et des techniques de construction utilisées (normes sismiques). Cependant les ondes L sont particulièrement éprouvantes pour les bâtiments car leur fréquence est plus proche des fréquences de résonance typiques des constructions humaines : les oscillations sont amplifiées et transmises sur toute la hauteur d'un bâtiment. La construction aux normes sismiques ajoute des éléments de structure, conçus pour amortir ces oscillations.

*Remarque 2* : on retrouve les notions de compression et de cisaillement en résistance des matériaux : il est alors question d'étudier la capacité d'un objet à résister à une contrainte, de type compression/étirement ou de type cisaillement.

### 3.1.4 Détection des ondes mécaniques

Le principe de détection d'une onde mécanique est d'utiliser un oscillateur, qui se mettra en mouvement à la fréquence de l'onde reçue, avec une amplitude correspondant à l'amplitude de l'onde reçue. L'amplitude de l'oscillation du capteur (un déplacement ou une dilatation) est ensuite transformée pour être enregistrée et étudiée :

- dans l'oreille, la vibration du tympan est transmise à l'oreille interne qui transforme la vibration mécanique en signal nerveux (similaire à un signal électrique) transmis au cerveau pour analyse ;
- dans un microphone, un matériau piézoélectrique réagit aux contraintes mécaniques (dus aux sons reçus) en signal électrique oscillant, transmis à une ligne téléphonique, un émetteur radio, etc. ;
- dans un sismographe, trois oscillateurs de type masse d'inertie-ressort transmettent les ondes mécaniques reçues (dans les 3 dimensions d'espace) à un stylet traçant l'amplitude reçue sur un papier. Des modèles plus récents utilisent comme masse d'inertie un aimant mobile à l'intérieur d'une bobine : le mouvement est ainsi converti en signal électrique oscillant.

## 3.2 Ondes électromagnétiques

La "perturbation" qui définit une onde électromagnétique (ci-après "EM") est un champ électromagnétique variable (qui s'ajoute au champ électromagnétique ambiant) émis par des charges électriques en mouvement. Les ondes EM se propagent dans le vide à la célérité  $c_0 = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .

La fréquence de l'onde EM ne varie pas à l'entrée dans un milieu dispersif, car l'énergie portée par chaque photon ne varie pas. Énergie et fréquence sont liées par la relation de De Broglie (aussi appelée réaction de Planck), formalisant la dualité onde-corpuscule de la nature de la lumière :

$$E = h\nu$$

où  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$  est la constante de Planck. La célérité de l'onde EM ainsi que sa longueur d'onde varient en fonction de l'indice optique :

$$c = \frac{c_0}{n} \quad ; \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

où  $n$  est l'indice optique du milieu et l'indice "0" signifie "mesurée dans le vide". Les relations suivantes, liant fréquence, longueur d'onde, quantité de mouvement et énergie du photon sont toujours valables :

$$c = \lambda\nu \quad ; \quad p = \frac{h}{\lambda} \quad ; \quad E = \frac{hc}{\lambda}$$

### 3.2.1 Le spectre électromagnétique

Le schéma ci-dessous présente les différents domaines du spectre EM. L'unité d'énergie utilisée est l'électron-volt :  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

