

Ingénierie optique

Semaine 11 – partie 1

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



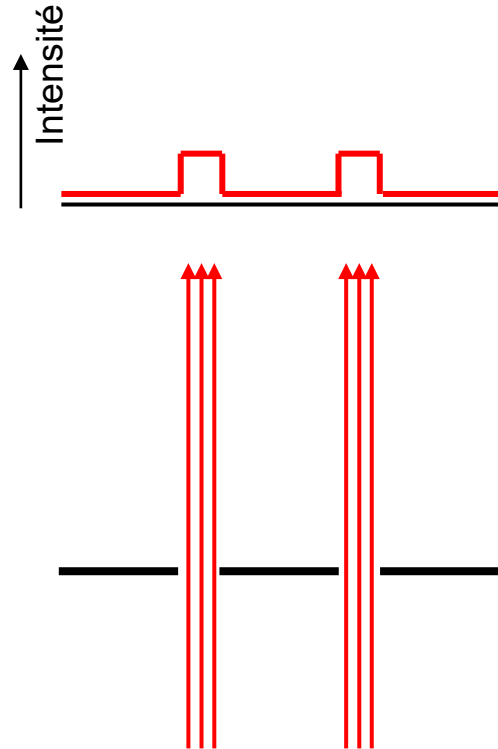
Dualité onde – particule

- La lumière est une onde électromagnétique qui satisfait les équations de Maxwell...
- La lumière est composée de photons...
- ... donc le photon est une onde !

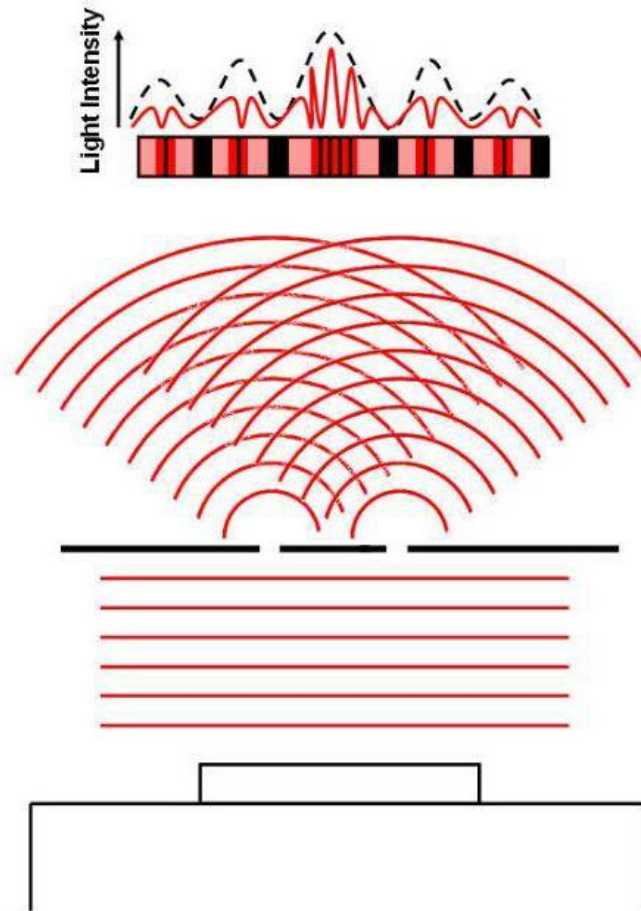
- Le photon a une certaine quantité de mouvement (puisqu'il produit des forces)...
- ... donc le photon est une particule !

Interférence par une double fente – 3 perspectives

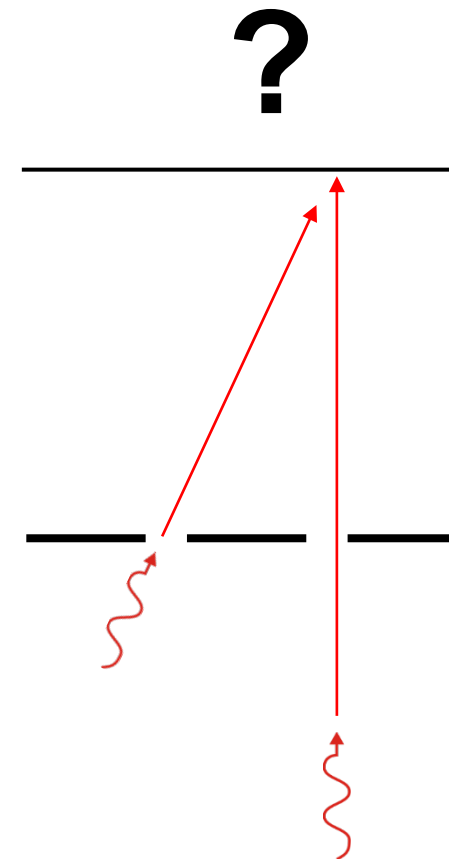
- Géométrique



- Ondulatoire

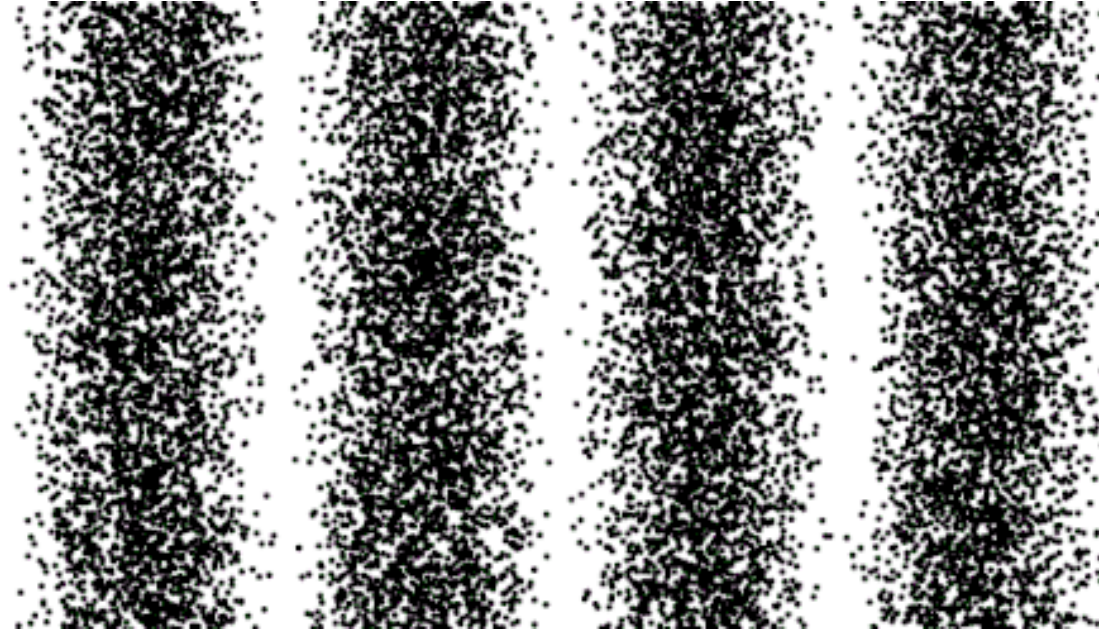


- Quantique



Dualité onde – particule

- Interférence par une double fente avec des photons uniques et en faisant la moyenne dans le temps:



- Le photon est à la fois une onde et une particule, parfois c'est son caractère ondulatoire qui est mis en évidence par une expérience (interférence), parfois c'est son caractère corpusculaire (force optique) !

Flux de photons

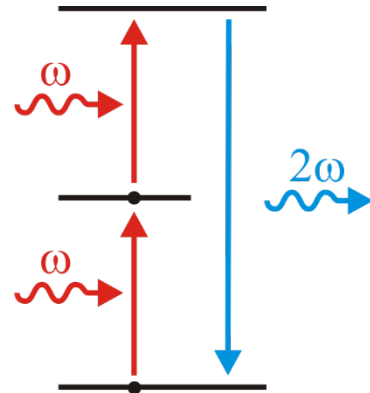
Table 6.1 – Densité moyenne de flux de photons pour différentes sources

Source	Flux (photons/cm ² s)
Etoile	10 ⁶
Pleine lune	10 ⁸
Eclairage électrique	10 ¹²
Soleil	10 ¹⁴
Laser He–Ne (10 mW focalisé sur un spot de 20 μm)	10 ²²

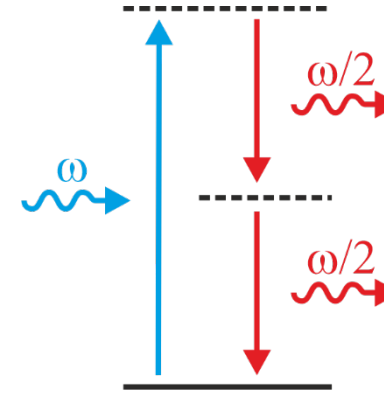
Communication quantique

- Optique non-linéaire

Second harmonic generation:



Parametric down-conversion:

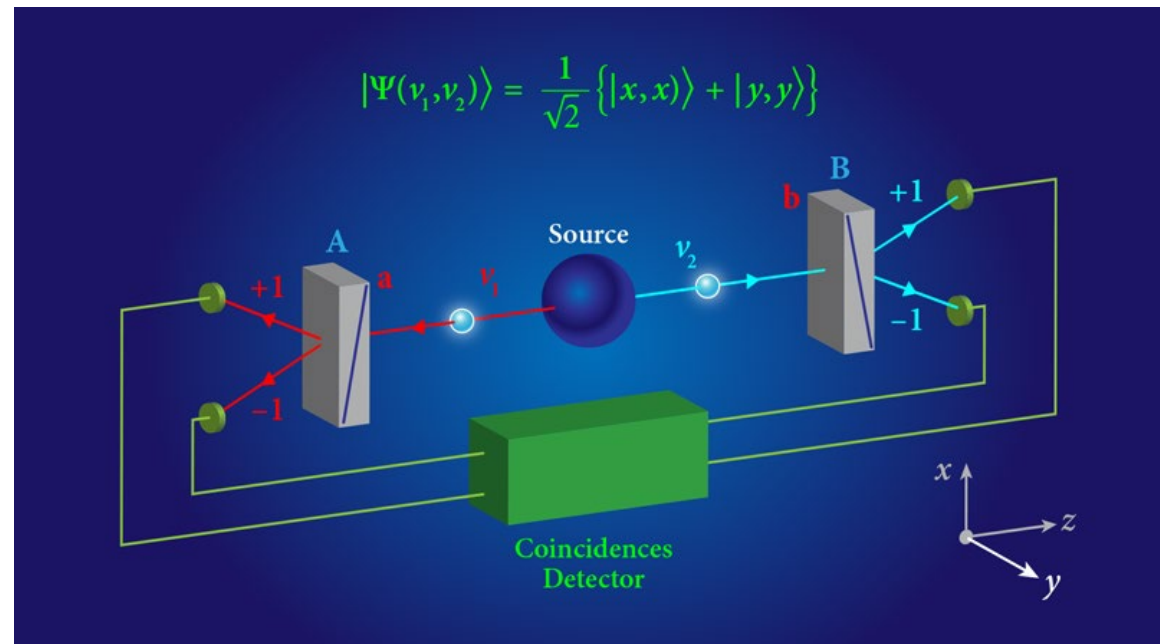
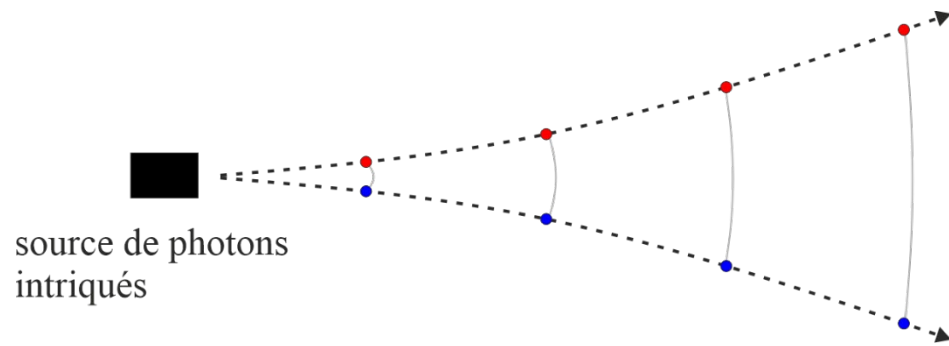


Les deux photons produits sont intriqués (corrélés)

- Paire de photons intriqués : l'état quantique d'un photon ne peut pas être décrit indépendamment de l'état de l'autre photon
- Etat classique (bit classique): état 0 ou 1
- qubit: état 0, 1, ou n'importe quelle superposition des deux $|\psi\rangle = a_0|0\rangle + a_1|1\rangle$
- Pour les photons, c'est la polarisation qui joue le rôle d'états de base $|0\rangle$ et $|1\rangle$ par exemple polarisation horizontale/verticale ou circulaire gauche/droite

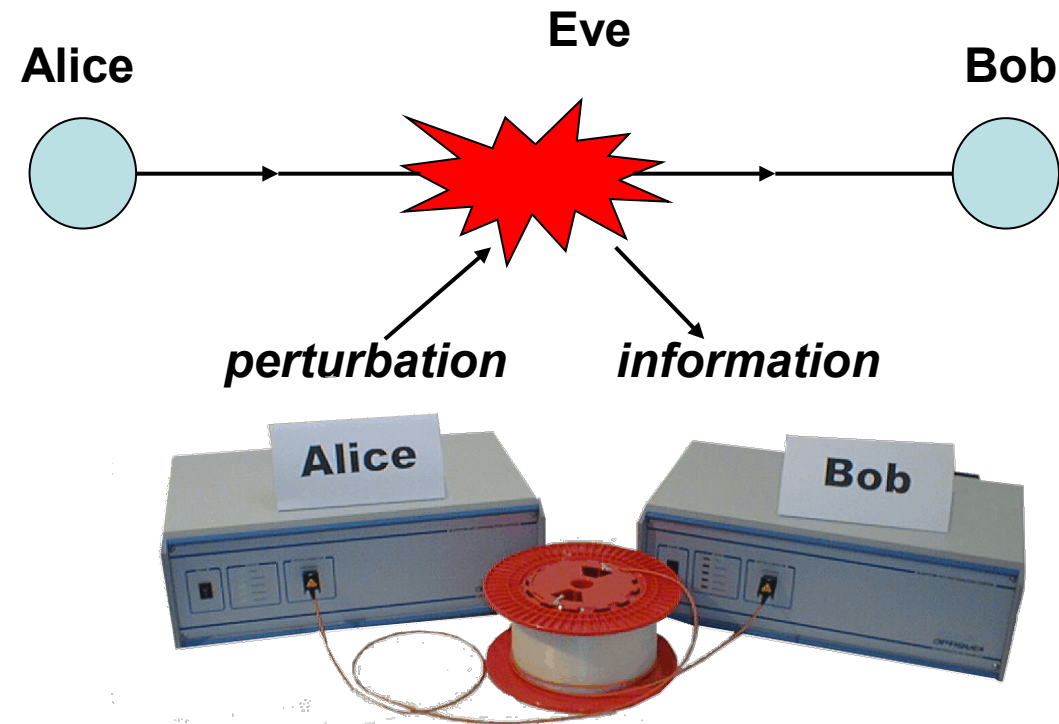
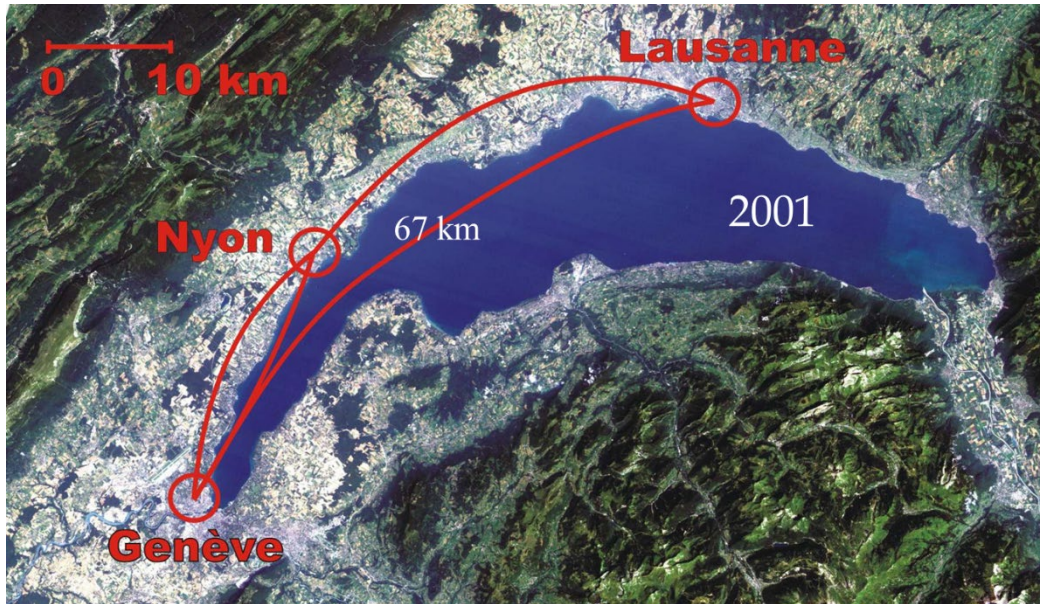
Communication quantique

- Si on a deux photons (2 qubits), on peut décrire l'état du système sur une base $|00\rangle, |10\rangle, |01\rangle$ et $|11\rangle$
- Si les photons sont intriqués, ils restent corrélés même s'ils se propagent à grande distance l'un de l'autre
- La statistique de la mesure (inégalités de Bell) doit suivre une distribution spécifiques; si on a interféré avec les photons, cette statistique n'est pas satisfaisante et on peut donc le découvrir



Communication quantique

- Réalisation de sources de photons uniques et démonstration d'un lien optique quantique
- Alice souhaite transmettre une information à Bob
- Si Eve espionne la ligne, dès qu'elle obtient de l'information, elle perturbe la mesure (les inégalités de Bell sont violées)



