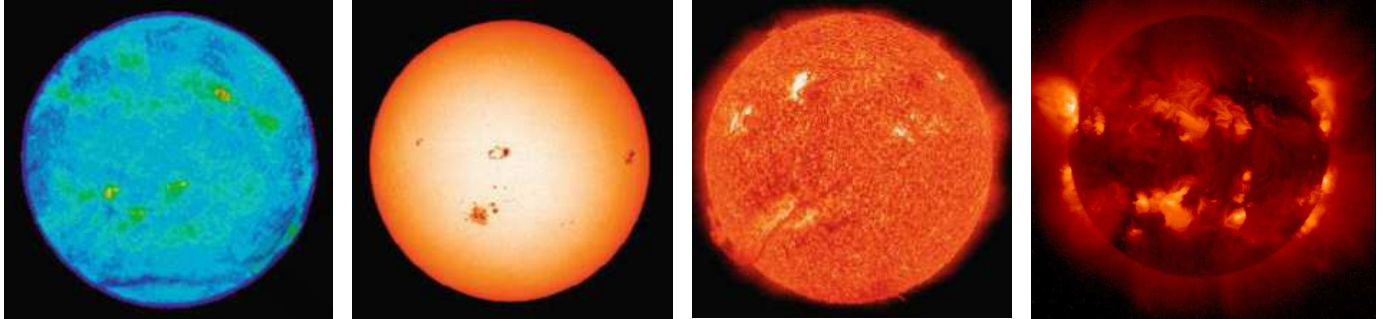


Ondes et particules

Depuis plus d'un siècle, l'étude de rayonnements invisibles venant du Soleil ou d'autres objets célestes nous permet de mieux comprendre l'Univers.



ondes radio

visible

UV

rayons X

Le Soleil, observé au même instant, dans des domaines différents

L'étude des séismes permet de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu et de dégager des méthodes fiables pour la prévention de ces catastrophes naturelles.



Sichuan, 12 mai 2008.

Comment détecte-t-on les ondes et les particules ?

1 - Les ondes dans l'Univers

Le rayonnement est une forme de transfert d'énergie.

Le phénomène physique peut être décrit de manière **particulaire** par la propagation de photons et de manière **ondulatoire** par la propagation d'une onde électromagnétique.

Une onde est la propagation d'une perturbation qui s'accompagne de variations réversibles des propriétés physiques locales du milieu. L'onde véhicule de l'énergie sans transport de matière.

Le spectre des ondes électromagnétiques est composé d'une infinité de radiations ; chacune est caractérisée par sa longueur d'onde dans le vide λ ou par sa fréquence ν .

Dans le vide, les OEM se propagent à la vitesse $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$, ces grandeurs sont liées par la relation $\lambda \times \nu = c$.

1.1 - Sources de rayonnements

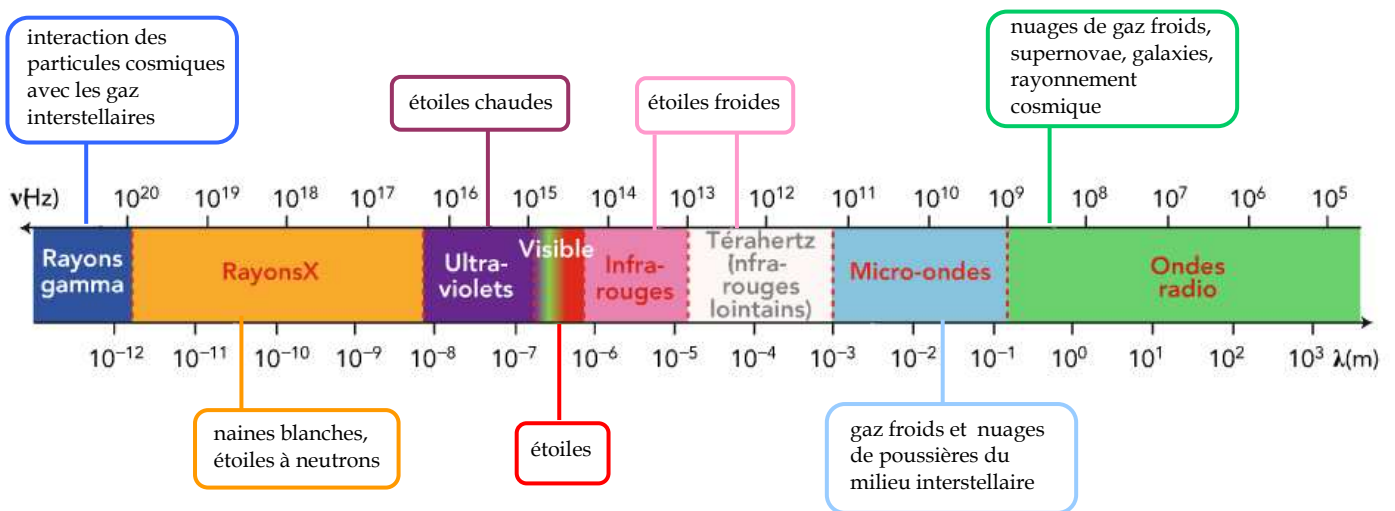
Le spectre des ondes électromagnétiques est découpé arbitrairement en divers domaines, des rayons gamma aux ondes radio. Dans le vide ou dans l'air, les radiations visibles ont des

