

OPTIQUE 2^{ème} partie

• **Emission de la lumière par la matière** : Incandescence et luminescence - Phosphorescence et fluorescence Les sources de lumière - Les spectres de raies des atomes Emission spontanée - Emission stimulée - Effet laser - Divers types de laser

• **Lumière et couleurs** : Diffusion de Rayleigh (bleu du ciel) et diffusion de Mie Absorption et diffusion - Loi de Beer-Lambert Rudiments de photométrie

1/ EMISSION DE LA LUMIERE PAR LA MATIERE

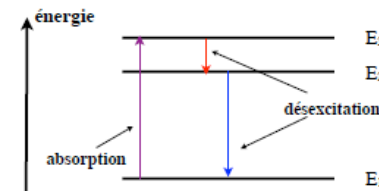
1.1 Incandescence et luminescence

→ **Incandescence** : lumière **d'origine thermique** et émise par des corps chauffés à haute température (ex : flamme d'une bougie, ampoule électrique, rayonnement du corps noir).

→ **Luminescence** :

- Lumière **froide** qui n'est pas d'origine thermique consécutive à un **apport d'énergie** amenant les atomes ou molécules dans un état excité.
- Le retour de ces éléments vers leur état fondamental s'accompagne de l'émission d'un **photon (=transition radiative)**.
- Les énergies absorbées ou émises par désexcitation sont quantifiées : $E_2 - E_1 = h\nu = hc/\lambda$

→ **Photoluminescence** : absorption puis réémission de lumière soit directement soit pas l'intermédiaire d'un ou plusieurs niveaux.



Ce qui distingue la **fluorescence** et la **phosphorescence** est leur temps de déclin (retour au fondamental) :

- ⇒ Le déclin de la **fluorescence** est **rapide** : $\sim 10^{-9} s$
- ⇒ Le déclin de la **phosphorescence** est **long** : $\sim 10^{-5} \text{ à } 10^4 s$, puisque, les éléments excités passent par un état intermédiaire avant d'émettre de la lumière.

Après interruption d'une illumination UV, la lumière persiste : c'est la phosphorescence. La phosphorescence n'est pas observée en solution à T ambiante du fait des collisions avec les molécules de solvant, mais peut l'être dans un milieu rigide.

1.1 1.2 Luminescence atomique

→ **Electroluminescence** : On peut obtenir des spectres de raies en soumettant un gaz à une décharge électrique (vapeur de sodium ou de mercure).

Sodium basse pression	Sodium haute pression
Gaz raréfié avec peu de collisions entre atomes \Leftrightarrow 1 seul niveau excité 1 raie = émission de photons de mêmes énergies	Plusieurs collisions entre atomes \Leftrightarrow états excités intermédiaires n raies = émission de photons d'énergies différentes

→ Absorption et émission – diagramme d'énergie

Après absorption d'un photon, le retour d'un atome excité vers son état initial peut suivre 3 scénarios :

- ✓ **(1)** : Emission d'un photon de même énergie que le photon absorbé = Résonance

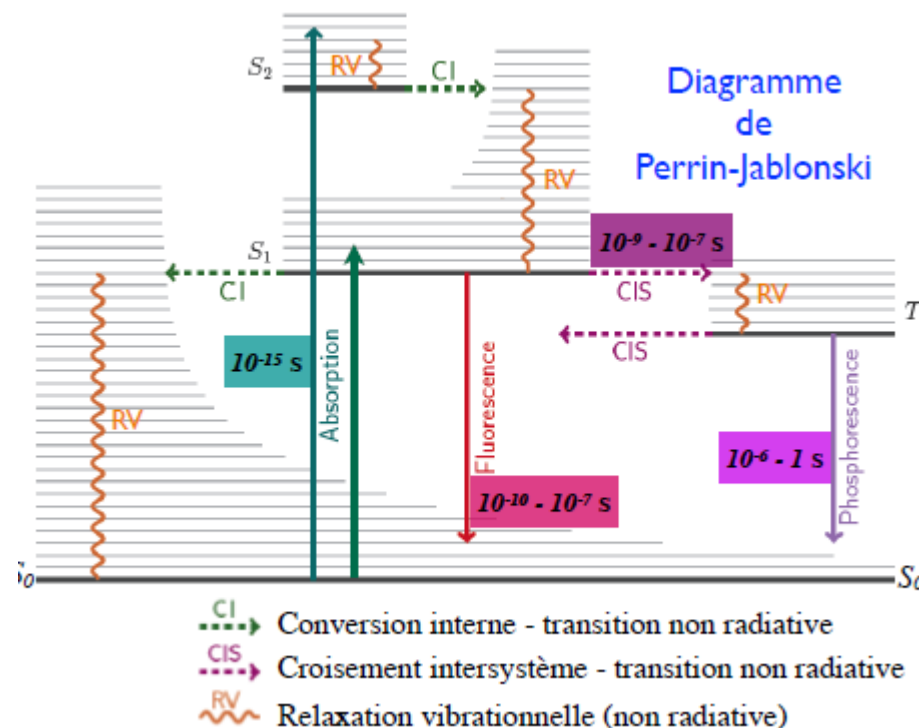
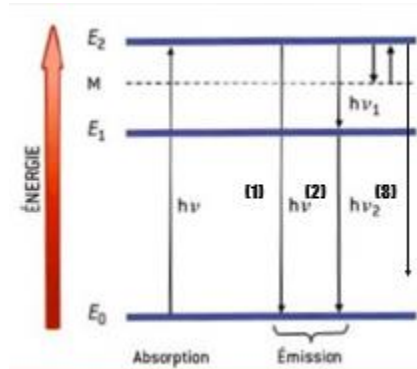
$$E(\text{abs}) = E(\text{émis}) = h \cdot \nu(\text{abs}) = h \cdot \nu(\text{émis})$$

