

ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

1. Vitesse de la lumière

Depuis Einstein, nous savons que la vitesse de la lumière est une **constante universelle**. On note cette constante **c** qui signifie **célérité**.

La lumière est une onde électromagnétique qui se déplace à une vitesse constante d'environ 300 000 km/s. **Aucun objet ne peut se déplacer plus vite**. Les ondes électromagnétiques sont caractérisées par une longueur d'onde λ (lambda) et une fréquence notée ν .

1.1 Formules

Les relations reliant ces grandeurs sont les suivantes :

1.2 Valeurs

$h = 6,64 \times 10^{-34}$ J.s

$c = 3,00 \times 10^8$ m.s⁻¹

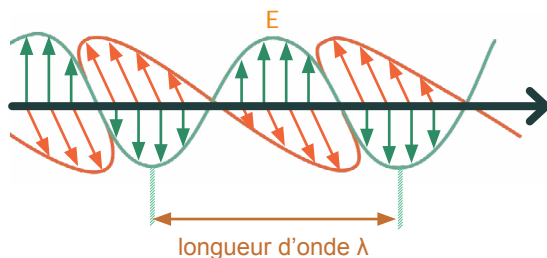


schéma de la propagation d'une onde

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$T = \frac{1}{\nu}$$

λ longueur d'onde (m)

c vitesse de la lumière (m.s⁻¹)

ν fréquence de l'onde en hertz (Hz)

T période en seconde (s)

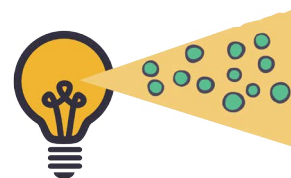
h constante de Planck en Joule seconde (J.s)

2. Dualité onde-corpuscule

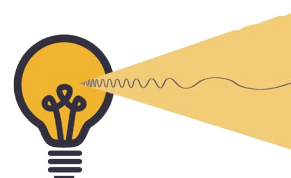
Les théories sur la lumière ont évolué au cours des siècles. D'une lumière composée de petites particules (**théorie corpusculaire de Newton**), on passe à une onde électromagnétique (**théorie ondulatoire de Maxwell**). Cependant, en 1887, Heinrich Hertz découvre l'effet photo-électrique. Cette expérience ne peut être interprétée en utilisant la théorie ondulatoire. Ce n'est qu'en 1905, qu'Einstein et Planck expliquent cette expérience en utilisant une théorie corpusculaire de la lumière. Cette petite particule de lumière est appelée **photon**.

Aujourd'hui, les scientifiques pensent que la lumière est à la fois composée de particules de masse nulle appelées **photons** et d'une **onde électromagnétique**. On parle alors de **dualité onde-corpuscule**.

Une relation lie à la fois l'onde et la particule, cette relation est la suivante :



théorie corpusculaire



théorie ondulatoire



dualité
onde-corpuscule

$$E = h \times \nu$$

E énergie de la particule « le photon » (J)

ν fréquence de l'onde en hertz (Hz)

h constante de Planck en Joule par seconde (J.s)

