

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université A.Mira de Bejaia



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة عبد الرحمان ميرة- بجاية

Séparation radiométrique et optique

M1 VRM

Mme KICHER

Année universitaire 2019/2020

SOMMAIRE

I. Généralités

I.1. Notions générales sur les minéraux

I.2. Classification des procédés de traitement des minéraux utiles

II. La séparation radiométrique

II.1. Introduction

II.2. La radioactivité

II.2.1. Atomes et noyaux radioactifs

II.2.2. L'instabilité du noyau d'un atome radioactif:

II.2.3. Fission et fusion nucléaires

II.2.4. Décroissance radioactive

II.2.5. Activité d'une source radioactive

II.3. Types de la séparation radiométrique

II.3.1. La méthode d'émission radiométrique

II.3.2. La méthode d'absorption radiométrique

II.3.3. Avantages et inconvénient de la séparation radiométrique

III. La séparation optique

III.1. Notion de base sur la couleur

III.2. généralités sur le rayonnement électromagnétique

III.3. La lumière naturelle et artificielle

III.4. La séparation optique

III.5.1. Principe de fonctionnement de la séparation optique

- a.** *Le domaine de l'infrarouge*
- b.** *Le domaine infrarouge et son système de mesure.*
- c.** *Source de radiations infrarouges*
- d.** *L'environnement.*

- e. Détecteurs.*
- f. Principes de fonctionnement*

III.5.2. Le procédé de la séparation optique

- a. Principe du fonctionnement*
- b. Processus d'éjection du matériau à trier*

III.5.3. les caractéristiques considérées la séparation optique

III.5.4. Conditions du tri

I. Généralités

I.1. Notions générales sur les minéraux

- **Définition :**

Un minéral est une Espèce chimique naturelle inorganique se présentant le plus souvent sous forme de solide cristallin.

On distingue 3 groupes de minéraux du point de vue de leur utilisation:

- **Métallique :** les métaux ferreux, métaux de base, métaux de haute technologie, les métaux précieux;
- **non métallique :** matériaux de construction, minéraux industriels, les pierres précieuses et les pierres fines;
- **Combustibles :** les éléments radioactifs, le pétrole et le charbon.

Tableau : Classification des ressources minérales en fonction de leurs utilisations.

Minerais métalliques	Métaux ferreux (utilisé dans la fabrication d'acier)	Fer
		Chrome
		Manganèse
		Nickel
		Molybdène
	Métaux de base (métaux communs, utilisé dans l'industrie)	Cuivre
		Zinc
		Plomb
		Étain
		Antimoine
		Cobalt
	Métaux de haute-technologie	Gallium
		Lithium
		Niobium
		Platine (et autre métaux de ce groupe)
		Tantale
		Terres-rares
		Titane
	Métaux précieux	Or
Platine		
Argent		
Autres	Aluminium	
Sources d'énergie	Uranium, pétrole, gaz, charbon	
Matériaux de construction	Sables, graviers, argiles	
Minéraux industriels	Silice, kaolin, gypse, talc, potasse, phosphate, sillimanite	
Pierres précieuses	Diamant, émeraude, opale, rubis, saphir	
Pierres fines	Agate, améthyste, béryl, grenat, jade, lapis-lazuli, malachite, topaze, tourmaline, turquoise, zircon	

Note : cette classification est indicative mais certains éléments ne peuvent pas être rangés dans une seule catégorie : le nickel est à la fois un métal de base et un métal ferreux ; le titane est à la fois un métal ferreux et un métal de haute-technologie.

Un minerai est un ensemble rocheux contenant des substances utiles en quantité suffisante pour justifier une exploitation. On entend par : « pour justifier une exploitation », l'existence d'une technique permet d'extraire la substance utile avec profit en respectant l'environnement.

Un traitement est économiquement rentable s'il existe une technologie appropriée. Le traitement doit tenir compte du respect de l'environnement. Par exemple le minerai de fer se compose de minéraux suivants: magnétite, hématite, quartz. Deux premiers sont utiles et le dernier est inutile du point de vue de la sidérurgie.

I.2. Classification des procédés de traitement des minéraux utiles

La préparation mécanique du minerai

- *Le concassage*
- *Le broyage*
- *le débouillage*
- *Le criblage*

Enrichissement

Cette opération permet de concentrer les minéraux utiles sous forme de concentré. Dans cette opération, on sépare les minéraux de valeur des minéraux non utiles (gangue).

- *Le triage à la main est utilisé dans les mines artisanales.*
- *la séparation gravimétrique et densimétrique,*
- *la flottation,*
- *la séparation magnétique,*
- *la séparation optique*
- *La séparation radiométrique*
- *la séparation électrique,...*

L'option d'un procédé dépend des caractéristiques physiques et des propriétés spécifiques des minéraux à séparer.

II. La séparation radiométrique

II.1. Introduction

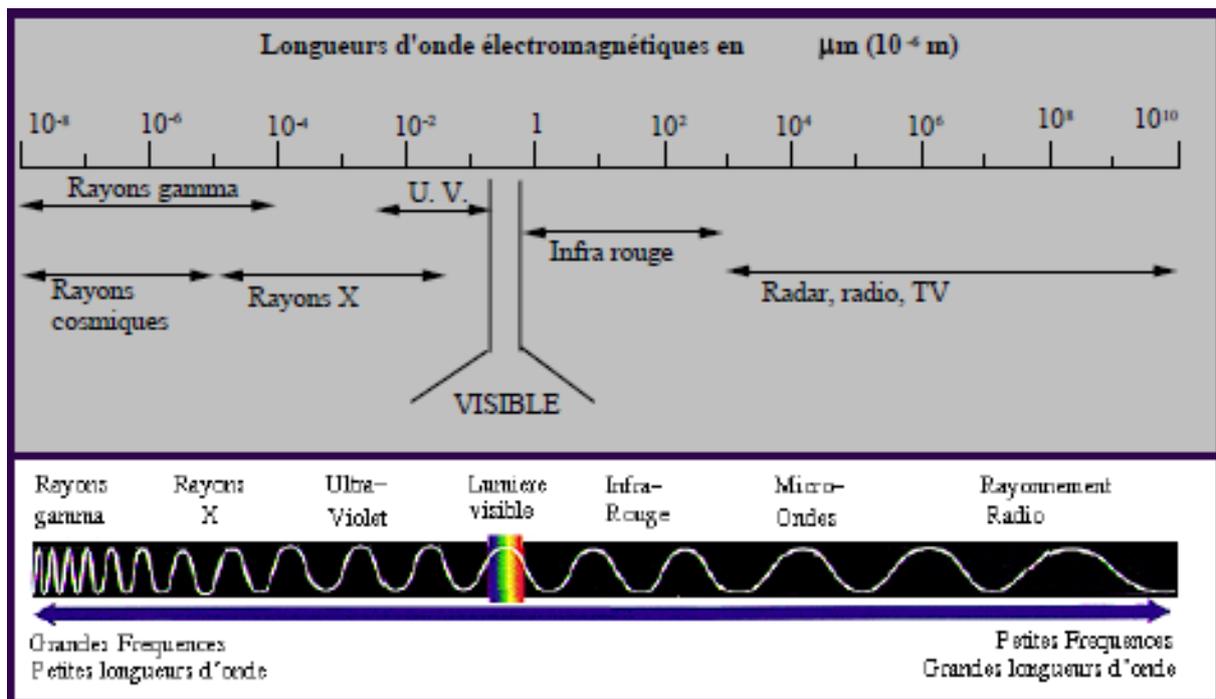
La séparation radiométrique est une nouvelle technique de séparation de substances utiles de la gangue. Elle est écologiquement propre.

Cette méthode se base sur les propriétés de certains minéraux à séparer telle que :

- l'émission de radiation,
- absorption des radiations.

Deux méthodes se distinguent:

- **La méthode d'émission radiométrique:** Cette méthode utilise la radioactivité naturelle d'un élément chimique ou bien sa luminescence
- **La méthode d'absorption radiométrique:** elle se base sur la caractéristique d'absorption des minerais pour les rayonnements X et Gamma et neutron.



II.2. La radioactivité

1896 : Becquerel constate que certains sels d'uranium émettent des "rayonnements uraniques" pouvant traverser la matière et pouvant impressionner des plaques photos placées dans l'obscurité.

1903 : Pierre et Marie Curie (ainsi que H.Becquerel) ont le Prix Nobel de Physique pour la découverte de la Radioactivité naturelle

1934 : Frédéric et Irène Joliot- Curie isolent deux nouveaux éléments, le polonium et le radium : prix Nobel de Chimie pour la découverte de la radioactivité artificielle

Une soixantaine de noyaux naturels sont instables, ainsi que presque tous les noyaux artificiels.

Définition

La radioactivité est un phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables se transforment spontanément en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnements divers, pour se transformer en des noyaux atomiques plus stables ayant perdu une partie de leur masse. Plusieurs éléments chimiques présentent cette caractéristique (voir tableau ci-dessous).

tableau-periodique.fr

Légende:

- Non-métaux
- Métaux alcalins
- Métaux alcalino-terreux
- Métaux de transition
- Métaux pauvres
- Métalloïdes
- Halogènes
- Gaz nobles
- Lanthanides
- Actinides

Elément radioactif

Tableau périodique des éléments chimiques

Lois de conservation de Soddy :

Au cours d'une transformation nucléaire naturelle ou artificielle, il y a :

- Conservation de nombre de masse A
- Conservation de nombre charge Z

• Au cours d'une réaction nucléaire, il y a également toujours conservation de la quantité de mouvement, et conservation de l'énergie totale (masse + énergie)

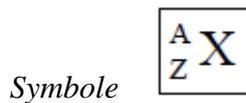
• La désintégration radioactive est un phénomène :

- Aléatoire : rien ne permet de prévoir exactement quand un noyau radioactif se désintègre (par contre le rythme de désintégration d'un échantillon est bien connu tant que ce nombre est important \Rightarrow loi de désintégration et loi de l'activité)
- Spontané : elle se déclenche seule, sans intervention extérieure ; elle est notamment indépendante de la température, de la pression, de la nature et de la structure chimique du composé auquel il appartient irréversible
- Inéluctable : rien ne peut ralentir ou accélérer la cadence de désintégration d'un échantillon radioactif
- indécélable par nos sens (inodore, inaudible, invisible)

II.2.1. Atomes et noyaux radioactifs

Comme tous les atomes, un atome radioactif est composé d'un noyau lui-même composé de nucléons : neutrons et protons et d'un cortège d'électrons circulants à bonne distance du noyau en nombre égal à celui des protons. L'atome radioactif est équilibré en charge électrique.

Un atome radioactif contient un **noyau instable** dont le nombre de nucléons ou la composition relative en protons et neutrons ne correspond pas à une situation stable. Le noyau de l'atome radioactif cherche à rallier la configuration stable la plus proche de sa composition en émettant des particules

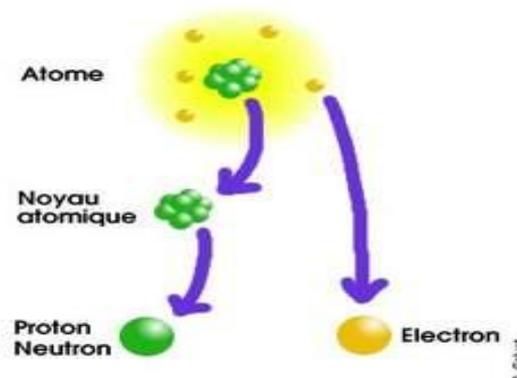


A est le nombre de masse et représente le nombre de nucléons.

Z est le nombre atomique et représente le nombre de charges positives élémentaires ou le nombre de protons.

N est le nombre de neutrons.

On a : $N = A - Z$



Exemples :

${}^4_2\text{He}$ renferme 4 nucléons : 2 protons et $4 - 2 = 2$ neutrons.

238

${}_{92}^{238}\text{U}$ renferme 92 protons et $238 - 92 = 146$ neutrons.

Caractéristiques des composants d'un atome

	Neutron	Proton	Electron
Charge (C)	0	$e = 1,60 \cdot 10^{-19}$	-e
Masse (kg)	$1,674 \cdot 10^{-27}$	$1,672 \cdot 10^{-27}$	$9,109 \cdot 10^{-31}$
Masse (en u)	1,008 665	1,007 277	0,000 549
Energie au repos (MeV)	939,57	938,28	0,511 003

NB : $1u = 1.66054 \times 10^{-27}$ kg

Remarque : un atome est électriquement neutre ; il y'a autant de protons que d'électrons.

II.2.2. L'instabilité du noyau d'un atome radioactif:

Par rapport au noyau de l'atome stable le plus voisin, le noyau de l'atome radioactif peut se trouver dans l'une des trois situations suivantes :

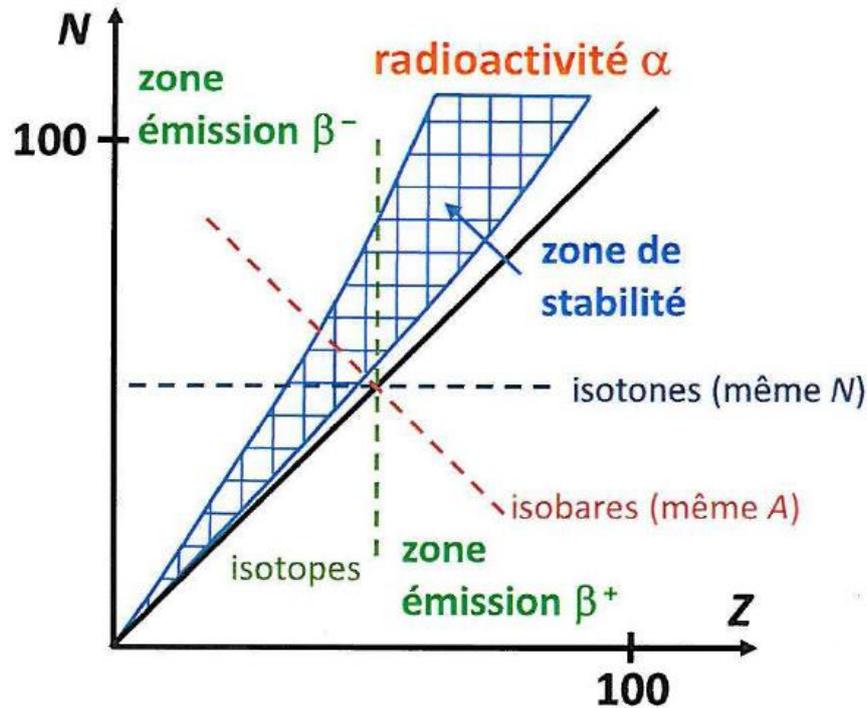
- en excès de nucléons
- en excès de neutrons
- en excès de protons

Cette transformation est accompagnée par émission de rayonnement très énergétique.