Ingénierie optique

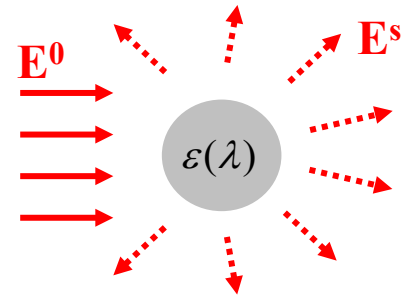
Semaine 11 – partie 2

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

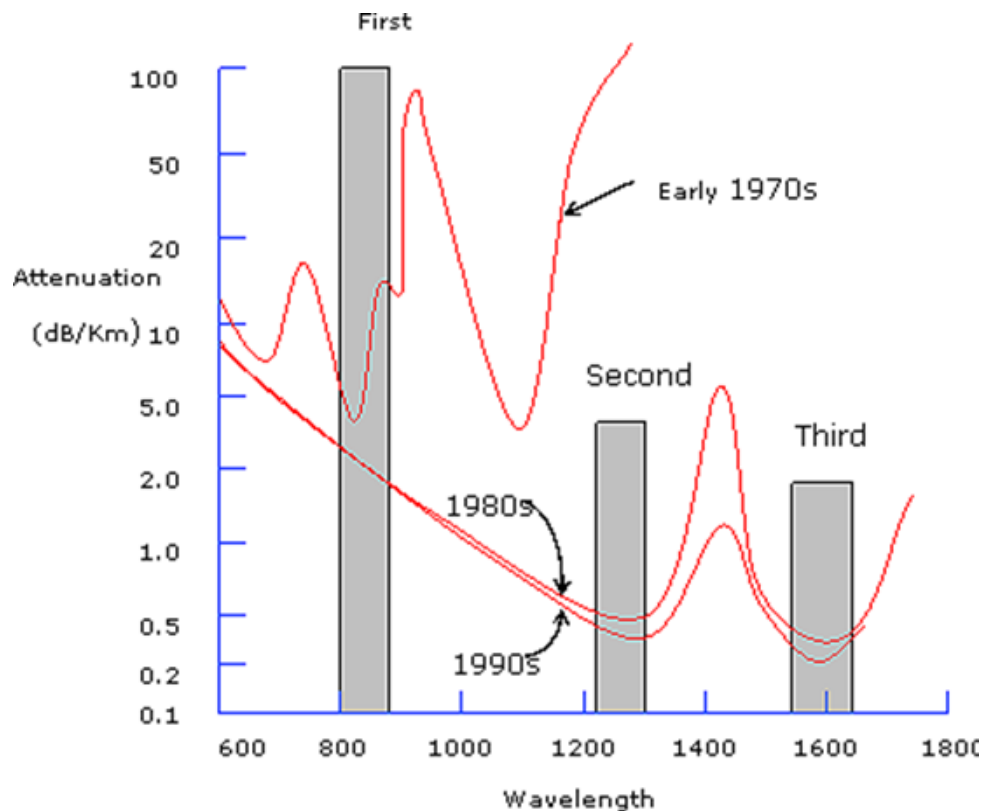


Diffusion de la lumière

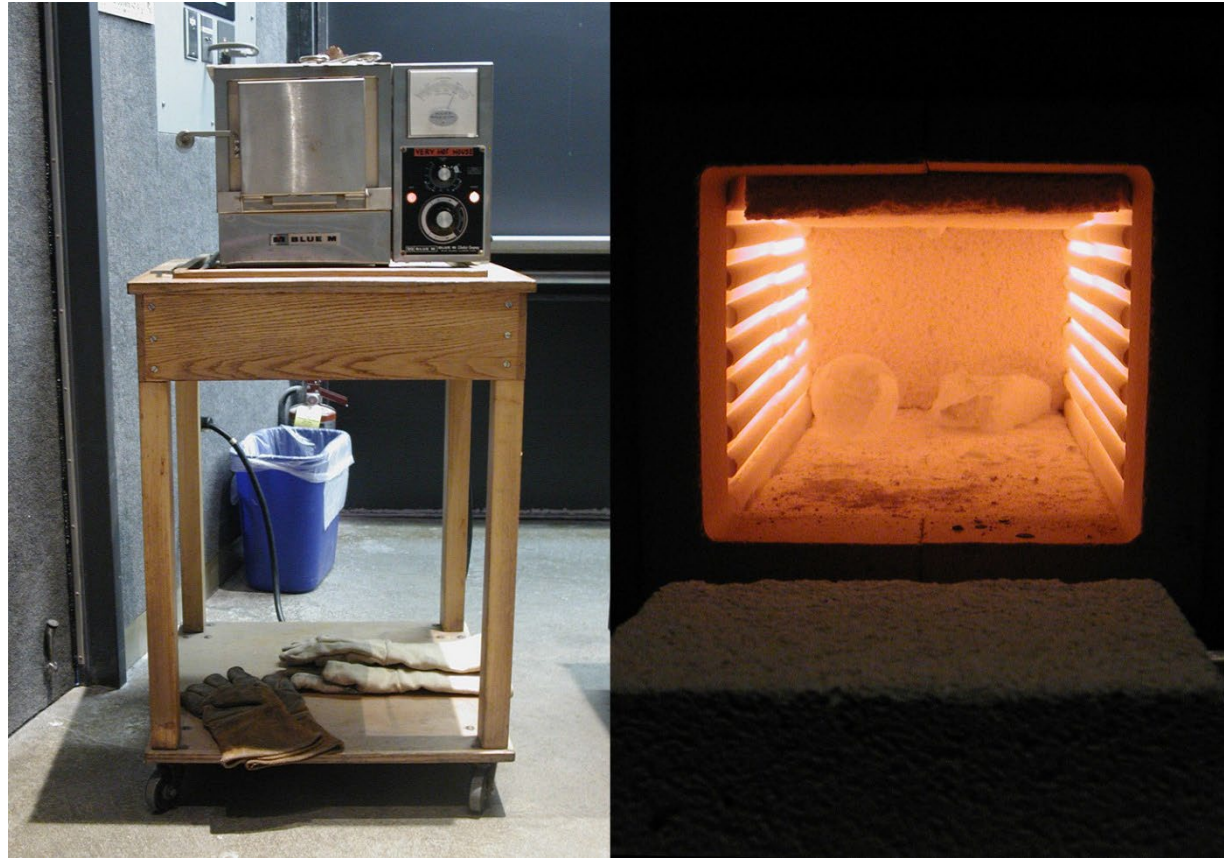
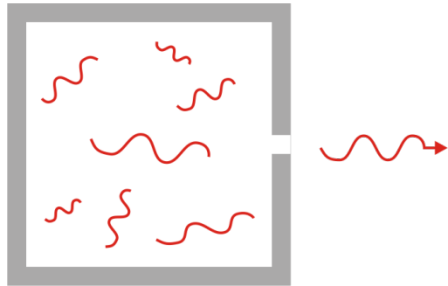
- Diffusion Rayleigh:
(pour de très petites particules, $R \ll \lambda$)
- Particulièrement efficace pour les petites longueurs d'onde: $\sim 1/\lambda^4$



$$Q_{scat}(\lambda) = \frac{8}{3} \left(\frac{2\pi R}{\lambda} \right)^4 \left| \frac{\epsilon(\lambda) - 1}{\epsilon(\lambda) + 2} \right|^2$$



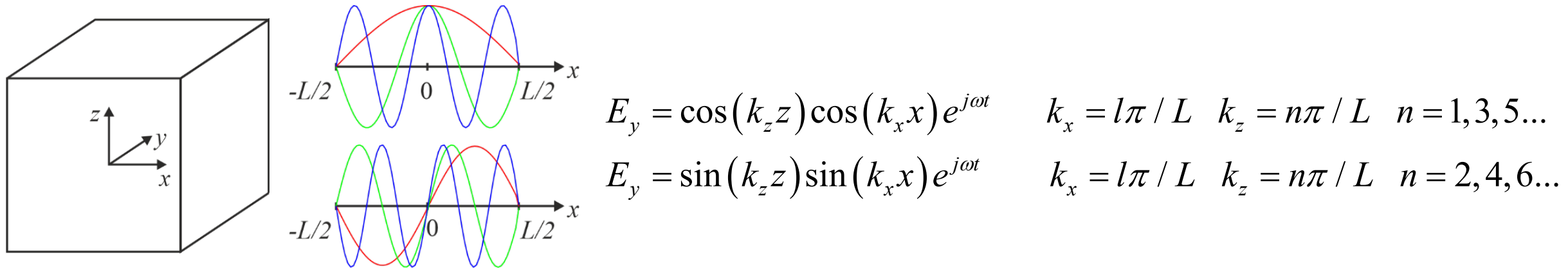
Emission thermique



- Corps noir:
 - objet idéal isolé de l'extérieur où toute radiation est absorbée

Catastrophe ultraviolette

- En utilisant le concept de corps noir, on peut montrer qu'il devrait y avoir un nombre infini de photons lorsque la fréquence ω augmente
- On fait une analogie entre les photons et les modes d'une cavité de taille $L \times L \times L$
- On cherche des champs qui s'annulent aux extrémités de la cavité:



- En faisant la même chose pour toutes les polarisation et en utilisant la relation de dispersion $\omega^2 = k^2 c^2$, on a pour ces modes: $\omega^2 = (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) c^2 = \pi^2 c^2 (l^2 + m^2 + n^2) / L^2$
- Chaque mode est caractérisé par un triplet (l, m, n) avec au moins deux indices $\neq 0$
- Lorsque ω augmente, le nombre de modes tend vers l'infini; en d'autres termes la densité de modes augmente avec ω

Catastrophe ultraviolette

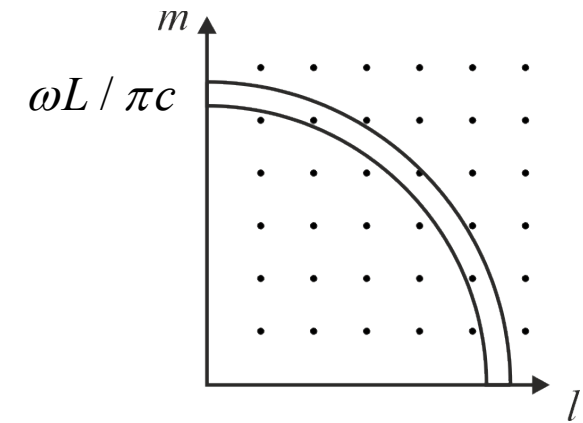
- Pour éviter cette catastrophe ultraviolette, on commence par noter que le triplet (l, m, n) représente un point dans un espace de phase et la fréquence ω correspondante est $\pi c / L$ fois la distance de (l, m, n) de l'origine
- Tous les points à une même distance de l'origine correspondent à la même énergie ω
- Le nombre d'états avec une fréquence entre ω et $\omega + \Delta\omega$ est une coquille dans cet espace:

$$\frac{1}{8} 4\pi \left(\frac{\omega L}{c\pi} \right)^2 \frac{\Delta\omega L}{c\pi} \quad (\times 2)$$

- On en déduit la densité d'états: $D(\omega) = \frac{L^3 \omega^2}{c^3 \pi^2}$
- L'idée géniale de Planck a été de dire que 1) l'énergie était quantifiée en unités de $\hbar\omega$
- 2) la distribution de ces quantas suit une statistique de Boltzmann:

$$\langle n \rangle = \left[\exp\left(\frac{\hbar\omega}{KT} \right) - 1 \right]^{-1}$$

- Si l'énergie est élevée, la probabilité d'avoir un quanta est extrêmement faible

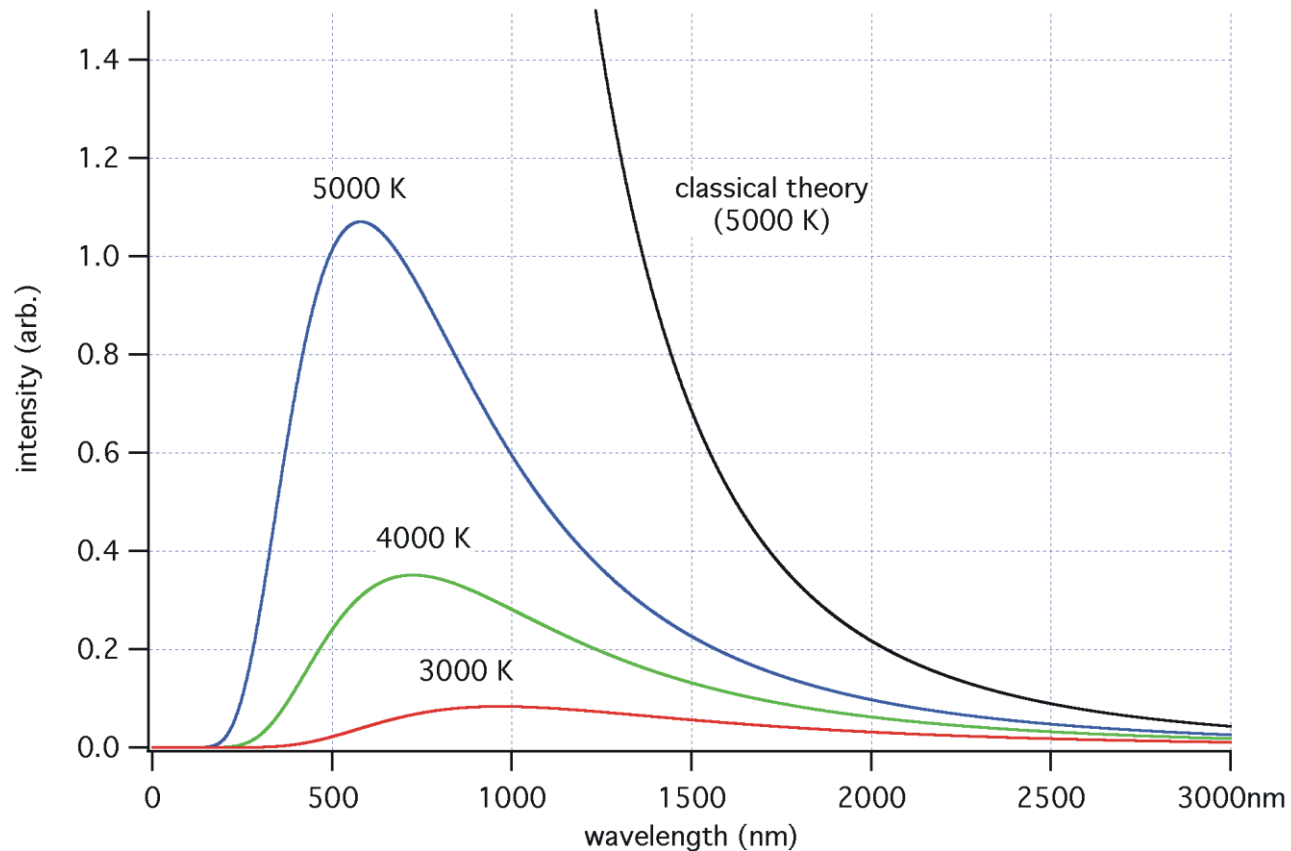


Catastrophe ultraviolette

- En combinant tout cela, on obtient l'énergie dans la cavité entre ω et $\omega + d\omega$:

$$u(\omega) = \langle n \rangle \hbar \omega D(\omega) = \frac{\hbar L^3}{c^3 \pi^2} \frac{\omega^3}{e^{\hbar\omega/KT} - 1}$$

- Qui correspond au spectre d'émission du corps noir:

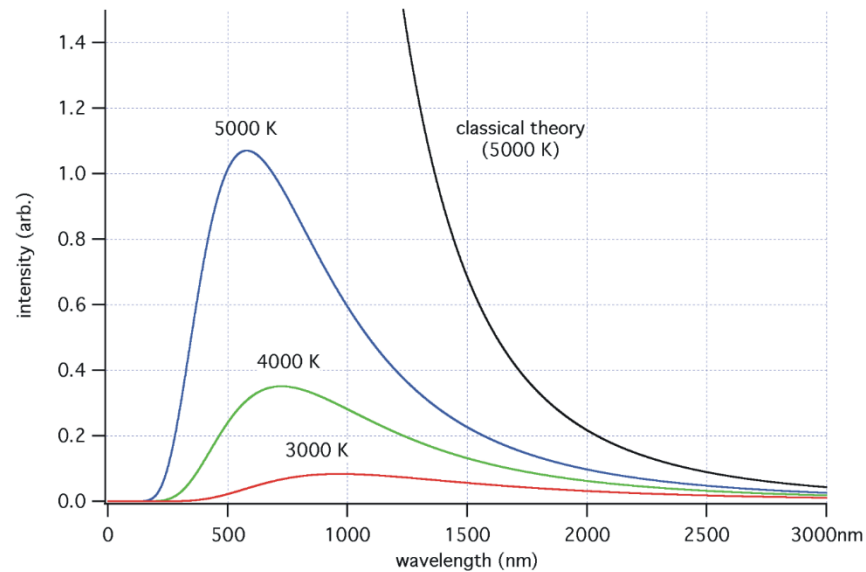


$$B_{\lambda T} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda KT) - 1]}$$

- Même s'ils ne sont pas des corps noirs idéaux la plupart des objets suivent cette loi au moins sur une partie du spectre

Emission thermique

$$B_{\lambda T} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda KT) - 1]}$$



- Intensité intégrée sur le spectre: $I = \sigma T^4$ (loi de Boltzmann)

$$\sigma = 5.669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

- Maximum d'émission:

$$\lambda_{\text{max}} T = 2.8978 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$$

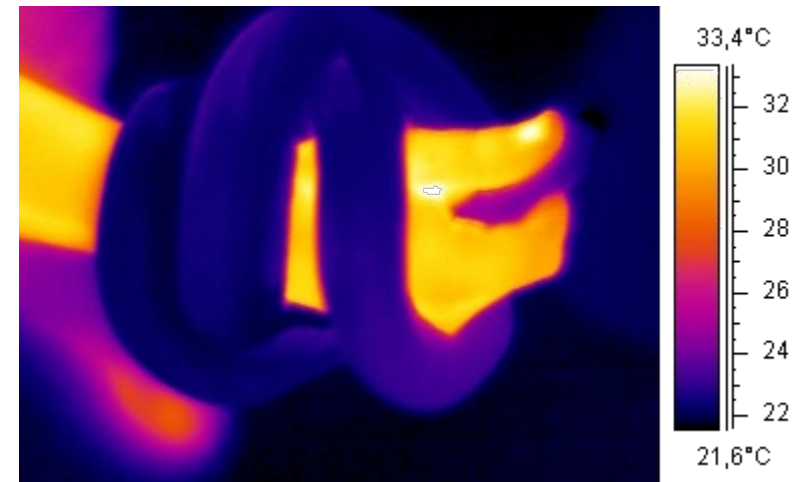
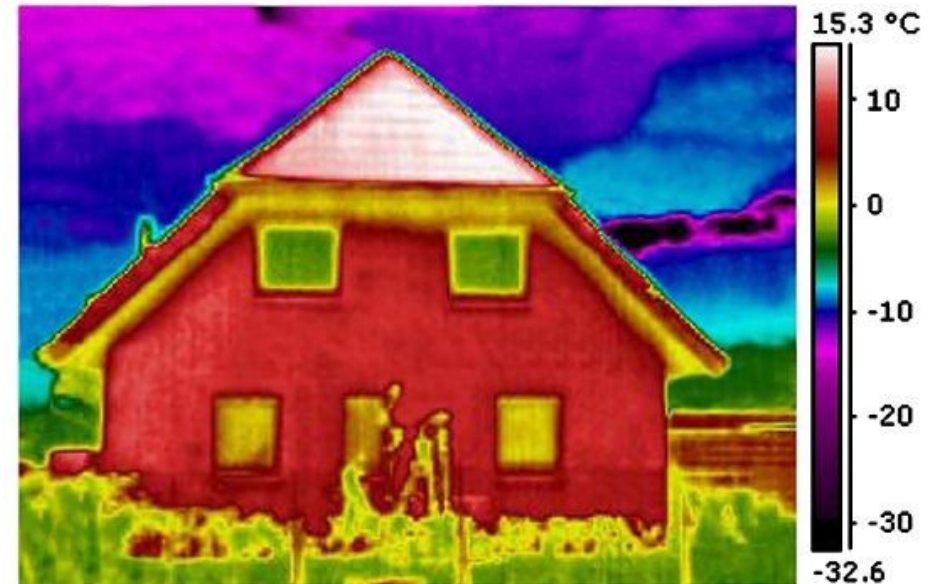
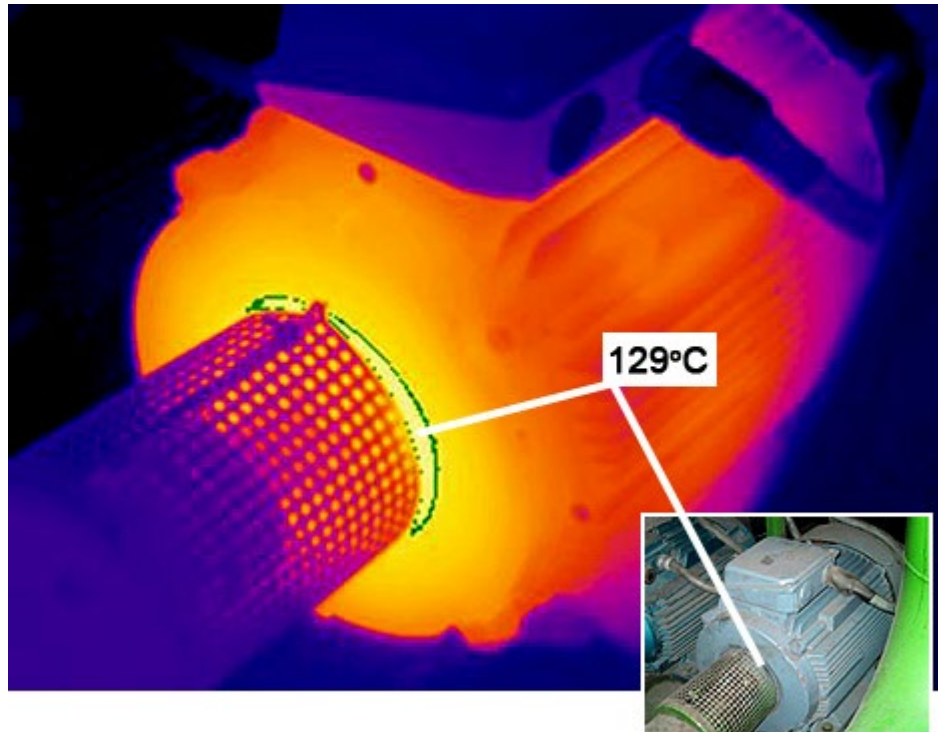
- Approximations:

$$B_{\lambda T} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \exp(-h\nu/KT) \quad \text{pour } h\nu \gg KT,$$

$$B_{\lambda T} = \frac{2KT\nu^2}{c^2} \quad \text{pour } h\nu \ll KT.$$

Thermographie (infrarouge)

- Permet de mesurer à distance les températures



Thermographie (infrarouge)

- Très large spectre d'applications:
 - sauvetage, localisation de victimes
 - recherche de foyer incendie ou de feu couvant
 - détection de personnes cachées
 - énergétique des bâtiments
 - localisation de court-circuit
 - mise en quarantaine