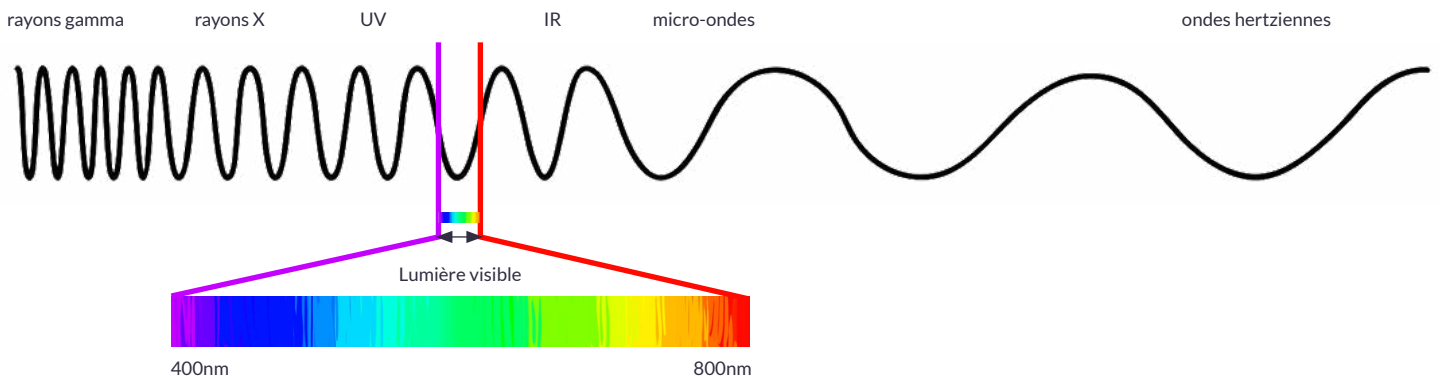


3. Types d'ondes électromagnétiques et applications

La lumière visible n'est qu'une **infime partie** des ondes électromagnétiques.
Il existe 8 types d'ondes électromagnétiques :

Note :
ces ondes se déplacent dans le vide à la vitesse de $3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.
On a l'habitude d'appeler cette vitesse **célérité**.

- les rayons gamma
- les rayons X
- les ultra-violetts (UV)
- le visible (de 400 nm à 800 nm)
- les infrarouges (IR)
- les micro-ondes
- les ondes hertziennes



Ces ondes sont mises à profit dans les objets du quotidien :

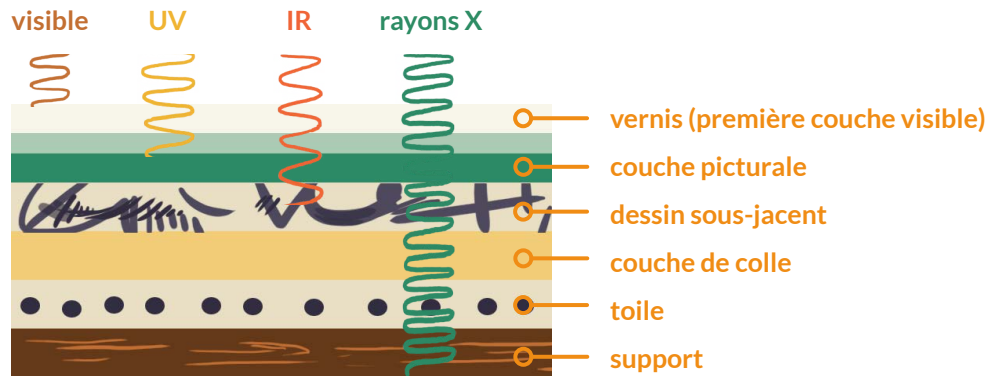
Ondes	rayons gamma	rayons X	ultra-violetts
Applications	- scintigraphie (technique d'analyse médicale)	- radiographie - analyse de toiles - sécurité des aéroports	- lampes bronzage - détection de faux billets - état du vernis

Ondes	infrarouges	micro-ondes	ondes hertziennes
Applications	- lampe de chauffage - télécommande - caméras nocturnes - repeints	- four de cuisine - wifi - téléphone portable	- radio - TNT - communication par satellite



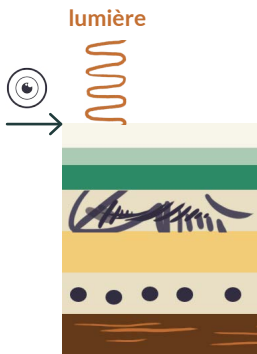
4. Utilisation des rayons

À l'heure actuelle, les sciences appliquées aux arts progressent continuellement. De nombreuses techniques permettent d'obtenir des informations sur une œuvre d'art. La préservation de l'œuvre est essentielle, les techniques utilisées doivent être non-destructives et les restaurations devront être réversibles. Les ondes électromagnétiques ne pénètrent pas toutes dans la matière de la même manière. Certaines ondes donnent des informations sur les couches profondes de la peinture et d'autres sur les couches superficielles.