La radioactivité naturelle : existe naturellement.

La radioactivité artificielle : obtenue par bombardement de noyaux atomique par des particules α , des neutrons, des protons

Les types de la radioactivité :



La courbe de la stabilité correspond à l'ensemble des noyaux stables ; on constate que :

- pour $Z < 20$, ces noyaux stables se situent sur la bissectrice $N=Z$ (noyaux comportant autant de neutrons que de protons)
- pour $Z > 20$, les noyaux stables se situent au-dessus de $N = Z$

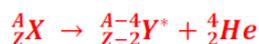
Pour les noyaux instables :

- Si le noyau est situé au-dessus de la Vallée de la stabilité : radioactivité β_-
- Si le noyau est situé en-dessous de la Vallée de la stabilité : radioactivité β_+
- Certains noyaux lourds $A > 170$ se désintègrent spontanément en émettant une particule α

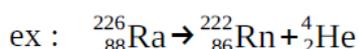
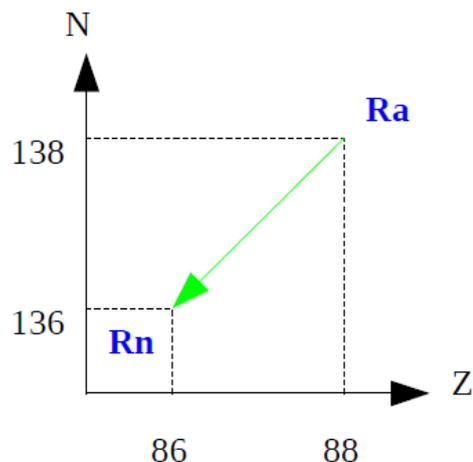
1. Radioactivité α

Elle concerne les noyaux lourds, instables à cause d'un trop grand nombre de nucléons. Le noyau se désintègre en émettant un noyau He nommé particule alpha, c'est-à-dire un groupe de 4 nucléons = 2 neutrons + 2 protons.

Au cours de son transit vers l'extérieur de l'atome au travers du cortège électronique, la particule alpha chargée positivement capte (ou non) deux électrons. Si cela n'a pas été le cas elle capte deux électrons auprès des atomes voisins et les deux électrons excédentaires de l'atome initial compensent le bilan électrique total qui reste neutre. C'est le rayonnement alpha.



$$\left\{ \begin{array}{l} {}^A_ZX : \text{noyau - père instable} \\ {}^{A-4}_{Z-2}Y^* : \text{noyau - fils dans l'état excité} \\ {}^4_2He : \text{noyau d'Hélium} \end{array} \right.$$



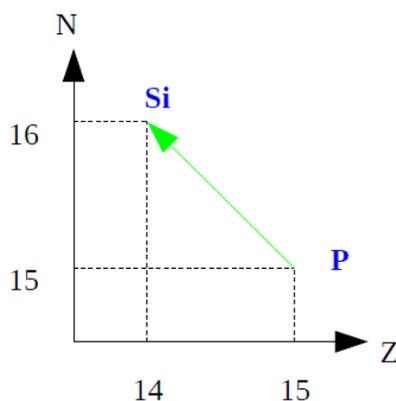
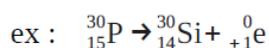
2. Radioactivité β^+ : émission d'un positon

La radioactivité β^+ affecte les nucléides X présentant un excès de protons (« béta plus \rightarrow positif \rightarrow proton ») ; lors de cette désintégration, il y a émission d'un positon (antiparticule associée à l'électron), et d'un neutrino

Dans ce cas le noyau transforme un neutron en proton et émet un électron ; cet électron chargé négativement traverse le cortège électronique de l'atome et continue sa route. C'est le rayonnement bêta.



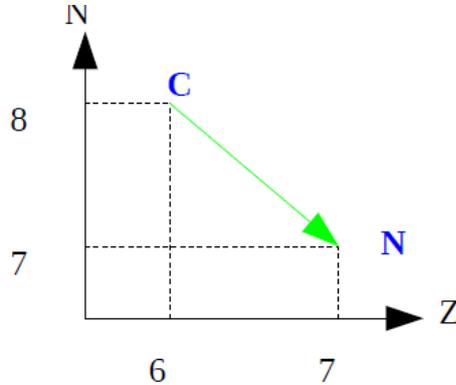
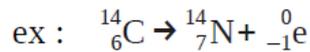
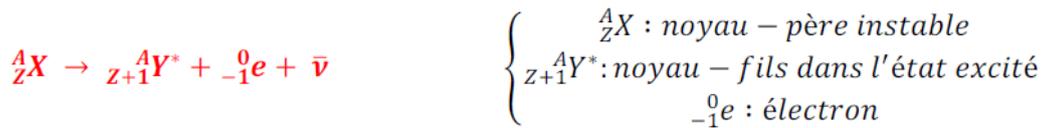
$$\left\{ \begin{array}{l} {}^A_ZX : \text{noyau - père instable} \\ {}^{A}_{Z-1}Y^* : \text{noyau - fils dans l'état excité} \\ {}^0_{-1}e : \text{électron} \end{array} \right.$$



3. Radioactivité β^- : émission d'un électron

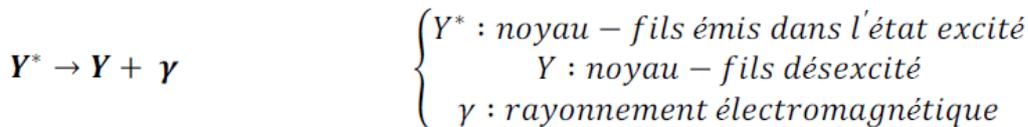
La radioactivité β^- affecte les nucléides ' présentant un excès de neutrons (« béta négatif \rightarrow preutron ») ; lors de cette désintégration, il y a émission d'un **électron**, et d'un **antineutrino** (particule sans charge et sans masse, nécessaire pour assurer le principe de conservation de l'énergie).

de façon similaire à l'excès de neutrons, **le noyau en excès de protons transforme un proton en neutron en émettant un positon (un anti-électron).**



4. La radioactivité γ

Lors d'une désintégration α ou β , le noyau père expulse une particule, α ou β . Le noyau fils obtenu est instable : on dit qu'il est excité. Il se désexcite en libérant un photon qui transporte un rayonnement électromagnétique très énergétique et de très faible longueur d'onde : le rayonnement γ .



Equivalence masse-Energie

1. Energie de masse

La théorie de la relativité d'Einstein (1905)

- Tout corps ayant une masse possède, au repos, une énergie potentielle « énergie de masse »
- Masse et énergie sont des grandeurs équivalentes : l'énergie peut se transformer en masse et réciproquement.

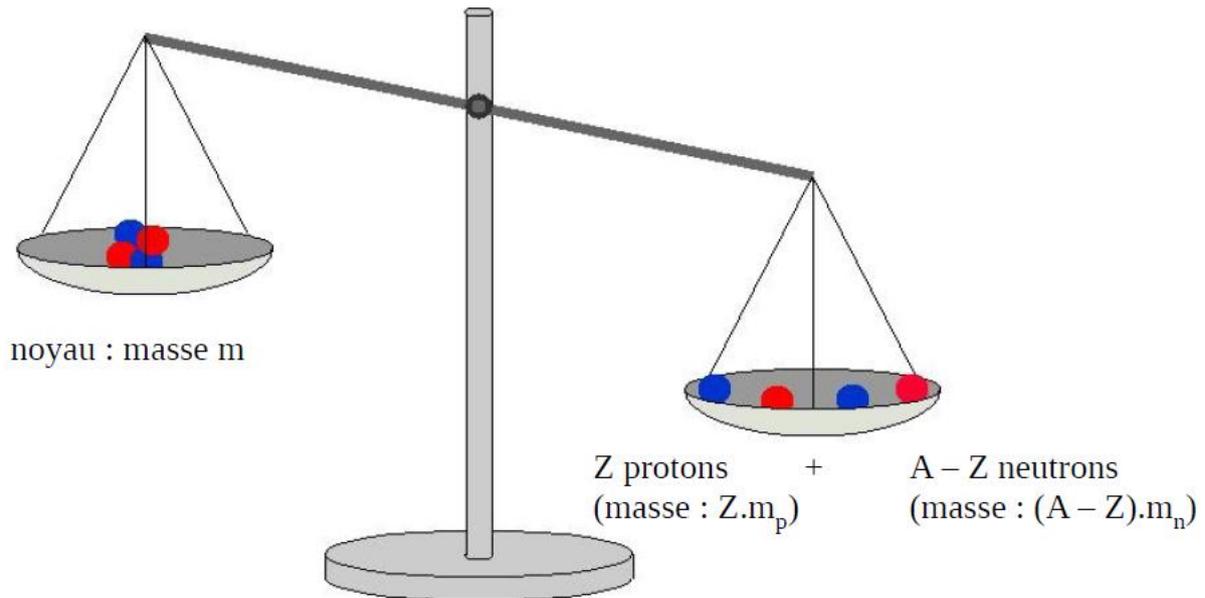
L'énergie de masse d'un corps est : $E = M \cdot C^2$

E : énergie du corps en joule

M : masse du corps en Kg

C : célérité en m/s

Défaut de masse :



On constate que $m < Z.m_p + (A - Z).m_n$

Pour un noyau X, le défaut de masse est $\Delta m = [Z.m_p + (A - Z).m_n] - m$.

3. Énergie de liaison

Si la masse du noyau est inférieure à la masse de ses constituants pris séparément, alors :

$$m.c^2 < [Z.m_p + (A - Z).m_n].c^2$$

Donc un noyau est plus stable que ses constituants séparés car son énergie de masse est plus faible.

On appelle énergie de liaison $E_l = \Delta m.c^2$

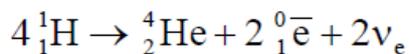
C'est cette énergie qui est récupérée lors d'une réaction nucléaire.

Pour disperser tous les nucléons du noyau, il faut donc fournir au noyau l'énergie $\Delta m.c^2$.

II.2.3. Fission et fusion nucléaires

1. Fusion nucléaire

La fusion nucléaire est une réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd et plus stable.



L'énergie libérée est :

$$\Delta E = E_{\text{produits}} - E_{\text{réactifs}} = [(m_{\text{He}} + 2m_e) - 4m_p]c^2$$

Application numérique:

$$m_p = 938,27 \text{ MeV}/c^2 ; m_{\text{He}} = 3727,4 \text{ MeV}/c^2 ; m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2 ; \Delta E = 24,7 \text{ MeV}$$

Lors de la fusion nucléaire (pour 4 noyaux d'hydrogène) la réaction libère donc une énergie de 24,7 MeV, à savoir une énergie de 6,2 MeV par noyau d'hydrogène.

Ainsi 1 kg d'hydrogène peut libérer une énergie de $37,1 \cdot 10^{26}$ MeV respectivement $594 \cdot 10^{12}$ J

Remarque : cette réaction ne peut pas être spontanée car les noyaux se repoussent naturellement. Il faut atteindre une température d'environ $100.106\text{ }^\circ\text{C}$.

2. Fission nucléaire

La fission nucléaire est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd se brise en deux noyaux plus légers et plus stables.

ex : ${}_0^1\text{n} + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{38}^{94}\text{Sr} + {}_{54}^{140}\text{Xe} + 2{}_0^1\text{n}$ Cette réaction libère $2,96 \cdot 10^{-11}\text{ J}$ par noyau d'uranium brisé.

Les neutrons sortant de cette réaction sont des neutrons rapides et peuvent donner lieu à une fission nucléaire si on les ralentit (neutrons thermiques).

L'énergie libérée est :

$$\Delta E = E_{\text{produits}} - E_{\text{réactifs}} = [(m_{\text{Xe}} + m_{\text{Sr}} + 3m_{\text{n}}) - (m_{\text{U}} + m_{\text{n}})]c^2$$

Application numérique :

$$m(\text{U-235}) = 234,9935\text{ u}; \quad m(\text{Xe-139}) = 138,8892\text{ u};$$

$$m(\text{Sr-94}) = 93,8945\text{ u}; \quad m(\text{n}) = 1,0087\text{ u},$$

Le défaut de masse $\Delta m = 0,1924\text{ u}$ et l'énergie libérée lors de la réaction (pour un noyau d'uranium-235) vaut $E = \Delta m \cdot c^2 = 179\text{ MeV}$.

Ainsi 1 kg d'U-235 peut libérer par fission une énergie de $4,59 \cdot 10^{26}\text{ MeV} = 73,5 \cdot 10^{12}\text{ J}$.
(Lors de la combustion, 1 kg d'essence libère une énergie de $47,3 \cdot 10^6\text{ J}$)

Remarque : cette réaction nécessite d'être amorcée par un neutron rapide qui sert de projectile. Cette réaction produit 2 (ou 3) neutrons qui peuvent, à leur tour, casser 2 ou 3 noyaux d'uranium : réaction en chaîne. C'est ce qu'on fait dans les centrales nucléaires actuelles.

II.2.4. Décroissance radioactive :

Les noyaux radioactifs n'ont pas toujours la même capacité de désintégration ; on constate que certains mettent beaucoup de temps, d'autres très peu.

Ce qui caractérise la propension d'un nucléide radioactif à se désintégrer, c'est sa **constante radioactive** λ .

λ représente « la probabilité qu'un noyau se désintègre dans la seconde à venir »

Pendant la durée Δt cette probabilité devient donc : $\lambda \Delta t$

Pour une population de noyaux radioactifs, il se désintégrera donc : $\Delta N = -\lambda \Delta t \times N$ (signe – car le nombre de noyaux diminue au cours du temps) ; en passant en instantané on a :

$$dN = -\lambda dt \times N$$

$$d'où : \frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

équation différentielle régissant la variation du nombre de noyaux radioactifs au cours du temps

La solution de cette équation différentielle donne la Loi de Décroissance radioactive :

Loi de Décroissance radioactive :

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad \left\{ \begin{array}{l} N_0 : \text{nombre de noyaux radioactifs} \\ \lambda : \text{homogène à un temps}^{-1} \end{array} \right.$$

Remarque :

$$\begin{array}{ll} \triangleright \text{ Si } t \text{ en s, } \lambda \text{ en } s^{-1} & \text{ Si } t \text{ en h, } \lambda \text{ en } h^{-1} \\ \text{ Si } t \text{ en j, } \lambda \text{ en } j^{-1} & \text{ Si } t \text{ en an, } \lambda \text{ en } an^{-1} \end{array}$$

$N(t)$ représente le nombre de noyaux radioactifs présents à l'instant t , et non le nombre de noyaux désintégrés. ($N_{dés} = N_0 - N_0 \cdot e^{-\lambda t} \Rightarrow N_{dés} = N_0(1 - e^{-\lambda t})$)

Demi-vie T d'un atome radioactif

On appelle demi-vie T d'un radioélément le temps au bout duquel le nombre N a diminué de moitié.