- ✓ **(2)** : Emission de plusieurs photons avec passage par des niveaux intermédiaires

$$E(\text{abs}) > E(\text{émis}) \Leftrightarrow h \cdot \nu(\text{abs}) > h \cdot \nu(\text{émis})$$

- ✓ **(3)** : Emission d'un photon de phosphorescence avec passage par un **état métastable** suite à des collisions (peu probable pour un gaz raréfié) accessible depuis l'état excité E_2 par le biais d'une **transition non-radiative**

$$E(\text{abs}) > E(\text{émis}) \Leftrightarrow h \cdot \nu(\text{abs}) > h \cdot \nu(\text{émis})$$



CI → Conversion interne - transition non radiative
 CIS → Croisement intersystème - transition non radiative
 RV → Relaxation vibrationnelle (non radiative)

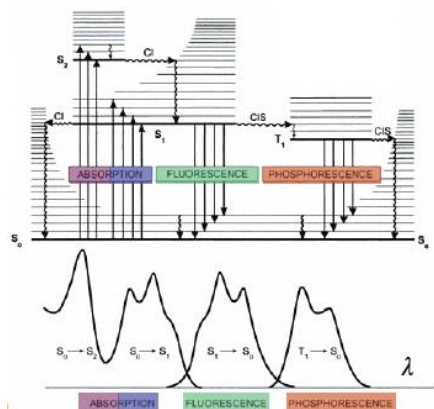
1.3 Luminescence moléculaire

Comme pour les atomes, les électrons d'une molécule peuvent transiter vers des **niveaux électroniques** (traits épais) d'énergie supérieure si la molécule absorbe de l'énergie.

Dans une molécule ces niveaux électroniques présentent des **sous-niveaux vibrationnels** et **rotationnels** (traits fins).

Transition NON RADIATIVE	Relaxation vibrationnelle	Passage, via des collisions entre molécules, vers le sous-niveau vibrationnel le plus bas de l'état considéré.
	Conversion interne	Permet le passage d'un niveau $S_n \rightarrow S_{n-1}$, (singulet) on atteint à chaque fois des sous-niveaux élevés de l'état S_{n-1}
	Croisement inter-système	Permet le passage d'un niveau $S_n \rightarrow T_1$ avec inversion de spin de l'électron promu. La durée de vie de l'état triplet est plus longue que celle de S (qq microsecondes à qq heures).

Transition RADIATIVE		Emissions spontanées entre le sous-niveau le plus bas d'un état donné, et un sous niveau d'un autre état de plus basse énergie.
	Fluorescence	Emission radiative entre deux états <u>singulets</u> (temps déclin 10^{-10} à 10^{-7} s)
	Phosphorescence	Emission radiative entre un état <u>triplet</u> et un état <u>singulet</u> (temps déclin 10^{-6} à plusieurs heures)



$$E_{\text{abs}} > E_{\text{fluo}} > E_{\text{phospho}}$$

$$\lambda_{\text{abs}} < \lambda_{\text{fluo}} < \lambda_{\text{phospho}}$$

❖ Rendement quantique :

L'efficacité de fluorescence pour une molécule donnée est déterminée par le rendement quantique ϕ .

⇒ Il est défini par le rapport entre le **nombre de photons émis** et le **nombre de photons absorbés** par la molécule.

Le rendement quantique **varie en fonction de l'environnement des fluorophores** : concentration, polarité, pH... Exemple : $\phi = 0,85$ pour la fluorescéine

❖ Durée de vie :

- Toutes les molécules excitées ne se dés excitent pas en même temps et la **décroissance** du nombre **N** de molécules **excitées** suit généralement une **loi exponentielle** caractérisée par un temps de déclin τ appelé **durée de vie de l'état excité** :

$$N = N_0 \exp(-t/\tau)$$

τ : temps moyen de séjour des molécules dans **l'état excité**. Il est de l'ordre de la nanoseconde pour la plupart des fluorophores et varie en fonction de l'environnement : milieu, pH...

- Le **temps de déclin de fluorescence**, τ_f est donné par :

$$\tau_f = \phi_f \cdot \tau_r$$

Où τ_r est la **durée de vie radiative** du plus bas sous-niveau de l'état excité.

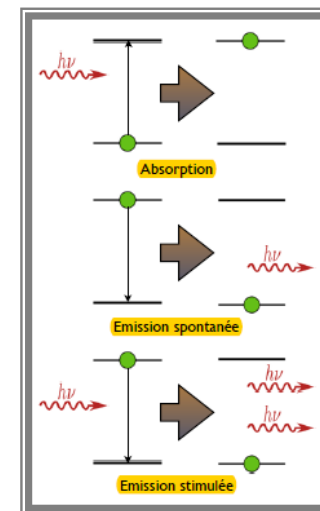
1.4 Emission spontanée – Emission stimulée – effet laser

→ Emission spontanée :

Les atomes et les molécules, après excitation, peuvent revenir à leur état fondamental par **émission spontanée de photons** (fluorescence ou phosphorescence) de façon aléatoire et dans toutes les directions.

→ Emission stimulée et effet laser :

En 1917, Einstein avait prédit un autre type **d'émission dite induite ou stimulée** : un photon incident sur un atome excité peut le forcer à se dés exciter en émettant un photon de **caractéristique rigoureusement identiques** à celles du photon incident (en particulier même énergie, même quantité de mouvement et même polarisation).



Ainsi les **deux** photons **identiques** (en phase) peuvent à leur tour provoquer l'émission **induite** chacun d'un autre photon, conduisant à un processus d'amplification de lumière. C'est le **principe du laser** (acronyme de **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation).