coupe d'un tableau, différentes couches

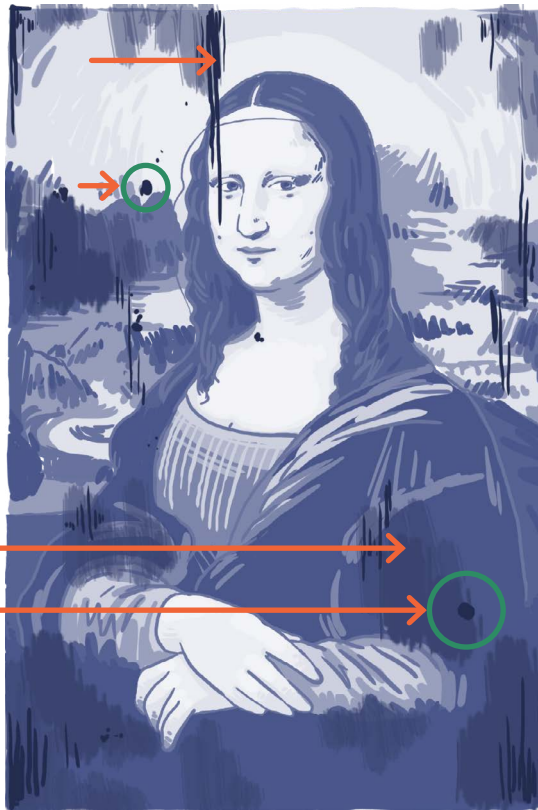
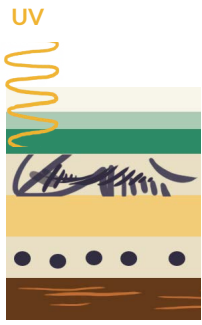
Exemple avec le tableau *La Joconde*, Léonard de Vinci, 1503-1506, huile sur bois, Musée du Louvre.



4.1 La lumière visible

Dans un premier temps, le tableau est analysé sous lumière **visible rasante**. Ce mode d'observation de l'œuvre met en évidence toutes les **aspérités** de la surface, les craquelures et les reliefs.





4.2 Les ultra-violet

Les UV ne pénètrent pas en profondeur, ils s'arrêtent sur la **couche picturale**. Ils ont pour effet de rendre fluorescente la couche de vernis, permettent de déceler les **retouches** (importance du vernis, homogénéité, restaurations récentes et maquillages).

repeint

restauration après le lancer d'un projectile en 1956



4.3 Les infrarouges

Les IR traversent la couche picturale: ils sont renvoyés par la couche de colle ou absorbés par le carbone (C) contenu dans le dessin sous-jacent. Ils révèlent le dessin de l'artiste.

apparition esquisse

rayons X



veines de bois de peuplier (si la Joconde avait été peinte sur toile, on aurait vu le châssis de bois ainsi que les clous.)

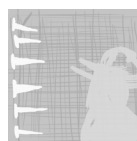


vue d'artiste de la Joconde sous rayons X

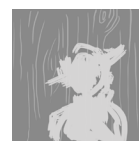
4.4 Les rayons X

Les rayons X traversent toutes les couches du tableau. Certains rayons X sont absorbés par les éléments lourds (de masse molaire importante comme le plomb). D'autres traversent le tableau lorsqu'ils rencontrent des éléments légers (de masse molaire atomique faible comme le carbone, l'hydrogène...).