Observer : ondes et matière

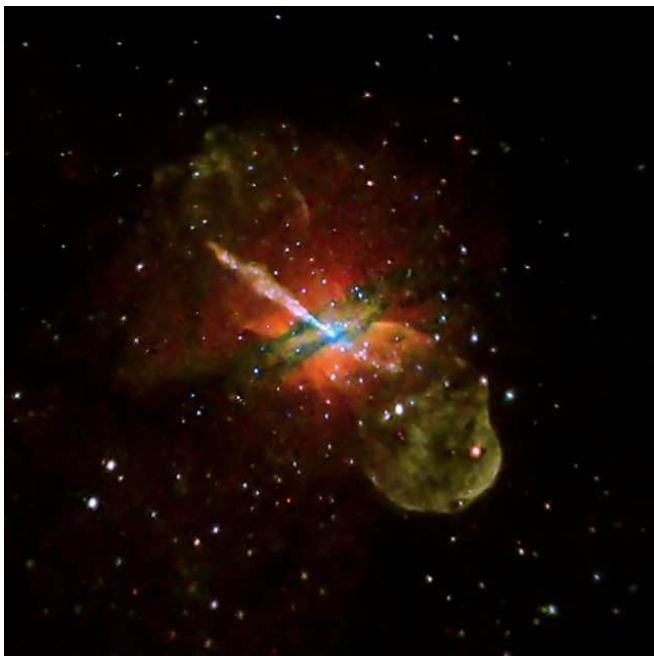
longueurs d'onde comprises entre 400 nm et 800 nm environ. Elles sont limitées par les ultraviolets (UV, $\nu < 400 \text{ nm}$) et les infrarouges (IR, $\nu > 800 \text{ nm}$). Le rayonnement visible n'est donc qu'un rayonnement parmi d'autres, invisibles à l'œil humain.

De nombreuses particules, principalement des protons et des noyaux d'hélium, circulent dans le vide interstellaire ; on parle d'astroparticules, qui constituent le rayonnement cosmique.

Tous les objets célestes émettent des rayonnements dans divers domaines. Il est possible d'associer à certains rayonnements des sources caractéristiques.



L'Homme sait aujourd'hui construire des émetteurs et des détecteurs pour les rayonnements de chacun de ces domaines.

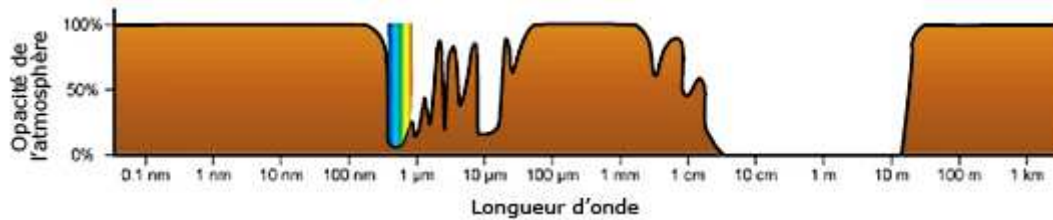


Le télescope spatial Chandra a observé notre galaxie voisine, Centaurus A, dans le domaine des rayons X. Un trou noir serait l'ultime résidu d'une étoile très massive. Problème : comme son nom l'indique, sa gravité est telle que la lumière elle-même ne peut s'en échapper, le rendant ainsi parfaitement invisible... Ce cliché montre indirectement l'existence probable d'un trou noir supermassif au centre de la galaxie : c'est le jet sur la gauche, s'étendant sur 13 000 années-lumière, qui serait la conséquence de l'absorption de matière par le trou noir central.

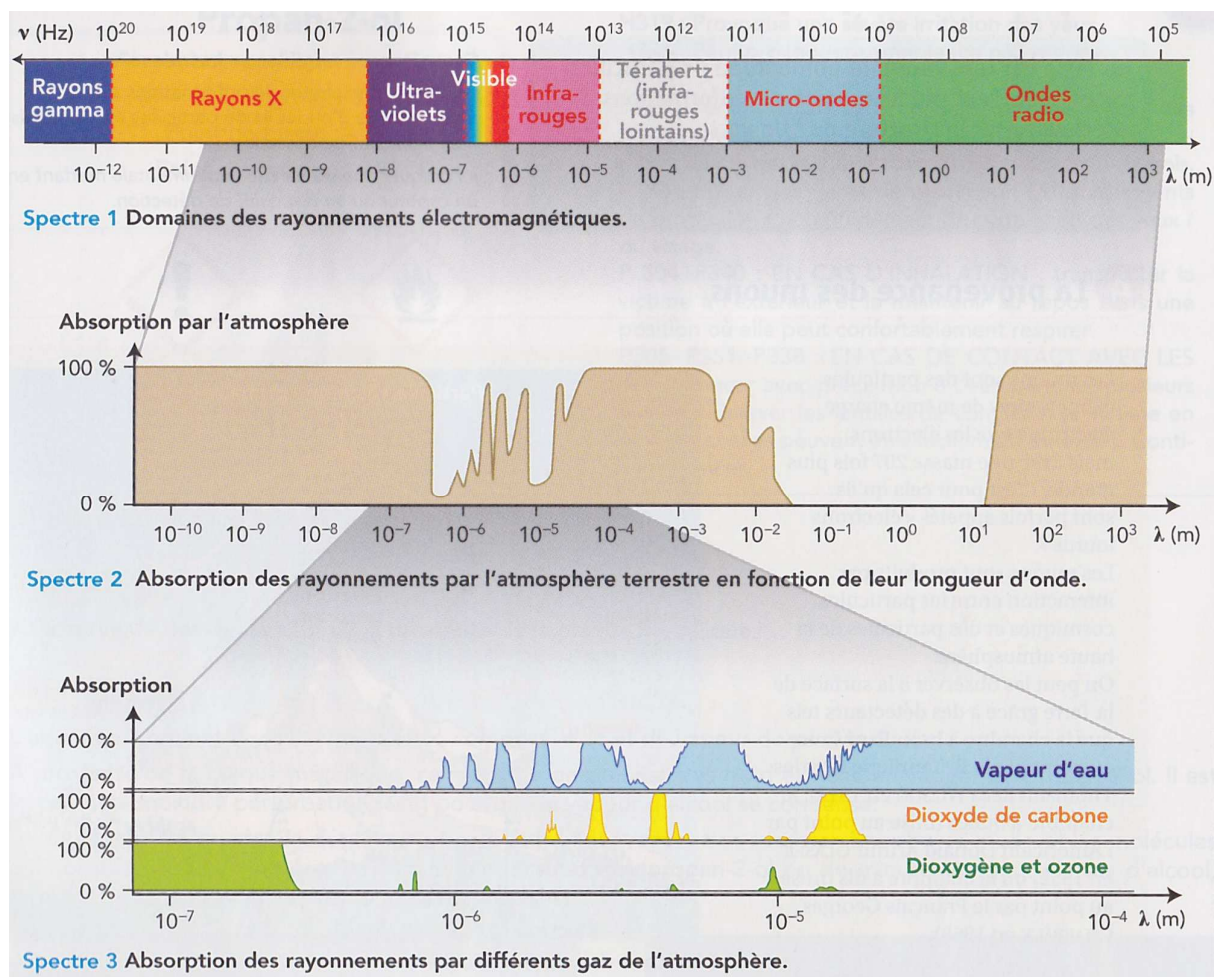
1.2 - Absorption par l'atmosphère

Les divers rayonnements se propagent dans le vide et dans les milieux matériels. La plupart interagissent avec la matière, notamment avec l'atmosphère. Les constituants de celle-ci

- absorbent certaines radiations, ce qui peut gêner les observations astronomiques (utilisation de télescopes spatiaux).
- interagissent avec les astroparticules : des particules secondaires sont alors créées (les plus abondantes au niveau de la mer sont les muons).