Les principes de base du laser :

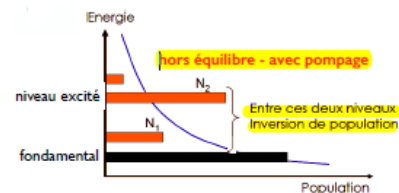
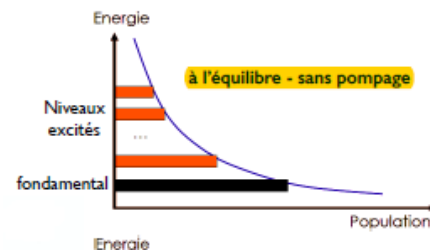
- ➔ **Un milieu amplificateur** : dans lequel on peut déclencher une émission stimulée
- ➔ **Une source externe d'énergie** : le pompage qui permet d'amener les molécules du milieu dans leur état excité et qui assure une inversion de population.
- ➔ **Une cavité résonante** (=2 miroirs) qui amplifie le rayonnement induit.

1.5 Principe du pompage

A l'équilibre thermodynamique, les populations N_i sont régies par la **statistique de Boltzmann** qui prédit une **diminution exponentielle** de la population N_i d'un niveau i avec l'augmentation de l'énergie associée à ce niveau.

$N_i \propto \exp\left(\frac{-E_i}{k_B T}\right)$ avec T : la température et k_B le facteur de Boltzmann.

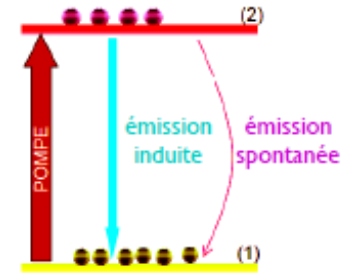
Dans des conditions normales, la majorité des atomes sont dans leur **état fondamental** d'énergie. Or, pour produire une quantité importante de **lumière cohérente** par **émission stimulée**, il faut beaucoup d'atomes dans le **même état excité** : on parle



Le tutorat est gratuit. Toute vente ou reproduction est interdite.

d'**inversion de population**. Il faut en fait forcer l'inversion de population ($N_{excité} > N_{fondamental}$) en pompant le milieu.

Pour une transition donnée, la **probabilité d'émission stimulée** (pour un atome dans l'état excité éclairé par un photon résonant) **est égale à la probabilité d'absorption** (pour un atome dans l'état fondamental éclairé par un photon résonant). Il est donc impossible en pompant une seule transition atomique d'obtenir une inversion de population ($N_2 > N_1$). Au maximum, pour un fort pompage, on a $N_1 = N_2$ appelé **seuil de transparence**.

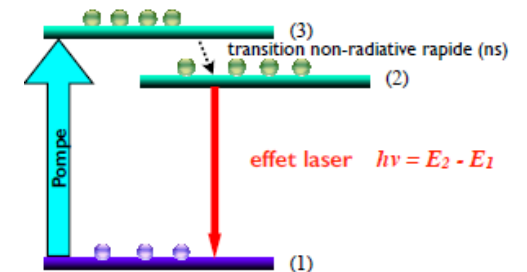


⇒ **IL FAUT AU MINIMUM 3 NIVEAUX POUR OBSERVER UN EFFET LASER ! LE LASER A 2 NIVEAUX N'EXISTE PAS !**

1.6 Laser à 3 niveaux

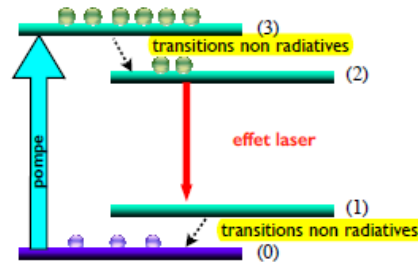
Les atomes dans leur état fondamental **(1)** sont excités vers le niveau **(3)** par pompage.

- ➔ Des **transitions non-radiatives** rapides entraînent le peuplement du niveau **(2)** d'énergie intermédiaire.
- ➔ Le niveau **(2)** est **métastable**, il a une durée de vie **longue**, on repeuple ainsi moins vite le niveau **(1)** et on le vide progressivement.
- ➔ Lorsque le pompage est suffisamment fort, il permet **d'inverser les populations** entre les niveaux **(1)** et **(2)**, on dépasse le **seuil de transparence**. Le laser ne fonctionne pas dès l'allumage, il faut d'abord **franchir ce seuil**.



1.7 Laser à 4 niveaux

- ➔ Beaucoup plus facile à réaliser grâce à l'existence d'un niveau **(1)** d'énergie E_1 un peu plus élevée que l'énergie E_0 du fondamental, mais assez éloigné pour que $(E_1 - E_0) > k_B T$, à température ordinaire.
- ➔ D'où un niveau **(1)** quasiment vide à l'équilibre thermodynamique. On a un affranchissement du seuil de transparence : $\Delta N > 0$ dès que le pompage est actif. L'inversion de population est réalisée dès que le pompage est actif. $N_2 > N_1$.

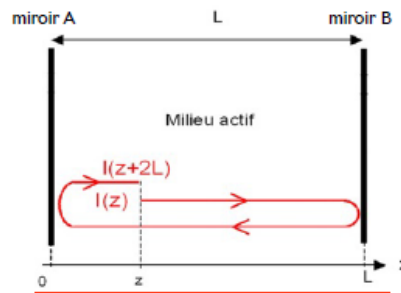


➔ PAS DE SEUIL DE TRANSPARENCE !