Les rayons X, qui traversent les différentes épaisseurs du tableau, atteignent une plaque photosensible qui devient noire (présence d'atomes d'argent). En fonction de la densité des matériaux utilisés, ils permettent d'observer la constitution et les caractéristiques du support, l'état de la couche picturale, les réutilisations de toiles, la technique du peintre, la présence d'agrafes, ...



clous dans un châssis



veines du bois

Rmq : La taille et la nature des pigments ou des liants sont caractéristiques de certaines époques et de certains lieux.

5. Techniques d'analyse

5.1 Utilisation d'un faisceau d'ion

Certaines techniques permettent de connaître la composition chimique de la peinture. Quand un matériau est exposé à un faisceau d'ions, l'objet réagit et produit un rayonnement électromagnétique. Sa nature donne des informations sur les constituants de la peinture.

5.2 Rayons X

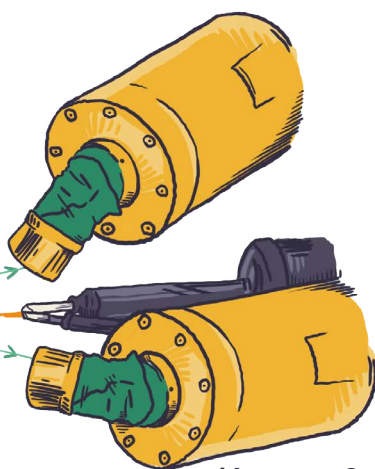
On parle de méthode PIXE (Particle Induced X-Ray Emission) lorsque les rayonnements utilisés sont des rayons X. La méthode PIXE consiste à envoyer des particules sur l'objet à analyser. Les particules (atomes d'hélium, d'hydrogène...) vont exciter les atomes de l'objet. Ceux-ci émettent alors un rayonnement électromagnétique qui est analysé par un ou plusieurs détecteurs. On obtient un spectre.

détecteur 1



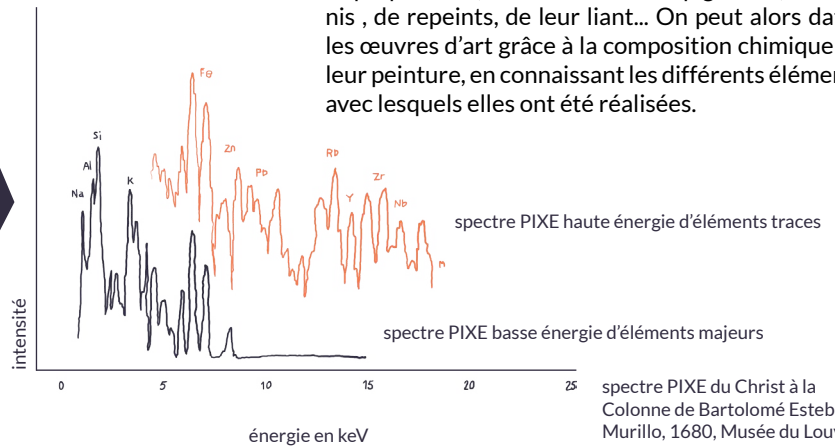
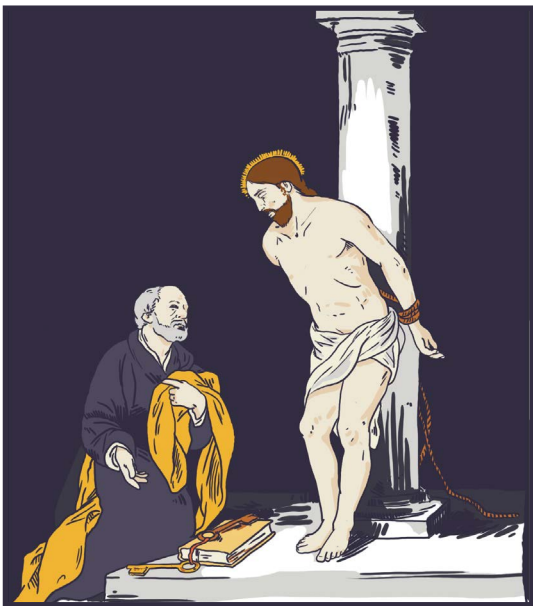
faisceau d'ions ou de particules