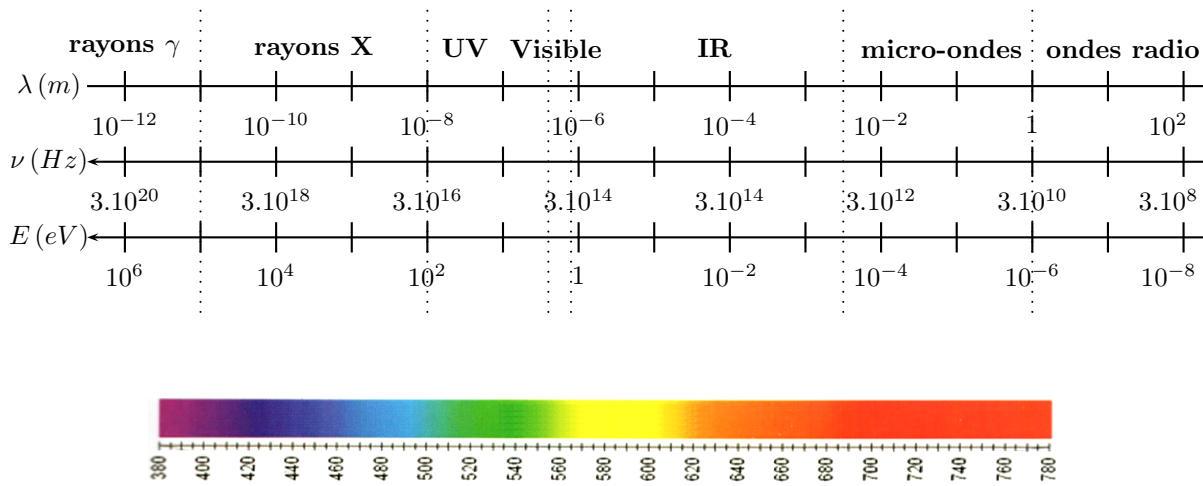


FIGURE 3.3 – Spectre EM : domaine visible (longueurs d’onde indiquées en  $nm$ ).

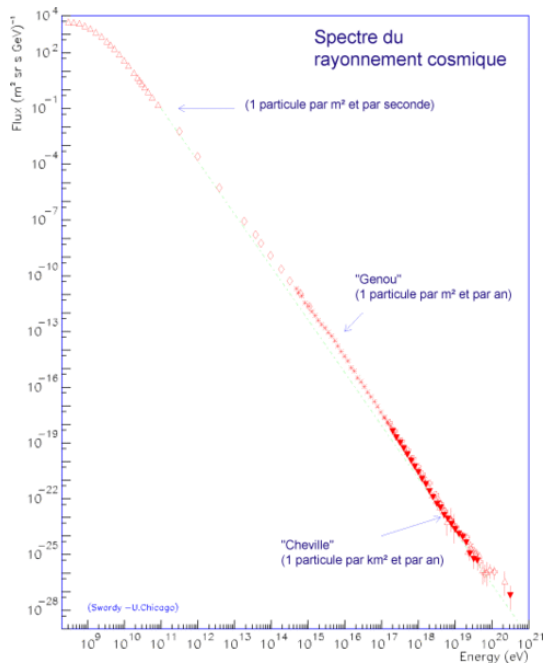


FIGURE 3.4 – Spectre du rayonnement cosmique (crédits Simon Swordy, U. Chicago).

*Remarque :* le “rayonnement cosmique” n’apparaît pas sur ce spectre, car il s’agit de particules chargées (principalement des protons), pas de photons. Le spectre du rayonnement cosmique représente la quantité de particules détectées (sur Terre) ayant une énergie cinétique donnée (cf. Fig. 3.4). Les particules d’énergies inférieures à 100 MeV ne sont pas observées car elles sont piégées par le champ magnétique terrestre. Au-delà, on détecte les particules du vent solaire (les particules d’origines plus lointaines sont piégées par le champ magnétique du Soleil). Les particules provenant du reste de la Galaxie sont visibles à partir de 10 GeV eV environ, et les particules provenant d’au-delà de la Voie Lactée à partir de  $10^{15}$  eV.

### 3.2.2 Sources de rayonnements non-visibles

#### Ondes radio

Les ondes radio, découvertes par Hertz en 1888, sont utilisées en télécommunication : radio FM  $\sim 90 - 110 MHz$ , radio AM  $\sim 10 - 30 MHz$ , radio UHF et VHF ; radar. La source d’émission est une antenne, i.e. un circuit électrique oscillant. Les fronts d’onde émis par ce type de source ne sont pas sphériques. Le courant alternatif à 50 Hz est aussi une onde radio, émise (à faible intensité) par tout câble électrique, appareil, tube à décharge (les tubes “néon” des plafonniers), etc. alimenté sur le secteur.