On peut constater que l'atmosphère est parfaitement opaque aux rayonnements de courte longueur d'onde (jusqu'aux UV-A) ; elle nous protège ainsi de leurs effets destructeurs. L'atmosphère offre également une fenêtre dans le domaine IR et radio.



2 - Les manifestations des ondes dans la matière

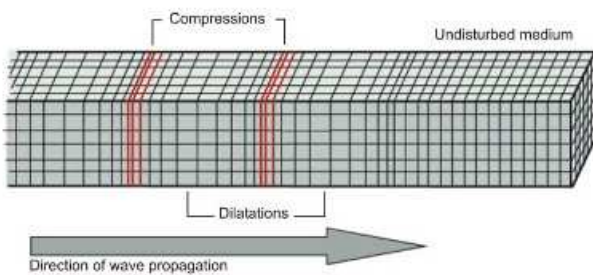
Contrairement aux ondes électromagnétiques, qui peuvent se propager dans le vide, certaines ondes se propagent uniquement dans la matière : ce sont des ondes mécaniques. L'énergie potentiellement colossale qu'elles véhiculent peut être dévastatrice.

2.1 - Les ondes sismiques

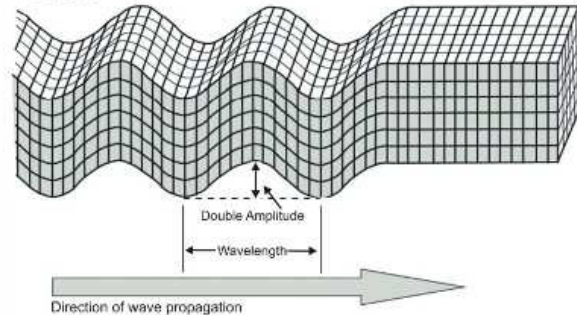
Il en existe différents types.

- Les ondes de volume, parmi lesquelles les ondes P (primaires) dites de compression ou longitudinales, et les ondes S (secondaires) dites de cisaillement ou transversales.

P-wave

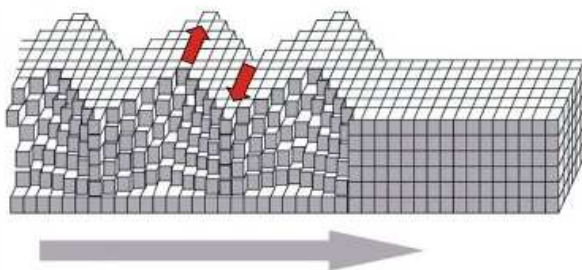


S-wave

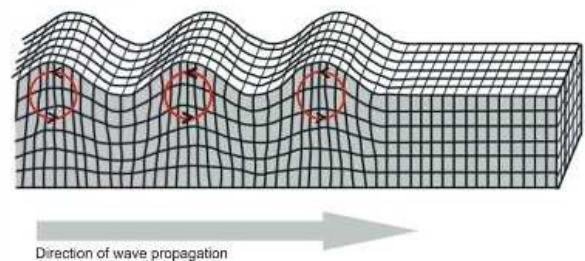


- Les ondes de surface, comme les ondes de Love (horizontales) et les ondes de Rayleigh (à la fois horizontales et verticales)

Love wave



Rayleigh wave



Source : <http://fr.lamit.ro/systeme-avertissement-seisme.htm>

Les vitesses de propagation des ondes ne sont pas les mêmes (6 km/s pour les ondes P, 4 km/s pour les ondes S).

Pour évaluer l'énergie dégagée par le séisme, les médias citent souvent l'échelle de Richter, mais les scientifiques utilisent plus souvent des magnitudes de moment.

L'échelle de Richter a été instaurée en 1935. Elle nous fournit ce qu'on appelle la magnitude d'un séisme, calculée à partir de la quantité d'énergie dégagée au foyer.

C'est une échelle logarithmique : la magnitude, dite de Richter, correspond au logarithme de la mesure de l'amplitude des ondes de volume (de type P et S), à 100 kilomètres de l'épicentre.

La formule utilise le logarithme décimal : $M_L = \log A - \log A_0$ où A représente l'amplitude maximale relevée par le sismographe et A_0 une amplitude de référence.

Ainsi, par exemple, cela signifie que les ondes sismiques d'un séisme de magnitude 6 ont une amplitude dix fois plus grande que celles d'un séisme de magnitude 5.

L'échelle de Mercalli quant à elle est une échelle de classification des séismes. Elle est subjective, fondée sur l'étendue des dégâts observés.