rayons X

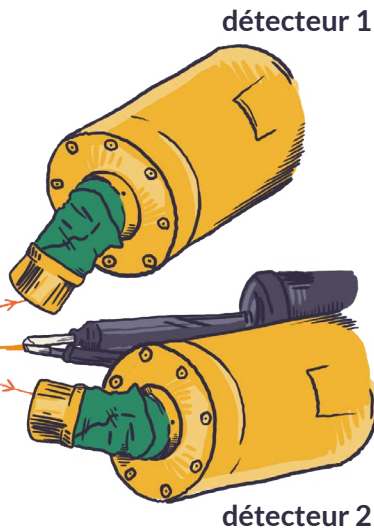
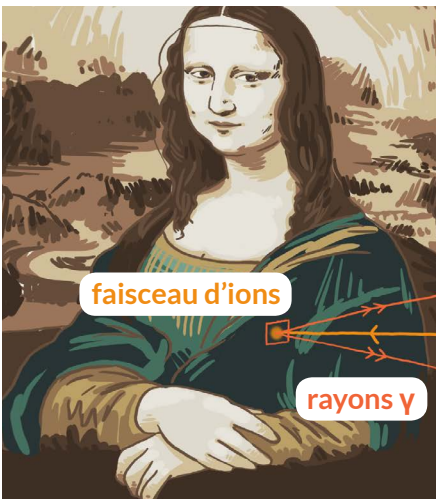


détecteur 2





Le rayonnement électromagnétique est analysé et retransmis en un spectre. Le but essentiel de l'analyse est l'identification des matériaux constitutifs de l'objet. Dans le cas d'un tableau, cette méthode permet de connaître la composition du support, de sa préparation, de ses couches de pigments, de vernis, de repeints, de leur liant... On peut alors dater les œuvres d'art grâce à la composition chimique de leur peinture, en connaissant les différents éléments avec lesquels elles ont été réalisées.



5.3 Rayonnements gamma (γ)

On parle de méthode **PIGE (Particle Induced Gamma-Ray Emission)** lorsque les rayonnements utilisés sont des rayons gamma.

Les deux méthodes, PIXE et PIGE sont souvent utilisées de façon complémentaire pour mener une étude approfondie de la composition chimique des œuvres d'art (bijoux, gemmes, céramiques, encres, pigments,...)

Les grandes étapes de l'analyse

1. ÉTUDE DE L'ŒUVRE

La célèbre sculpture en verre de la Tête bleue (collection égyptologique du Louvre) a été acquise en 1923. Elle a été analysée en 2001.

2. ANALYSE ÉCHANTILLON

Son matériau principal, le verre, a été analysé chimiquement avec des rayons X et gamma. On a décelé la présence d'oxyde de plomb PbO (28%) et d'oxyde d'arsenic As_2O_3 (6%) en quantités plus importantes que les objets de la même époque.

3. VERDICT

Ces éléments chimiques étaient beaucoup utilisés entre 1920 et 1923, ce qui a permis de qualifier cette œuvre de **faux**.

6. Datation d'une œuvre d'art

Les ondes électromagnétiques peuvent également permettre aux physiciens de dater des œuvres d'art : il s'agit de la **thermoluminescence**. Mais il existe d'autres techniques plus précises.

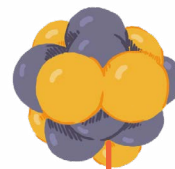
6.1 La luminescence

La céramique va être chauffée. L'élévation de température provoque une production de lumière nous permettant de dater la céramique. Au cours du temps, une céramique est exposée à des particules radioactives. Ces particules peuvent provoquer le passage des électrons dans un état métastable. L'élévation de température de l'objet va permettre le passage des électrons d'un niveau d'énergie métastable vers un niveau de haute énergie peu stable. L'électron va retourner dans un état de basse énergie stable libérant ainsi de la lumière.