Dans certains cas, le niveau **(1)** se trouve dans une **bande large** (analogue à la bande E_3 dans le laser à 3 niveaux). On peut alors choisir le niveau E_1 à l'intérieur de cette bande et par conséquent choisir sur un certain intervalle la fréquence amplifiée. $h\nu = E_2 - E_1$: on parle alors de **laser accordable en fréquence**.

1.8 Cavité résonante

Pour augmenter l'amplification du faisceau incident, on lui fait traverser l'amplificateur plusieurs fois : c'est le rôle de la **cavité résonante** d'un laser. En optique, c'est le plus souvent une cavité Fabry-Pérot constituée de **deux miroirs plans parallèles**. L'un des miroirs n'est que **partiellement** réfléchissant pour permettre la transmission d'une partie du faisceau laser.

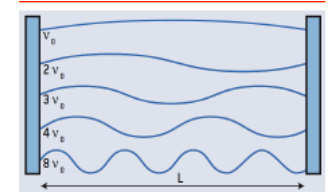


La cavité laser formée par les deux miroirs parallèles est l'analogue optique d'une **corde vibrante** fixée à ses deux extrémités. Ses résonances sont appelées **modes longitudinaux**. La fréquence fondamentale ν_0 est aussi la différence des fréquences de 2 résonances voisines. On peut y installer un **système d'ondes stationnaires**.

❖ Condition de résonance :

$$2L = n\lambda \Leftrightarrow \nu = \frac{nc}{2L} = n\nu_0$$

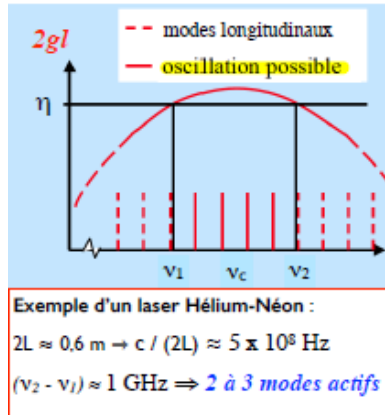
C'est la condition de re-bouclage en "phase" sur un aller-retour.



❖ Condition d'oscillation :

Le fonctionnement du laser suppose que **les pertes** dues à l'absorption dans la cavité et à la nécessaire transmission partielle d'un des miroirs soient au moins **compensées** par l'**amplification** laser.

- ✓ Soit G le gain du milieu actif et η les pertes sur un aller-retour. La condition d'oscillation laser s'écrit : $G(1 - \eta) > 1$
- ✓ Si le milieu actif est de longueur l , on peut écrire : $G = e^{2gl}$ où $g \propto (N_2 - N_1)$ (avec N_2 la population dans l'état excité et N_1 la population dans l'état fondamental).
- ✓ Approximation des gains faibles : Si gl reste petit devant l'unité, $G \approx 1 + 2gl$, et dans la mesure où η est aussi petit devant 1, la condition d'oscillation s'écrit : $2gl > \eta$



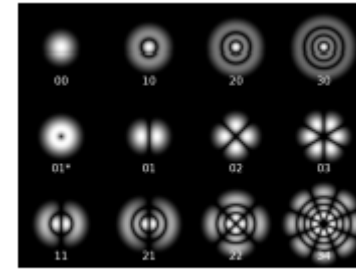
$f(\nu)$ est une courbe en «cloche» centrée sur la fréquence ν_c dans les lasers en milieu condensé.

Les conditions d'oscillations permettent de déterminer le **nombre de modes actifs** en fonction de la longueur **L** de la cavité et de **ν_c** -> seules les fréquences dans 1 petit intervalle autour de ν_c peuvent être **amplifiées**.

Modes transverses :

Si l'analogie avec la corde vibrante permet de comprendre la structure des modes longitudinaux, elle ne peut décrire les **variations transverses** du champ, perpendiculairement à l'axe de la cavité. Liées à la section finie de la cavité, ces variations se traduisent par des modes transverses, analogues des modes de vibration de la **membrane d'un tambour**, et caractérisés par leur **profil spatial**

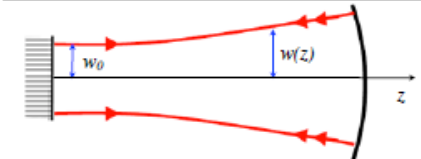
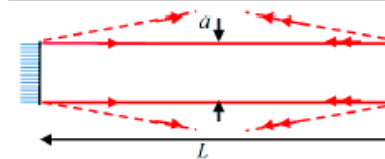
Parmi les modes transverses, le premier (**00**) est celui dont les **pertes par diffraction** sur les bords des miroirs sont les plus faibles. Ce mode est caractérisé par une forte corrélation de l'amplitude et de la phase des ondes dans une section transverse du faisceau. Cette cohérence spatiale se traduit par la **directivité** du faisceau laser.



Modes transverses cylindriques TEM

Pertes par diffraction négligeables si : $\lambda L \ll a^2$

Solution : cavité stable à miroirs concaves.



Si un seul **mode longitudinal** est excité, et ce dans le premier **mode transverse** (par exemple TEM₀₀), c'est ce qui assure la cohérence à la fois **temporelle** et **spatiale** du faisceau laser.