2.2 - Ondes sonores

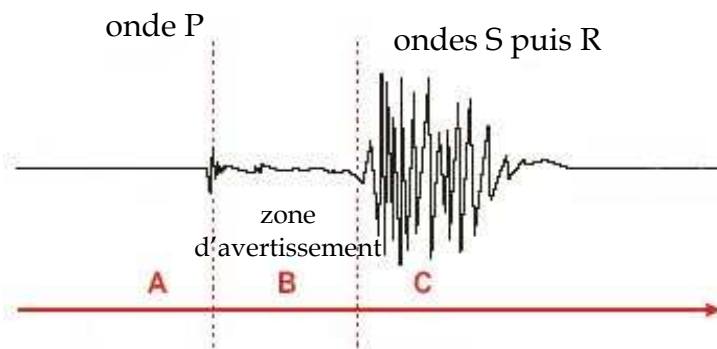
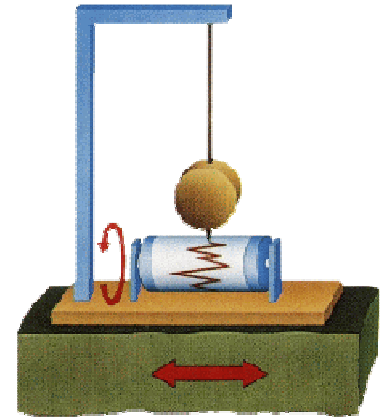
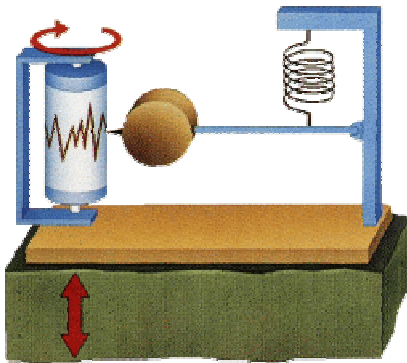
Les ondes sonores sont des ondes de compression et de dilatation (ondes longitudinales). Lorsqu'une telle onde se propage dans un gaz, les atomes et molécules de ce gaz sont plus proches les uns des autres dans certaines zones de l'espace : la pression est alors plus élevée que

la pression moyenne du gaz. Dans d'autres zones, ils sont espacés : la pression est plus faible. Lorsque la variation de pression est très rapide et de grande amplitude, l'onde sonore devient une onde de choc : une telle onde peut être produite par un avion en vol supersonique (au-delà du « mur » du son) ou par une explosion. Ses effets peuvent être considérables : vitres brisées, murs fissurés... Citons par exemple le cas de l'explosion de l'usine AZF à Toulouse.

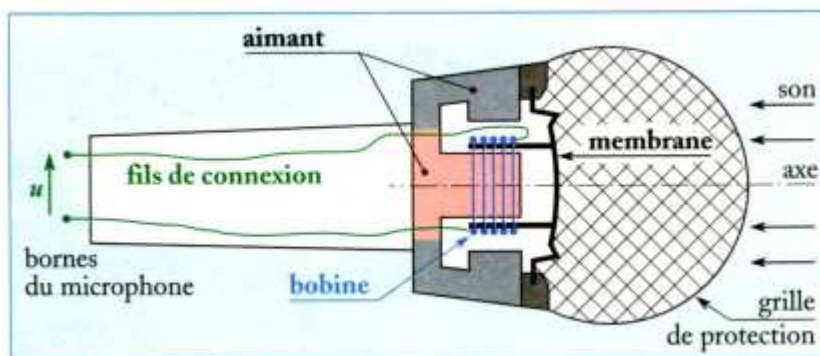
3 - Les moyens de détection

3.1 - Détecter les ondes mécaniques

Ondes sismiques : les sismographes

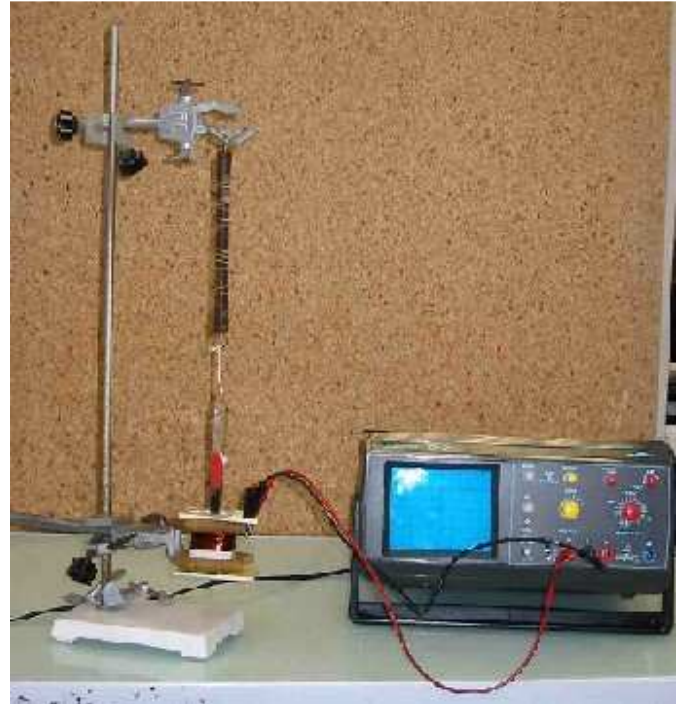


Ondes sonores : le microphone



Dans le microphone, la membrane vibre sous l'action des ondes sonores qu'elle reçoit, de même que la bobine à laquelle elle est reliée. Cette dernière est montée sur un aimant, de telle sorte qu'un courant électrique interne soit généré à chacun de ses déplacements ; le signal électrique ainsi obtenu correspond fidèlement au son capté par le microphone (amplitude et fréquence).

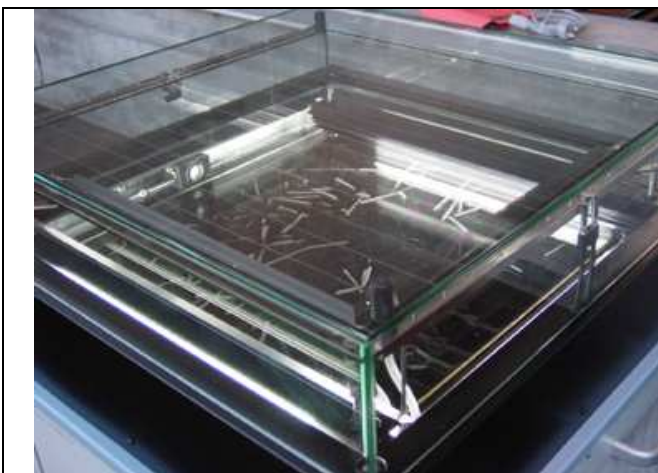
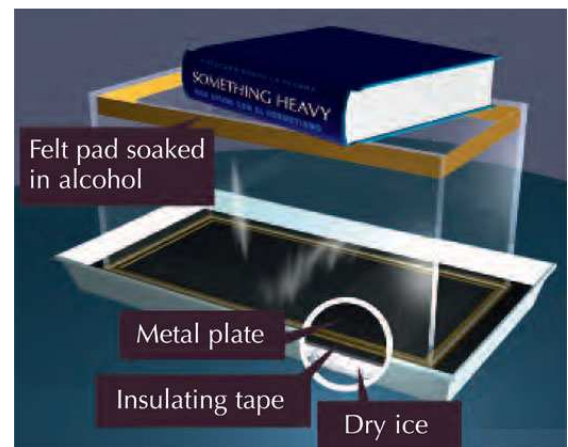
Au laboratoire, un aimant accroché à un ressort et plongeant dans une bobine permet de modéliser le principe : mis en mouvement d'oscillation, l'aimant génère un courant électrique au sein de la bobine, et la tension aux bornes de cette dernière reproduit les oscillations de l'aimant.