La demi-vie des noyaux radioactifs peut s'étendre de fractions de secondes jusqu'à des milliards d'années. Elle est caractéristique d'un nucléide particulier.

Exemples de quelques demi-vies :

${}_{88}^{226}\text{Ra}(\alpha)$:	$T = 1590 \text{ a}$ (années)	${}_{92}^{238}\text{U}(\alpha)$:	$T = 4,5 \cdot 10^9 \text{ a}$
${}_{86}^{222}\text{Rn}(\alpha)$:	$T = 3,825 \text{ d}$ (jours)	${}_{19}^{40}\text{K}$:	$T = 1,3 \cdot 10^9 \text{ a}$
neutron (instable) :	$T = 702 \text{ s}$		
proton (stable) :	T est infini		

Relation entre t et λ

En $t = T$, on a $N(T) = N_0/2$, donc: $N(T) = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}$

Cette relation fournit : $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$ ou : $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$

Ex : ${}_{99}\text{Tc}$ $\left\{ \begin{array}{l} \lambda = 3,209 \cdot 10^{-5} s^{-1} \\ t_{1/2} = 6 \text{ h} \end{array} \right.$

II.2.5. Activité d'une source radioactive

a) Définition

L'activité A d'une source radioactive est le nombre de noyaux radioactifs se désintégrant par seconde.

C'est aussi le nombre de particules ou de photons émis par unité de temps.

Si dans un intervalle de temps dt , $\square dN$ nucléides se sont désintégrés, l'activité vaut :

$$A = - \frac{dN}{dt}$$

Unité : 1 becquerel = 1 Bq = 1 s⁻¹

A l'aide de la loi de la désintégration on obtient :

$$A = -\frac{dN}{dt} = -\frac{d}{dt}(N_0 e^{-\lambda t}) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\boxed{A = \lambda N}$$

En posant $A_0 = \lambda N_0$, on obtient: $\boxed{A = A_0 e^{-\lambda t}}$

La radioactivité naturelle

On retrouve la plupart des éléments radioactifs naturels dans les roches. Cet extrait de la carte des noyaux montre la succession de désintégrations radioactives qui va de l'uranium-238 jusqu'au radon. Les descendants de l'uranium-238, présents à l'état de traces dans ces minerais, émettent des rayons alpha et bêta qui restent prisonniers des roches, alors que les rayons gamma s'en échappent. Le sixième descendant de l'uranium, le radon, est un gaz. Une partie s'échappe du sol, relâchant de la radioactivité dans l'atmosphère.

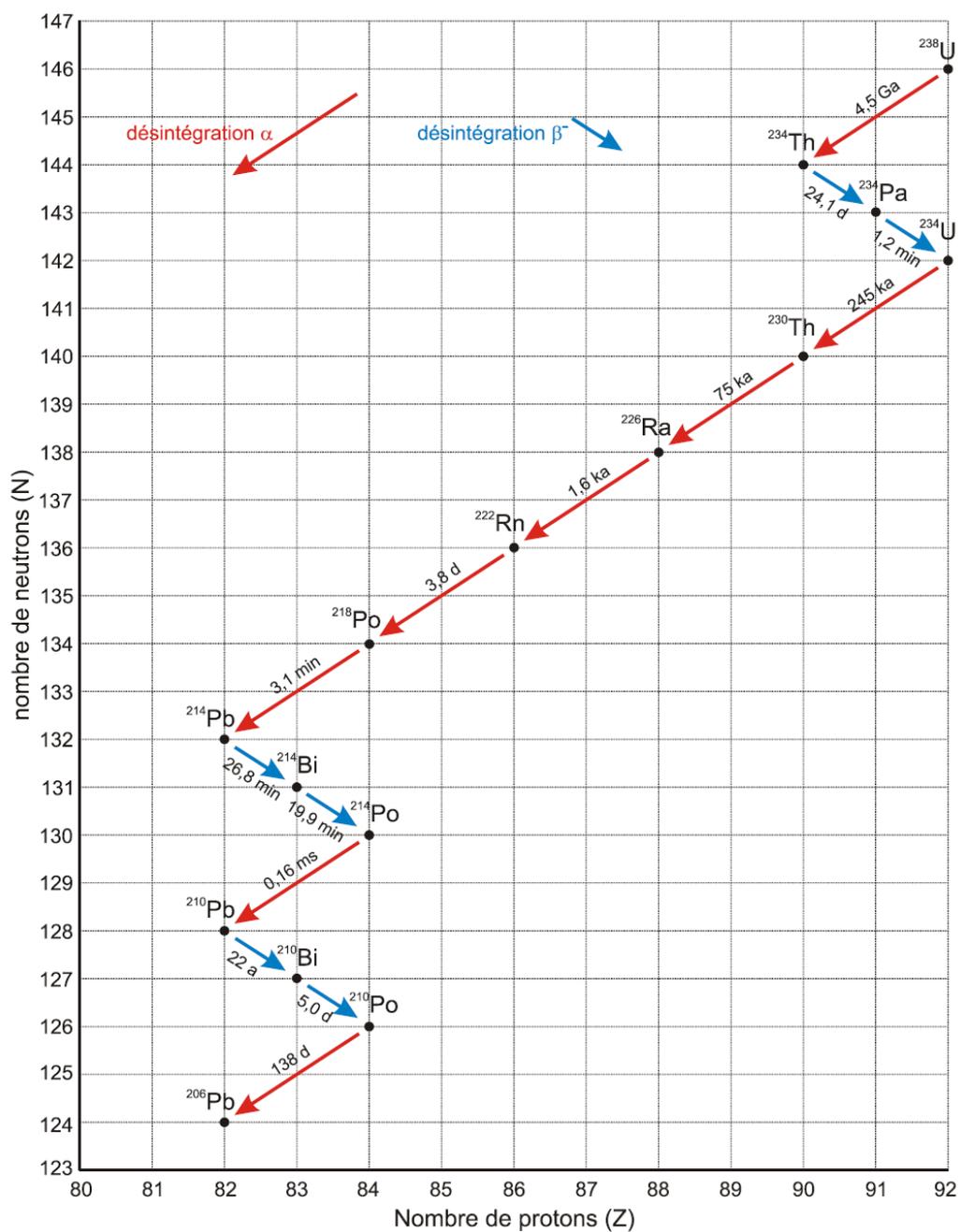
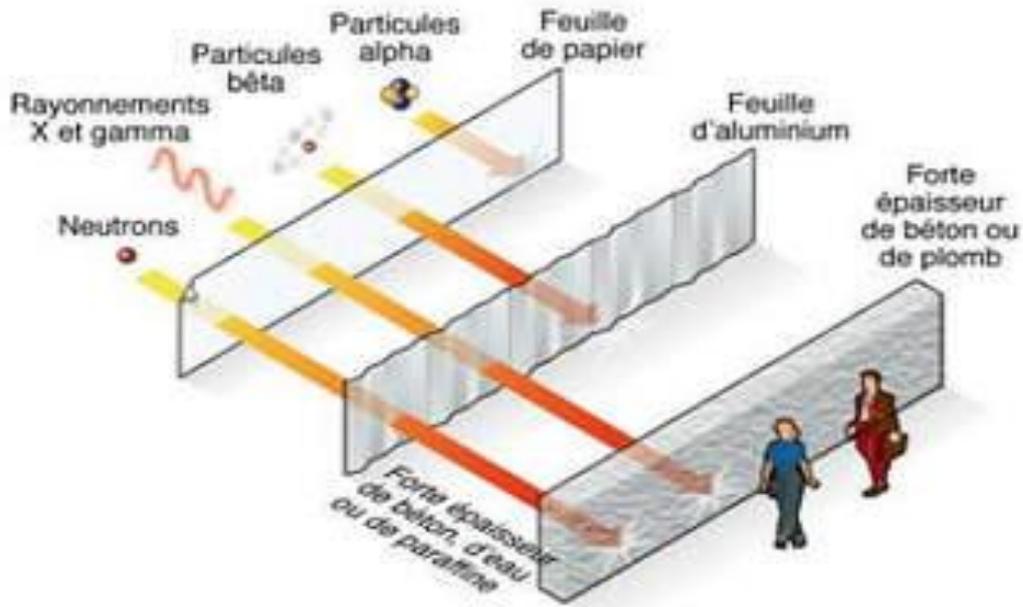


Schéma de désintégration du noyau de l'Uranium 238 et ces descendants.



Propagation des rayonnements X, gamma, beta, alpha et neutron dans divers milieux.

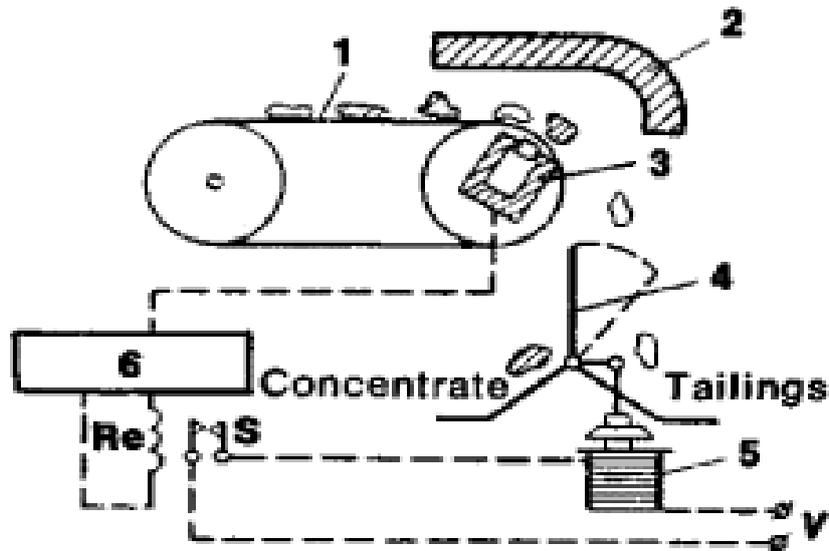
II.3. Types de la séparation radiométrique :

Il existe trois méthodes de séparation radiométrique :

- *La méthode par morceau (the chunk method) elle consiste à enregistrer les radiations de chaque minéral.*
- *La méthode par lots: (batch method) séparation de plusieurs parties en même temps.*
- *La méthode par flux:(the flow method) la séparation se fait par enregistrement de radiation du flux de minerais.*

II.3.1. La méthode d'émission radiométrique

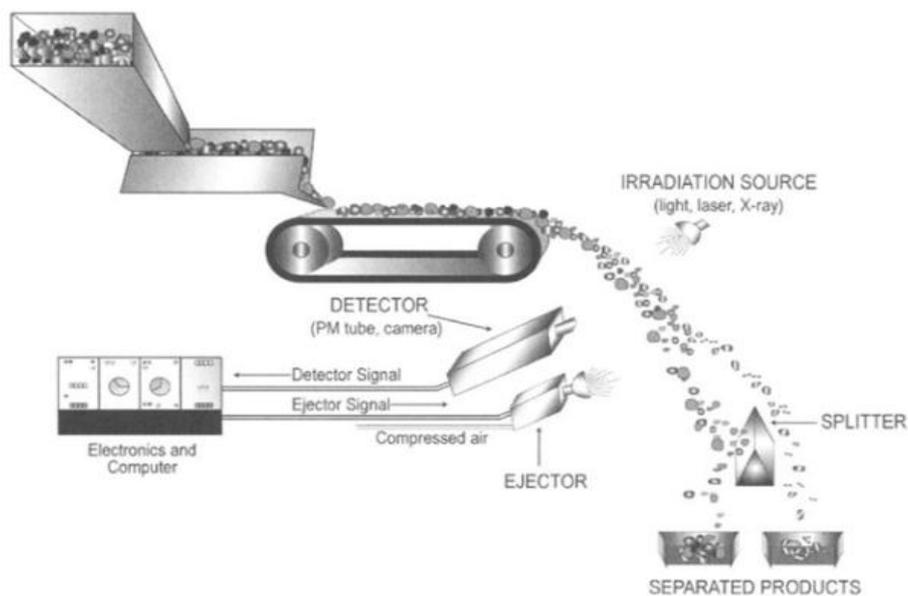
La radioactivité est un phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables se transforment spontanément en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnements divers, pour se transformer en des noyaux atomiques plus stables ayant perdu une partie de leur masse.



Séparateur radiométrique pour la radioactive naturelle des minerais: (1) convoyeur à bande, (2) écran, (3) détecteur radiométrique, (4) valve, (5) électromanette, (6) radiomètre, (Re, S) switch relay, and (V) source d'énergie

II.3.2. La méthode d'absorption radiométrique

Cette méthode consiste à irradier un minerai par un rayonnement X, gamma ou neutron. Les différents composants du minerai vont absorber une partie des radiations et réfléchir une autre partie. L'énergie absorbée diffère d'un minéral à un autre.