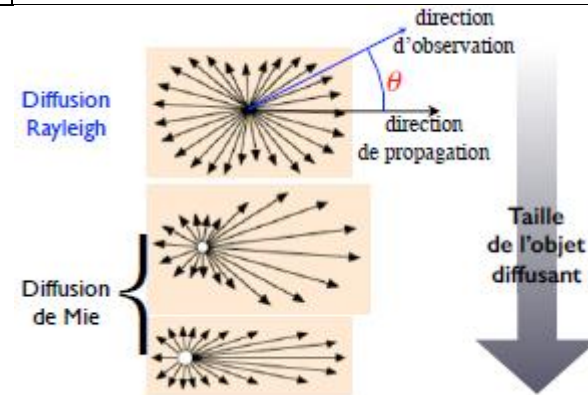
2/ LUMIERE ET COULEURS

Origine de l'émission lumineuse	Phénomène physique responsable de la couleur	Exemples
Source primaire de lumière	<ul style="list-style-type: none"> • incandescence • luminescence <ul style="list-style-type: none"> photoluminescence électroluminescence bioluminescence 	<ul style="list-style-type: none"> - flamme de bougie, filament d'ampoule, résistance électrique, Soleil, étoiles... - peintures phosphorescentes - lampes à vapeur de sodium, diodes électroluminescentes - lucioles, certaines méduses ou poissons...
Source secondaire de lumière	<ul style="list-style-type: none"> • réfraction • diffusion • diffraction & interférences • interférences sans diffraction • absorption • absorption suivi d'émission (photoluminescence) 	<ul style="list-style-type: none"> - dispersion par un prisme, arc-en-ciel... - bleu du ciel, reflets bleutés de la neige, fumée de cigarette... - réseaux de diffraction, iridescence des ailes de certains papillons... - bulles de savon, film d'huile sur l'eau... - pigments, colorants - couleurs des minéraux, des plantes... - objets fluorescents et phosphorescents...

2.1 Diffusion

Modèle classique	Le champ électrique de l'onde électromagnétique fait osciller les électrons des molécules, celles-ci se comportant alors comme des dipôles oscillants , rayonnent à leur tour dans toutes les directions à la même fréquence.
Diffusion de Rayleigh	<p>Pour des particules très petites : taille $< \lambda/10$, l'intensité vaut :</p> $I \propto N \frac{1}{\lambda^4} (1 + \cos^2 \theta)$ <p>N=nombre de particules par unité de volume, θ=angle que fait la direction d'observation avec la direction de la lumière incidente</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ L'intensité varie très fortement avec la longueur d'onde : la lumière bleue est plus efficacement diffusée que la lumière rouge d'un facteur égal à 10

	<p>C'est ce qui explique la couleur bleue du ciel ou la couleur bleutée de la fumée de cigarette...</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ $\cos^2 \theta$ => intensité autant diffusée vers l'avant que vers l'arrière => diffusion symétrique
Diffusion de Mie	<p>Pour des particules de grandes tailles : $> \lambda/10$</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ L'intensité de la lumière ne dépend pas ou peu de la longueur d'onde ✓ La distribution angulaire est dissymétrique : la fraction rétrodiffusée (= à l'arrière de la particule) est d'autant plus faible que la particule est grosse.



2.2 Les couleurs du ciel

Bleu du ciel	<p>Les rayons du Soleil sont diffusés par les particules atmosphériques d'autant plus efficacement que la longueur d'onde est courte (diffusion de Rayleigh).</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Q : Pourquoi ne voyons-nous donc pas le ciel violet ? ✓ R : parce que la lumière du soleil est moins intense à ces longueurs d'onde et que notre œil est moins sensible dans le violet.
---------------------	---

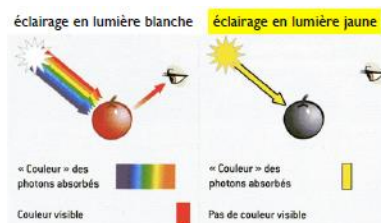
Blanc du ciel	Plus l'atmosphère est chargée de gouttelettes d'eau, plus le ciel devient blanc par la diffusion de Mie qui domine lorsque les gouttelettes ont une taille supérieure à la longueur d'onde (blancheur des nuages).
Soleil couchant ou levant	Lorsque le Soleil est bas sur l'horizon, les rayons qui nous parviennent ont traversé une part plus importante de l'atmosphère, réduisant la proportion des longueurs d'onde courtes (diffusion de Rayleigh). Le ciel devient alors jaune, orangé et rouge.

2.3 Couleurs d'un objet

La couleur d'un objet dépend de :

- ➔ La manière avec laquelle les **pigments constituant l'objet** diffusent et absorbent les différentes longueurs d'onde ;
- ➔ La **composition de la lumière qui l'éclaire** ; si on éclaire un objet rouge pur avec de la lumière jaune, il apparaît noir puisque l'objet absorbe toutes les couleurs sauf le rouge, et donc le jaune.

En pratique, les pigments colorés diffusent des **plages de couleurs** ; les couleurs diffusées ne sont jamais pures (monochromatiques) ; ce sont l'œil et le cerveau qui interprètent ces plages en impressions colorées.

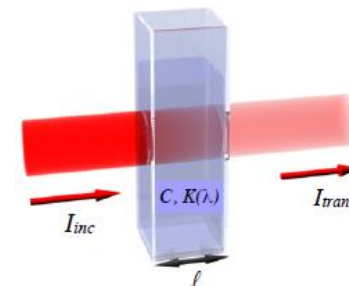


En plus de ces phénomènes d'**absorption** et de **diffusion**, la surface de l'objet subit des phénomènes de **réflexion** : soit **spéculaire** (surface lisse), soit **diffuse** (surface rugueuse). A cette réflexion se rajoute la diffusion de volume par les pigments jouant le rôle de centres diffuseurs.