Les sources naturelles d’ondes radio sont des objets astrophysiques capables d’accélérer des particules chargées (électrons, protons, noyaux atomiques) à des vitesses relativistes (supérieures à 95% de la vitesse de la lumière). Ces particules accélérées émettent des

rayonnement EM lors d'interactions avec le champ magnétique à la source, ou d'interactions avec la lumière (UV, visible, infrarouge) provenant d'étoiles distantes. Ces rayonnements couvrent tout le spectre EM, des ondes radio aux rayons  $\gamma$ . L'observation du ciel dans le domaine radio (où l'atmosphère terrestre est transparente) a permis la découverte de ces objets. En voici deux exemples :

- pulsars : l'explosion (supernova) d'une étoile massive (plus de 8 fois la masse du Soleil) laisse une étoile à neutrons (objet de la taille de la Terre et 1,4 fois plus lourd que le Soleil) en rotation rapide et dotée d'un fort champ magnétique. Le nom "pulsar" vient de la nature périodique du rayonnement observé, due à la rotation de l'étoile à neutrons (comme la lumière d'un phare) ;
- quasars (QUasi Stellar objects) : au cœur de chaque galaxie se trouve un trou noir supermassif (qqes millions à qqes milliards de fois plus lourds que le Soleil). La matière environnante (étoiles, nuages de gaz) y tombe du fait de l'attraction gravitationnelle, et forme un disque en spiralant autour du trou noir. Une partie de cette matière est "déviée" sous forme de deux jets de plasma relativiste le long de l'axe de rotation du système trou noir/disque. Le plasma émet un rayonnement collimaté et si intense que le rayonnement est visible bien plus loin que la galaxie au cœur de laquelle se trouve le trou noir. À l'époque de leur découverte leur distance n'était pas connue et ils apparaissaient comme des étoiles peu lumineuses, d'où leur surnom. Par la suite d'autres systèmes trou noir/disque de masses plus faibles ont été découverts, qui émettent aussi dans tous les domaines du spectre EM.

### Micro-ondes

Les micro-ondes sont utilisées aussi dans les télécommunications : GPS, GSM, WiFi. Le principe de ces antennes est le même que pour les antennes radio.

Les sources naturelles de micro-ondes sont également astrophysiques :

- les pulsars, quasars et autres "accélérateurs de particules" astrophysiques ;
- le fond diffus cosmologique : dans les premières 380 000 ans de l'Univers, la matière contenue dans celui-ci était trop dense pour que la lumière s'y propage. Un photon émis par un atome était immédiatement réabsorbé par un autre, comme au cœur d'une étoile. L'Univers a continué de s'étendre jusqu'à être assez peu dense pour que la lumière s'y propage. Cette première lumière, émise de tous points (donc vue dans toutes les directions, de manière presque uniforme) est encore visible aujourd'hui, mais du fait de l'expansion sa longueur d'onde est maintenant d'environ 1 mm. Le spectre est bien décrit par le modèle du corps noir, et la température correspondant à cette longueur d'onde est de 2,73 K ;
- la raie à 21 cm de l'hydrogène : le niveau d'énergie de l'atome d'hydrogène varie très légèrement selon que le spin de l'électron (sur la couche 1s) est aligné ou anti-aligné avec celui du proton. Cette transition correspond à l'émission d'un photon de longueur d'onde 21 cm, on appelle ce dédoublement de niveau la structure hyperfine de l'hydrogène.