Séparateur radiométrique par absorption

II.3.3. Avantages et inconvénient de la séparation radiométrique

- *Pré-concentrer l'alimentation de la station dans une fraction de haute qualité et de faible teneur ;*
- *Réduire les risques et les coûts environnementaux ;*
- *Optimiser plusieurs flux de processus ;*
- *Pré-concentrer le minerai sous terre ou sur le site distant ;*
- *Surveiller la composition de l'alimentation de la station.*

En dépit de plusieurs avantages, le tri du minerai pose des problèmes:

- *Perte de minerai, car parfois le minerai est finement disséminé dans la roche et le trieur n'est pas capable de le choisir et de le considérer comme un gaspillage ;*
- *Le débit des trieurs n'est pas très élevé ;*
- *La roche ne devrait pas être fine car plus fine signifie plus de nombre de particules que les trieurs doivent analyser individuellement. C'est donc sa sensibilité ;*
- *La surface des particules doit être correctement lavée avant le tri ou l'efficacité du trieur ne sera pas élevée ;*
- *Le flux doit subir un dimensionnement préliminaire pour alimenter monocouche au trieur pour améliorer son efficacité.*

III. La séparation optique

III.1. Notion de base sur la couleur

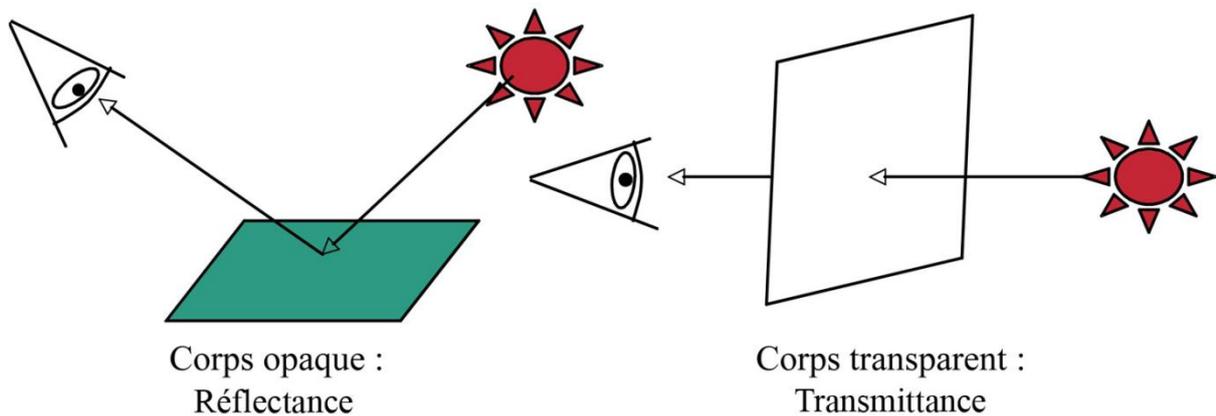
a. Définition

La couleur est une sensation entièrement cérébrale associée à la vision et résultant de l'interprétation par notre cerveau de l'action sur l'oeil de radiations lumineuses.

Les couleurs peuvent :

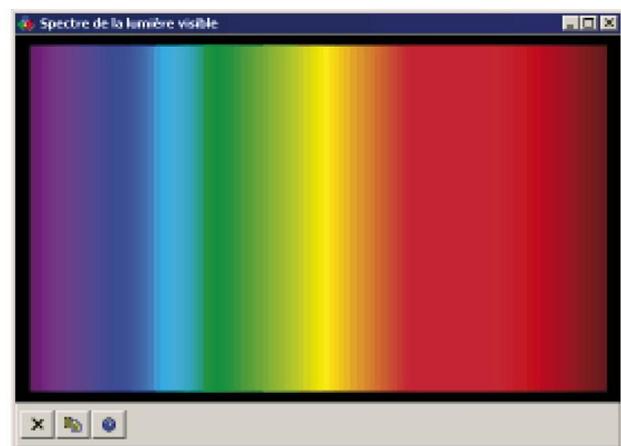
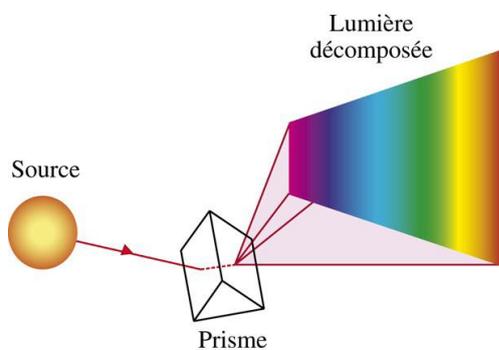
- être créées par la réflexion d'une source de lumière naturelle ou artificielle avec les objets ;
- provenir de la source elle-même (projecteur, lampe, télévision, ...).

L'oeil est un récepteur, il analyse la portion de la lumière qui lui parvient et c'est le cerveau qui interprète la fraction de signal renvoyée (corps opaque) ou transmise (corps transparent).



b. Nature spectrale de la couleur

En 1669 Newton décompose la lumière blanche en lumières simples colorées.



c. La vision des couleurs

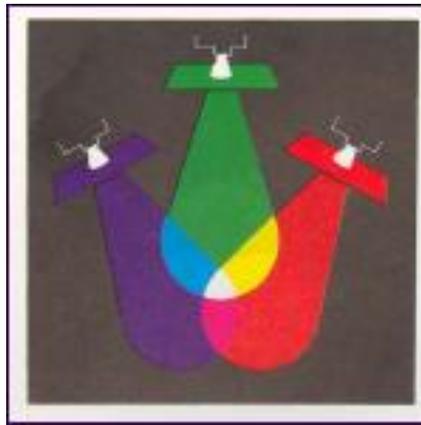
❖ Couleur des objets

- Un objet noir absorbe toutes les longueurs d'onde.
- Un objet n'est vert que parce que les longueurs d'onde vertes sont réfléchies, toutes les autres étant absorbées.

Nous ne voyons des surfaces colorées que parce qu'elles sont capables d'émettre ou de ré-émettre de façon sélective certaines longueurs d'onde de la lumière incidente

❖ Synthèse additive

- Le mélange en proportions égales de 3 lumières primaires (bleu, vert, rouge) crée une lumière blanche.
- On peut obtenir d'autres couleurs par la superposition de faisceaux colorés projetés sur un écran blanc.



II.2. Les caractéristiques optiques des minéraux

a. La forme

La matière cristalline s'organise en réseaux périodiques qui obéissent à certaines lois et possèdent des propriétés symétriques particulières. Ces lois sont :

· **La loi de constance des angles (Romé de l'Isle, 1722)** : Dans une même espèce minérale, l'angle des faces correspondantes est constant.

· **La loi d'Hauy** : Un cristal d'une certaine espèce est formé, quelle que soit sa morphologie, par la juxtaposition de petits parallélépipèdes élémentaires ("les briques" élémentaires) tous égaux entre eux et caractéristiques de l'espèce appelés maille simple du réseau.

· **La loi de symétrie** : Toute forme géométrique se rapporte à l'un des sept systèmes cristallins possibles. Trois éléments, ou opérateurs, de symétrie sont pris en compte pour définir les formes fondamentales.

- Le centre de symétrie : point défini tel que les sommets d'un polyèdre se correspondent deux à deux sur des lignes menées par ce centre ;

- L'axe de symétrie : ligne de rotation permettant de retrouver plusieurs fois de suite l'aspect du polyèdre au cours d'un tour complet. Axe binaire (A2), le cristal apparaît identique à lui-même 2 fois au cours d'une rotation de 360° . A3, il apparaît 3 fois. A4, quatre fois etc...

- Le plan de symétrie : plan qui partage le cristal en deux moitiés symétriques

· La loi de respect des symétries pour les formes dérivées : Les familles de clivages et des troncutures respectent dans tous les cas les éléments de symétrie de la forme primitive

On répartit les 32 classes de symétrie en 7 systèmes cristallins d'après la symétrie de leur réseau dont il existe 14 possibilités (les réseaux de Bravais). Ces systèmes cristallins sont :

- Le réseau ne possède aucun axe de symétrie : système triclinique ;
- Le réseau possède un axe binaire (A2) : système monoclinique ;
- Le réseau possède trois axes binaires (A2) rectangulaires deux à deux : système orthorhombique ;
- Le réseau possède un axe ternaire (A3) : système rhomboédrique ;
- Le réseau possède un axe quaternaire (A4) : système quadratique ;
- Le réseau possède un axe sénaire (A6) : système hexagonal ;
- Le réseau possède quatre axes ternaires (A3) : système cubique ;

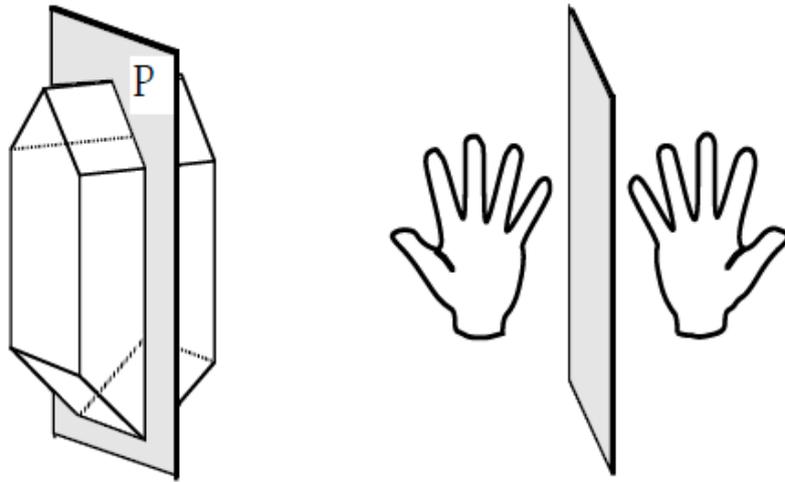
a. La symétrie

Les cristaux bien développés montrent des faces planes limitées par des arêtes qui elles-mêmes convergent vers des sommets. En observant attentivement les cristaux, on constate qu'ils présentent une "certaine symétrie".

Ce terme de symétrie recouvre en fait une discipline abstraite qui relève des lois de la géométrie. Il s'agit de lois de répétitions effectuées par des opérateurs de symétrie dont les principaux sont le plan de symétrie, l'axe de symétrie et le centre d'inversion.

b. Le plan de symétrie :

C'est un plan qui caractérise les symétries bilatérales. Il dédouble les éléments d'un objet, agissant comme un miroir. Toutes les faces, arêtes et sommets d'un cristal retrouvent une image identique (mais non superposable) de l'autre côté du plan. Ainsi, vue dans un miroir, la main droite aura l'air d'une main gauche. On qualifie d'énantiomorphes de tels objets identiques mais non superposables.

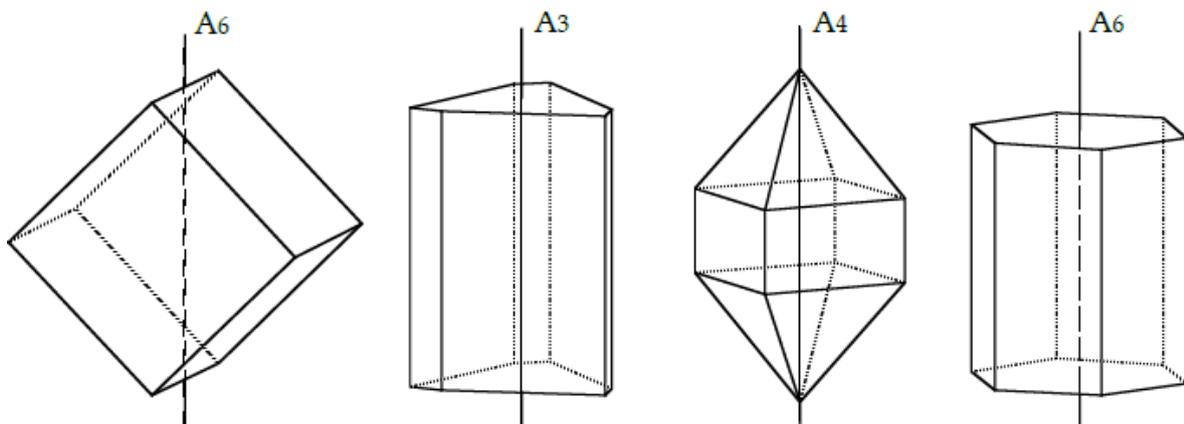


Plan de symétrie.

Le plan de symétrie produit des objets non superposables, dits «énantiomorphes»

c. Les axes de symétrie

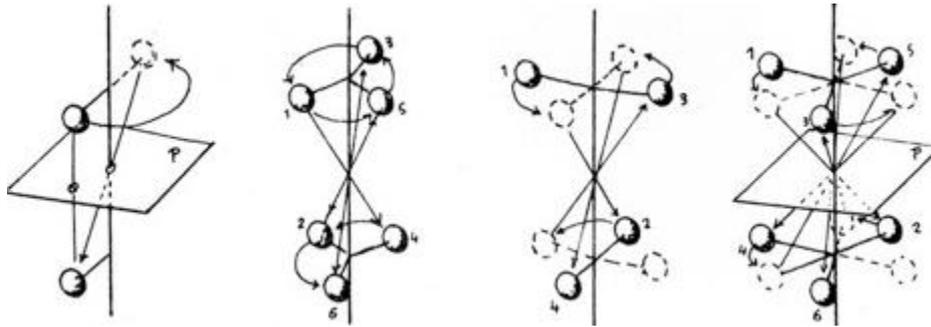
toutes les faces, arêtes et sommets sont "répétés" par rotation autour d'un axe. Au cours d'une rotation complète (360°), chaque élément est répété 2, 3, 4 ou 6 fois, suivant l'ordre de l'axe. Dans le monde minéral il n'existe que des axes d'ordre 2, 3, 4 et 6.



Axes de symétrie d'ordre 2, 3, 4 et 6. On voit que les axes peuvent passer par le milieu d'arêtes opposées, par le milieu de faces opposées ou par des sommets opposés

d. Les axes de symétrie inverses

L'axe inverse est un opérateur multiple qui associe deux opérations : un axe et un point d'inversion.

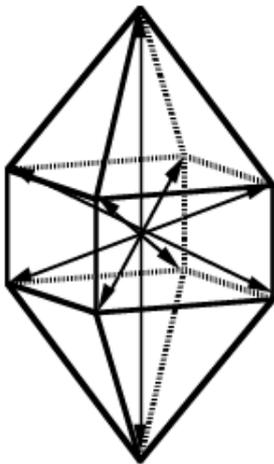


Axes de symétrie d'ordre 2, 3, 4 et 6. On voit que les axes peuvent passer par le milieu d'arêtes opposées, par le milieu de faces opposées ou par des sommets opposés

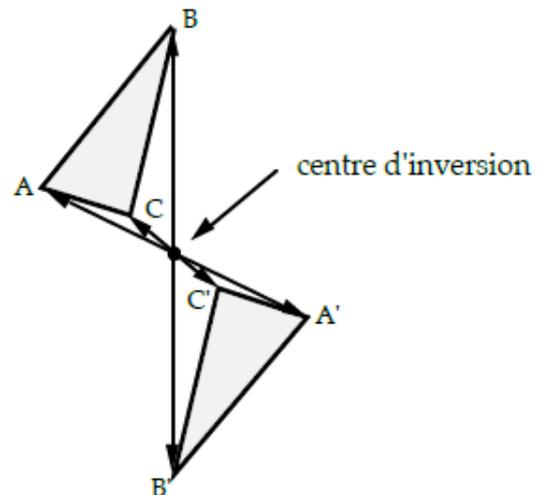
e. Le centre d'inversion

Toutes les faces de la forme cristalline sont reproductibles deux à deux par inversion de leurs sommets et de leurs arêtes par rapport à un centre d'inversion, appelé parfois aussi centre de symétrie.