2.4 ABSORPTION

La quantité de lumière absorbée dépend :

- ✓ De la longueur **l** du trajet parcouru par la lumière
- ✓ De la concentration **C** d'atomes ou de molécules de la substance absorbante
- ✓ Du coefficient d'extinction **K(λ)** caractéristique de la substance et dépendant de la longueur d'onde
- ✓



LOI DE BEER-LAMBERT

$$I_{trans} = I_{inc} \exp (- K(\lambda) C \ell)$$

- C en mol. L^{-1}
- $K(\lambda)$ en $\text{L. mol. L}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$
- l en cm

Absorbance :

$$A_\lambda = K(\lambda) \cdot C \cdot l$$

$$A_\lambda = - \ln (I_{trans} / I_{inc})$$

En spectroscopie, on rencontre une absorbance définie avec un logarithme de base 10 :

$$A_\lambda = - \log_{10} (I_{trans} / I_{inc}) = A_\lambda / \ln (10)$$

$$\text{et un coefficient d'extinction } \varepsilon(\lambda) \text{ défini par : } A_\lambda = \varepsilon(\lambda) C \ell$$

Remarque : L'atténuation de la lumière à la traversée d'un milieu est généralement due non seulement à l'**absorption** de la lumière par les molécules mais également à la **diffusion** de la lumière par ces mêmes molécules.

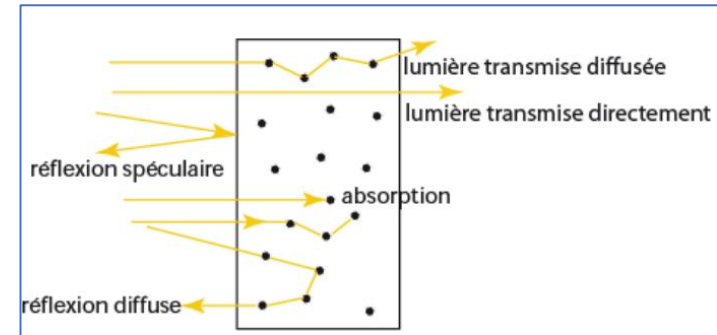
2.5 DIFFUSION

$$\Phi_{\text{in}} = I_0 A \quad \Phi_{\text{diff}} = I_0 \sigma_s \quad \Phi_{\text{out}} = I_0 (A - \sigma_s)$$



	Absorption	Diffusion
Coefficient d'absorption	$\mu_a = C K(\lambda)$ <ul style="list-style-type: none"> C : concentration = nombre de particules absorbées par unité de Volume $K(\lambda)$: coefficient d'extinction ou section efficace d'absorption 	$\mu_s = N_s \sigma_s$ <ul style="list-style-type: none"> N_s : nb de diffuseurs par unité de volume σ_s : section efficace de diffusion <i>Plus les particules sont grosses et nombreuses, plus le coeff d'absorption augmente</i>
Libre parcours moyen = inverse d'une longueur	$l_s = 1 / \mu_s = (N_s \sigma_s)^{-1}$ <i>Distance moyenne qu'un photon peut parcourir avant d'être absorbé</i>	$l_a = 1 / \mu_a = [C K(\lambda)]^{-1}$ <i>Distance moyenne qu'un photon parcourt entre 2 événements de diffusion</i>
Deux mécanismes responsables de l'atténuation de la lumière traversant une substance absorbante et diffusante.		

RECAP-IMAGE que j'ai trouvé :



Diffusion et absorption sont indissociables et dépendent tous deux de la **longueur d'onde**

→ La diffusion décroît lorsque la longueur d'onde **augmente** :

$$\mu_s = A \cdot \lambda^{-b} \text{ où } b \sim 4 \text{ (Rayleigh) et } b \sim 0,5 \text{ (Mie)}$$

→ L'absorption est importante dans l'UV et l'IR et faible dans le **rouge** et le **proche IR**

La modélisation du transport de la lumière dans les tissus dépend de l'importance relative des coefficients optiques d'absorption et de diffusion.

→ $\mu_a \gg \mu_s$: L'**absorption** domine (loi de Beer-Lambert ($\lambda \leq 300$ nm; $\lambda \geq 2000$ nm))

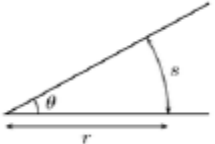

→ $\mu_s \gg \mu_a$ La **diffusion** domine ($600 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1000 \text{ nm}$)

→ Lorsque $\mu_s \sim \mu_a$, le **coefficient d'extinction global** s'écrit :

$$\mu = \mu_s + \mu_a$$

$$\text{Loi d'atténuation généralisée : } I_{\text{trans}} = I_{\text{inc}} \exp(-\mu \ell)$$

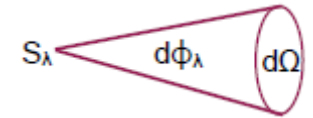
2.6 RUDIMENTS DE PHOTOMETRIE :

Angle plat	<p>Mesure l'ouverture entre deux segments de droite</p>  <p> $\theta = s/r$ $[\theta] = \text{radian (rd)}$ $0 \leq \theta \leq 2\pi$ </p>
Angle solide	<p>Un angle solide est une région de l'espace limitée par un cône non nécessairement circulaire. Le sommet du cône est le sommet de l'angle solide. L'unité de mesure de l'angle solide est le stéradian (sr).</p> <p> $\Omega = A/r^2$ $[\Omega] = \text{stéradian (sr)}$ $0 \leq \Omega \leq 4\pi$ </p> <p>La mesure d'un angle solide est la mesure de la surface découpée par celui-ci sur une sphère de centre le sommet de l'angle solide et de rayon unité.</p> <p>Le concept d'angle solide généralise celui d'un angle plan, ce dernier mesurant l'ouverture entre deux demi-droites interceptant un arc de cercle.</p>  <p>Valeurs particulières de Ω :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Sphère : $\Omega = 4 \cdot \pi \text{ sr}$ ✓ Hémisphère : $\Omega = 2 \cdot \pi \text{ sr}$ ✓ $\theta = 33^\circ$: $\Omega = 1 \text{ sr}$ ✓ $\theta = 33^\circ$: $\Omega = 1 \text{ sr}$ ✓ $\theta = 60^\circ$: $\Omega = \pi \text{ sr}$ (1/4 d'espace complet)

A. INTENSITE :

L'intensité (énergétique ou lumineuse) mesure la **puissance $d\phi_\lambda$** fournie par une **source ponctuelle**, par **unité d'angle solide $d\Omega$** dans une direction donnée.