### Infra-rouges

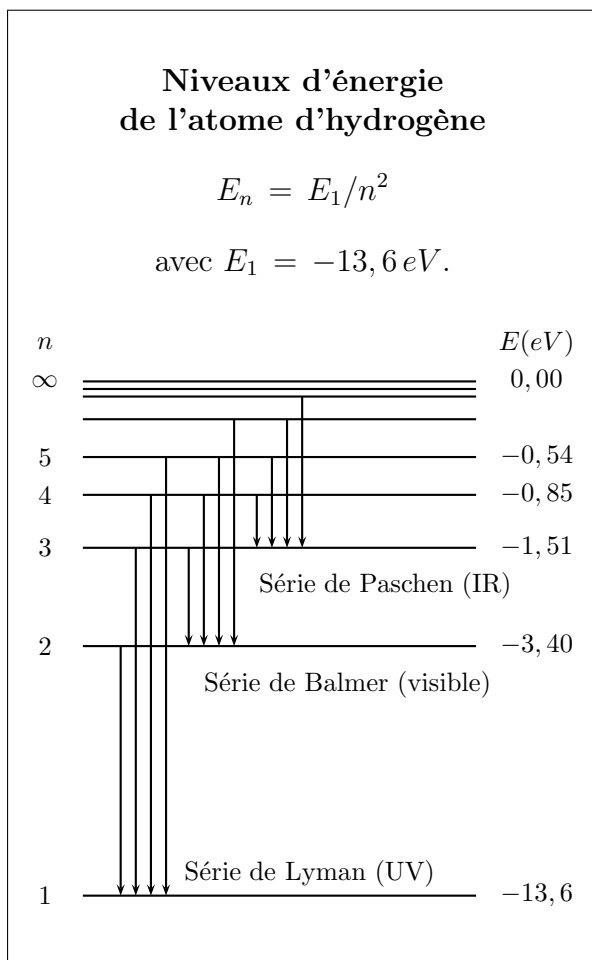
Un rayonnement infrarouge thermique est émis par tout corps dont la température est comprise entre environ  $10^2$  et  $10^4$  K. Ceci inclut les animaux à sang chaud, le feu, les éclairs, les étoiles géantes rouges (un stade avancé de l'évolution d'une étoile comme le

Soleil), et les pouponnières d'étoiles. Les sources artificielles comptent les radiateurs et fours bien sûr, et aussi les ampoules à filament.

### Ultra-violets

On distingue plusieurs “sous-classes” de rayonnements UV :

- les UV-A ( $315 < \lambda < 380 \text{ nm}$ ) : ceux du Soleil font bronzer. Les lampes à bronzer et les lampes à lumière noire émettent dans ce domaine ;
- les UV-B ( $280 < \lambda < 315 \text{ nm}$ ) : ceux du Soleil font bronzer mais sont nocifs à forte dose ;
- les UV-C ( $100 < \lambda < 280 \text{ nm}$ ) : utilisés pour purifier l'eau et l'air, traiter certaines maladies de peau, effacer certains composants de mémoires informatiques (EEPROM). La couche d'ozone absorbe la majeure partie des UV-C solaires.



Les étoiles géantes bleues sont des étoiles plus massives que le Soleil (au moins 18 fois plus lourdes), qui effectuent leur nucléosynthèse à un rythme plus soutenu que le Soleil et vivent aussi moins longtemps. La longueur d'onde à laquelle leur longueur d'onde est maximale se trouve dans l'UV, ce qui correspond à une température de surface d'au moins  $10^5 \text{ K}$ .

### Rayons X et $\gamma$

Les disques d'accrétion des systèmes trou noir/disque décrits plus haut émettent un rayonnement thermique dans le domaine des rayons X, tant la friction dans le disque est importante (la température correspondante est de  $10^4$  à  $10^7 \text{ K}$ ). Les sources astrophysiques accélératrices de particules émettent aussi dans le domaine  $\gamma$ .

Wilhelm Röntgen a découvert les rayons X et  $\gamma$  lors d'expériences sur les radionucléides en 1895. Il a plus tard été montré que les cortèges électroniques émettent, au plus, des rayons X, alors que les noyaux radioactifs émettent des rayons  $\gamma$ .