3.2 - Détecter les particules

La chambre à brouillard est le premier détecteur de particules imaginé par Charles Wilson en 1895, et pour laquelle il obtiendra le prix Nobel de Physique en 1927.

La chambre contient de l'alcool (propanol) sous forme gazeuse. La vapeur est soumise à une pression et une température où elle devrait juste commencer à se liquéfier : la moindre perturbation la fait passer à l'état liquide. Cette perturbation provient, par exemple, du passage d'une particule : l'alcool se condense, les premières gouttes d'alcool liquide se forment et une trace de brouillard montre la trace de la particule.



Dans les chambres à bulles, développées dans les années 1960, de l'hydrogène surchauffé est maintenu dans un état liquide métastable ; au passage des particules, des bulles d'hydrogène se forment et matérialisent les trajectoires.

La chambre est généralement placée dans un champ magnétique : si la particule est chargée, sa trajectoire est courbée et la mesure de la courbure donne accès à son impulsion, le sens de la courbure à sa charge électrique.



Dans les années 1970, l'électronique prend le relais avec les chambres multifilaires inventées par Georges Charpak (prix Nobel en 1992).

3.3 – Détecter les OEM

Les ondes radio (voir l'expérience de Hertz, 1887)

Pour créer une onde électromagnétique, il faut perturber des charges électriques. Pour détecter ces ondes, on peut utiliser cette observation : un simple fil métallique, qui renferme des électrons libres, peut donc à son tour être perturbé par l'onde et générer un signal électrique permettant d'obtenir les caractéristiques de l'onde reçue.

Pensez aux antennes des voitures, aux antennes TV ou encore aux radiotélescopes : de simples fils conducteurs permettent de capter les ondes électromagnétiques ! Bien sûr, l'antenne peut avoir une forme qui lui permette de ne recevoir que certaines OEM particulières : ainsi, le simple grillage des antennes d'un radiotélescope n'a pas un maillage quelconque (il est plus petit que la longueur d'onde captée).



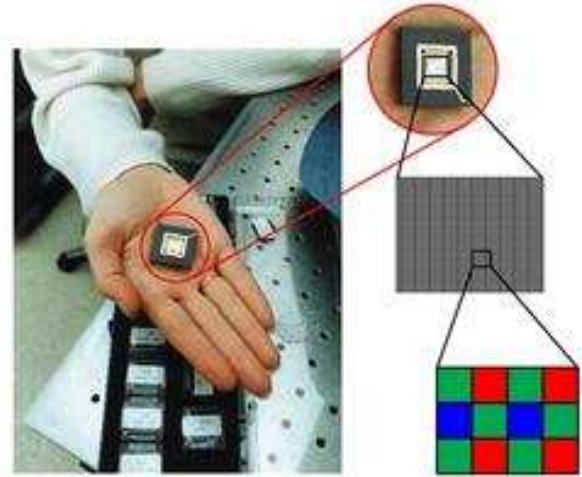
La lumière, et bien plus : le capteur CCD

On distingue plusieurs types de capteurs, le CCD (Charged Coupled Device) étant le plus répandu. Le CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) en représente un dérivé. Fonctionnant selon le même principe, il se distingue avant tout par son procédé de fabrication, similaire à celui des circuits imprimés et microprocesseurs. En conséquence, il possède un faible coût de fabrication et une consommation électrique réduite, ce qui lui donne des avantages de poids dans la conception de photoscopes grands publics peu onéreux. En contrepartie, ce dispositif se montre beaucoup plus sensible au bruit survenant lors de prises de vue dans des conditions de faible luminosité (le CMOS possède une sensibilité environ égale aux deux tiers de celle du CCD).

La surface du capteur CCD est constituée soit de multiples photosites, soit de cellules réagissant à la lumière. Chacun de ces photosites donnera lieu, sur l'image finale, à un point (ou pixel).

Lorsqu'ils sont frappés par les rayons lumineux, ils produisent une impulsion électrique ; celle-ci possède une intensité proportionnelle à la quantité de lumière fournie par lesdits rayons. De même que le film argentique, le CCD possède une sensibilité, que le constructeur donne souvent en équivalent ISO. L'impulsion est par la suite codée sur un octet (suite de huit bits de valeur 0 ou 1, soit 256 possibilités différentes) grâce à un convertisseur analogique/numérique intégré au photoscope. Et... c'est tout ? Pas tout à fait, puisque jusqu'à présent, les photosites n'ont mesuré que la luminance du point (est-ce noir, gris clair, gris foncé... ?) ce qui nous donne une magnifique image... monochrome !

Afin de reconstituer les valeurs de chrominance (est-ce rouge, violet, marron... ?) chaque photosite est recouvert d'un filtre coloré, ne laissant passer que les rayons d'une certaine température (rouge, vert, bleu en synthèse additive, mais également quelques fois cyan, magenta, jaune et noir si le CCD fonctionne en synthèse soustractive). La plupart des capteurs CCD disposent de filtres disposés de la manière suivante : bleu - vert - bleu - vert... sur la première ligne, vert - rouge - vert - rouge... sur la seconde. Ainsi, chaque photosite mesure avec précision l'intensité lumineuse d'une seule couleur primaire.