Intuitivement, plus la lumière perçue en provenance d'une lampe nous paraît éclatante, brillante, plus son intensité lumineuse est grande.



→ **L'intensité énergétique (spectrale) :**

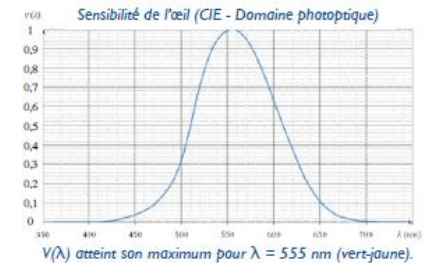
$$I_\lambda^e = \frac{d\phi_\lambda}{d\Omega} \text{ en Watt par stéradian (W} \cdot \text{sr}^{-1}\text{)}$$

→ **L'intensité lumineuse (spectrale) :**

$$I_\lambda^e = K_m V(\lambda) \frac{d\phi_\lambda}{d\Omega} \text{ en candela (Cd)}$$

Elle dépend de :

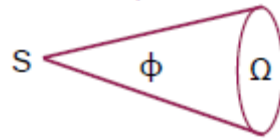
- ✓ Par convention, $K_m = 683$
- ✓ La fonction de visibilité $V(\lambda)$ correspondant approximativement à la perception de l'œil. On a $V_{max} = 1$ à $\lambda = 555 \text{ nm}$
- ✓ La candela fait partie des unités du système international (C'est la seule unité qui dépend directement de la perception humaine)



B. FLUX LUMINEUX :

De manière intuitive, on pourrait dire que le flux lumineux correspond à la **puissance visible** d'un rayonnement.

Naturellement, à puissance égale, plus un rayonnement a une fréquence proche du maximum de sensibilité de l'œil, plus son flux lumineux est important.



Le flux lumineux mesure la **puissance lumineuse (perceptible)** d'une source rayonnant **dans un angle solide** donné :

$$\Phi = \int \Omega I d\Omega$$

Φ est exprimée en lumen (**lm**)

Donc **1 cd = 1 lm/sr**

Ainsi le **lumen** est la valeur du flux lumineux émis dans un angle solide de **1 stéradian** par une source ponctuelle située au sommet de cet angle et dont l'intensité lumineuse vaut **1 candela** dans toutes les directions.

Si l'intensité est constante dans toutes les directions, alors **$\Phi = I \Omega$ ++**, où Ω est l'angle solide total considéré.

Si l'angle solide considérée correspond à tout l'espace, **$\Phi = 4 \pi I$ ++**.

C. RENDEMENT = EFFICACITE LUMINEUSE :

On définit le rendement d'une source lumineuse en comparant la **puissance lumineuse (visible)** de cette source avec la **puissance totale P** qu'elle consomme.

$$r = \Phi / P \quad +++$$

D. ECLAIREMENT LUMINEUX :

→ Soit une **surface S** éclairée par un rayonnement lumineux.

L'éclairement lumineux

E_m moyen de cette surface est égal au rapport du **flux lumineux incident** sur cette surface par **l'aire de la surface**.

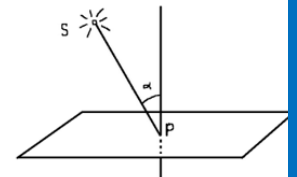
$$E_m = \Phi / S$$

- E_m est l'éclairement moyen en lux (lx).
- Φ est le flux lumineux en lumen (lm).
- S est la surface en mètre carré (m^2).

→ Par convention on mesure l'éclairement en **lux** où 1 lux = 1 lumen/ m^2 . Donc **1 lux** est l'éclairement à **1 m** produit par une source dont l'intensité est **1 cd**, dans un angle solide de **1 stéradian** (le flux lumineux dans cet angle solide correspondant à 1 lumen).

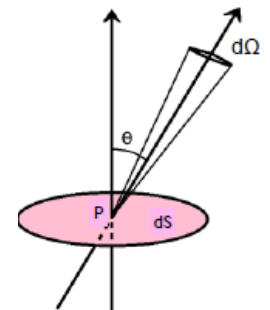
→ On veut calculer l'éclairement en un point P d'une surface par une source S située à une distance **d** de P, et dont on connaît l'intensité lumineuse **I** (on suppose que la source émet de façon uniforme dans toutes les directions). On peut montrer que l'éclairement au point P est donné par :

$$E_P = I \cos \alpha / d^2 \quad +++$$

**E. LUMINANCE :**

→ La luminance est la grandeur photométrique qui caractérise l'éclat d'une **source étendue**, c'est-à-dire qui n'est pas perçue comme un point mais comme une surface (écran de télévision, sujet d'une photographie, etc).