Ingénierie optique

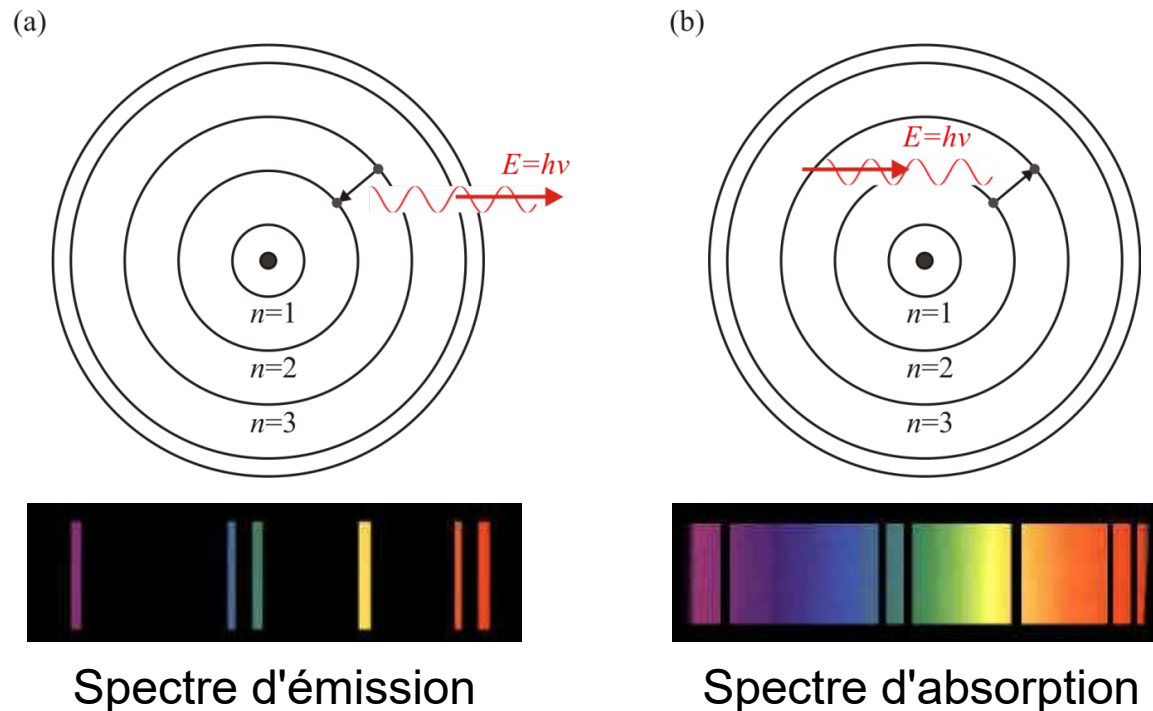
Semaine 11 – partie 3

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



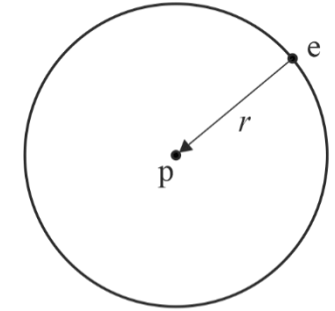
Niveaux d'énergie – Emission et absorption des photons

- Lorsqu'un électron est excité il peut se désexciter en émettant soit de la fluorescence (désexcitation rapide) soit de la phosphorescence (désexcitation lente)
- L'énergie du photon émis correspond à la différence d'énergie entre les niveaux correspondants
- Si un photon est absorbé, un électron passe vers un niveau d'énergie plus élevé



Modèle de Bohr

- Atome d'hydrogène formé d'un proton avec un électron gravitant autour



- Orbite circulaire avec la force de Coulomb: $\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$
- Energie totale de l'électron: $E = E_c + E_p = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$
- Quantification du moment cinétique ($L = mvr$): $L = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots$
- Quantification de la vitesse: $v = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{L} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\pi e^2}{nh}$
- Et des niveaux d'énergie: $E_n = - \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{me^4}{2n^2\hbar^2}$
- Orbites possibles: $r_n = 4\pi\epsilon_0 \frac{n^2\hbar^2}{me^2}$ Rayon de Bohr: $a_0 = r_1 = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{me^2} \simeq 0.53 \text{ \AA}$

Modèle de Bohr – Energie du photon émis

- Energie du photon émis: $\Delta E_{n \rightarrow n'} = E_n - E_{n'} = h\nu$

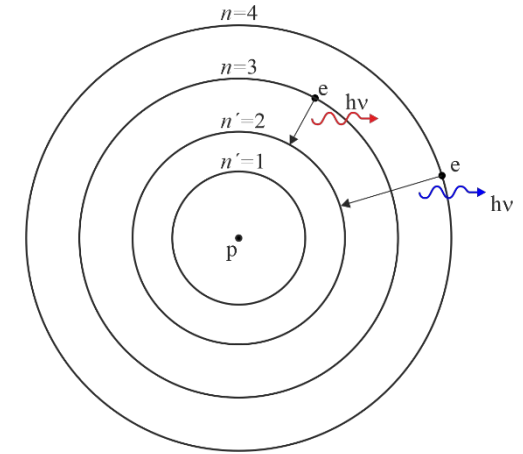
$$\Delta E_{n \rightarrow n'} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{me^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\lambda = \frac{hc_0}{\Delta E_{n \rightarrow n'}} = (4\pi\epsilon_0)^2 \frac{4\pi\hbar^3 c_0}{me^4} \frac{n^2 n'^2}{n^2 - n'^2}$$

- Série de Balmer: $\lambda = \frac{bn^2}{n^2 - 4} \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad b = 3'645.6 \text{ \AA}$

- Correspond parfaitement au cas $n' = 2$ et $n > 2$:

$$\lambda = (4\pi\epsilon_0)^2 \frac{16\pi\hbar^3 c_0}{me^4} \frac{n^2}{n^2 - 4}$$



Johann Jakob Balmer
(1825 – 1898)

wikipedia

Modèle de Bohr – Constante de structure fine

- Rapport de la vitesse de l'électron à la vitesse de la lumière:

$$\frac{v}{c_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{n\hbar c_0}$$

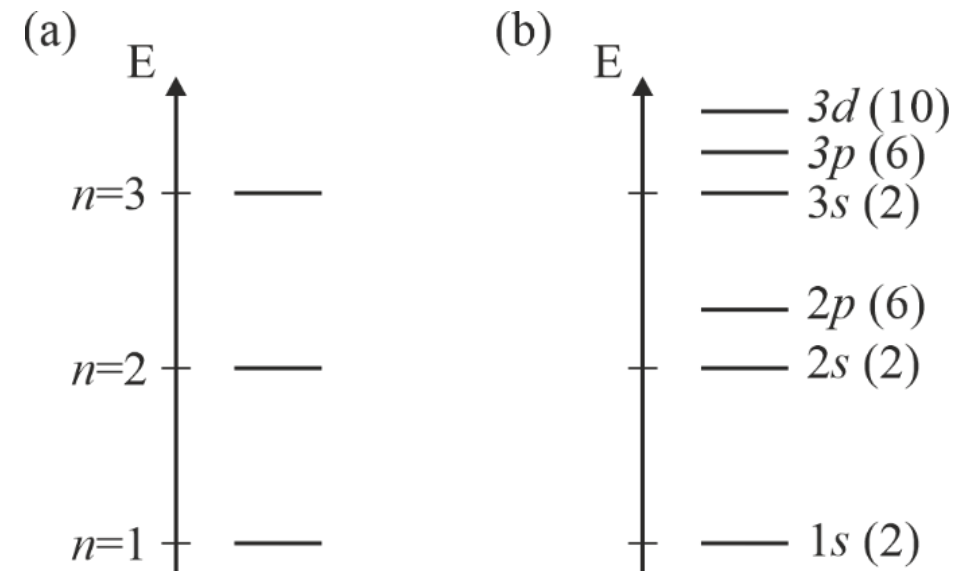
- En calculant pour $n = 1$:

$$v/c_0 = 0.007297 \quad \alpha = 1/137$$

- Décrit le couplage entre électrons et photons

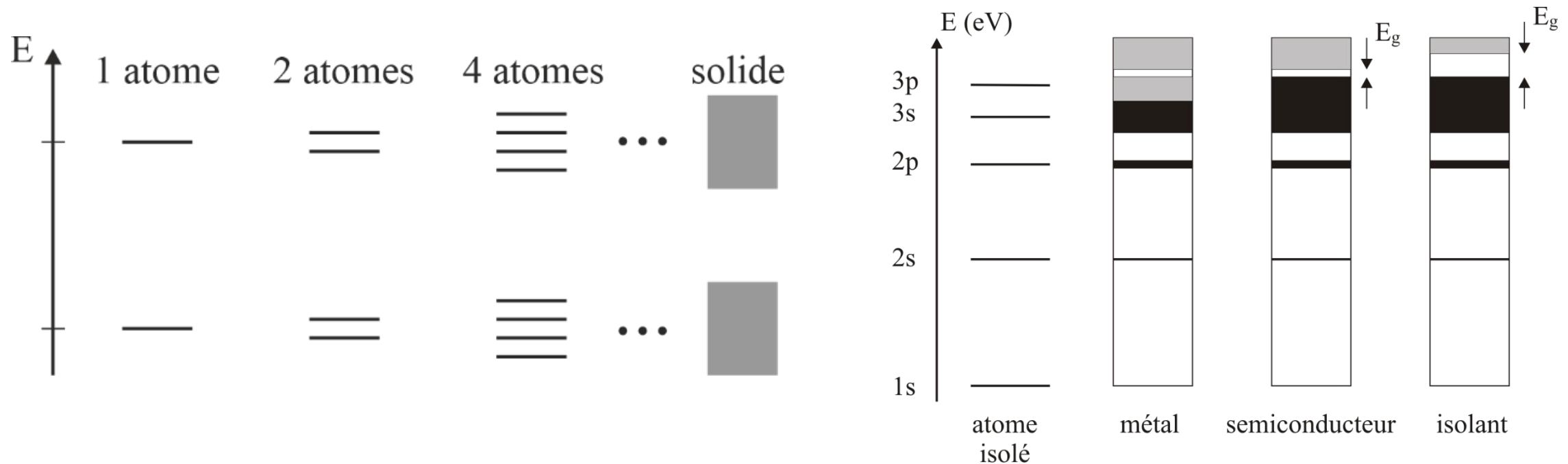
Au-delà du modèle de Bohr

- Dans le modèle de Bohr, l'énergie ne dépend que du nombre quantique principal n
- Pour chaque nombre quantique principal il existe des nombres quantiques azimutaux $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$ (orbites s, p, d, f, g, \dots)
- pour chaque nombre quantique azimutal, il existe $2l + 1$ nombres quantiques magnétiques $m = -l, -l + 1, \dots, -1, 0, 1, \dots, l - 1, l$
- Finalement, il existe deux valeurs pour le moment angulaire intrinsèque de l'électron (spin) $m_s = \pm 1/2$
- Pour une valeur du nombre quantique principal, il y a donc $2n^2$ niveaux possibles



Niveaux d'énergie: de l'atome au solide

- Le principe d'exclusion de Pauli interdit que deux électrons se trouvent dans le même état (avec exactement les mêmes nombres quantiques)
- En augmentant le nombre d'atomes, on augmente le nombre d'états électroniques, jusqu'à l'apparition de bandes d'énergie pour les solides (au lieu de niveaux discrets)



- Bande de valence, de conduction, bandgap, dopants

Ingénierie optique

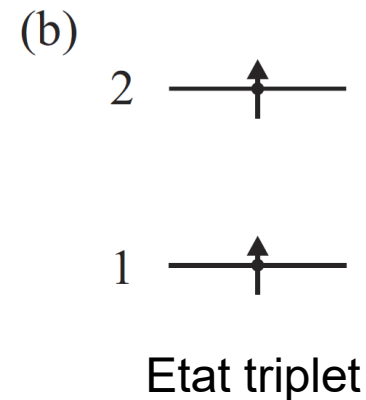
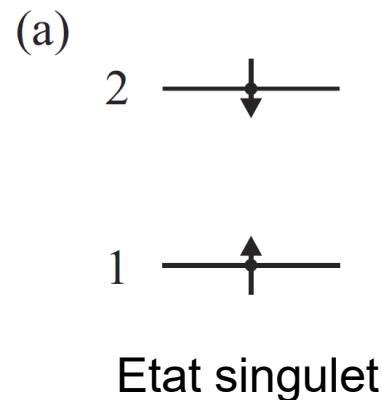
Semaine 11 – partie 4

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



Etat triplet et singulet

- Le principe d'exclusion de Pauli interdit à deux électrons d'être dans le même état quantique (i.e. d'avoir la même énergie **et** le même spin)
- Ainsi, si l'électron excité a le même spin que l'électron se trouvant au niveau fondamental, il est très peu probable qu'il se désexcite (car alors les deux électrons se retrouveraient dans le même état quantique)
- La désexcitation est tout de même possible mais prendra beaucoup de temps



Fluorescence et phosphorescence

- Lorsqu'un électron est excité, il se retrouve généralement dans un état d'énergie élevé et passe par plusieurs niveaux d'énergie successifs avant de retomber au niveau fondamental en émettant de la lumière
- Chaque niveau électronique peut se décomposer en plusieurs niveaux vibrationnels; il existe donc plusieurs chemins de désexcitation possibles (élargissement des lignes spectrales)

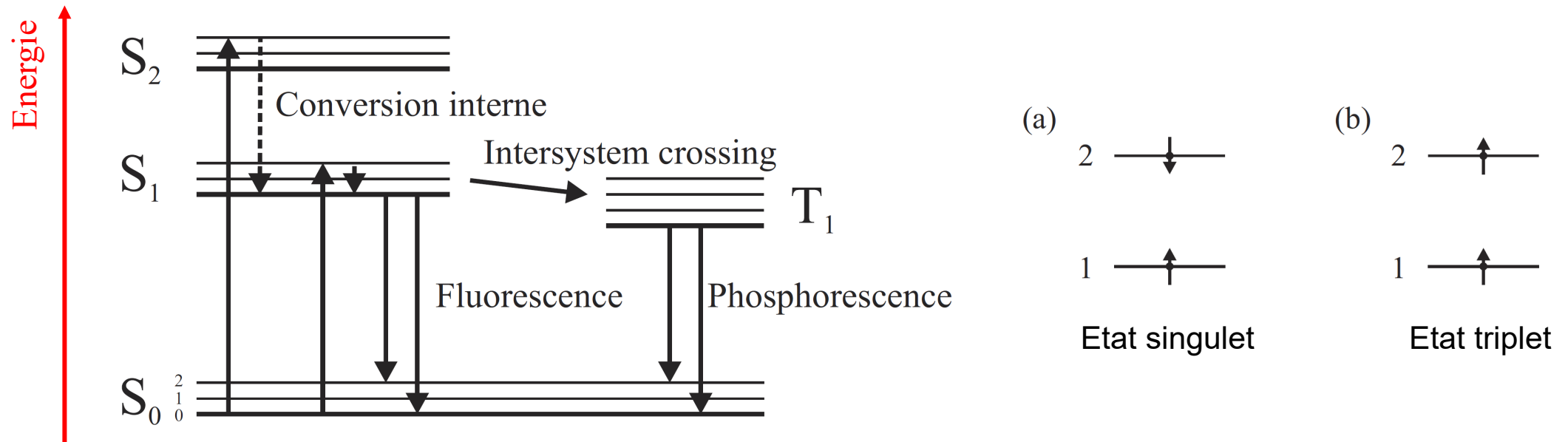
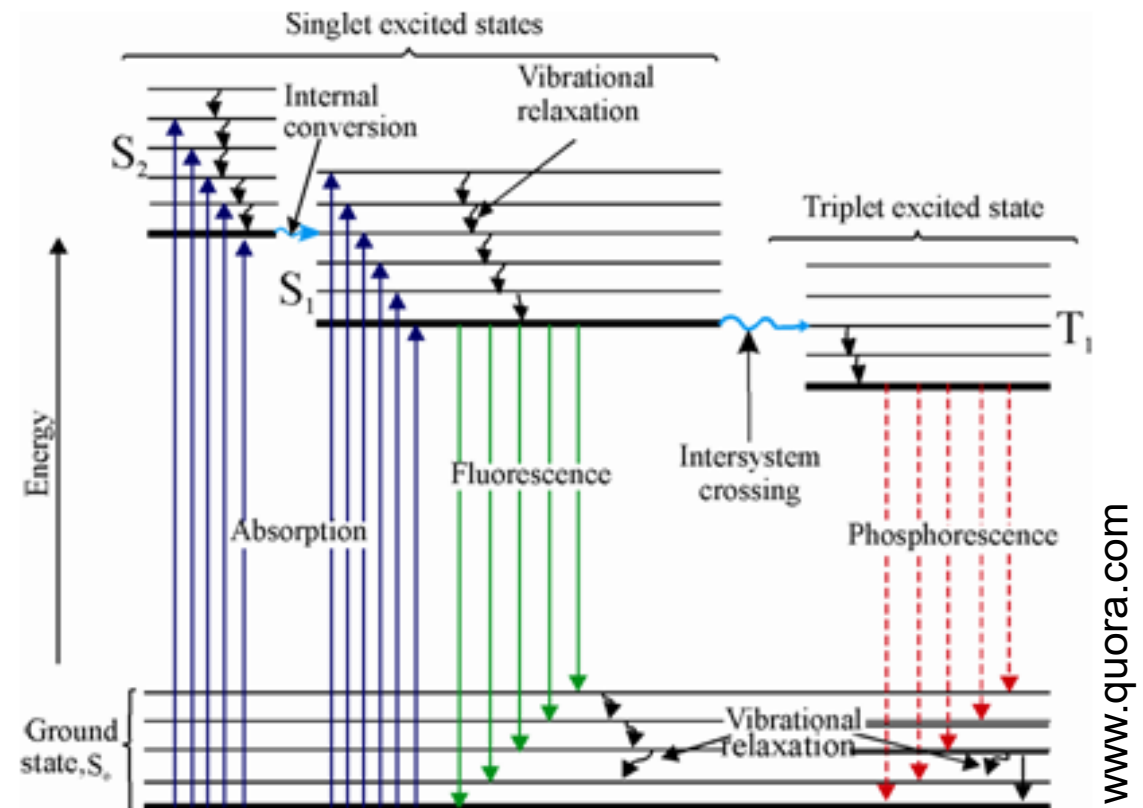


Diagramme de Jablonski

- Permet de déterminer toutes les transitions électroniques possibles, en tenant compte de tous les niveaux énergétiques
- Toutes les transitions ne produisent pas nécessairement un photon

Table 1: Average timescales for radiative and non-radiative processes

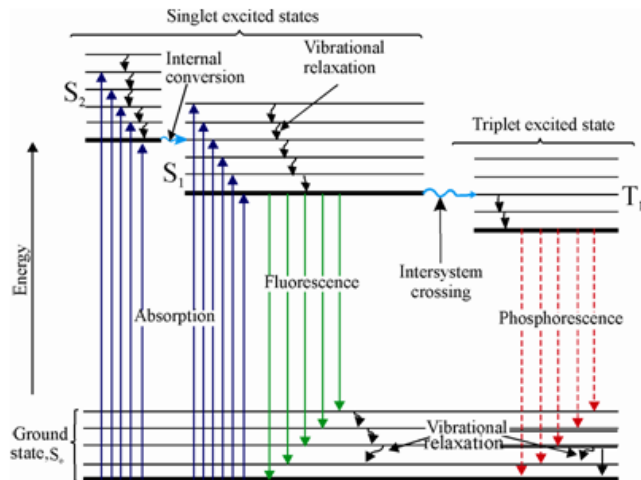
Transition	Time Scale	Radiative Process?
Internal Conversion	$10^{-14} - 10^{-11} \text{ s}$	no
Vibrational Relaxation	$10^{-14} - 10^{-11} \text{ s}$	no
Absorption	10^{-15} s	yes
Phosphorescence	$10^{-4} - 10^{-1} \text{ s}$	yes
Intersystem Crossing	$10^{-8} - 10^{-3} \text{ s}$	no
Fluorescence	$10^{-9} - 10^{-7} \text{ s}$	yes



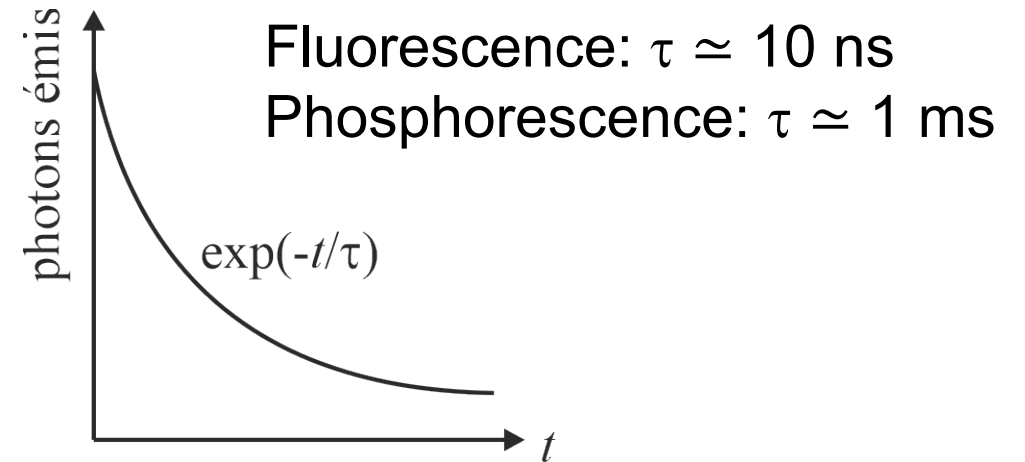
- Taux d'émission: Fluorescence $\sim 10^8 \text{ s}^{-1}$, Phosphorescence entre 1 et 10^3 s^{-1}