Il nous manque alors toujours de l'information : les valeurs de rouge et de vert pour les pixels correspondant aux photosites recouverts d'un filtre bleu, de bleu et de vert pour ceux pourvus d'un filtre rouge, etc. Le processeur intégré à l'appareil numérique doit, pour récupérer les mesures manquantes, réaliser une interpolation de couleurs (à ne pas confondre avec l'interpolation de pixels). C'est-à-dire qu'il calcule les informations complémentaires en se basant sur la couleur mesurée par les pixels adjacents. Cette méthode donne lieu à d'excellents résultats la plupart du temps, mais révèle parfois ses limites dans des conditions extrêmes (forts contrastes notamment).

Et voilà, le tour est joué ! Puisque chaque canal de couleur est codé sur un octet, soit 256 valeurs différentes possibles, nous obtenons une étendue de $256 \times 256 \times 256 = 16,8$ millions de couleurs envisageables (c'est le mode true color, ou 24 bits).

<http://www.clubic.com/article-14325-1-la-photographie-numerique-comment-ca-marche.html>

XX^{ème} siècle : scintillateur – photomultiplicateur

Le photomultiplicateur est un dispositif permettant la détection de photons. Il se présente sous la forme d'un composant électronique tubulaire d'une dizaine de centimètres de long. Sous l'action de la lumière, des électrons sont arrachés, par effet photoélectrique, à une photocathode métallique, le faible courant électrique ainsi généré est amplifié par une série de dynodes utilisant le phénomène d'émission secondaire pour obtenir un gain important. Ce détecteur permet de compter les photons individuellement.

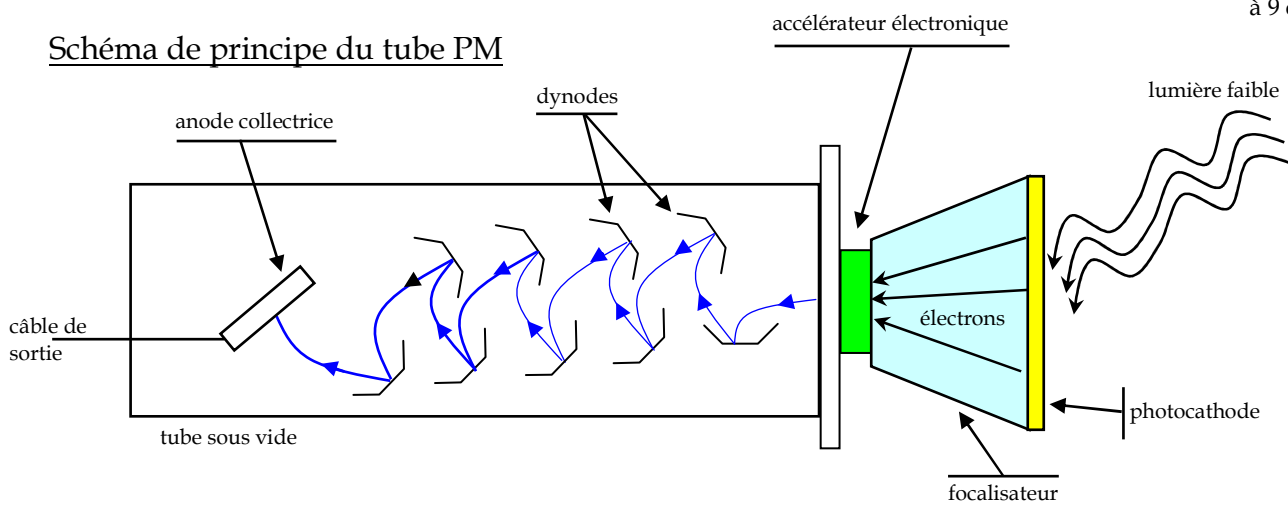
Il est généralement sensible de l'ultraviolet à l'infrarouge proche, avec des temps de réponse de l'ordre de la nanoseconde (soit 10^{-9} seconde).

Le tube PM (pour PhotoMultiplicateur) est utilisé dans la vidéosurveillance civile et militaire dans des conditions de luminosité réduite, tout autant que dans l'astronomie¹, couplé à un amplificateur et à un discriminateur, ou encore en médecine (scintigraphie : la gamma-caméra).



PM 1P128
à 9 étages (dynodes)

Schéma de principe du tube PM



¹ Sur la photométrie en astronomie : <http://www.astrosurf.com/luxorion/photometrie.htm>

Annexe - La découverte des OEM

Au XIX^{ème} siècle, Hans Christian OERSTED découvre qu'il existe un lien entre électricité et magnétisme. Les lois liant ces phénomènes seront étudiées par les grands noms de l'époque : André-Marie Ampère, Michaël Faraday, Jean-Baptiste Biot et Félix Savart. Faraday, expérimentateur de génie, montre en particulier que si un courant électrique a un effet magnétique, réciproquement un aimant peut produire un courant électrique.

Quelques années plus tard, un jeune prodige écossais, James Clerk Maxwell, réutilise les travaux de ses pairs et formalise des équations fondamentales liant électricité et magnétisme. Chose étrange, ses équations prédisent l'existence d'ondes se déplaçant dans le vide, dont il estime la vitesse à une valeur très proche de celle de la lumière dans le vide. En 1864, dans un article intitulé *A dynamic theory of the electromagnetic field*, il risque une hypothèse révolutionnaire : « L'accord des résultats semble montrer que la lumière et le magnétisme sont deux phénomènes de même nature et que la lumière est une perturbation électromagnétique se propageant dans l'espace selon les lois de l'électromagnétisme. »