→ La luminance L est l'**intensité lumineuse dI** due à l'élément de surface **dS**, dans la direction donnée, et ceci **par élément de surface apparente dA** perpendiculaire à la direction d'observation :



$$L = \frac{dI}{dA} \text{ en } \text{cd}/\text{m}^2$$

F. **EMITTANCE :**

L'émittance mesure la **puissance lumineuse** par **unité de surface** d'une source **étendue**, lorsqu'elle émet un rayonnement visible dans toutes les directions vers l'extérieur de la source :

$$M = \frac{d\theta}{dS} \text{ en } \text{LM}/\text{m}^2$$

Remarque : en photométrie énergétique, **la loi de Stefan** donne l'émittance énergétique totale du corps noir :

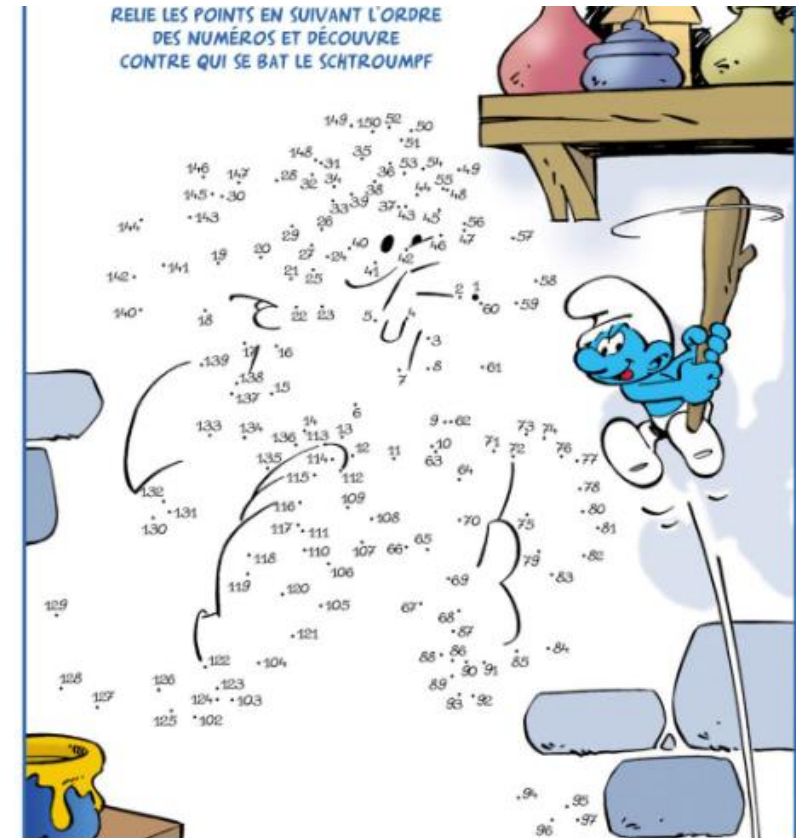
$$M^e = \sigma \cdot T^4$$

σ = constante de Stefan et T = la température

Source de Lambert = source dont la luminance est la même dans toutes les directions.

- ➔ On dit que cette source est **orthotrope** (par exemple, le corps noir ou encore une surface parfaitement diffusante).
- ➔ L'émittance est alors reliée à la luminance par la relation :

$$M = \pi \cdot L$$
- ➔ Une telle source apparaît **sans relief**, car le contraste et le relief d'un objet sont dus à une variation de luminance



Bon courage à mes fillotes, au groupe de l'ombre ... Ils se reconnaîtront ! Gros courage à Grohl et son pote qui habitent à côté de chez moi !!!! et au fillot d'Amandine ☺ Bon courage à vous tous :D !!!

	Intensité	Flux lumineux	Eclairement lumineux	Luminance	Emittance
Définition	L'intensité (énergétique ou lumineuse) mesure la puissance $d\phi$ fournie par une source ponctuelle , par unité d'angle solide $d\Omega$ dans une direction donnée.	De manière intuitive, on pourrait dire que le flux lumineux correspond à la puissance visible d'un rayonnement.	L'éclairement lumineux E_m moyen de cette surface est égal au rapport du flux lumineux incident sur cette surface par l'aire de la surface .	La luminance L est l' intensité lumineuse dI due à l'élément de surface dS , dans la direction donnée, et ceci par élément de surface apparente dA perpendiculaire à la direction d'observation	L'émittance mesure la puissance lumineuse par unité de surface d'une source étendue , lorsqu'elle émet un rayonnement visible dans toutes les directions vers l'extérieur de la source
Formule	<p>→ Energétique (spectrale) :</p> $I = \frac{\phi}{\Omega} \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ <p>→ Lumineuse (spectrale) :</p> $I = K \cdot V \cdot \frac{\phi}{\Omega} \text{ Cd}$	$\phi = I \times \Omega$ <p>Si l'angle solide considérée correspond à tout l'espace,</p> $\phi = 4 \pi I \text{ ++.}$	$E_m = \frac{\phi}{S}$ $E_p = \frac{I \cos(\alpha)}{d^2}$	$L = \frac{dI}{dA}$ <p>en cd/m^2</p>	$M = \frac{d\theta}{dS}$ <p>en lm/m^2</p>
Unité	<ul style="list-style-type: none"> - Watt par stéradian - Candela : lumen / stéradian 	<p>Lumen</p> <p>Ainsi le lumen est la valeur du flux lumineux émis dans un angle solide de 1 stéradian par une source ponctuelle située au sommet de cet angle et dont l'intensité lumineuse vaut 1 candela dans toutes les directions.</p>	<p>1 lux = 1 lumen/m².</p> <p>1 lux est l'éclairement à 1 m produit par une source dont l'intensité est 1 cd, dans un angle solide de 1 stéradian (le flux lumineux dans cette angle solide correspondant à 1 lumen).</p>	<p>La luminance L est exprimée en candela par mètre carré (cd/m^2).</p>	<p>Elle s'exprime en lm/m^2</p>
Source	Ponctuelle	Ponctuelle	Ponctuelle	Etendue	Etendue