Durée de vie et taux d'émission

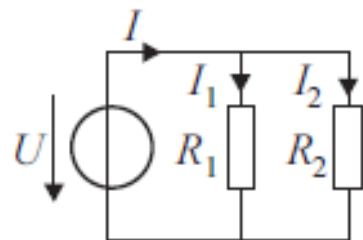
- On caractérise une transition optique soit par sa durée de vie τ (unités [s]) soit par son taux de transition p (unités [s^{-1}]), qu'on écrit aussi parfois γ ou Γ
- La population du niveau excité décroît de façon exponentielle:



$$p = \frac{1}{\tau}$$



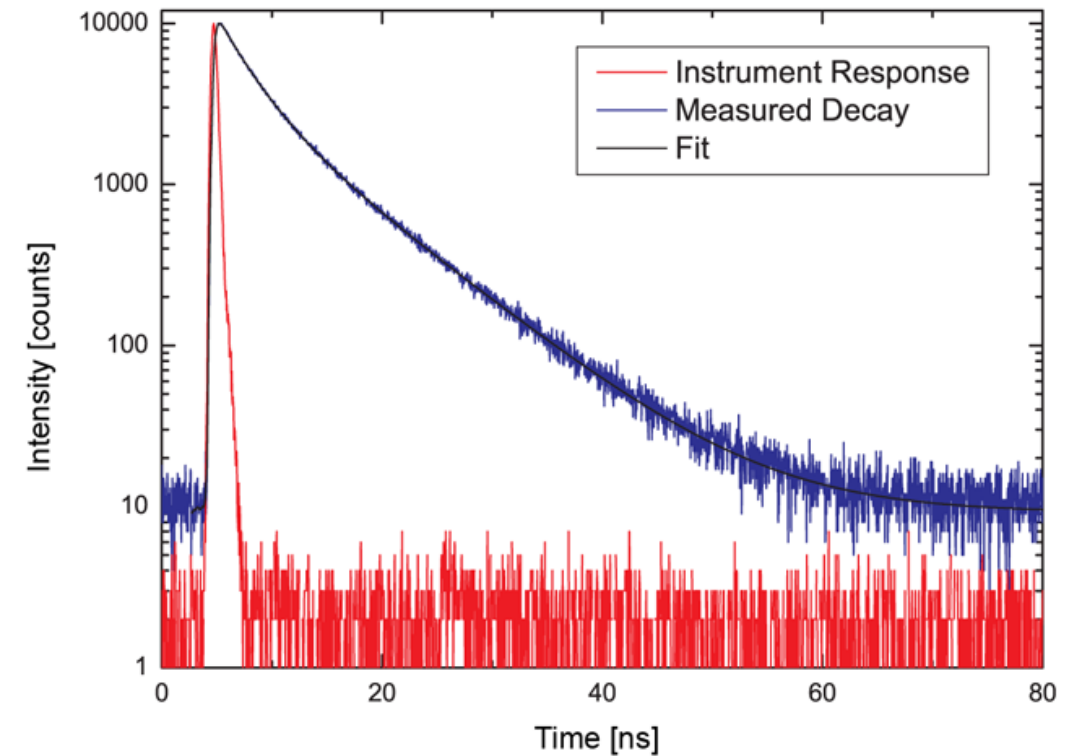
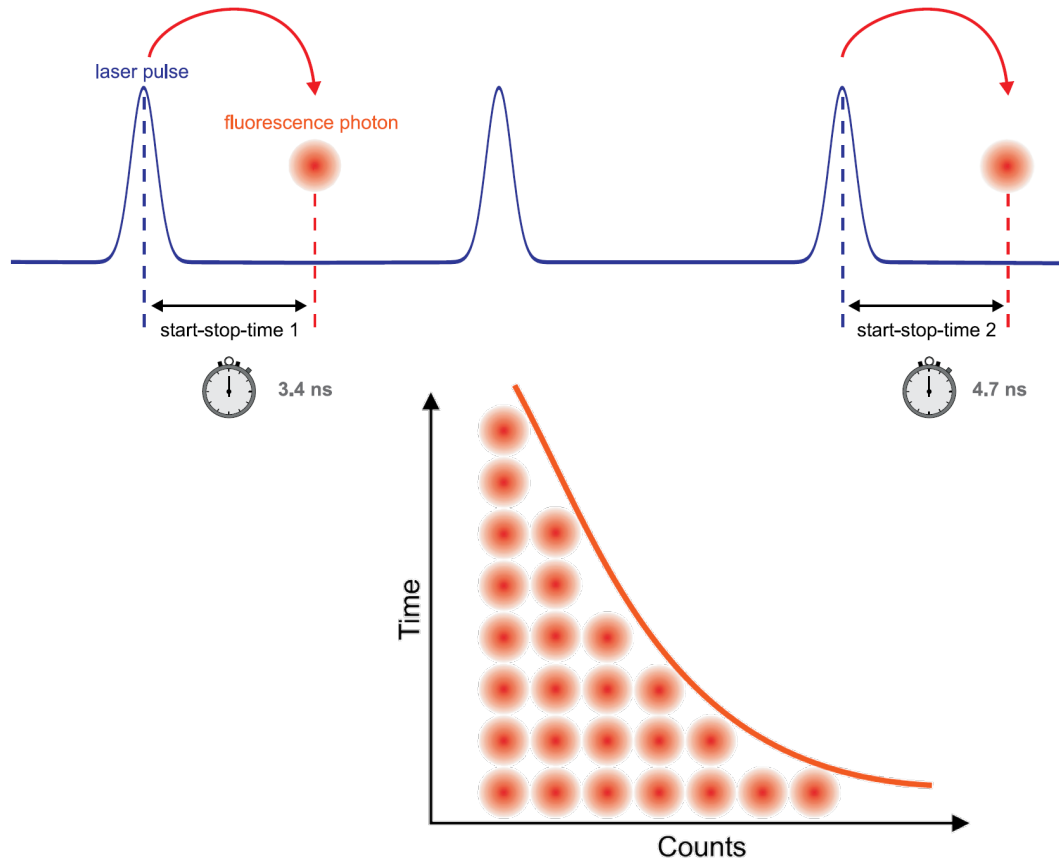
- Si un état excité a plusieurs canaux de dé-excitation, on additionne les taux de chaque canal pour avoir le taux de transition total (comme pour les résistances en parallèle):



$$I = I_1 + I_2 \quad \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Mesure de la durée de vie

- Time-Correlated Single Photon Counting
- Illumination laser avec des pulses très courts (~ 50 ps)
- Signal fortement atténué en sorte de n'avoir qu'un photon à la fois
- Photodétecteur à très haute sensibilité

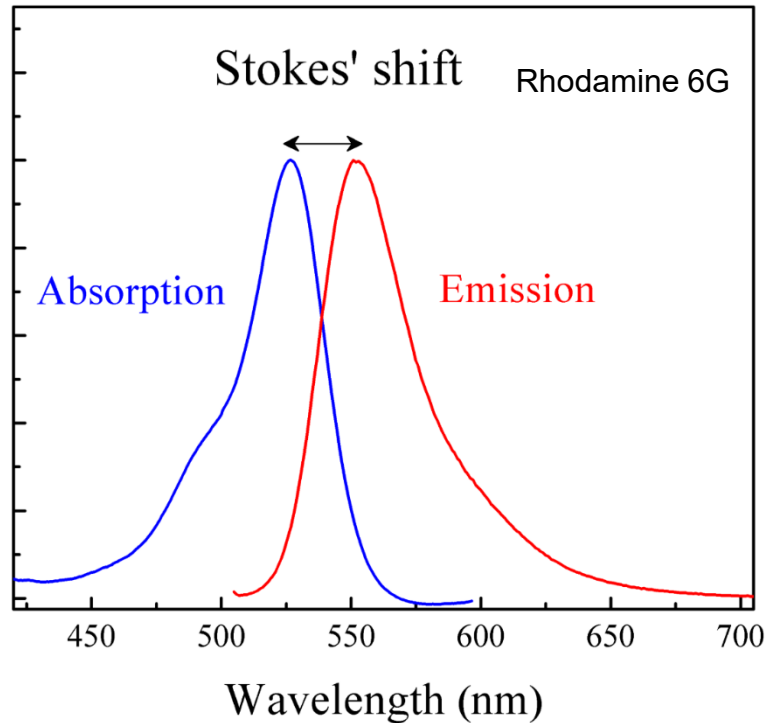


Spectres d'absorption et d'émission

- Il y a toujours une différence d'énergie entre l'absorption et l'émission (fluorescence ou phosphorescence), on parle de Stokes' shift



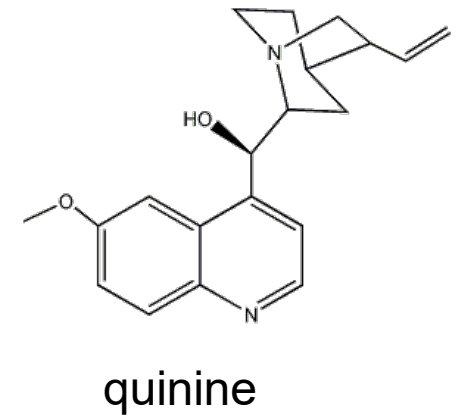
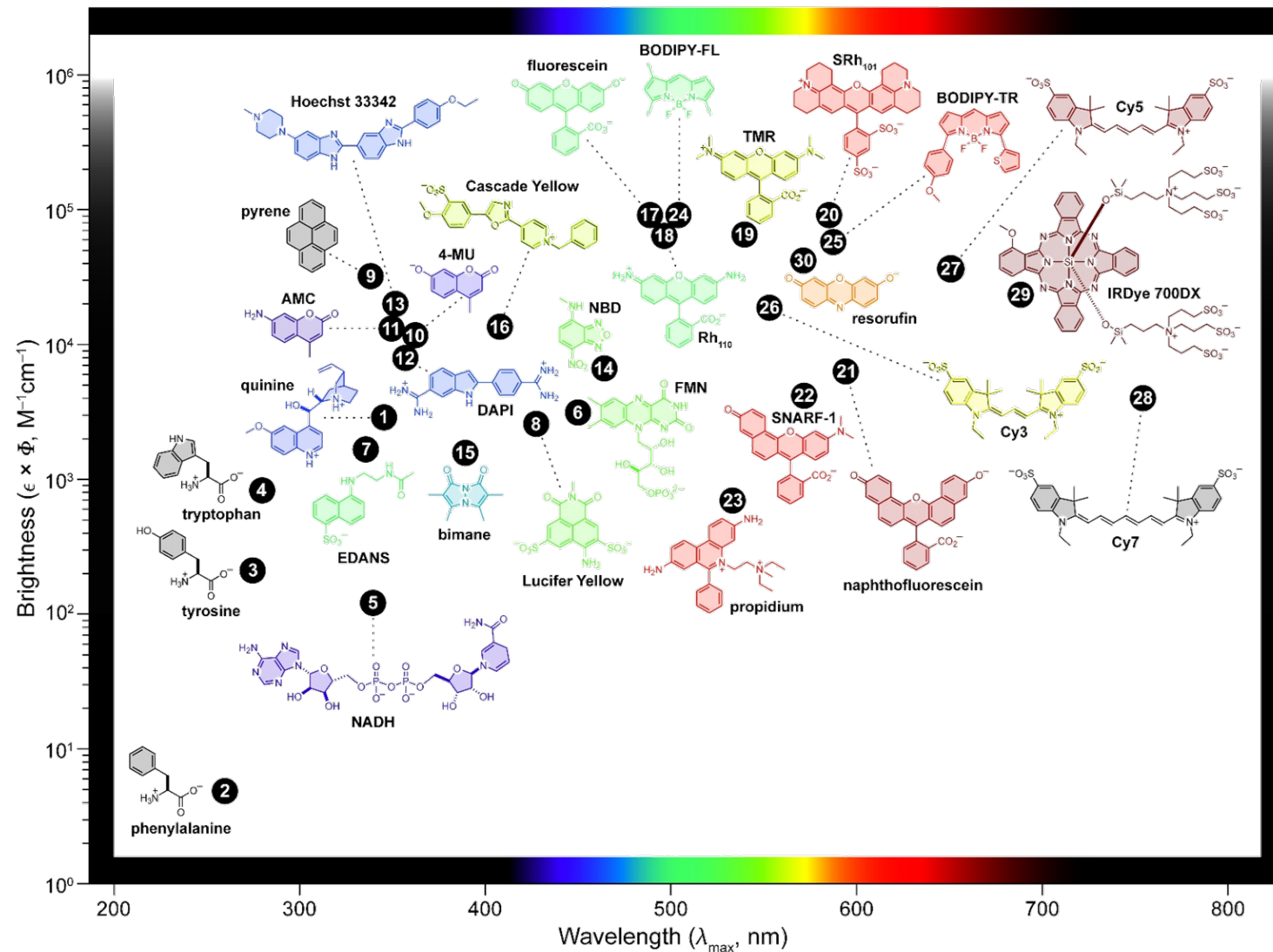
George Gabriel Stokes
(1819 – 1903)



- On introduit aussi l'efficacité quantique q_0 (quantum yield) qui exprime le nombre de photons émis (par fluorescence) pour un photon absorbé; en général $q_0 \approx 1$, mais peut être aussi très petit

Fluorescence

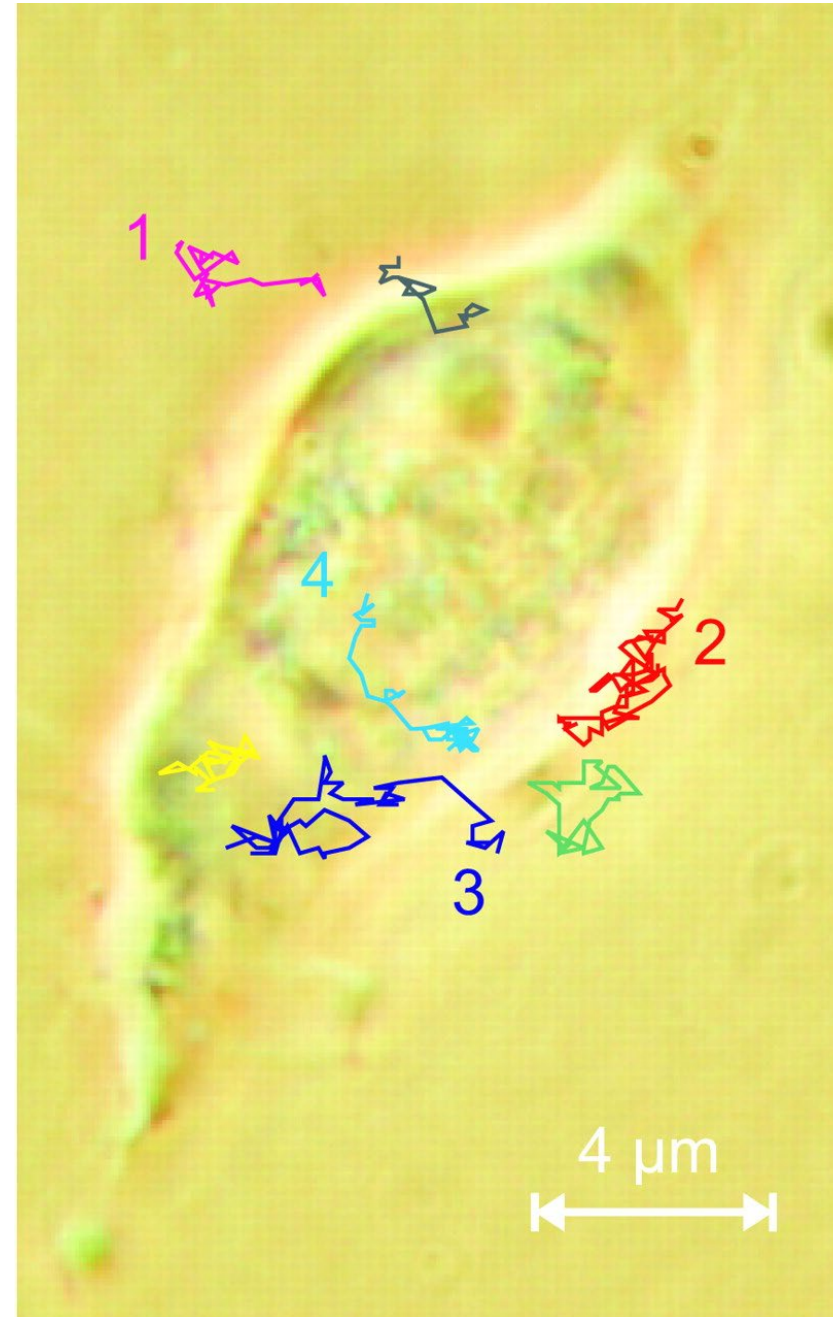
- Une immense variété de molécules fluorescentes existe



Microscopie par fluorescence

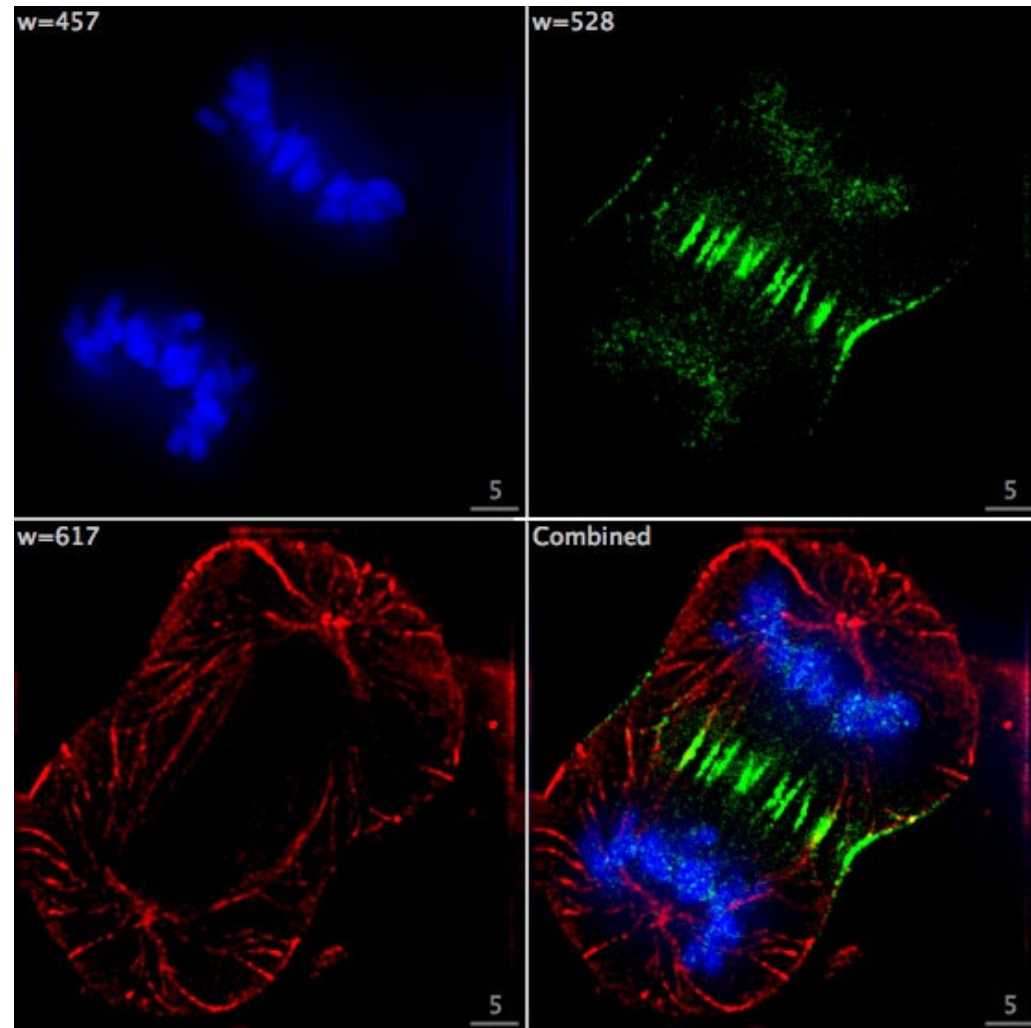
- Conjugaison: on peut attacher (covalent bonding) une molécule fluorescente sur pratiquement n'importe quelle entité biologique (molécule, virus, organelle, membrane, etc...)
- Trajet d'un virus marqué par une molécule fluorescente alors qu'il essaye d'infester une cellule en passant à-travers la membrane cellulaire:

Science vol. 294, p. 1929 (2001)



Microscopie par fluorescence

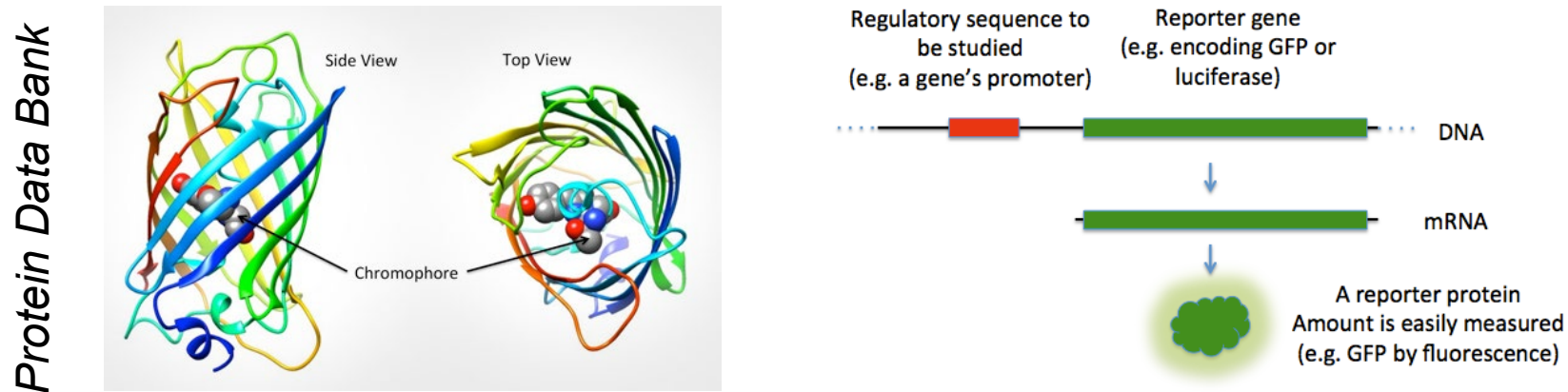
- Souvent on combine des images avec différentes molécules qui fluorescent à différentes longueurs d'onde et se fixent sur des organelles spécifiques
- Cellule cancéreuse humaine: bleu – ADN, vert – protéine particulière, rouge – microtubules
- On parle parfois de «functional imaging» puisque ces colorations permettent de mettre en évidence certaines fonctions biologiques