Il s'agit de transitions énergétiques :

- lors d'une capture électronique, les électrons des couches profondes du cortège électronique doivent être réarrangés, ce qui donne lieu à l'émission de photons X. Alors qu'une transition énergétique de l'hydrogène donnent lieu au plus à l'émission d'un photon UV (série de Lyman), les électrons de couche  $K$  d'atomes lourds ( $Z > 6$ ) sont plus fortement liés à leurs noyaux et les transitions vers la couche  $K$  appartiennent au domaine des rayons X. Par ex. la transition  $K_\alpha$  de la couche  $L$  à la couche  $K$  du fer émet un photon de  $6,4 \text{ keV}$  ;

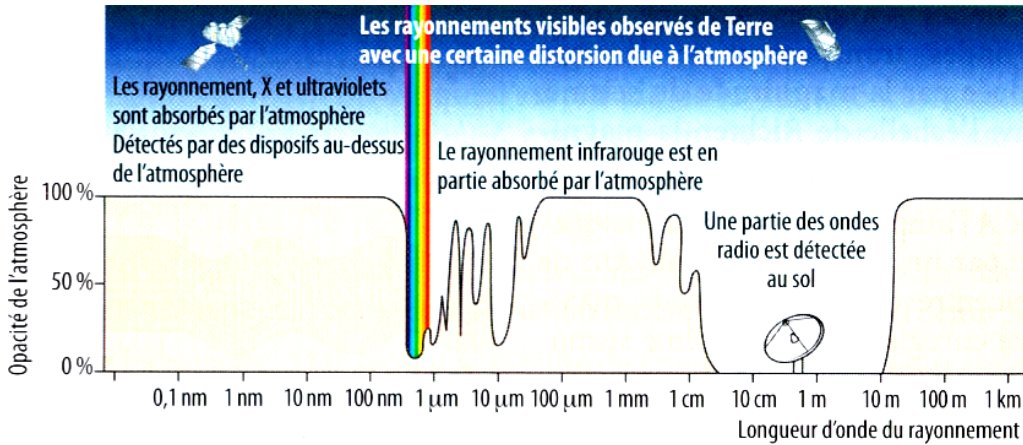


FIGURE 3.5 – Opacité de l'atmosphère terrestre dans différents domaines du spectre EM.

- dans la radioactivité  $\gamma$ , le noyau passe d'un état excité à un état stable quand un ou deux nucléons descendent d'un niveau d'énergie haut à un niveau bas, sans émettre de particule chargée. Les écarts énergétiques correspondants sont au moins de l'ordre d'un MeV ;

(cf. Annexe A pour quelques détails sur la capture électronique et la radioactivité  $\gamma$ ).

### 3.2.3 Absorption

La Figure 3.5 représente l'opacité de l'atmosphère terrestre aux rayonnements EM. On constate que presque tout le spectre est fortement absorbé, avec deux ouvertures dans le domaine devenu "visible" (380 à 780 nm) et dans une partie du domaine radio. Ceci a permis, entre autres, le développement de l'astronomie (avec des instruments au sol) dans ces deux domaines de longueurs d'ondes. La transparence de l'atmosphère dans une fenêtre du domaine radio permet leur utilisation en télécommunications, y compris avec des satellites et des sondes lointaines.

### 3.2.4 Détection des photons et ondes EM

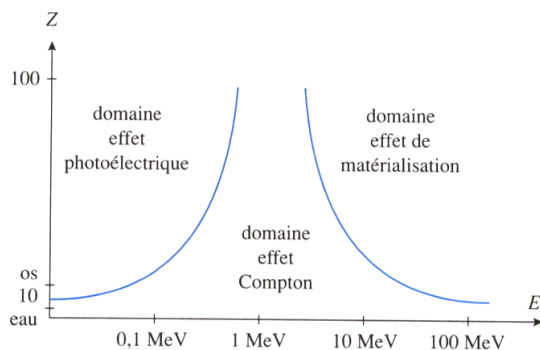


FIGURE 3.6 – Types d'interaction entre matière et rayonnement, en fonction de l'énergie des photons incidents et de la charge ( $Z$ ) des noyaux cibles.