Chaque face d'une forme cristalline ayant un point d'inversion, possède une face équivalente parallèle. Cette particularité permet de reconnaître la présence ou l'absence de cet opérateur de symétrie.



Forme cristalline avec un centre d'inversion.



Mécanisme de l'inversion.

f. Les classes de symétrie

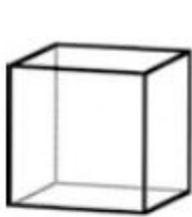
Trente deux classes peuvent être reconstituées systématiquement en examinant successivement les sept associations possibles d'opérateurs et en prenant soin de respecter les théorèmes de symétrie.

Dans chaque système, une classe possède la multiplicité maximum. Cette classe, la plus symétrique du système considéré, est l'holoédrie. Si la multiplicité diminue de moitié on a une hémioédrie; si elle diminue encore une fois de moitié c'est une tétartoédrie.

Ces termes comportent parfois un préfixe ou sont remplacés par d'autres termes plus particuliers. Ainsi l'holoaxie est une mérioédrie qui n'a conservé que les axes, alors que dans

l'exemple de l'hémimorphite (ci-dessus) est caractérisée par la disparition du plan normal à un axe principal. On utilise parfois le préfixe para- pour les hémiedries centrées et anti-lorsqu'il n'y a pas de centre.

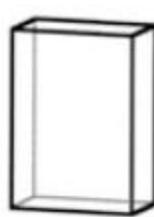
Systeme	Caractéristique	Multiplicité de l'holoédrie
<i>cubique</i>	<i>4 axes d'ordre 3</i>	<i>48</i>
<i>quadratique</i>	<i>un axe principal d'ordre 4</i>	<i>16</i>
<i>orthorhombique</i>	<i>3 éléments binaires</i>	<i>8</i>
<i>monoclinique</i>	<i>un élément binaire</i>	<i>4</i>
<i>hexagonal</i>	<i>un axe principal d'ordre 6</i>	<i>24</i>
<i>rhomboédrique</i>	<i>un axe principal d'ordre 3</i>	<i>12</i>
<i>triclinique</i>	<i>axe direct ou inv. d'ordre 1 (C ou rien)</i>	<i>2</i>



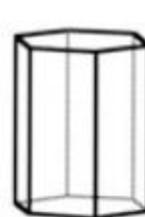
Cubique
Cube



Quadratique
Prisme droit à base carrée



Orthorhombique
Prisme droit à base rectangle



Hexagonal
Prisme droit à base hexagonale



Rhombocédrique
rhombocédre



Monoclinique
prisme oblique à base rectangle



Triclinique
prisme oblique sur toutes les arêtes

Système	Formule de symétrie	Mult.	Classe	Not.intern.
Cubique	$3A_4 4A_6 \frac{1}{3} 6A_2 C 3P_4 6P_2$	48	holoédrie	$m\bar{3}m$
	$3A_4 4A_3 6A_2$	24	holoaxie	432
	$3A_4^2 4A_3 6P_2$	24	antihémiédrie	43m
	$3A_2 4A_6 \frac{1}{3} C 3P_2$	24	parahémiédrie	$m\bar{3}$
	$3A_2 4A_3$	12	tétartoaxie	23
Quadratique	$A_4 2A_2 2A_2 C P_4 2P_2 2P_2$	16	holoédrie	4/mmm
	$A_4 2A_2 2A_2$	8	holoaxie	422
	$A_4 2P_2 2P_2$	8	hémimorphie	4mm
	$A_4 C P_4$	8	parahémiédrie	4/m
	$A_4^2 2A_2 2P_2$	8	antihémiédrie	42m
	A_4^2	4	tétartoédrie	4
	A_4	4	tétartoédrie hémimorphe	4
Monoclinique	$A_2 C P_2$	4	holoédrie	2/m
	A_2	2	holoaxie	2
	P_2	2	antihémiédrie	m
Orthorhombique	$A_2 A_2 A_2 C P_2 P_2 P_2$	8	holoédrie	mmm
	$A_2 A_2 A_2$	4	holoaxie	222
	$A_2 P_2 P_2$	4	hémimorphie	mm2
Hexagonal	$A_6 3A_2 3A_2 C P_6 3P_2 3P_2$	24	holoédrie	6/mmm
	$A_6 3A_2 3A_2$	12	holoaxie	622
	$A_6 3P_2 3P_2$	12	hémimorphie	6mm
	$A_6 C P_6$	12	parahémiédrie	6/m
	$A_3 3A_2 P_3 3P_2$	12	antihémiédrie	6m2
	$A_3 P_3$	6	tétartoédrie	6
	A_6	6	tétartoédrie hémimorphe	6
Rhomboédrique	$A_6 \frac{1}{3} 3A_2 C 3P_2$	12	holoédrie	3m
	$A_3 3A_2$	6	holoaxie	32
	$A_3 3P_2$	6	hémimorphie	3m
	$A_6 \frac{1}{3} C$	6	parahémiédrie	3
	A_3	3	tétartoédrie	3
Triclinique	C	2	holoédrie	1
	—	1	hémiédrie	1

Caractéristiques des diverses mailles élémentaires

Symétrie	angles entre les arêtes	long. arêtes	Nombre de paramètres
cubique	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a = b = c$	1
quadratique	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a = b \neq c$	2
orthorhombique	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a \neq b \neq c$	3
hexagonale*	$\alpha = \beta = 90^\circ \quad \gamma = 120^\circ$	$a = b \neq c$	2
rhomboédrique*	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	$a = b \neq c$	2
monoclinique	$\alpha = \beta = 90^\circ \quad \gamma \neq 90^\circ$	$a \neq b \neq c$	4
triclinique	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	$a \neq b \neq c$	6

* dans le cas du choix d'une maille simple

b. Le clivage

Certains minéraux peuvent se fendre (se cliver) selon des familles de plans cristallographiques particuliers où les liaisons atomiques sont plus faibles (plan de clivage). La présence ou l'absence de clivage, l'orientation des plans de clivage par rapport aux faces cristallines et les uns par rapport aux autres sont des critères de reconnaissance et de détermination des minéraux.

Exemples

Pyroxène : deux séries de plans de clivages à 90°

Amphibole : deux séries de plans de clivages à 120°

c. Les macles

Certains minéraux forment lors de leur croissance des macles. Ce sont deux ou plusieurs cristaux du même minéral (individus), accolés mais orientés différemment. { Les cristaux sont liés par une rotation autour d'un axe cristallographique, une réflexion sur un plan du cristal, etc.

Exemples

Feldspath orthose : macle de Carlsbad

Feldspaths plagioclases : macle polysynthétique

Lorsque la macle est répétée à plusieurs reprises, elle est dite polysynthétique.

d. La couleur

Elle fait partie des caractères de détermination les plus importants mais n'est pas toujours absolument fiable. En effet, la fluorite par exemple peut être incolore, blanche, bleue, verte, jaune, violette, etc.

Chez certains minéraux, ces différences de coloration déterminent des variétés différentes ; par exemple : le quartz, le cristal de roche (transparent), l'améthyste (violet), la citrine (jaune), le quartz enfumé sont tous la même espèce minérale de formule SiO_2 ; de même le corindon (Al_2O_3) lorsqu'il est bleu est appelé saphir et lorsqu'il est rouge il est appelé rubis. Chez beaucoup de minéraux, la couleur est typique et décide de leur nom comme la chlorite (Kloros = vert, en grec), l'azurite (Lazaward = bleu, en persan), l'albite (Albus = blanc, en latin) ou encore l'olivine (Olive). Certains minéraux ont même donné leur nom à des nuances de couleur comme le vert émeraude ou le bleu turquoise.

II.3. généralités sur le rayonnement électromagnétique

Définition

Le rayonnement électromagnétique correspond à l'ensemble des radiations émises par une source sous forme d'ondes électromagnétiques.

Structure du rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique est un mode d'échange d'énergie par émission et adsorption de radiations électromagnétiques. Cet échange se fait par les processus suivants :

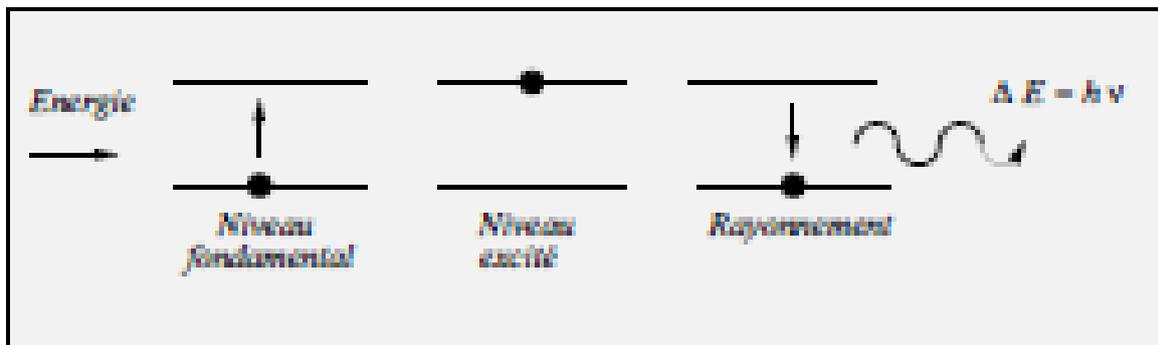
Emission : Il y a conversion de l'énergie fournie à la source en énergie électromagnétique.

Transmission : La transmission de cette énergie électromagnétique se fait par propagation des ondes avec éventuellement absorption par le milieu traverse.

Réception : A la réception, il y a conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique (absorption).

Origine du rayonnement : la transition électronique

Le rayonnement trouve son origine lors d'une transition électronique entre deux états d'énergie d'une molécule ou d'un atome :

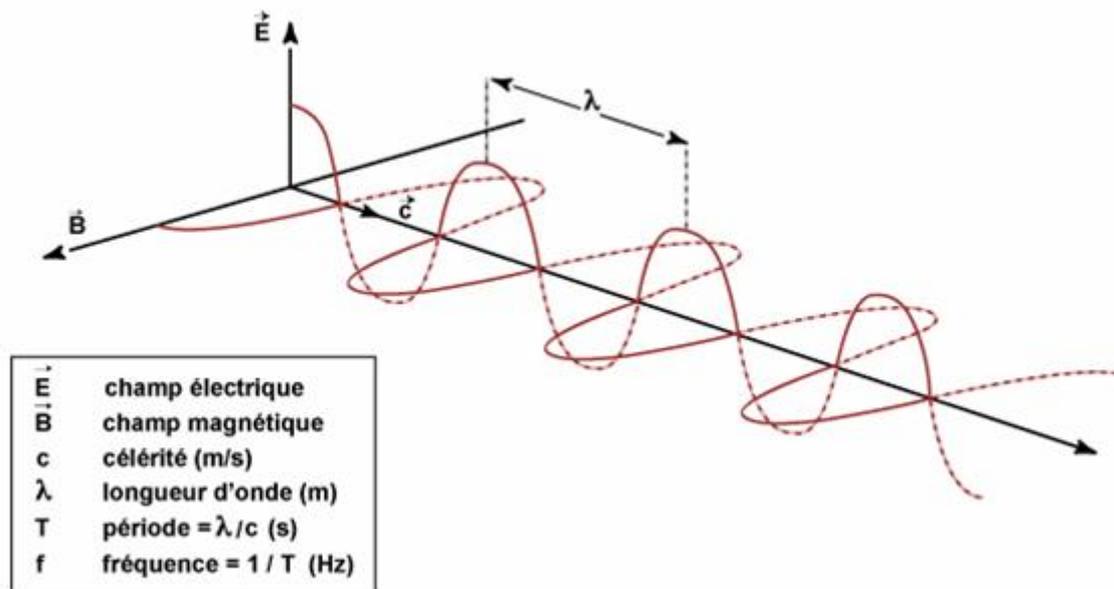


Principe d'émission d'un rayonnement électromagnétique

Les ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique comporte à la fois un champ électrique et un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Ces deux champs, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre se propagent dans un milieu selon une direction orthogonale.

La propagation de ces ondes s'effectue à une vitesse qui dépend du milieu considéré. Dans le vide, la vitesse de propagation est égale à $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Une onde électromagnétique est caractérisée par plusieurs grandeurs physiques :

- La longueur d'onde (λ) :

elle exprime le caractère oscillatoire périodique de l'onde dans l'espace. C'est la longueur d'un cycle d'une onde, la distance séparant deux crêtes successives. Elle est mesurée en mètre ou en l'un de ses sous-multiples, les ondes électromagnétiques utilisées en télédétection spatiale ayant des longueurs d'onde relativement courtes:

le nanomètre $1 \text{ nm} = 10^{-9}$ mètre

le micromètre $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ mètre

le centimètre $1 \text{ cm} = 10^{-2}$ mètre.

- La période (T) : elle représente le temps nécessaire pour que l'onde effectue un cycle. L'unité est la seconde.
- La fréquence (ν) : inverse de la période, elle traduit le nombre de cycles par unité de temps.

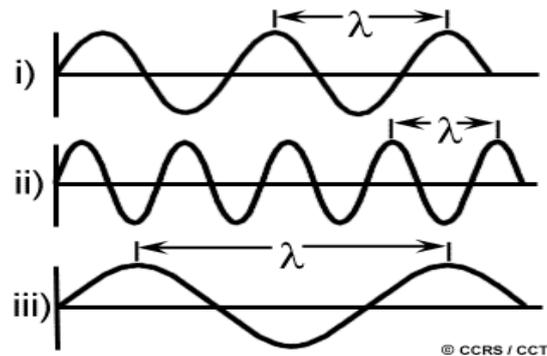
Elle s'exprime en Hertz (Hz) - un Hz équivaut à une oscillation par seconde - ou en multiples du Hertz, les ondes électromagnétiques utilisées en télédétection spatiale ayant des fréquences très élevées :

le kilohertz $1 \text{ kHz} = 10^3$ Hz

le mégahertz $1 \text{ MHz} = 10^6$ Hz

le gigahertz $1 \text{ GHz} = 10^9$ Hz

Dans un milieu d'indice n la vitesse de propagation est $v = c/n$ avec n indice du milieu.