Nikon www.microscopyu.com

Biological assay

- GFP (green fluorescent protein), une protéine qui peut être générée par un organisme vivant et produit de la fluorescence dans le vert
- On peut ajouter le gène qui code pour GFP (reporter gene) à un autre gène que l'on souhaite étudier



- Si cet autre gène est produit par l'organisme («exprimé»), la GFP est aussi produite et l'organisme produit un signal de fluorescence vert

Biological assay

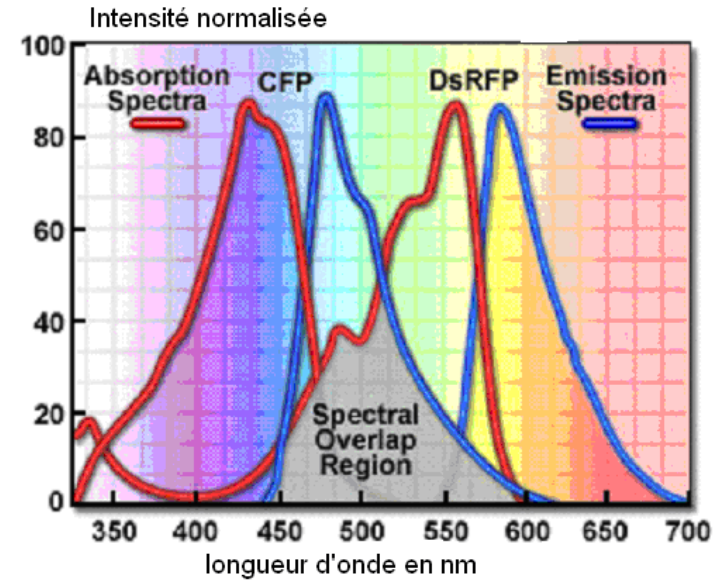
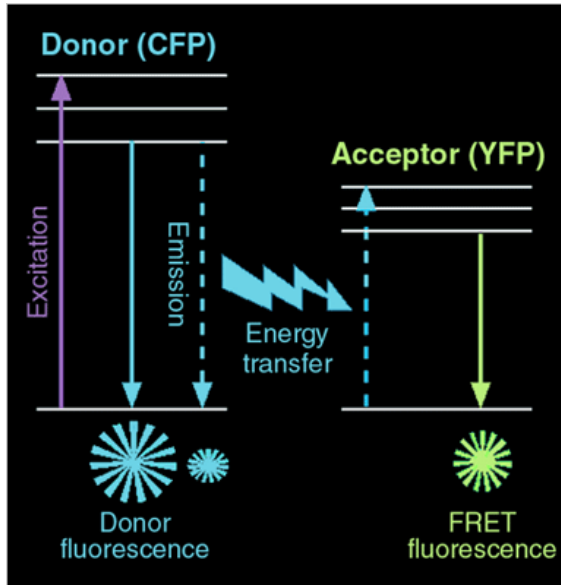
- Souris exprimant GFP



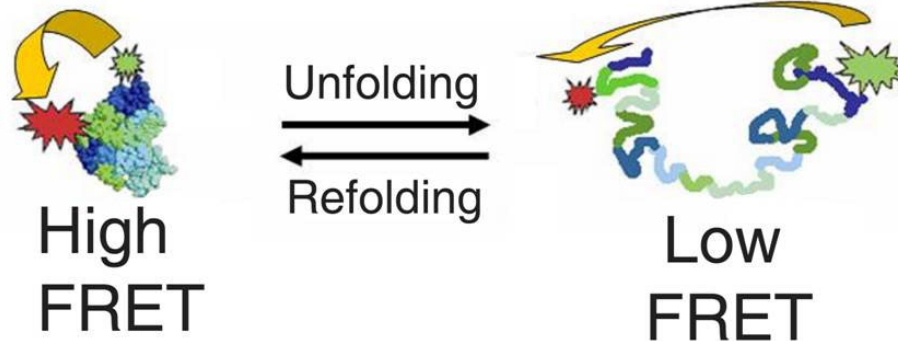
Wikimedia

FRET et transfert de Förster

- Couplage entre deux molécules (donneur – accepteur) et transfert d'énergie de l'une vers l'autre, dépend très fortement de la distance $I \sim \frac{1}{d^6}$ et nécessite un recouvrement spectral

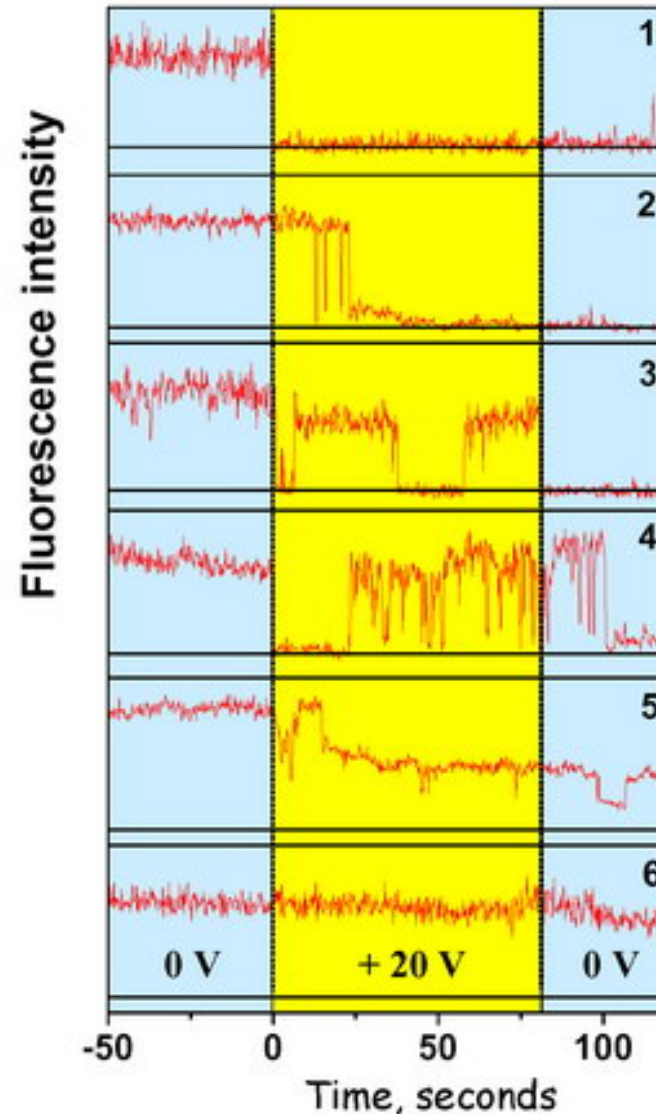


- Permet d'étudier la conformation de protéines en marquant deux extrémités



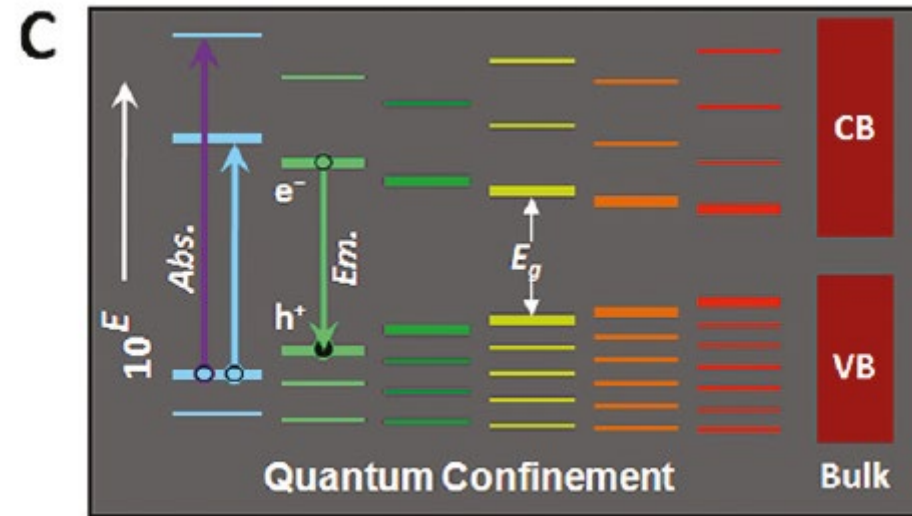
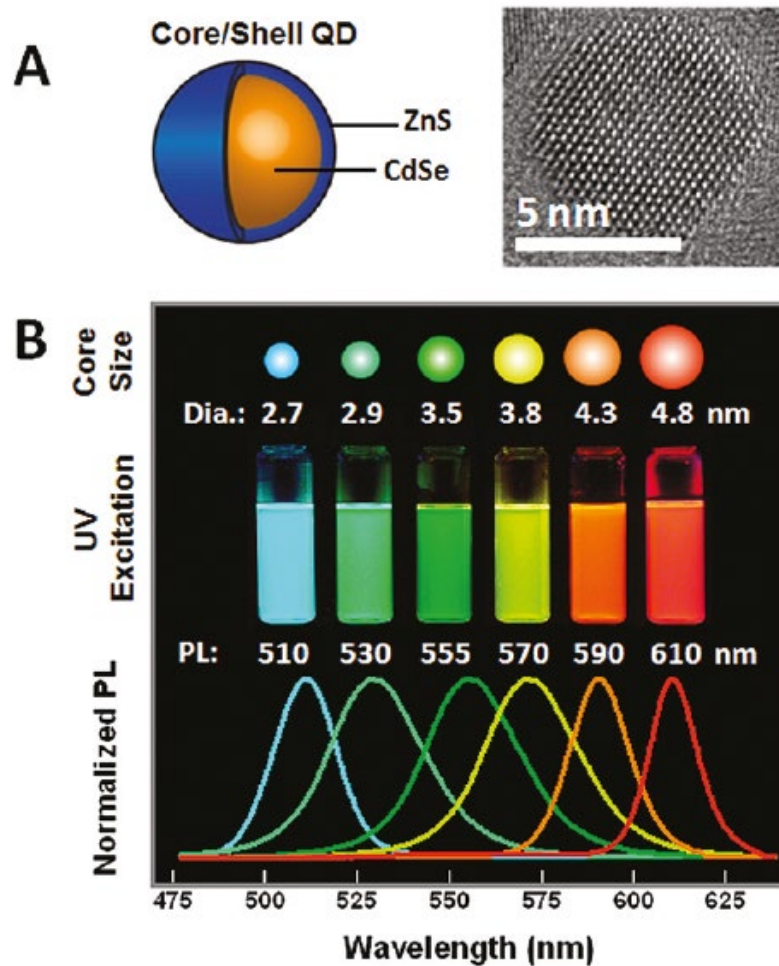
Quantum dots (boîtes quantiques)

- La fluorescence de molécules est très sensible à l'environnement
- Elle peut s'interrompre (clignoter=blinking) ou même s'arrêter complètement (quenching)
- Cela rend le signal difficile à interpréter
- Une boîte quantique est moins sensible à ce phénomène et produit aussi un signal lumineux suite aux dé-excitations électroniques



Quantum dots (boîtes quantiques)

- Généralement un cœur en semiconducteur entouré d'une couche protectrice permettant la dispersion dans l'eau
- Souvent composé de matériaux toxiques



Analytical Chemistry 2011

Ingénierie optique

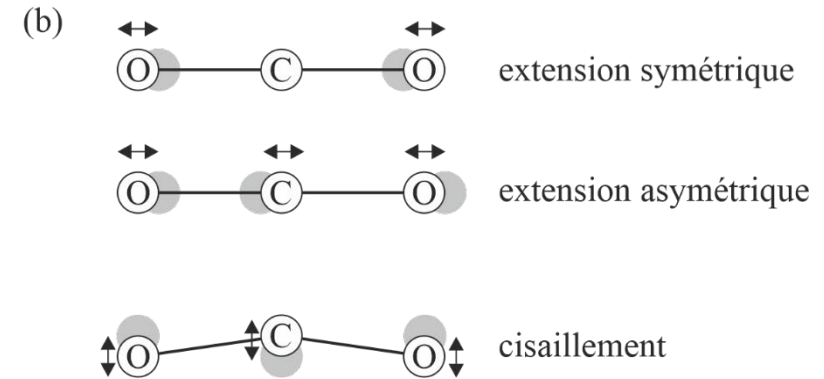
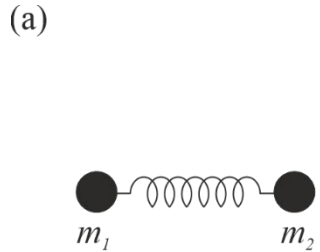
Semaine 11 – partie 5

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie

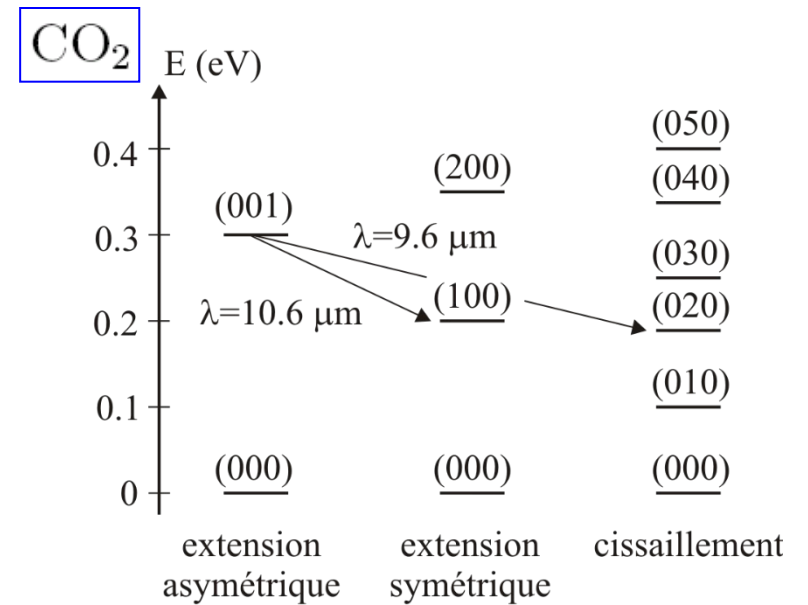


Niveaux vibrationnels

- Jusqu'à présent, nous avons considéré uniquement les niveaux électroniques
- Pour une molécule, il existe aussi des niveaux
 - vibrationnelles (infrarouge)
 - rotationnelles (infrarouge lointain)
- Les niveaux vibrationnels et rotationnels se comprennent comme des niveaux "mécaniques"
- Energie spécifique et indiqués aussi dans le diagramme de Jablonski



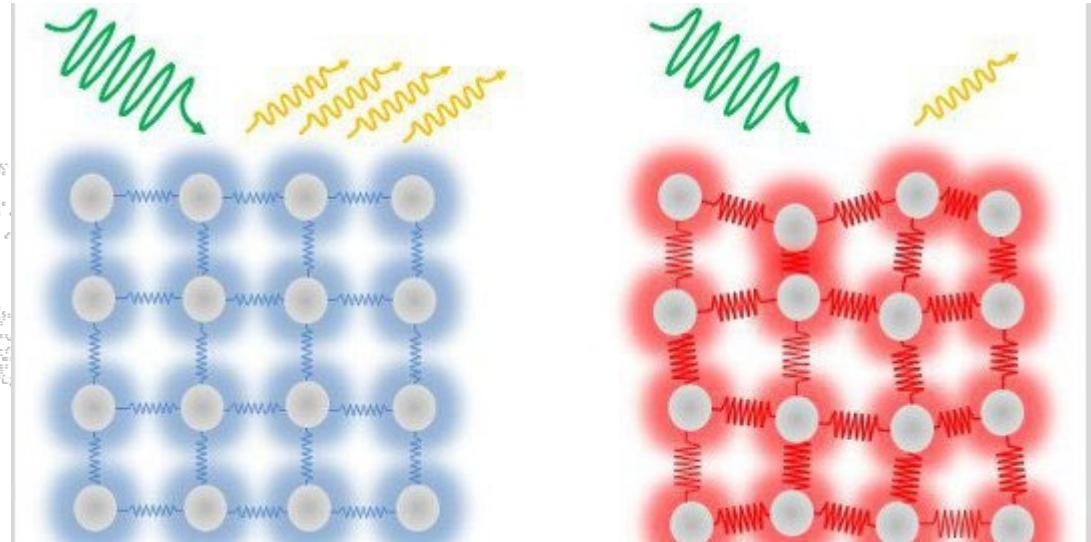
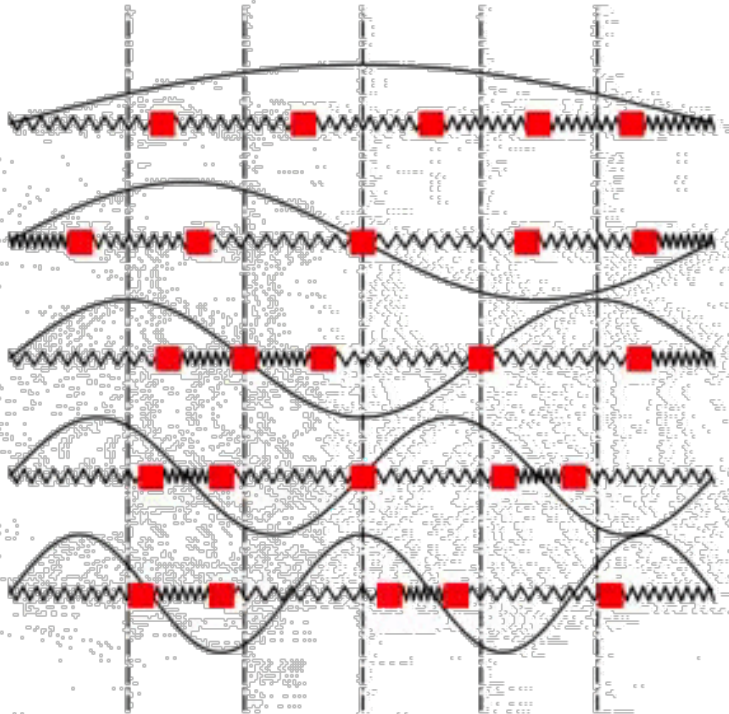
Mode	$\tilde{\nu}$ [cm^{-1}]	ν [THz]	λ [μm]	E [meV]
extension symétrique	1'388	41.6	7.2	172.0
extension asymétrique	2'349	70.4	4.2	291.2
cisaillement	667	20	15	82.7



Niveaux vibrationnels

- Dans un solide aussi, il existe des vibrations mécaniques, on parle de phonons:

©2017, Bhaskar Kamble

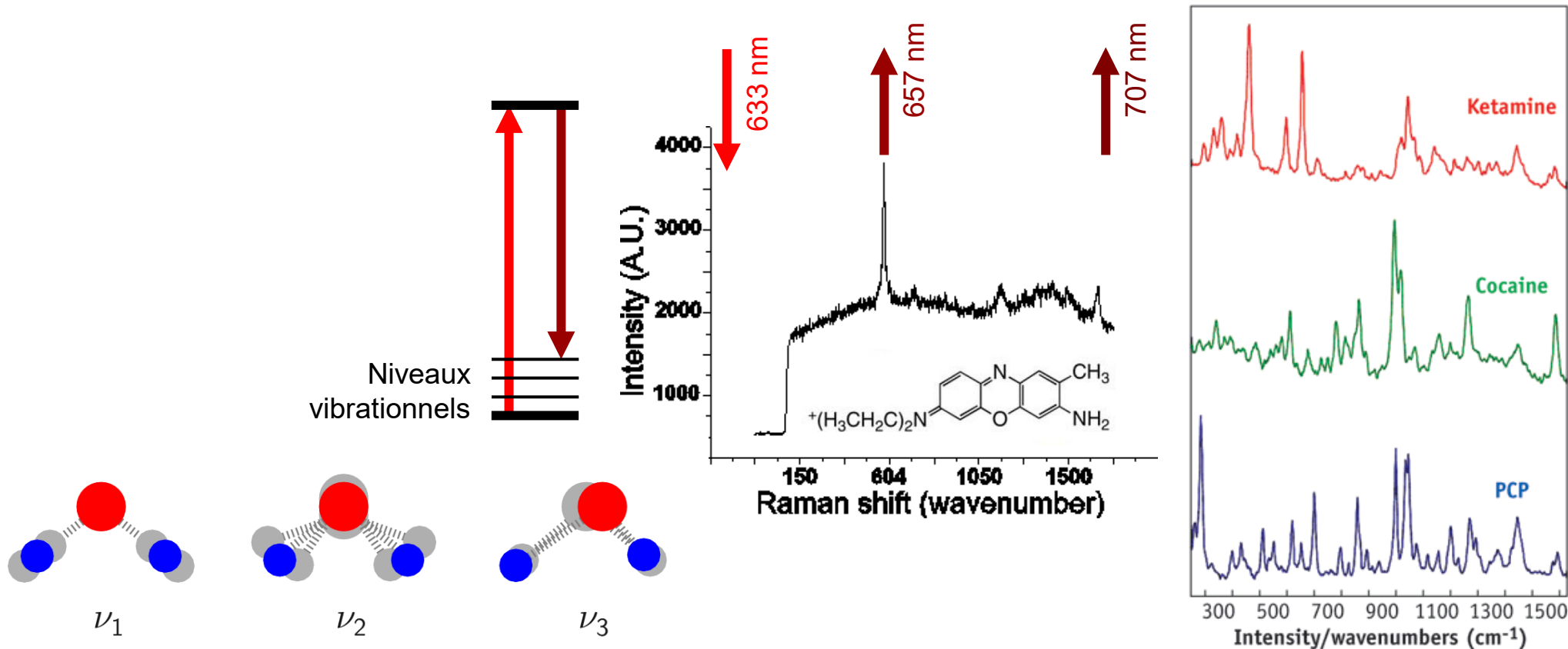


quora.com

- Les photons interagissent avec ces vibrations, dans les molécules et les solides
- De la lumière peut être absorbée et exciter ces vibrations mécaniques dans un solide ou dans une molécule

Spectroscopie Raman

- La spectroscopie Raman utilise directement ces niveaux vibratoires (on parle de diffusion inélastique de la lumière, phénomène peu efficace)
- Comme chaque molécule a des liaisons chimiques différentes, elle peut vibrer dans des modes différents et produire un spectre Raman spécifique (empreinte digitale)
- L'énergie correspondante est très faible (d'où les unités en cm^{-1})



Ingénierie optique

Semaine 11 – partie 6

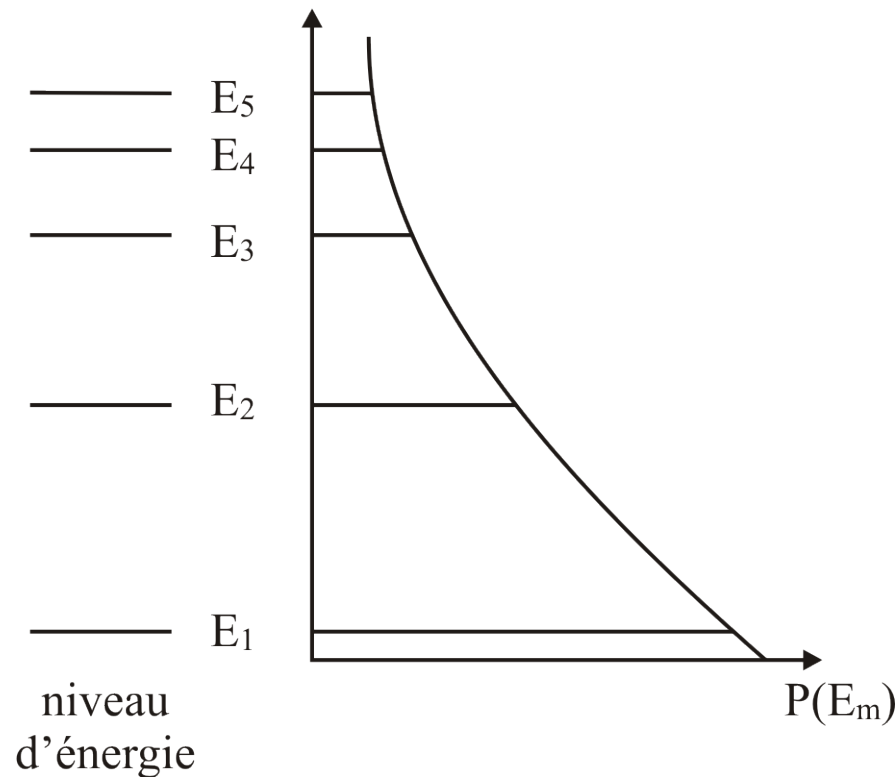
Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



Occupation des niveaux d'énergie en fonction de la température

- Les niveaux sont donnés par la structure des atomes/molécules/solides (diagramme de Jablonski)
- Leur occupation (sans excitation) dépend de la température et suit la loi de Boltzmann:

$$P(E_m) \propto \exp(-E_m/KT), \quad m = 1, 2, 3, \dots$$



Occupation des niveaux d'énergie en fonction de la température

- La distribution de Boltzmann correspond à une distribution par équipartitions
- Si on a N atomes, le rapport des populations dans les niveaux 1 et 2 est

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{KT}\right)$$

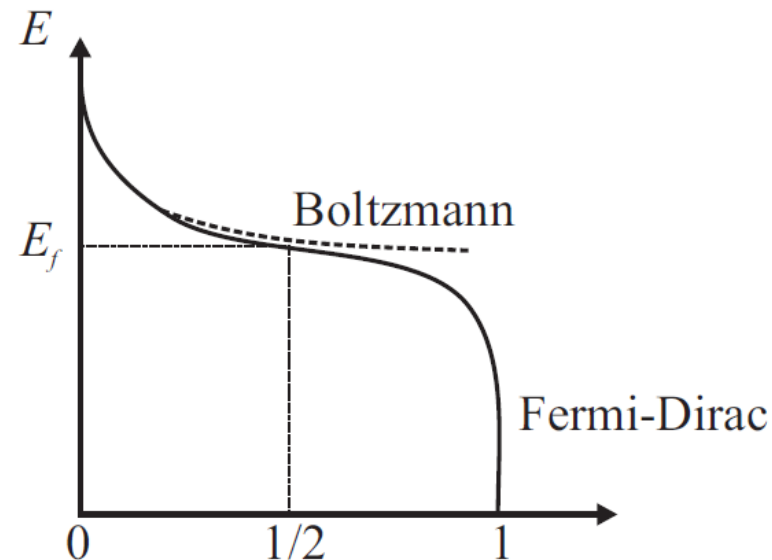
- Ce rapport dépend de la température; à $T = 0^\circ \text{K}$ tous les atomes sont dans le niveau fondamental
- En augmentant la température, la population des niveaux d'énergies supérieures augmente
- A l'équilibre, la population d'un niveau d'énergie donné est toujours plus grande que celle des niveaux d'énergies supérieures
- Ce n'est pas nécessairement le cas hors équilibre: il peut alors y avoir une inversion de population \rightarrow lasage

Dépendance en température

- Dans un système quantique, on doit aussi tenir compte du principe d'exclusion de Pauli qui empêche qu'un état d'énergie/spin soit occupé par plus d'un électron
- La probabilité qu'un niveau d'énergie E soit occupé suit alors la distribution de Fermi-Dirac:

$$f(E) = \frac{1}{\exp((E - E_f)/KT) + 1}$$

- Au dessus de l'énergie de Fermi E_f , cette distribution s'approche de la distribution de Boltzmann
- Les transitions qui jouent un rôle en optique ont une énergie plus grande que l'énergie de Fermi



Ingénierie optique

Semaine 11 – partie 7

Olivier J.F. Martin
Laboratoire de Nanophotonique et Métrologie



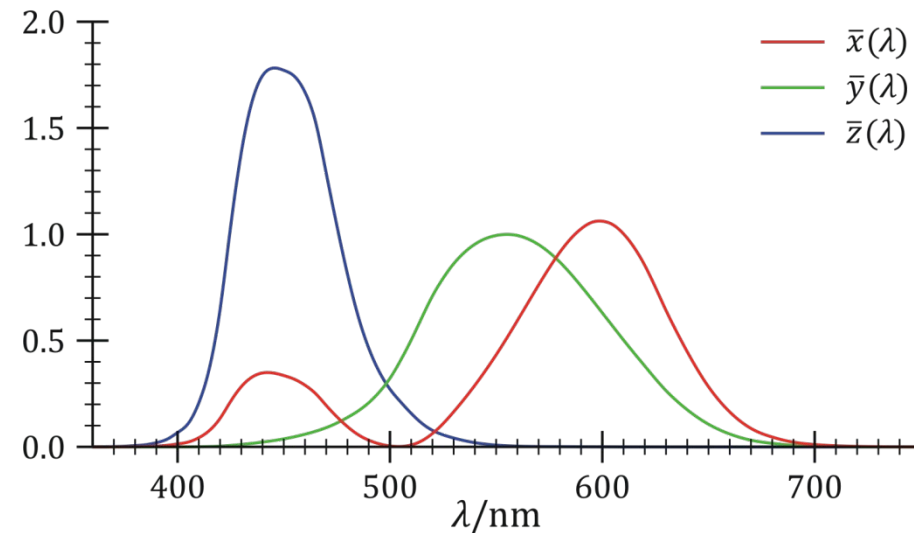
Colorimétrie

- Art de rendre les couleurs par la lumière
- Commission Internationale d'Eclairage (CIE 1931)
- On cherche à formaliser les couleurs telles que perçues par l'oeil
- Trois types de récepteurs dans l'œil, sensibles plutôt au rouge (X), au vert (Y) et au bleu (Z)
- Une couleur est décrite par le triplet XYZ

$$X = \int_0^{\infty} d\lambda I(\lambda) \bar{x}(\lambda),$$

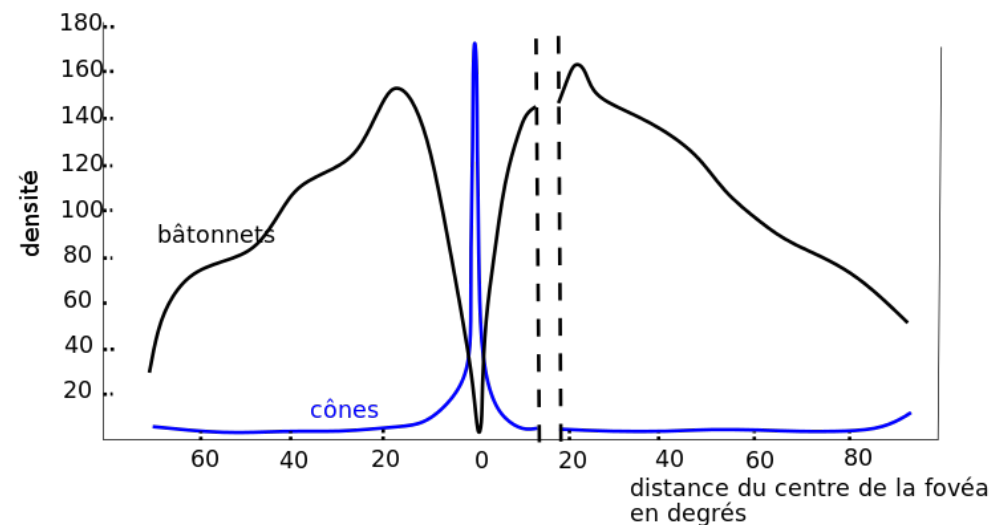
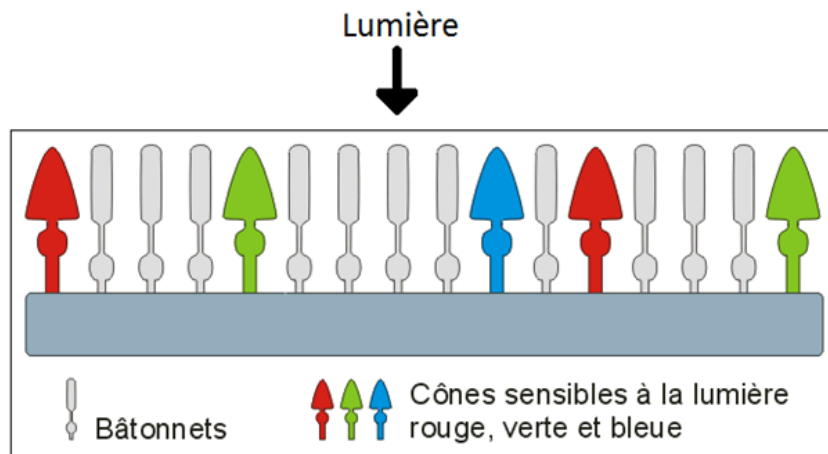
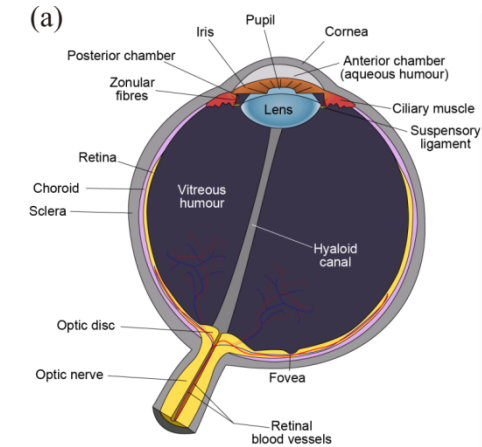
$$Y = \int_0^{\infty} d\lambda I(\lambda) \bar{y}(\lambda),$$

$$Z = \int_0^{\infty} d\lambda I(\lambda) \bar{z}(\lambda).$$



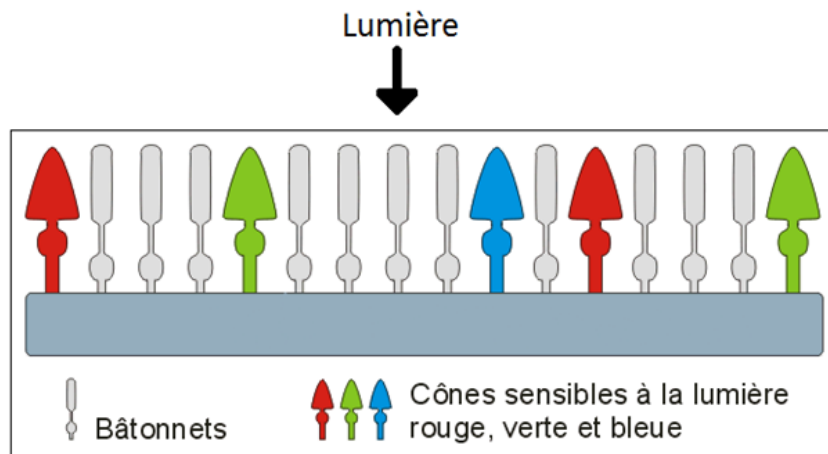
Colorimétrie – Physiologie de l'oeil

- La rétine est composée de deux types de photorécepteurs les bâtonnets (très sensibles à l'intensité mais pas à la couleur) et les cônes sensibles à la couleur
- Trois types de cônes avec des pigments photosensibles différents: erythropsine (rouge), cyanopsine (bleu) et chloropsine (vert)



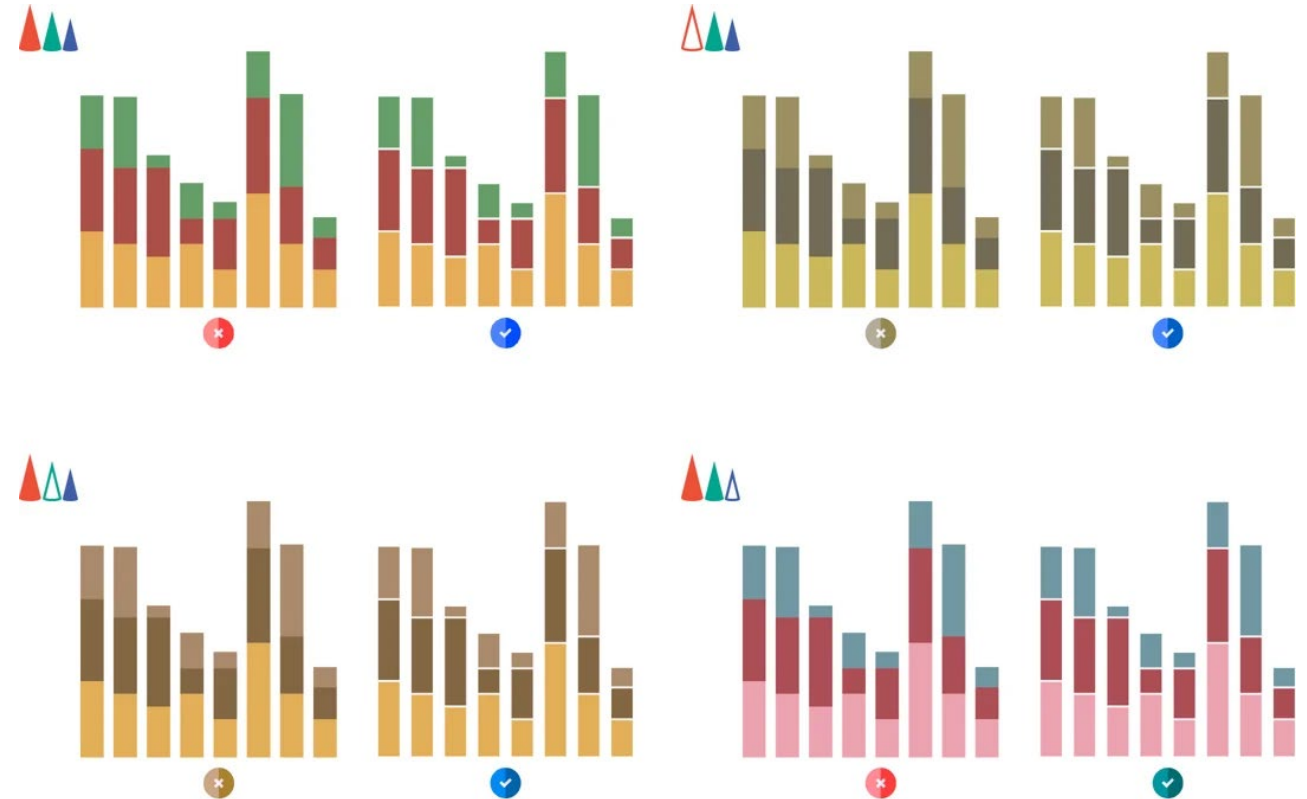
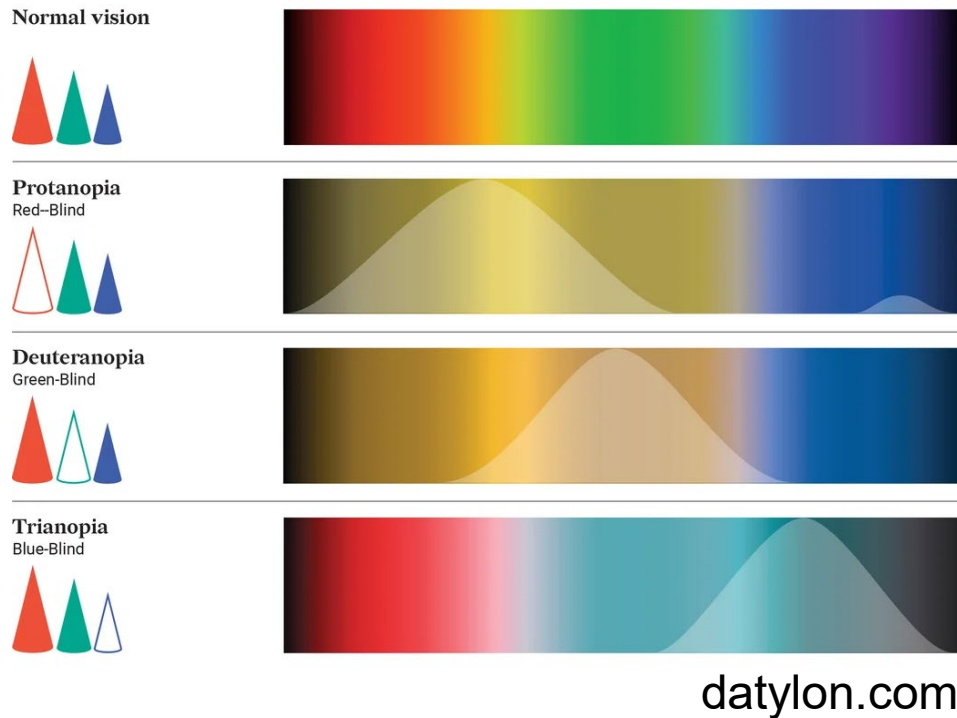
Colorimétrie – Physiologie de l'oeil

- Daltonisme: déficience d'un ou de plusieurs cônes:
 - protanopie (pas de rouge, chromosome X)
 - deutéranopie (pas de vert, chromosome X)
 - tritanopie (pas de bleu)



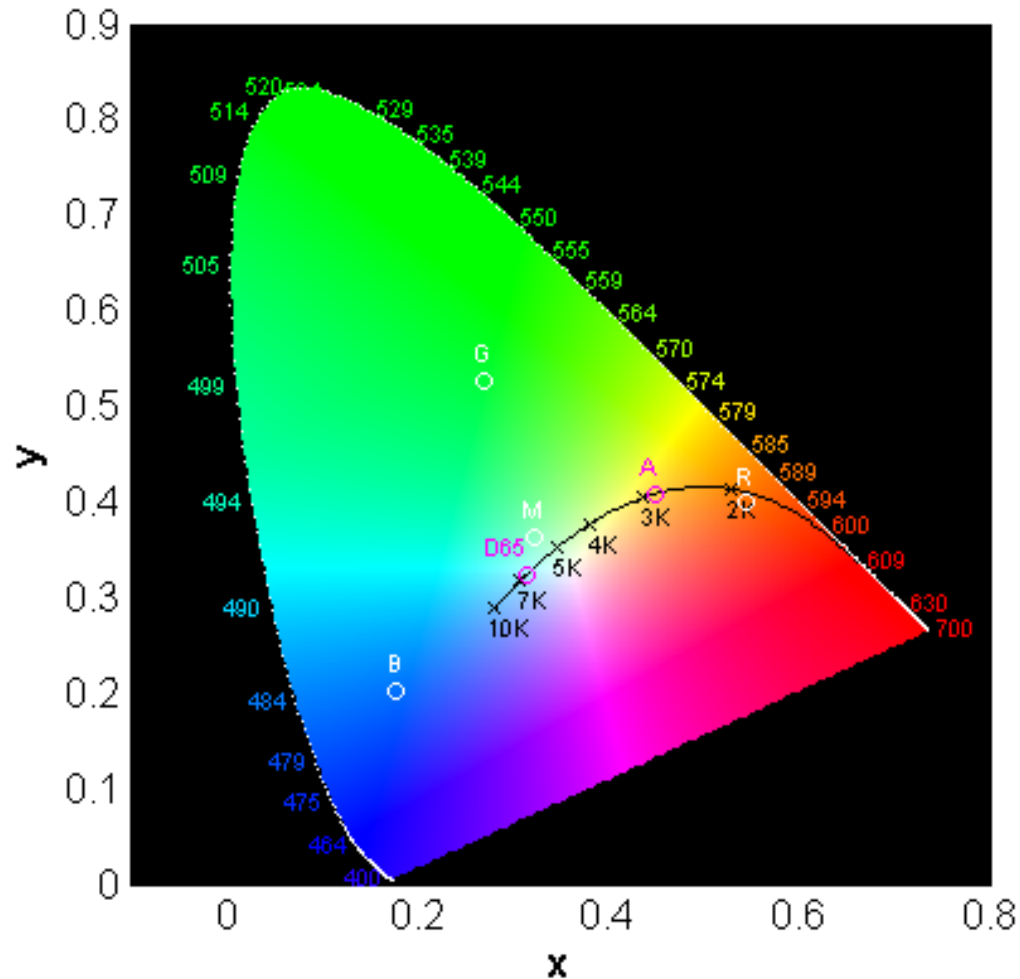
Colorimétrie – Physiologie de l'oeil

- Les daltoniens ont de la difficulté à visualiser certains graphes, pensez-y lorsque vous présentez graphiquement des résultats!