Dans les domaines des ondes radio et des micro-ondes, le principe de détection est similaire au principe de détection des ondes mécaniques : on utilise des antennes, i.e. des oscillateurs électriques pour capter les ondes EM.

Dans le domaine IR, on peut utiliser des bolomètres, i.e. l'intensité d'un rayonnement infrarouge reçu correspond à l'élévation de température du matériau du détecteur.

Dans les domaines de plus faibles longueurs d'onde, on utilise des détecteurs de photons, de principe de fonctionnement variable selon l'énergie des photons à observer (cf. Fig. 3.6) :

- les photons visibles et UV sont détectés par effet photoélectrique dans un matériau semi-conducteur (caméra CCD, photodiode, cellule photovoltaïque). On peut aussi utiliser des tubes photomultiplicateurs, dans lesquels un courant est créé dans une cathode métallique, puis amplifié ;
- pour les rayons X on utilise l'effet photoélectrique, avec des matériaux plus lourds que ceux constituant les caméras CCD ;
- les rayons  $\gamma$  d'énergies inférieures à  $10 \text{ MeV}$  sont observés à l'aide de scintillateurs : un photon incident transmet une partie de son énergie à un électron périphérique (d'un "atome cible" du matériau du détecteur) qui se trouve éjecté et va réagir avec un autre "atome cible" (ainsi de suite jusqu'à épuisement de l'énergie fournie par le photon incident). Un photon diffusé d'énergie moindre est émis par désexcitation de chaque noyau cible ayant réagi ainsi : l'intensité de ce rayonnement de scintillation est une mesure de l'énergie du photon incident ;
- les détecteurs de rayons  $\gamma$  d'énergies supérieures à  $10 \text{ MeV}$  utilisent l'effet de matérialisation. L'énergie du photon incident est suffisante pour être transformée en énergie de masse, i.e. en nouvelles particules, par interaction EM avec des "noyaux-cibles" assez lourds : du tungstène ( $Z = 74$ ) pour des photons de quelques MeV, l'oxygène et l'azote de l'atmosphère pour des photons de quelques TeV. Les produits les plus probables sont une paire  $e^+/e^-$ . La détection de ces particules ionisantes (par effet photoélectrique dans un détecteur solide ; par observation de rayonnements secondaires sinon) permet de mesurer l'énergie et la direction du photon incident.

## Conclusion

À retenir :

- différences entre ondes mécaniques et électromagnétiques ;
- nature et célérité des ondes sonores ;
- définition du niveau sonore ;
- ordre d'arrivée des ondes P, S, L ;
- définition de la magnitude d'un séisme ;
- domaines du spectre électromagnétique ;
- célérité de la lumière dans le vide ;
- définition de l'indice optique d'un milieu dispersif ;
- niveaux énergétiques de l'hydrogène (formule  $E(n)$ ) et noms des principales séries de transitions ;
- principe des méthodes de détection des ondes et des photons.

## Bibliographie

- *DéfiBAC, Physique-Chimie, Tle S*, Ed. Bordas (2012)
- *ABC du BAC, Physique-Chimie spécifique et spécialité*, Ed. Nathan (2013)
- *Physique, Tle C & E*, Ed. Nathan (1989)
- *Physique-chimie, Tle S*, Ed. Nathan (2012)
- *Objectif PCEM, Physique et Chimie générale*, Ed. Hachette supérieur (2006)
- L. Valentin, *Le monde subatomique*, Ed. Hermann (1995)
- *L'éclairage basse tension et très basse tension*, Ed. SAEP (2002)