A partir de la fréquence ν (ou de la période $T = 1/\nu$), de la vitesse de propagation dans le vide c , on peut déterminer la périodicité spatiale de l'onde λ_0 :

$$\lambda_0 = cT = \frac{c}{\nu}$$

$$[\lambda_0] = \text{m} \quad [c] = \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad [T] = \text{s} \quad [\nu] = \text{s}^{-1} \quad (1.2)$$

Dans un milieu homogène d'indice de réfraction n :

$$\lambda = \frac{cT}{n} = \frac{\lambda_0}{n} \quad (1.3)$$

Rayonnement et énergie

Le rayonnement émis par les molécules est une onde électromagnétique qui transporte de l'énergie E liée à sa fréquence ν par la relation :

$$E = h\nu = hc / \lambda$$

h : La constante de Planck ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$),

c : La vitesse de la lumière dans le milieu où se propage l'onde ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ dans le vide),

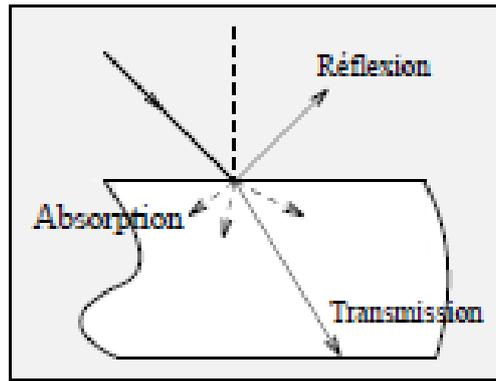
λ : La longueur d'onde du rayonnement, exprimée habituellement en nanomètres (nm).

Principe du chauffage par rayonnement

Lorsqu'un rayonnement arrive sur un corps opaque, celui-ci peut être :

- transmis,
- absorbé,
- réfléchi,

Dans des proportions variables selon la nature du corps.



Réflexion, transmission et absorption du rayonnement

Classification des corps soumis à un rayonnement

Selon la nature du corps, et selon la longueur d'onde du rayonnement incident l'un de trois phénomènes : réflexion, transmission et absorption, peut être prépondérant.

Classification des corps soumis à un rayonnement

➤ Corps transparents

Lorsqu'un rayonnement ne subit aucune atténuation lors de la traversée d'un milieu, on dit que le milieu est transparent pour ce rayonnement. C'est le cas du vide pour toutes les radiations, de certains gaz (N_2 , O_2 notamment) dans le visible et l'infrarouge.

➤ Corps opaques

La grande majorité des solides et des liquides sont dits « opaques », car ils arrêtent la propagation de tout rayonnement dès leur surface : ces corps se réchauffent par absorption du rayonnement.

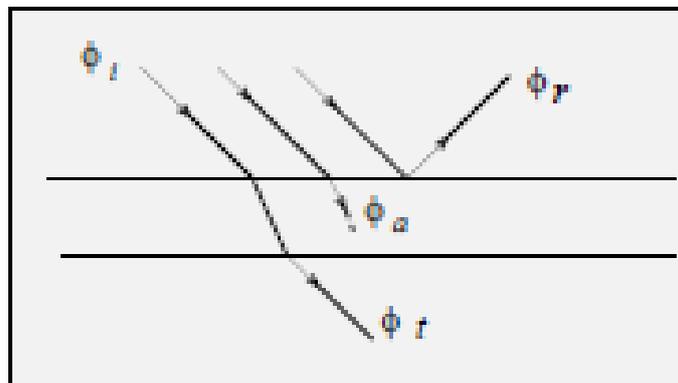
➤ Corps semi-transparentes

Par contre certains corps sont partiellement transparents car l'onde électromagnétique peut se propager dans le milieu considéré. La propagation s'accompagne d'une absorption électromagnétique qui accroît l'énergie du milieu traversé.

Loi de conservation de l'énergie

Soit Φ_i le flux incident, Φ_r le flux réfléchi, Φ_t le flux transmis et Φ_a le flux absorbé, la conservation de l'énergie s'écrit :

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_t + \Phi_a$$



Décomposition du flux incident.

Coefficient d'absorption thermique

Posons :

$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i}$	facteur de réflexion
$\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_i}$	facteur d'absorption
$\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i}$	facteur de transmission

La conservation de l'énergie s'écrit :

$$\rho + \alpha + \tau = 1.$$

Ces paramètres caractérisent le comportement d'un corps vis _a vis du rayonnement reçu. Le coefficient α est important en thermique : il mesure la proportion de conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique.

Remarque :

Le coefficient α est faible pour les surfaces métalliques polies et non oxydées. Il augmente pour les corps qui apparaissent noirs mais reste toujours inférieur à l'unité.

III.4. La lumière naturelle et artificielle

a. Définition de la lumière

La lumière est composée de rayonnements électromagnétiques dans une gamme relativement étroite de longueur d'onde; elle est comprise entre 380 et 780 nm.

La lumière blanche naturelle est composée de l'ensemble du spectre. S'il manque une ou plusieurs bandes de longueur d'onde, l'œil interprète les longueurs d'onde restant en termes de couleur (teinte)

Lorsque la lumière pénètre dans un objet, plusieurs cas de figure peuvent se présenter :

1. la lumière est totalement absorbée, et l'objet est noir ;
2. La lumière est partiellement absorbée. Les longueurs d'onde non absorbées donnent la couleur de l'objet;
3. La lumière n'est pas absorbée et l'objet est transparent

e. La lumière naturelle

La lumière du soleil est une lumière blanche composée de l'ensemble des longueurs d'onde visibles. Cette composition représente le spectre. Chaque longueur d'onde correspond à une radiation "colorée".

f. La lumière artificielle

C'est l'éclairage produit artificiellement à l'aide d'une lampe ou projecteur.

Classification des sources de lumière :

On peut classer les sources de lumière en deux catégories :

Les sources primaires : se sont des corps qui créent et émettent de la lumière dans toutes les directions (Une bougie, une lampe, le soleil, ...etc). Il existe deux sortes de sources :

1. les sources chaudes (soleil, étoiles, bougie...)
2. les sources froides dont la température est voisine de la température ambiante ($\sim 25^{\circ}\text{C}$). exemples : écrans, vers luisant, luciole....

Les sources secondaires : Une source de lumière secondaire est un corps qui renvoie la lumière reçue dans toutes les directions.

Exemples : La Lune, les planètes, un écran de cinéma

g. Sources artificielles de lumière

La source artificielle de lumière peut être de deux principes :

- Incandescence
- Luminescence

a) Incandescence

C'est un phénomène physique qui se manifeste par une émission de lumière due à la température d'un corps chauffé. Dans une lampe à incandescence, l'électricité porte à haute température un filament de tungstène enfermé dans une ampoule en verre vide d'air ou remplie de gaz inertes. Les radiations thermiques obtenues émettent alors un spectre continu de lumière visible.

La quantité de la lumière émise par dépend de la température du corps chauffé :

- un corps moyennement chauffé (1600°C) émis une lumière rouge orangée
- un corps très chaud (5000°C) émis une lumière blanche (soleil)
- un corps extrêmement chaud ($8000-9000^{\circ}\text{C}$) émis une lumière blanche bleutée

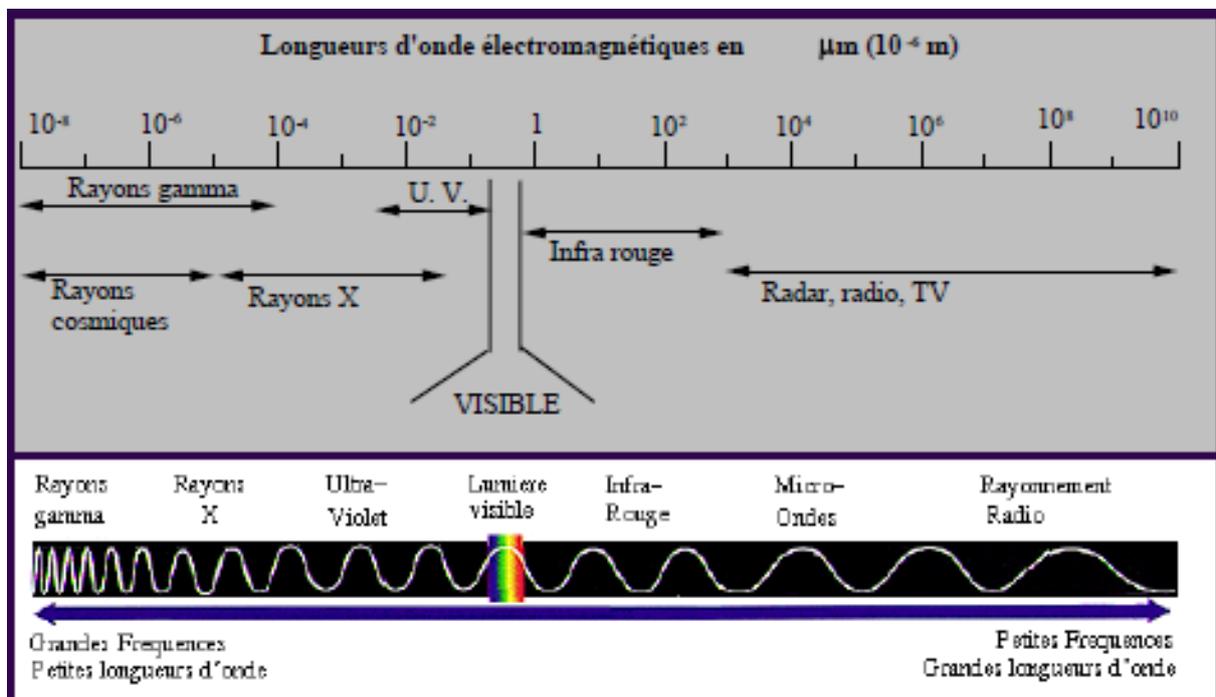
Exemples : combustion, lampe à filament, lampe halogène..

b) Luminescence

c'est une émission de lumière dite froide. Cette lumière résulte d'une interaction entre particules électroniquement chargées (transition électronique dans les atomes). La luminescence est le rayonnement (non thermique...) émis par un gaz ou une vapeur métallique soumis à des décharges électriques. Ce rayonnement ne couvre pas forcément tout le spectre visible. Ces décharges sont intermittentes, la lumière émise également, à la fréquence des décharges (par exemple à la fréquence du courant alternatif). Ce principe a donné le jour à toutes les lampes à décharge basse et haute pression actuelles.

Exemple : néons, vapeur de Hg, Na, lampe fluorescente..

Le spectre électromagnétique



Le spectre électromagnétique couvre plusieurs domaines à savoir :

- Le domaine du rayon X
- Le domaine des rayons gamma
- Les domaines l'ultra- violet allant de 190 à 800 nm,
- Le visible (400-800 nm).
- Les domaines couvrant l'infra rouge (2500-3000 nm)
- Le domaine du micro- ondes

- Le domaine des ondes radio.

II.5. La séparation optique

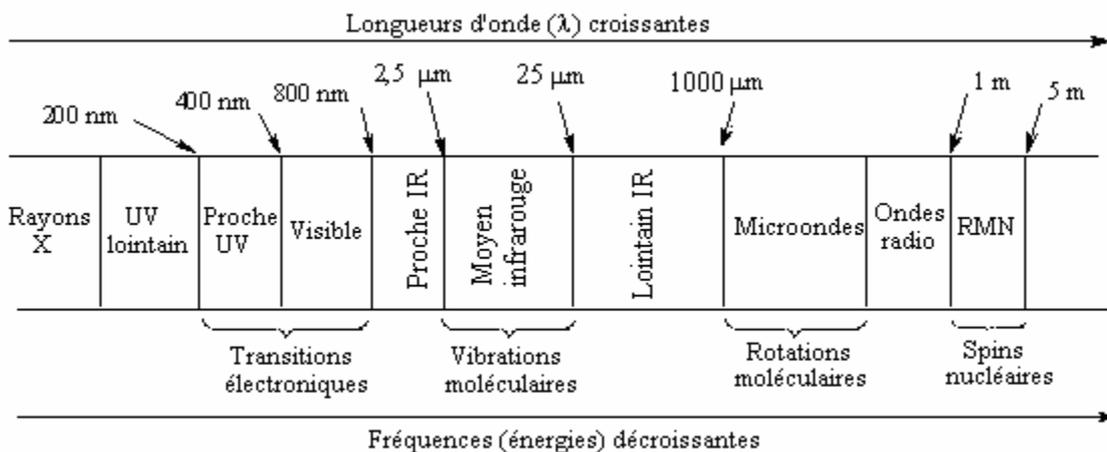
II.5.1. Principe de fonctionnement de la séparation optique

La séparation optique des minerais est une technique qui se base sur l'examen, au moyen de caméras, des caractéristiques optiques des minéraux. Ces caméras examinent la surface d'un minerai circulant sur un convoyeur, éclairé dans des conditions contrôlées. Les critères examinés sont la forme, la granulométrie et la couleur au sens large : spectre de la lumière réfléchi par l'objet dans le visible, l'infrarouge (IR) ou l'ultraviolet (UV).

Dans le domaine des mines le rayonnement le plus utilisé est l'infrarouge.

a. Le domaine de l'infrarouge

Le rayonnement infrarouge (IR) fut découvert en 1800 par Frédéric Wilhelm Hershel. Ces radiations localisées au-delà des longueurs d'onde dans le rouge, sont situées entre la région du spectre visible et des ondes hertziennes. Le domaine infrarouge s'étend de $0,8 \mu\text{m}$ à $1000 \mu\text{m}$. Il est arbitrairement divisé en 3 catégories, le proche infrarouge ($0,8$ à $2,5 \mu\text{m}$), le moyen infrarouge ($2,5$ à $25 \mu\text{m}$) et le lointain infrarouge (25 à $1000 \mu\text{m}$).



Domaines de l'IR dans le spectre électromagnétique.