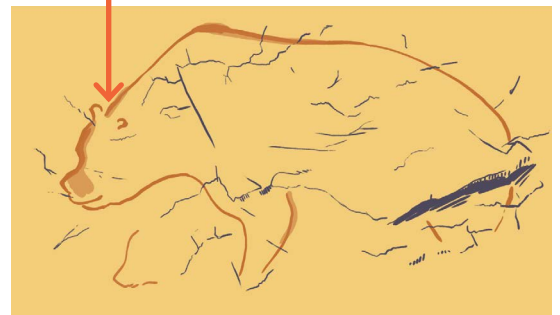
La thermoluminescence permet de dater des roches terrestres (pots, vases). Ce principe de datation présente l'avantage de pouvoir dater des sites très anciens comme le paléolithique moyen où le carbone 14 atteint ses limites. Il est néanmoins peu précis.

6.2 Le carbone 14

Les matériaux organiques contiennent tous le même élément : le **carbone (C)**. Celui-ci se présente sous plusieurs formes appelées isotopes, ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C . Il s'agit d'atomes de carbone contenant le même nombre de protons (6) mais des nucléons différents (12, 13, 14). Seul le carbone 14 est radioactif et se transforme progressivement. Les plantes absorbent le dioxyde de carbone (contenant le carbone 14) pour leur croissance : c'est la photosynthèse. Aussi longtemps que la plante vit, elle continue de prélever du ^{14}C . Quand la plante meurt, la quantité de ^{14}C diminue au cours du temps. En déterminant la quantité restante de carbone 14 dans un échantillon, on peut déterminer la date de la mort de la plante ou de l'animal. Il est nécessaire de prélever un échantillon pour l'analyse. Cette méthode est donc **destructive**. Le carbone 14 est utilisable pour des matériaux datant de 500 à 70 000 ans environ.

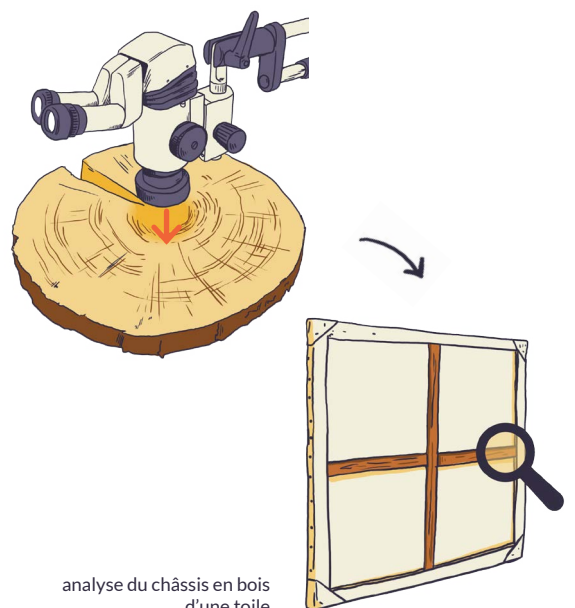


Le carbone 14 contenu dans la peinture de la fresque de l'Ours de Chauvet a permis de savoir que ces peintures sont plus anciennes que celles de Lascaux.



6.3 La dendrochronologie

La dendrochronologie est la méthode la plus précise puisqu'elle date des fragments de bois à l'**année près** en mesurant la largeur des **cernes du bois**. Elle nécessite néanmoins des échantillons de référence. Cette méthode est non-intrusive mais elle ne permet de dater que des supports en toile sur châssis. On doit alors émettre l'hypothèse que la peinture a été réalisée dans un court délai après l'abattage de l'arbre.



analyse du châssis en bois d'une toile