Colorimétrie

- On peut encore réduire le triplet $X Y Z$ à deux nombres x et y dont la valeur est entre 0 et 1 (normalisation $x + y + z = 1$):

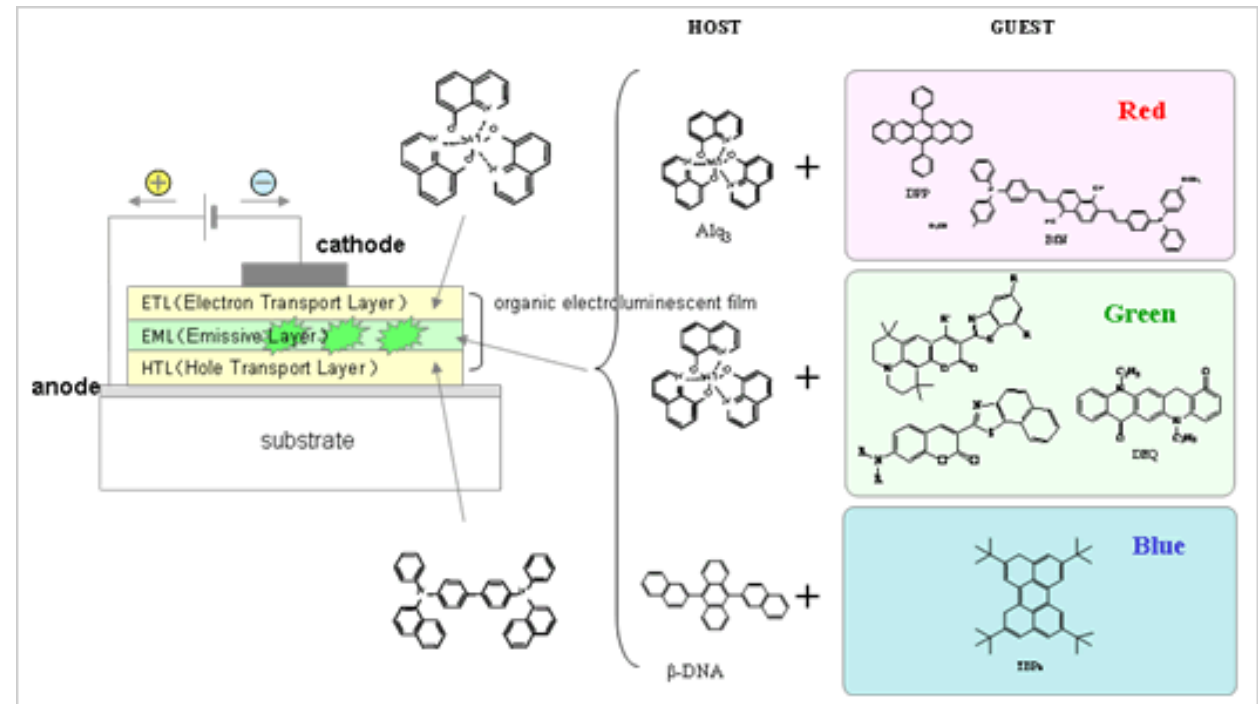
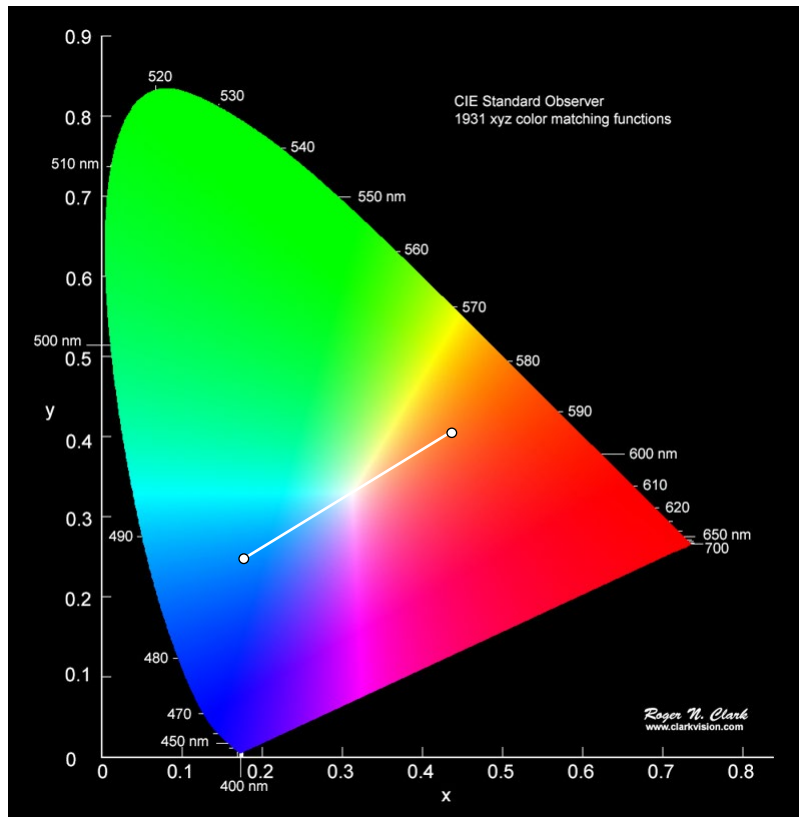


$$x = \frac{X}{X + Y + Z},$$
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z},$$
$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = 1 - x - y.$$

- Diagramme de chromaticité
- Gamut de couleur
- Couleurs monochromatiques sur le bord indiquées par leur longueur d'onde
- Mélange entre deux (ou plus) points (non-proportionnel à la distance)
- Sources thermiques idéales indiquées avec leur température

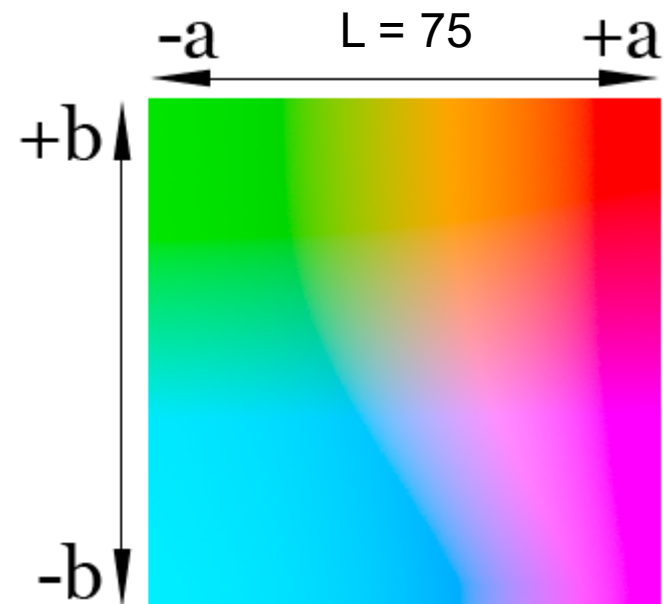
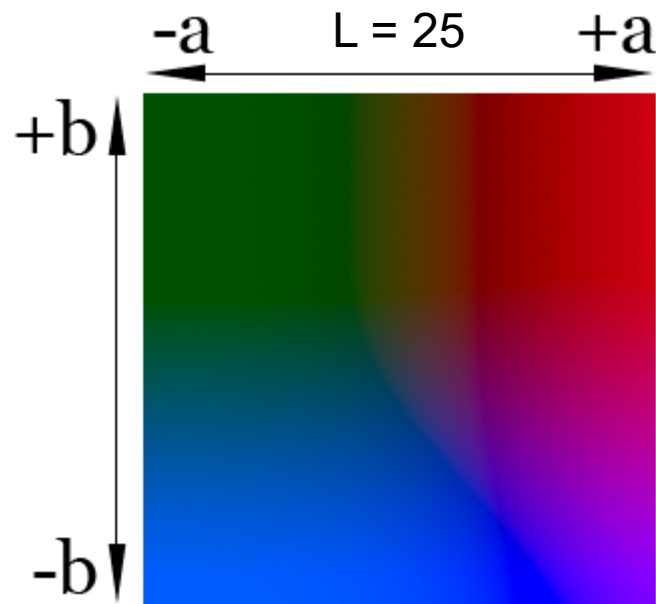
Colorimétrie - OLED

- Une émission blanche nécessite 3 émetteurs RGB avec chacun la même luminosité, ce qui est difficile à réaliser
- Il est plus aisé de n'utiliser que deux émetteurs, par exemple orange et bleu



Colorimétrie – Autres systèmes

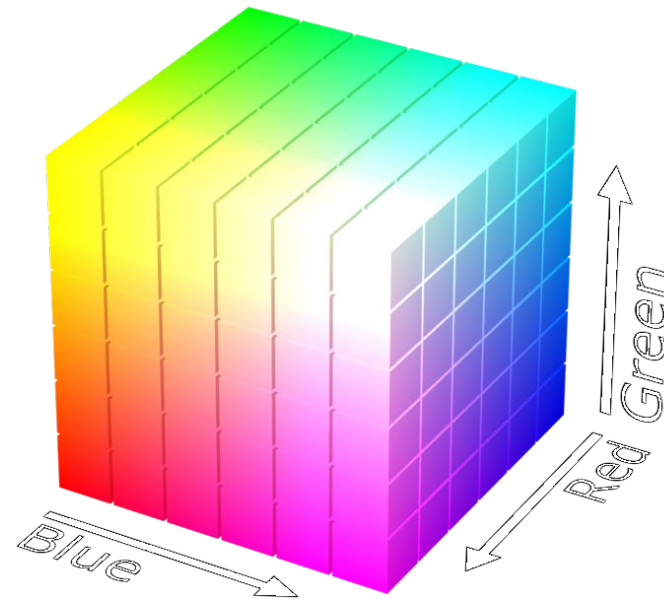
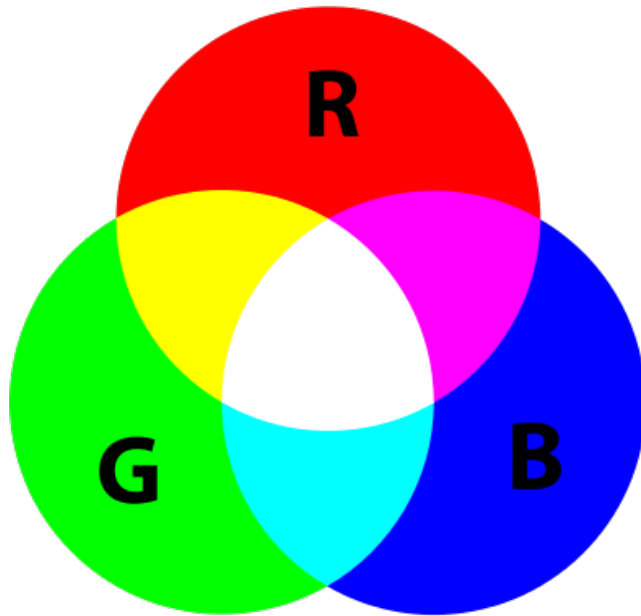
- La CIE a aussi défini d'autres systèmes de couleur, parmi ceux-ci le système Lab:
 - L^* = clarté (0=noir – 100=blanc)
 - a^* = 600 niveaux sur un axe du rouge au vert
 - b^* = 600 niveaux sur un axe du jaune au bleu
- Equivalent au système XYZ, mais meilleure linéarité entre les couleurs



wikimedia.org

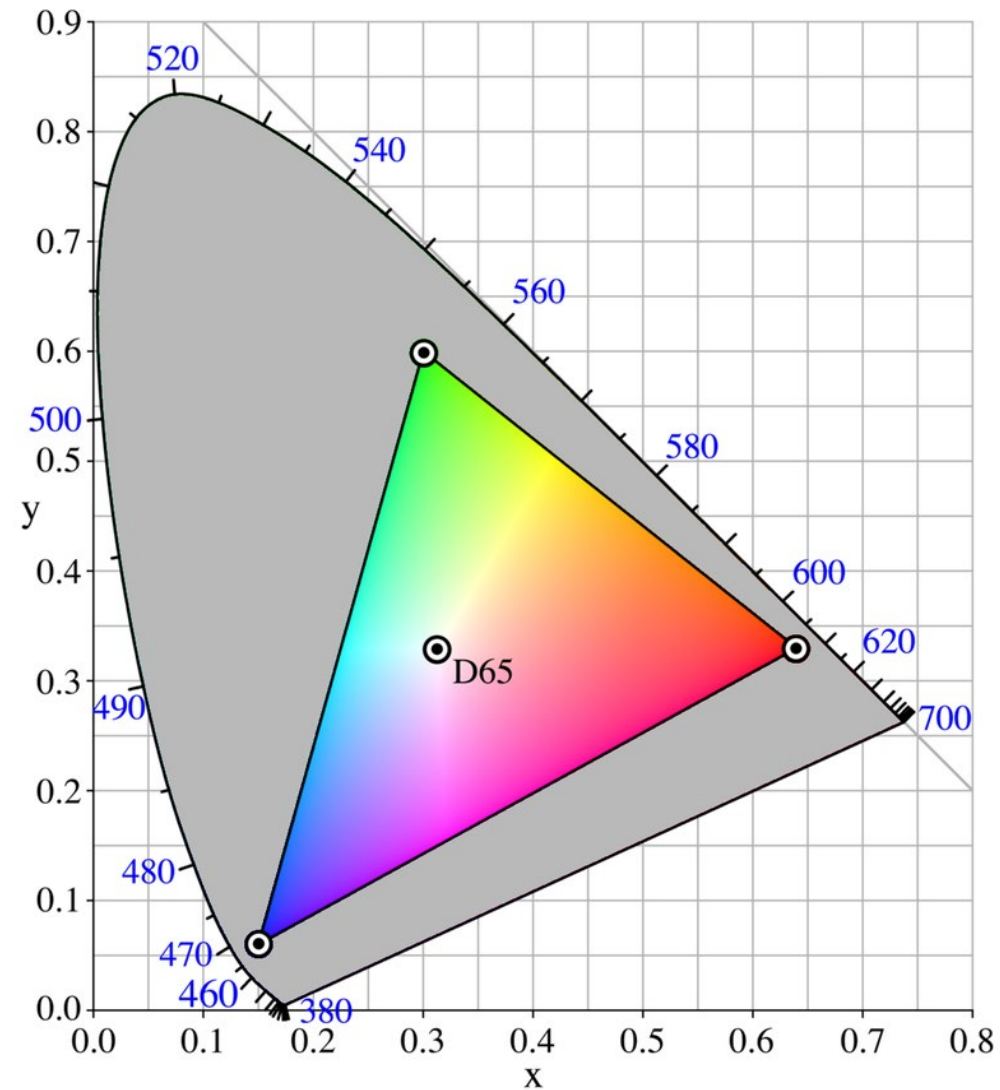
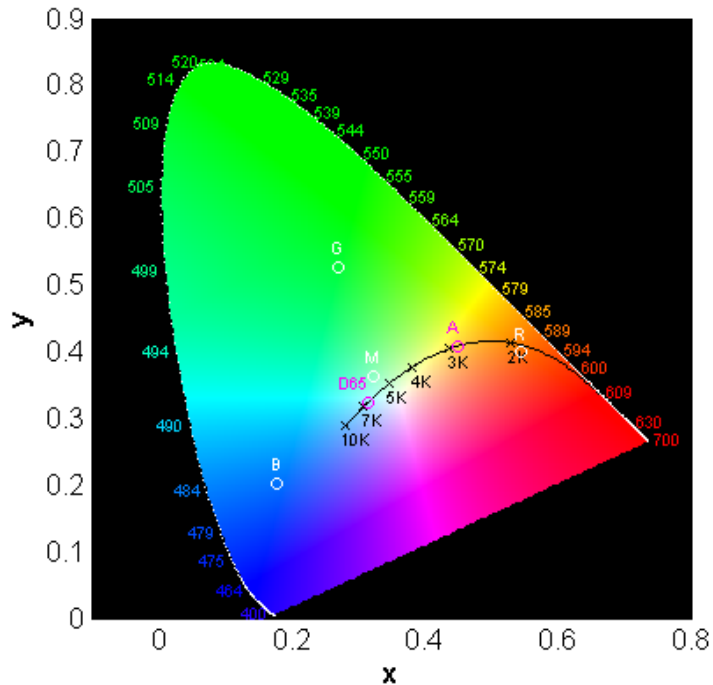
Colorimétrie – Autres systèmes de couleurs

- Le système RGB est un système additif des trois couleurs primaires (inspirées par la physiologie de l'œil)
- Additionnées par paire, les couleurs primaires donnent les couleurs secondaires: cyan (C), magenta (M) et jaune (Y)



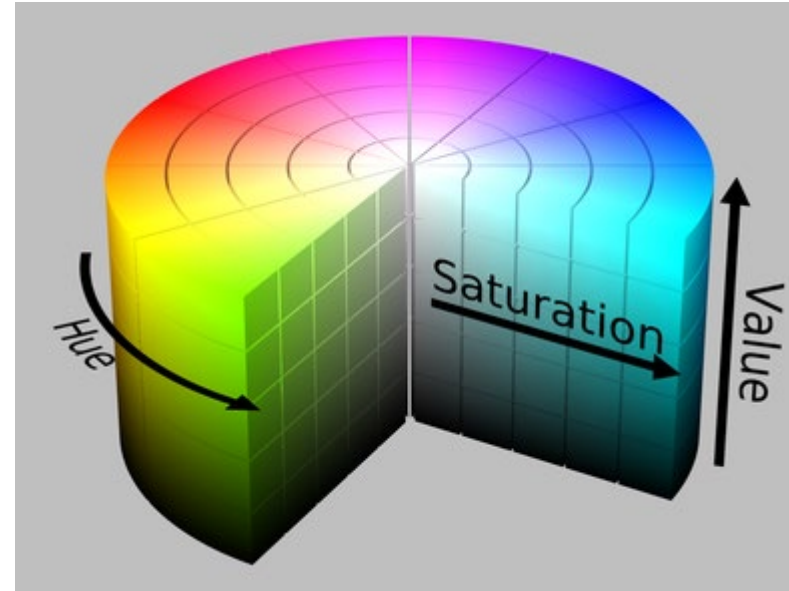
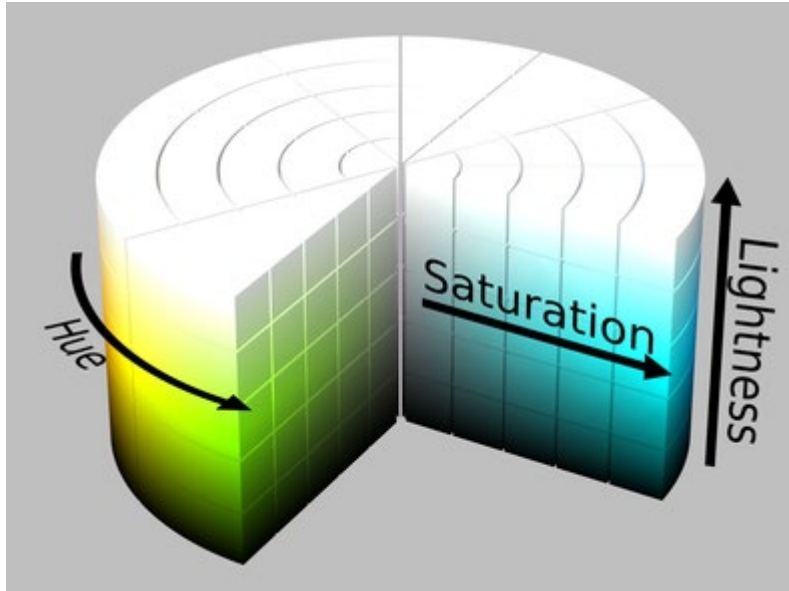
Colorimétrie – Autres systèmes de couleurs