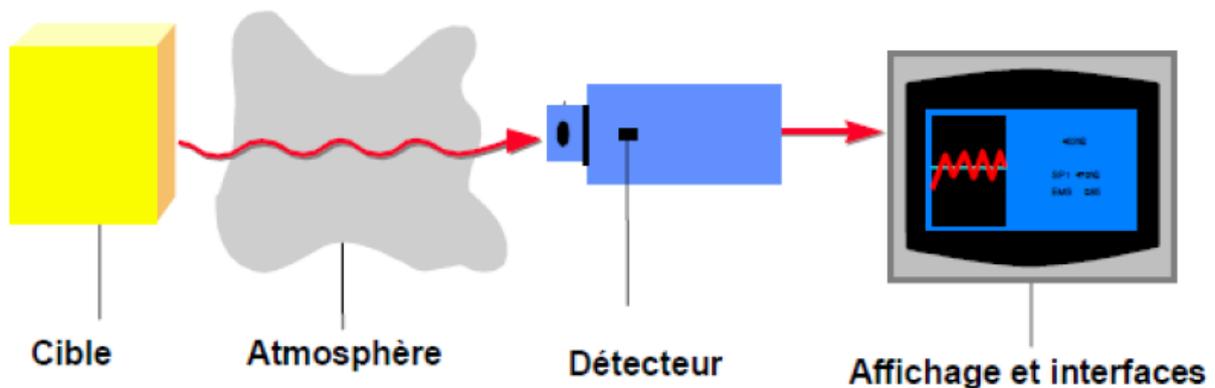
Les radiations infrarouges traversent facilement l'atmosphère, même brumeuse. On utilise cette propriété en photographie aérienne, pour prendre des vues panoramiques par temps couvert. L'infrarouge sert aussi au chauffage domestique ou industriel et au séchage des vernis et peintures, du bois, des cuirs, des papiers et pellicules photographiques, à la déshydratation des fruits et légumes. L'une des applications militaires les plus importantes concerne l'autoguidage par infrarouge des missiles. L'infrarouge peut aussi servir pour les appareils de visée nocturne.

Une camera infrarouge (ou camera thermique) est une camera qui enregistre les différents rayonnements infrarouges (ondes de chaleurs) émis par les corps et qui varient en fonction de leurs températures.

C'est un procédé qui est de plus en plus utilisé dans l'industrie car ces cameras permettent d'effectuer des contrôles au niveau d'une ligne de production et ceci sans aucun contact avec le produit contrôlé.

b. Le domaine infrarouge et son système de mesure.

Le système de mesure par infrarouge consiste à ce que l'optique de la camera focalise les radiations de l'objet à mesurer vers le détecteur. Ce dernier transforme alors l'information reçue en un signal qu'il transmet vers l'affichage.



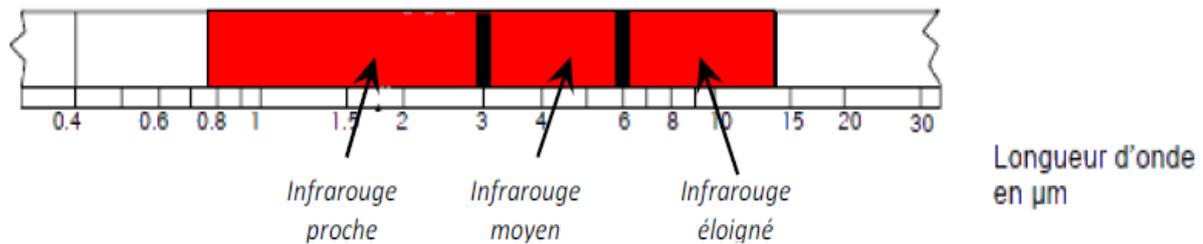
Système de mesure par infrarouge.

- Le rayonnement infrarouge

Tout corps ayant une température (T) supérieure au zéro absolue (-273°C ou 0°K) émet, selon sa température, une énergie infrarouge spécifique. Cette énergie est provoquée par le mouvement mécanique au sein des molécules. L'intensité de ce mouvement dépend de la température du corps.

Les mouvements des molécules étant synonyme de mouvement de charge, ils génèrent des radiations électromagnétiques.

Ces radiations ont permis de mettre en place le spectre électromagnétique suivant :



Le domaine de l'infrarouge s'étend de $0.8\mu\text{m}$ à $1000\mu\text{m}$. il est divisé en trois catégories :

- Le proche infrarouge de 0.8 à $2.5\mu\text{m}$;
- Le moyen infrarouge de 2.5 à $25\mu\text{m}$;
- Le lointain infrarouge de 25 à $1000\mu\text{m}$.

Les radiations infrarouge traverse facilement l'atmosphère. Elles sont utilisées dans de diverses domaines, on note :

- Séparation de minerais ;
- Photographie aérienne ;
- Déshydratation des fruits et légumes ;
- Tri de déchets.....

Le rayonnement thermique

Les corps solides chauffés à des températures suffisamment élevées commencent à émettre de la lumière dans le visible ; mais à des températures basses ils émettent des rayonnements sous forme d'ondes infrarouges.

c. Source de radiations infrarouges

Source thermique

La radiation lumineuse est le résultat de l'échauffement d'un filament métallique par un courant électrique. Les sources thermiques peuvent présenter beaucoup d'avantages :

- Emission de radiations lumineuses couvrant une grande plage de longueurs d'onde ;
- L'intensité de la source est forte ce qui réduit les problèmes d'amplification du signal
- Les filaments des sources thermiques émettent des radiations comparables à celles d'un corps noir.

- Le Corps Noir.

Le rayonnement émis par un corps dépend de sa nature. L'émetteur idéal est le corps qui, pour une température donnée, émet le maximum d'énergie. Ce corps s'appelle le corps noir. L'absorption découlant des mêmes règles que l'émission, ce corps peut également être défini comme celui dont le pouvoir d'absorption est maximal.

Pour le corps noir, le facteur d'absorption est donc égal à l'unité pour toutes les directions et pour toutes les longueurs d'onde. Ce corps absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit sans en réfléchir ni transmettre une quelconque fraction. C'est le corps de référence.

Le corps noir est le corps de référence dans la théorie du rayonnement infrarouge : celui-ci est capable d'absorber tout rayonnement incident quelque soit sa longueur d'onde et d'émettre à son tour des radiations à toutes les longueurs d'ondes. Ce corps référentiel cède à l'environnement l'énergie captée jusqu'à l'établissement d'un équilibre thermodynamique.

$$\text{pour un corps noir : } \alpha = \alpha\lambda = 1$$

Trois lois définissent le rayonnement d'un corps noir :

La loi de Planck :

Max Planck a calculé les flux de puissances électromagnétiques émis par un corps noir. La relation utilisée est la suivante :

$$w_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \text{ (watts/cm}^2\text{)}$$

avec :

- λ : longueur d'onde ;
- w_{λ} : Flux de puissance émis par le corps noir à la longueur d'onde ;
- c : vitesse de la lumière = 3.10^{10} cm/s ;
- k : constante de Planck = $6,6.10^{-34}$ Watt.s² ;
- h : constante de Boltzmann = $1,4.10^{-23}$ Watt.s²/°K ;
- T : température absolue du corps en Kelvin.

La loi de Wien : *Cette loi exprime le fait que la couleur d'un objet chauffé à une température élevée varie du rouge au blanc. La relation utilisée est la suivante :*

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \text{ (}\mu\text{m)}$$

avec :

- λ_{max} : longueur d'onde à laquelle se produit l'émission maximale ;
- T : température absolue du corps en Kelvin.

La loi de Stefan-Boltzmann : *Celle-ci détermine le flux de puissance total émis par un corps noir. La relation utilisée est la suivante :*

$$w = \sigma \cdot T^4 \text{ (watts/cm}^2\text{)}$$

avec :

- σ : constante de Stefan-Boltzmann = $5,7.10^{-12}$ (Watts/cm²/°K⁴) ;

- T : température absolue du corps en Kelvin.

Le facteur d'émission ou EMISSIVITE ϵ

L'émissivité d'un corps représente l'aptitude de ce corps à émettre du rayonnement infrarouge. C'est le rapport entre le flux de puissance émis à une longueur d'onde par un corps réel à une température T et le flux de puissance qui serait émis à la longueur d'onde par un corps noir porte à la température T .

La relation mathématique qui permet de calculer l'émissivité est la suivante :

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{W_{\lambda}}{W_{\lambda_0}} \quad (\text{sans unité})$$

avec :

w_{λ} : Flux de puissance émis par un corps réel à la longueur d'onde).

w_{λ_0} : Flux de puissance émis par un corps noir à la longueur d'onde).

Quelques exemples :

- T est la température en °C à laquelle la mesure a été réalisée.

- ' $d\lambda$ ' est la bande spectrale en μm .

- ϵ : est l'émissivité normale.

Matériaux	T	' $d\lambda$ '	ϵ
Peau	30°C	2 à 5	0,98
Papier	30°C	8 à 12	0,95
Eau	30°C	2 à 5	0,95
Peinture mate	20 à 100°C	2 à 5	0,95
Acier oxydé	100°C	2 à 5	0,74
Acier poli	100°C	2 à 5	0,07
Acier rouillé	20°C	2 à 5	0,69

d. L'environnement.

Le réglage d'une camera infrarouge pour un certain domaine spectral s'avère nécessaire en raison de la transmissivité spécifique du parcours effectuée par les radiations, c'est-à-dire de l'environnement.

Certains composants de l'atmosphère, comme la vapeur d'eau et le gaz carbonique, absorbent les radiations infrarouges à une certaines longueurs d'ondes et provoquent des pertes de transmission. De nos jours, les fabricants ont pratiquement tous équipés leurs appareils de mesure par infrarouge de filtre de correction atmosphérique. L'utilisateur ne doit donc plus craindre les éventuelles pertes de transmission.

Il faut également tenir compte des sources de rayonnements thermiques situées à proximité de la cible, mais également les poussières, les fumées et les particules en suspension qui peuvent encrasser l'optique et ainsi fausser les mesures.

Voici dans un tableau récapitulatif les problèmes liés à l'environnement et les solutions apportées à ce problème.

Perturbations	Solutions
Rayonnement environnant plus chaud que l'objet	- Capteur de compensation ; - Surface à mesurer à l'ombre du rayonnement.
Poussières, Fumées, Particules dans l'atmosphère	- Collier de soufflage d'air ; - Pyromètre bi chromatique.
Température ambiante élevée	- Montage à isolement thermique ; - Refroidissement par air et/ou eau ; - Collier de soufflage d'air ; - Bouclier thermique.

e. Détecteurs.

Le détecteur est la pièce maîtresse de tout thermomètre infrarouge. Il transforme l'énergie infrarouge captée en signaux électriques qui sont alors affichés en termes de température par une électronique d'interprétation. Les techniques récentes utilisées par les processeurs ont augmenté la stabilité, la fiabilité, la résolution et la vitesse de réponse des thermomètres infrarouges tout en baissant leurs coûts.

On connaît deux principales catégories de détecteurs par infrarouge : les détecteurs quantiques et les détecteurs thermiques.

- **Les détecteurs quantiques** (photodiodes) entrent directement en interaction avec les photons captés créant ainsi des paires d'électrodes, puis un signal de courant électrique.
- **Les détecteurs thermiques** modifient leur température selon le rayonnement incident. La modification de la température génère une tension similaire à celle d'un thermocouple.

L'échauffement propre aux détecteurs thermiques fait qu'ils sont beaucoup plus lents que les détecteurs quantiques. La signification de l'expression «beaucoup plus lents » veut dire que les détecteurs thermiques exigent un temps de réponse exprimé en «ms » en comparaison aux «ns » ou aux « μ s » pour les détecteurs quantiques.

f. Affichage et interface.

Les interfaces disponibles et la nature de l'affichage des valeurs mesurées sont des éléments importants pour l'utilisateur.

Les sorties analogiques ou numériques permettent d'utiliser des affichages supplémentaires dans le poste de contrôle ou d'opérer des réglages. Le raccordement direct d'électroniques d'interprétation, d'imprimantes et d'ordinateurs est également possible.

g. Les Caméras Thermiques

L'atmosphère possède trois fenêtres de transmission dans l'infrarouge, c'est dans ces bandes de longueurs d'onde que sont optimisés les détecteurs. Les premières caméras utilisaient un seul détecteur associé à un dispositif de balayage à miroirs deux axes (lignes et colonnes), puis des barrettes ont été produites (un seul axe de balayage suivant les lignes). Actuellement,

elles utilisent des matrices de détecteurs. Il faut ajouter ici que les détecteurs peuvent être quantiques, ils sont alors refroidis pour éliminer le courant d'obscurité, ou thermiques.

Si on associe à l'observation d'une même scène thermique un système radiométrique de captation spatiale adjoint à un ordinateur qui à la fois convertit les rayonnements infrarouges en points lumineux et en températures, on obtient une caméra infrarouge. Cet équipement permet de visualiser et de quantifier les températures d'une scène thermique : cette technique est appelée "**Thermographie infrarouge**".

Il existe deux systèmes de captation spatiale des radiations électromagnétiques : le système à balayage spatial et le système à plan focal.

Le système à balayage spatial.

La caméra thermique est munie d'un dispositif optico-mécanique qui par le biais de miroirs permet le balayage d'une scène suivant des axes verticaux et horizontaux. Dans ce cas, le même détecteur analyse chaque zone de la scène thermique avec un très léger décalage temporel.

Le système à plan focal.