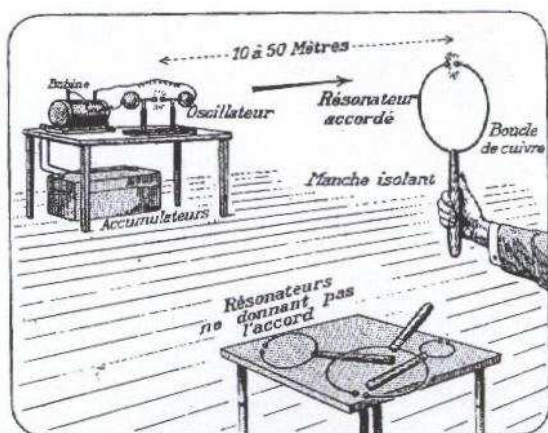
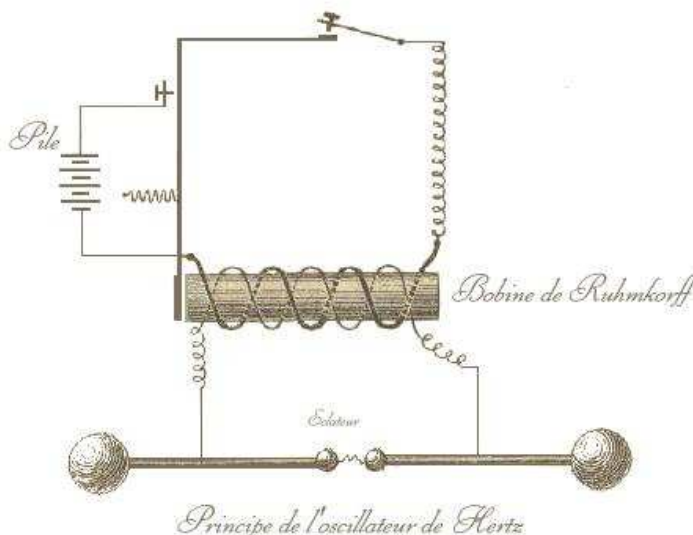
Les premières vérifications expérimentales de la théorie de Maxwell sont obtenues par le physicien allemand Heinrich Hertz en 1887 : il identifie des ondes électromagnétiques non visibles, se propageant à la même vitesse que la lumière, et susceptibles elles aussi de se diffracter, de se réfracter et de se polariser.

Il se construit un excitateur électrique.

L'oscillateur comprend deux sphères de cuivre, d'environ 30 cm de diamètre, reliées par un conducteur rectiligne d'environ 3 m, coupé en son milieu par un éclateur constitué de deux petites sphères dont la distance peut être réglée.

Les sphères sont reliées à une bobine de RUHMKORFF de forte puissance et l'ensemble est isolé de la terre.

Les charges s'accumulent dans les grandes sphères jusqu'au moment où l'étincelle éclate entre les petites sphères de l'éclateur.



Hertz remarque que la fréquence des oscillations des étincelles de l'éclateur (plusieurs millions par seconde) est indépendante de la fréquence de la bobine (quelques milliers par seconde). Ces courants alternatifs de haute fréquence induisent des courants dans un conducteur voisin, le "résonateur", produisant de petites étincelles dans l'éclateur dont il est pourvu. L'excitateur et le résonateur sont les modèles primitifs d'un émetteur et d'un récepteur de radio.

Heinrich Hertz ne vit pas l'application de son dispositif et de sa découverte qui allaient permettre la radiophonie puis les télécommunications au XX^{ème} siècle. Il se contenta de noter que « cela n'a aucune espèce d'application. C'est juste une expérience qui permet de prouver que le maître Maxwell avait raison – nous avons simplement ces ondes électromagnétiques mystérieuses que nous ne pouvons voir à l'œil nu. Mais elles sont là. »

En l'honneur de Heinrich Hertz, les ondes radio sont nommées « hertziennes ».

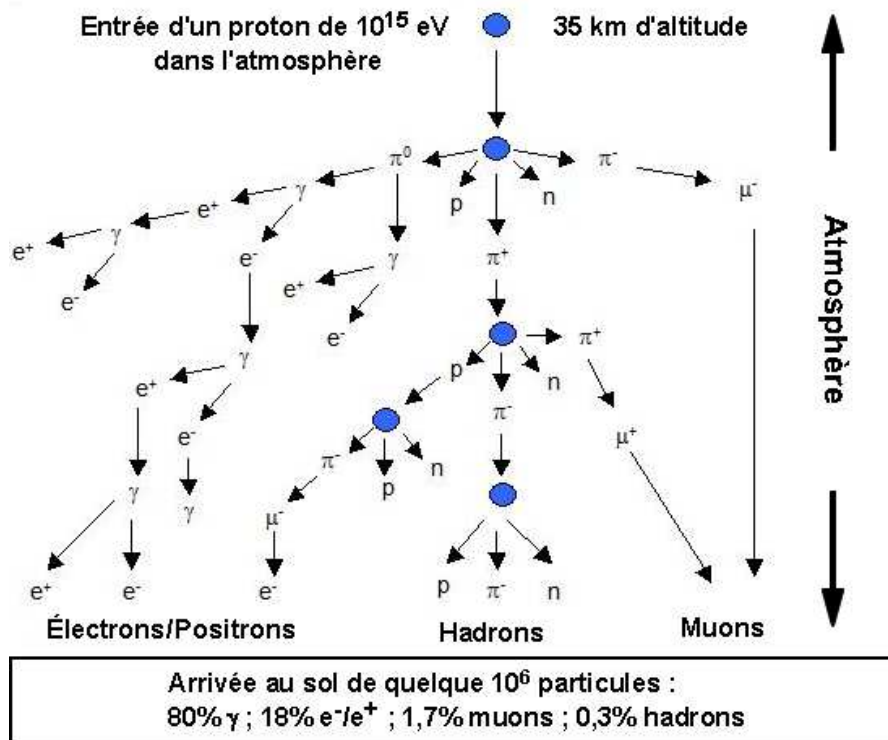
Rayons cosmiques

Le rayonnement cosmique est un flux de particules chargées très rapides en provenance du milieu interstellaire. Ces astroparticules sont surtout des protons (85%), des noyaux d'hélium (14%), des électrons (1%) et d'autres noyaux atomiques ; sa partie neutre est constituée de photons gamma et de neutrinos.

L'énergie des astroparticules est typiquement de 1 GeV (l'énergie qu'aurait un électron accéléré par une tension électrique de un milliard de volts), mais elle monte parfois jusqu'à 10^{11} GeV.

Ces particules pourraient avoir été accélérées lors d'explosions de Supernovae. Le Soleil émet aussi des particules de haute énergie, mais généralement très inférieure au GeV.

Les rayons cosmiques de haute énergie provenant de l'espace qui frappent l'atmosphère terrestre représentent une véritable énigme. Ces rayons se désintègrent en créant de spectaculaires gerbes de particules qui peuvent être détectées au sol.