- Le système RGB ne permet de reproduire qu'une partie du Gamut de couleurs

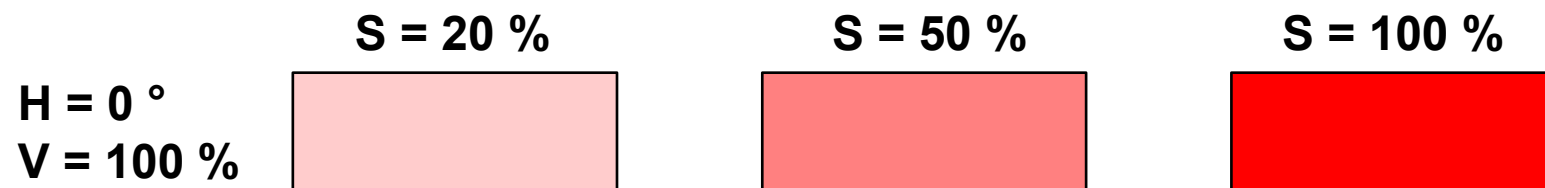


Colorimétrie – Autres systèmes de couleurs

- Les systèmes HSL (hue, saturation, lightness) et HSV (hue, saturation, value) sont dérivés du système RGB

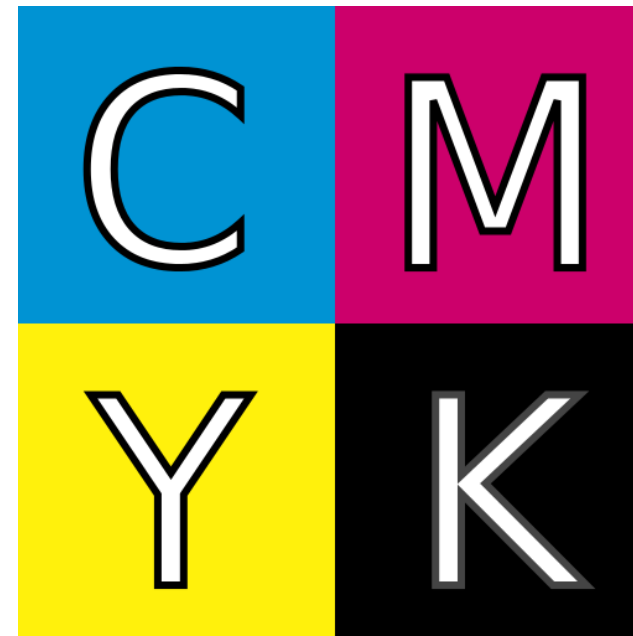
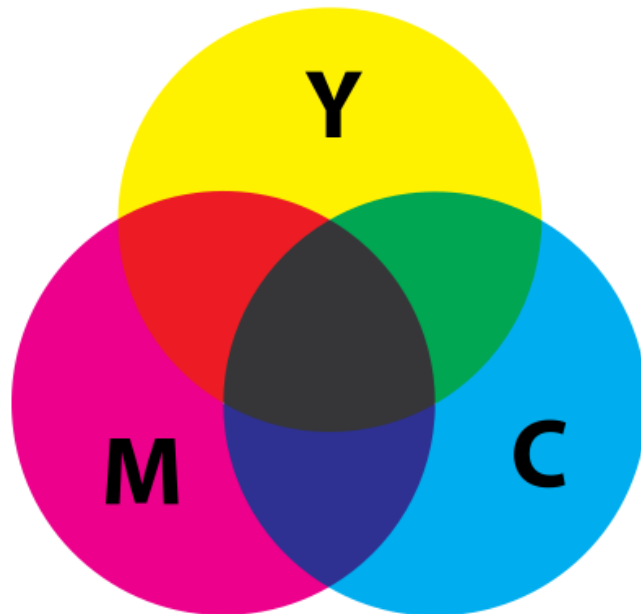


- La saturation est particulièrement importante pour obtenir des couleurs vibrantes:



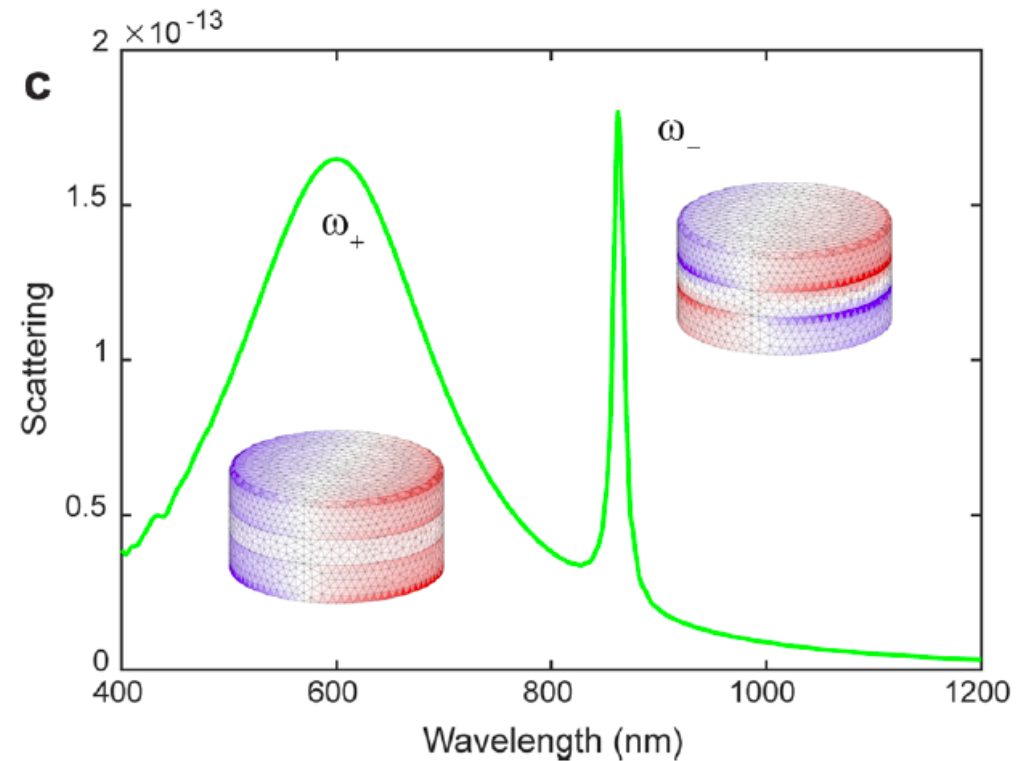
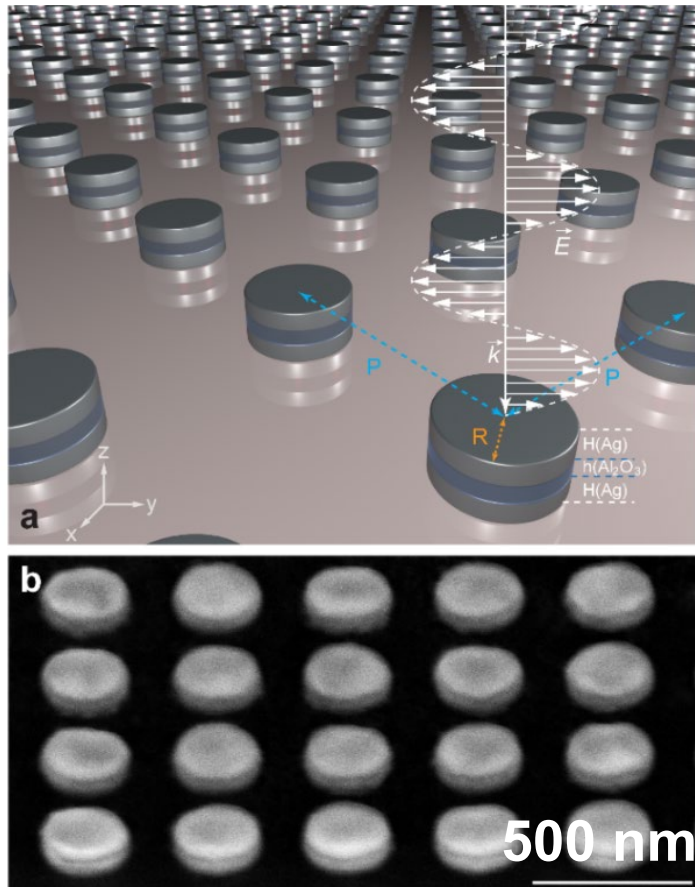
Colorimétrie – Autres systèmes de couleurs

- Le système CMYK est un système soustractif des trois couleurs: cyan (C), magenta (M) et jaune (Y) (correspondant aux couleurs complémentaires de RGB) ainsi que le noir (K)
- Utilisé essentiellement en imprimerie
- Alors que dans le système RGB le blanc est obtenu en ajoutant de la lumière rouge (R), verte (G) et bleue (B), dans le système CMYK le noir peut être obtenu en soustrayant CMY d'un fond de papier blanc, cependant, pour avoir un meilleur contraste, en imprimerie on ajoute du noir (K)



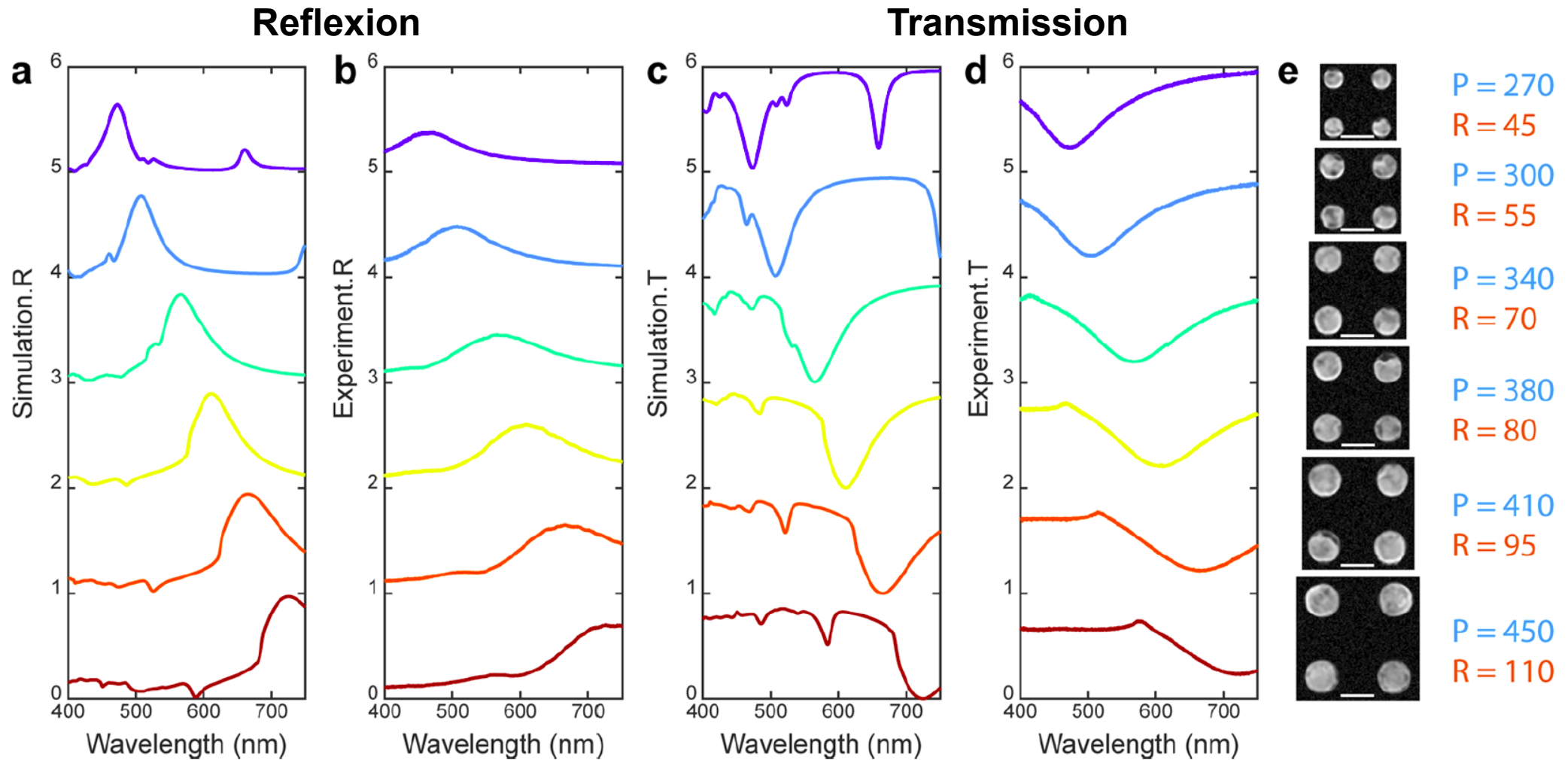
Couleurs produites par des nanostructures

- Certains métaux ont une interaction très forte avec la lumière: Au, Ag, Al, Cu
- On parle de métaux plasmoniques
- Deux disques d'argent avec un espace diélectrique d' Al_2O_3 produisent des couleurs fortes



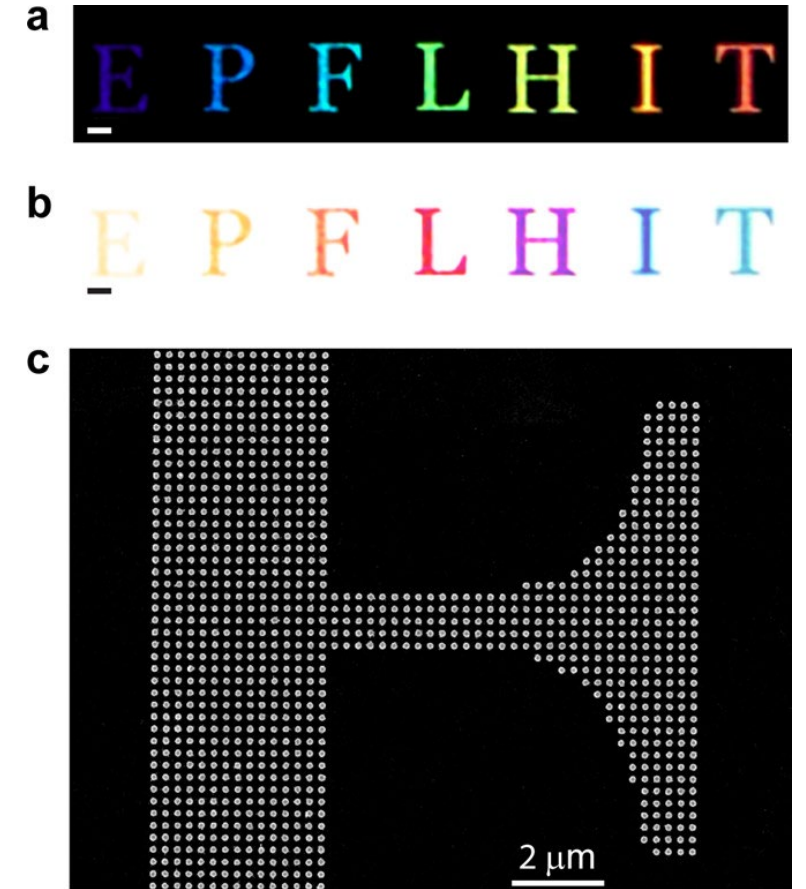
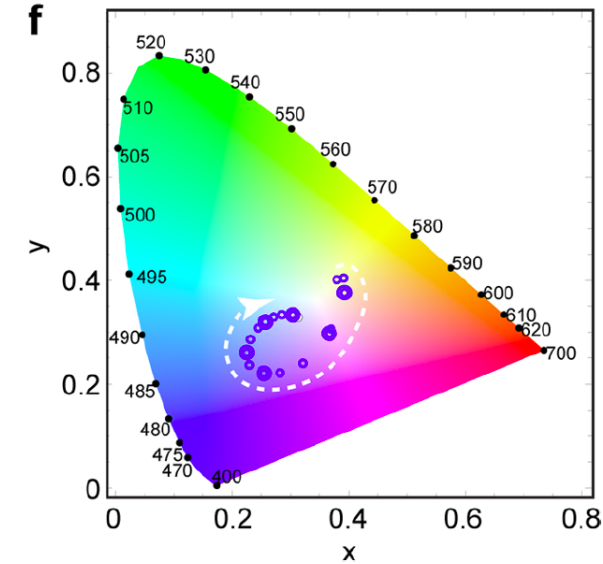
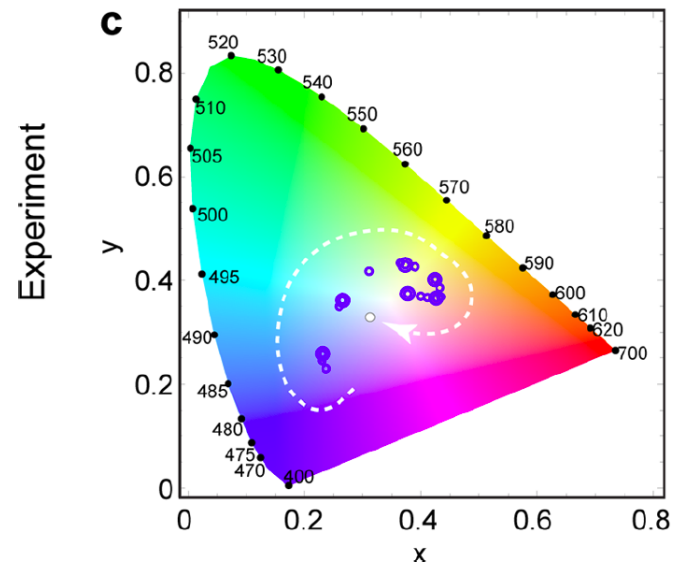
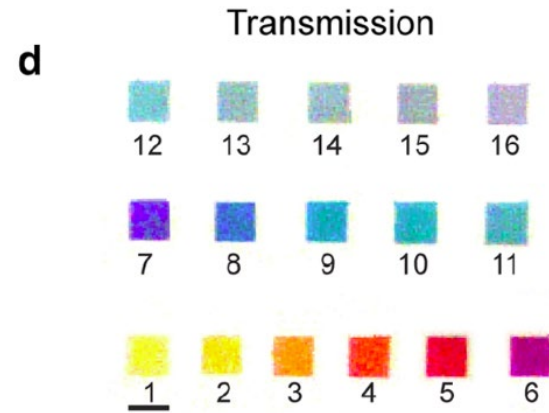
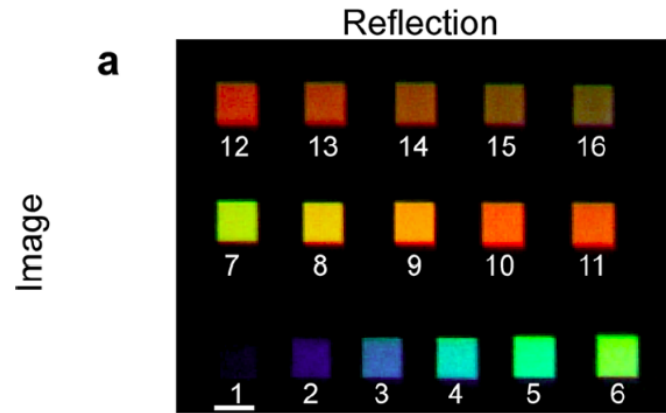
Couleurs produites par des nanostructures

- En variant la période P et le rayon R de ces structures, on peut ajuster la couleur
- On observe des couleurs complémentaires en réflexion (RGB) et en transmission (CMY)



Couleurs produites par des nanostructures

- Ces couleurs couvrent une grande partie du gamut de couleurs



augmenter
le rayon et
la période

Lien entre spectre et couleur

- Une bonne référence qui contient aussi des routines Matlab pour traduire un spectre en ses couleurs correspondantes