Celui-ci est constitué par une multitude de radiomètres appelé "matrice de détecteurs". Dans ce cas, chaque détecteur est destiné à l'analyse continue d'une zone unique dans le champ scanné défini par l'optique de la caméra

Depuis 1989, les imageurs thermiques à matrice de grand nombre de détecteurs sont disponibles pour des applications civiles, militaires et industrielles. En 1995, les matrices ont été adoptées pour les caméras thermiques d'entrée de gamme. Une meilleure qualité d'image risque de faire conclure à de meilleures qualités de mesure ; il est donc désormais nécessaire d'observer les implications de l'emploi des matrices sur les caractéristiques et performances instrumentales des caméras thermiques.

h. Principes de fonctionnement:

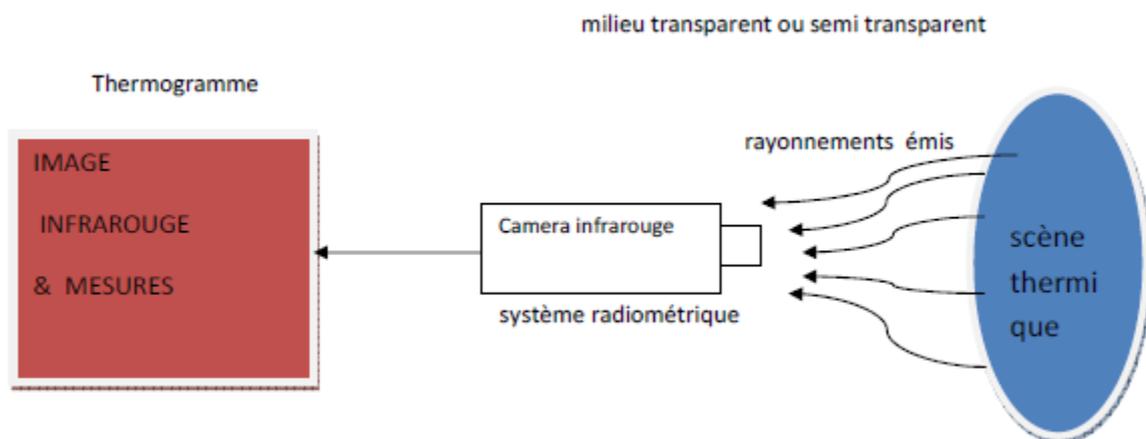
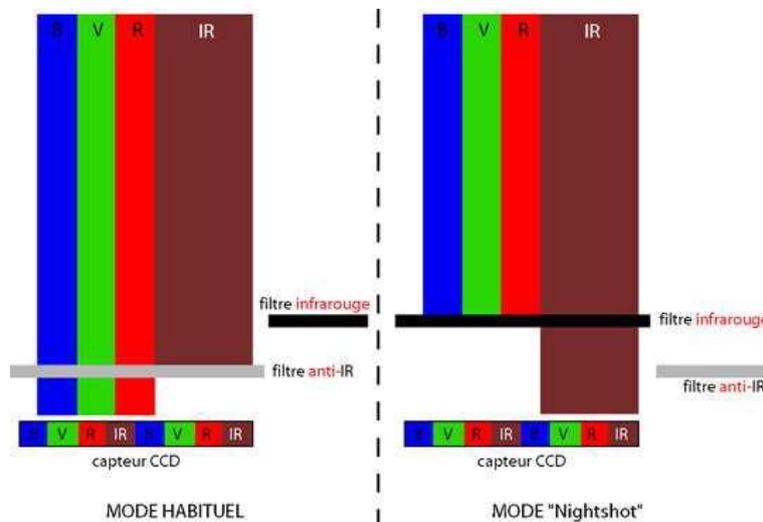


Schéma de fonctionnement de camera thermique

La camera infrarouge capte au travers d'un milieu transmetteur (ex : l'atmosphère) les rayonnements émis par une scène thermique. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques ou analogiques : ceux-ci sont transcrits en température par le ordinateur et transformés en points lumineux sur un écran. L'image ainsi obtenue s'appelle "Thérmogramme".

Pour comprendre le fonctionnement, il est intéressant de savoir ce qui se passe lorsque la camera passe en mode «infrarouge ». Tous les capteurs CCD et tri-CCD ont une couche photosensible au rayonnement infrarouge. Toutes les cameras professionnelles et grand public possèdent un filtre qui coupe l'infrarouge et restreint donc l'impact des rayonnements sur le capteur à la seule lumière visible. La grande innovation est d'avoir rendu ce filtre amovible, qui est alors remplacé par un autre filtre, qui lui, inversement, supprime en majeure partie la lumière visible arrivant au capteur.



III.5.2. Le procédé de la séparation optique

c. Principe du fonctionnement

La machine scanne et détecte les substances minérales qui passent sur le convoyeur (tapis roulant). Les spectres de ces substances sont analysés en l'espace de quelques millisecondes par un ordinateur (spectromètre) qui les compare avec les spectres de sa base de données.

Une table vibrante est habituellement utilisée pour alimenter le convoyeur d'accélération. Cette approche est préférée car: Le matériel se stabilise plus rapidement sur le convoyeur d'accélération dû à la faible distance de transition entre la table vibrante et la courroie du convoyeur;

La table vibrante aide à étendre le matériel sur la pleine largeur du convoyeur d'accélération, ce qui aide grandement à atteindre une seule couche de matériel et ainsi éviter que plusieurs matériaux se superposent.

Le matériel, une fois accéléré et stabilisé sur la courroie du convoyeur d'accélération, passe sous un faisceau lumineux et est ensuite « scanné » (voir schéma simplifié ci-après) :

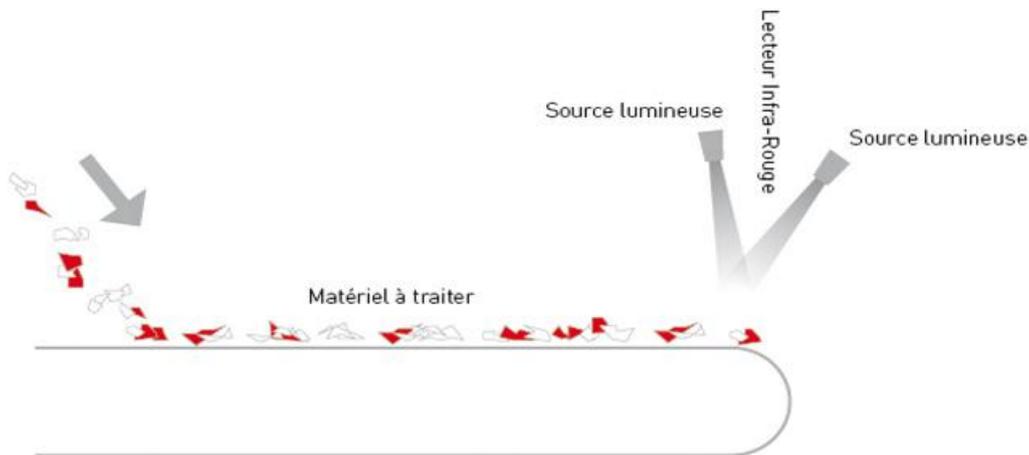


Schéma simplifié de la séparation optique.

En fonction des spectres détectés et donc de leurs compositions, les substances minérales sont ensuite soufflées grâce à de l'air comprimé vers différentes goulottes.

a. Processus d'éjection du matériau à trier

La lecture sur toute la largeur du convoyeur d'accélération est sous-divisée en zones. Chacune de ces zones de lecture contrôlera le processus d'éjection en étant associées à une série de valves.

Les zones de détection/éjection dépendent directement de la nature du matériel à trier :

Le matériel plus gros à traiter entraînera des plus grosses zones de détection alors que les petits morceaux auront des zones plus petites;

Il y a trois configurations possibles des valves d'éjection :

- Valves standard d'éjection : utilisées pour la plupart des tris de déchets
- Valves ultra-robustes : surtout utilisées pour trier des matériaux plus gros et plus lourds tels que le bois dans les déchets de Construction, Rénovation et Démolition (CRD);
- Valves de précision : utilisées pour éjecter les petits morceaux.

Une fois que le matériel a été identifié comme celui à éjecter, deux options d'éjection sont possibles :

Éjection vers le haut :

Lorsque le matériel lu par la caméra IR correspond à celui à trier, des valves situées sous la trajectoire naturelle du matériel le soufflent vers le haut, changeant ainsi sa trajectoire et l'acheminant dans une chute séparée

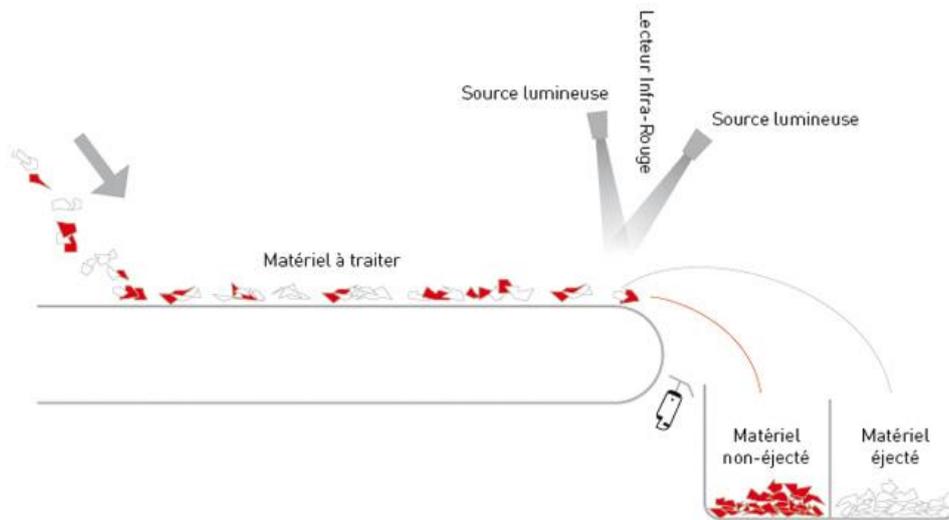


Schéma simplifié de la séparation optique avec éjection vers le haut.

Éjection vers le bas :

Lorsque le matériel lu par la caméra IR correspond à celui à trier, des valves situées au dessus de la trajectoire naturelle du matériel le soufflent vers le bas, changeant ainsi sa trajectoire et l'acheminant dans une chute séparée.

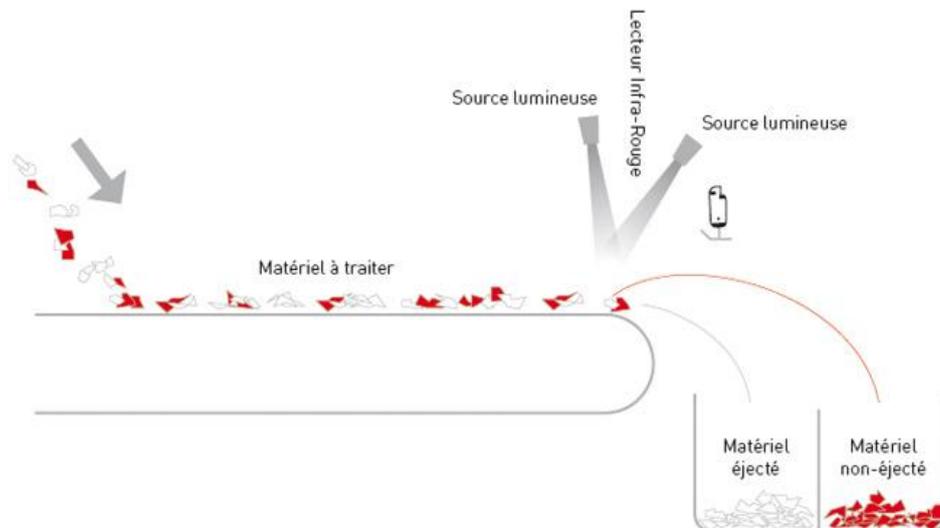


Schéma simplifié de la séparation optique avec éjection vers le bas.

III.5.3. Les caractéristiques considérées par la séparation optique

Le tri optique peut se faire pour plusieurs caractéristiques physiques:

- **Couleurs réelles et luminosité** : Identification au moyen de divers types de caméras et des systèmes d'éclairage les plus variés dans le spectre de lumière visible.
- **Granulométrie** : Analyse ou tri des grands flux de matériau suivant la dimension des particules.
- **Forme des grains** : le tri se fait par rapport longueur / largeur librement paramétrable.

Le système du tri optique peut être équipé de capteurs pour métaux à fin de faciliter la séparation. On distingue :

Capteur de métaux Identification inductive de métaux ferreux et non ferreux à très haute sensibilité.

Capteurs multiples

- Applications spéciales nécessitant l'emploi de plus d'un capteur.
- Observation bilatérale au moyen de caméras
- Combinaison de la détection inductive de métaux avec système de caméra.

Schéma général de la séparation optique

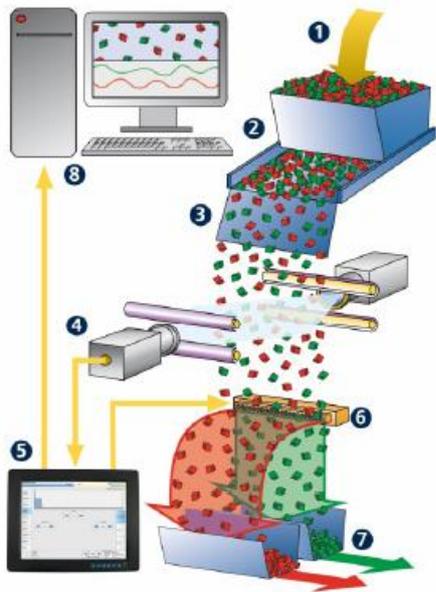


Figure:

Principe de fonctionnement du tri optique

1. Alimentation en matériau
2. Répartition et transport
3. Accélération et séparation
4. "Scannage" du rideau de matériaux par divers systèmes optiques
5. Analyse par un ordinateur rapide
6. Séparation par des jets d'air comprimé de haute précision
7. Evacuation des produits triés
8. Liaison avec le réseau

	Matières à traiter	Flux passant	Flux rejeté
verre			
calcaire			
Sel			

Photos de quelques matériaux avant et après le tri optique

III.5.4. Conditions du tri

Le principe de séparation optique fonctionne dans les conditions suivantes pour des granulométries comprises dans une fourchette de 1 à 250 µm.

1. Les matériaux à séparer doivent pouvoir être différenciés par la couleur ou la luminosité. Des différences infimes de couleur suffisent, mais cela suppose une certaine préparation du matériau (par exemple lavage, humidification, égouttage ou séchage suivant le cas).

2. Le matériau doit pouvoir être séparé.

3. L'alimentation doit autant que possible être réalisée avec des produits ayant une tranche granulométrique étroite. Cela permet alors d'ajuster de manière optimale les paramètres de tri, la pression de l'air et la limite de séparation en fonction du produit.

Bibliographie

- **Olivier PERROT** 2010-2011 cours de rayonnement I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque Département Génie Thermique et énergie.
- **A. EL HAJJI & S.ZAYDOUN** Cours de Spectroscopie Infrarouge/ U.M. V / FSR/ Master sciences analytiques.
- **Cyril Langlois** 2007 Reconnaissance des minéraux
- **N. Bouzidi** cours L3 Techniques de Tri des Déchets université a/mira- Bejaia Faculté de technologie département des mines et géologie.
- **Stéphane DELECROIX & Mahmoud SKIFATI** Les Caméras Infrarouges.
- **Jan Drzymala** 2007 mineral processing; Foundations of theory and practice of minerallurgy. Livre.
- **Nicholas t. Arndt ; clément ganino 2010; ressources Minérales** Origine, nature et exploitation livre, édition DUNOD.
- **Jacques Deferne** 2010 Introduction à la cristallographie.
- **michael O'Donoghue** 1997 : roches et minéraux. Livre ; édition FONTAINE