De tels rayons à très haute énergie, supérieure à $7 \cdot 10^{19}$ eV, sont très rares : seulement quelques événements par kilomètre carré et par siècle, et quelques dizaines d'observations dans le monde depuis 1962. Pourtant, leur simple existence est un défi pour le physicien théoricien. En effet ces rayons cosmiques sont supposés être des protons. Mais cette supposition, la plus naturelle, se heurte à une difficulté. Les protons de très haute énergie parcourant de grandes distances dans l'espace sont en quelque sorte freinés par le gaz de photons très diffus qui forme le fameux rayonnement de fond cosmologique à 3 K, témoin fossile du "big bang". Cet effet, appelé coupure de Greisen-Zatsepin-Kuz'min (GZK) devrait supprimer complètement les rayons cosmiques de très haute énergie, ou du moins ceux émis par des sources lointaines, réparties sur des distances dites "cosmologiques" (celles qui se mesurent en centaines de millions d'années lumière). Or, les quelques observations dont on dispose ne montrent pas du tout une telle coupure, mais bien au contraire une certaine remontée relative de ces événements de très haute énergie.

Annexe - Astronomie gamma

Les rayons gamma les plus énergétiques (> 30 GeV) peuvent aussi être détectés depuis le sol. Les photons gamma arrivant dans l'atmosphère interagissent avec la haute atmosphère et produisent des gerbes de particules ultra-relativistes (cascade électromagnétique). Ces particules vont plus vite que la vitesse de la lumière dans l'air. Elles émettent alors un rayonnement électromagnétique (lumière) par effet Čerenkov (équivalent du bang supersonique pour la lumière). Cette lumière, qui est émise dans le bleu et l'UV proche, se propage jusqu'au sol où elle peut être détectée.

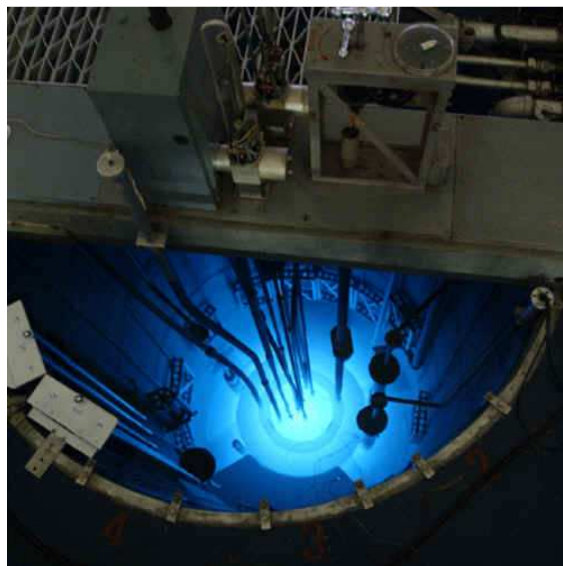
Cette lumière bleutée se propage en formant un cône autour de la direction de la particule qui la provoque. Le nombre de photons Čerenkov diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne de l'axe de la trajectoire de la particule. D'autre part, la grande énergie du rayon cosmique incident fait que les particules de la gerbe qu'il provoque sont groupées. Toute la lumière Čerenkov émise par la gerbe arrive donc au niveau du sol regroupée dans un 10 ns (un 100-millionième de seconde) sur un disque de seulement 250 m de diamètre environ. Le réflecteur optique du télescope à imagerie Čerenkov atmosphérique collecte cette lumière au niveau du sol et la focalise sur la caméra. Une analyse de la forme de l'image obtenue permet de déterminer la direction incidente et l'énergie du rayon cosmique ainsi que de distinguer la nature du rayon cosmique. La résolution angulaire de la camera ($\sim 0,1$ degrés) permet de visualiser la forme de la gerbe atmosphérique induite par un rayon cosmique. On parle d'imagerie puisque qu'on obtient l'image d'une gerbe.

Cette technique est en particulier utilisée pour la détection des rayons gamma de haute énergie, qui produisent des gerbes purement électromagnétiques qui sont fines et symétriques. Les noyaux atomiques interagissent de façon hadronique avec l'atmosphère et produisent des gerbes plus éclatées et dissymétriques.

La technique d'imagerie Čerenkov atmosphérique a permis le développement d'une nouvelle astronomie gamma aux énergies supérieures à 100 GeV. Le télescope pionnier est le télescope de 10 m de l'observatoire Whipple qui détecta pour la première fois une source gamma (la Nébuleuse du Crabe) dans ce domaine d'énergie. À l'heure actuelle (2009), près d'une centaine de sources ont été mises en évidence grâce à cette technique. Les principaux observatoires sont le projet américain VERITAS et les projets européens HESS et MAGIC.

Zoom sur l'effet Čerenkov

Effet Čerenkov observé dans la piscine d'un réacteur nucléaire



Dans un milieu matériel, la lumière se déplace à une vitesse $v = \frac{c}{n}$, où c est la vitesse de la lumière dans le vide et n est l'indice de réfraction du milieu. Une particule chargée peut se déplacer dans ce milieu à une vitesse v' supérieure à v . La particule chargée interagit, tout au long de sa trajectoire, avec le milieu qu'elle traverse en perturbant temporairement la polarisation des couches électroniques des atomes rencontrés, ce qui provoque une émission radiative. Chaque atome rencontré par la particule devient donc émetteur d'un rayonnement à son passage. Or l'onde émise se propage à la vitesse v inférieure à v' . L'interférence des ondes émises par chaque atome perturbé est alors constructive ; un front d'onde cohérent apparaît sous la forme d'un cône de lumière. La fréquence de cette onde constructive correspond généralement, pour l'effet Čerenkov dans l'eau, à celle du bleu ou de l'ultraviolet.

L'analogie entre l'effet Tcherenkov et l'onde de choc est facile à faire. Un avion se déplaçant plus vite que le son dans l'air crée une onde de choc sur laquelle toutes les ondes sonores se retrouvent. La correspondance avec l'effet Čerenkov se fait en remplaçant l'avion assimilé à un point par une particule chargée et le son par la lumière. L'étude du nombre de Mach fournit un cadre de pensée qui est directement applicable ici.