Rayonnement et Spectroscopie

- Nature de la Lumière
- Spectres
- Effet Doppler
- Lumière et Températures

Nature de la lumière
Ondes électromagnétiques

$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\vec{k}\ \vec{r} - \omega\ t)$

$\omega = 2\Pi / T$: Pulsation

$\vec{k} = 2\Pi / \lambda$: Vecteur d'onde

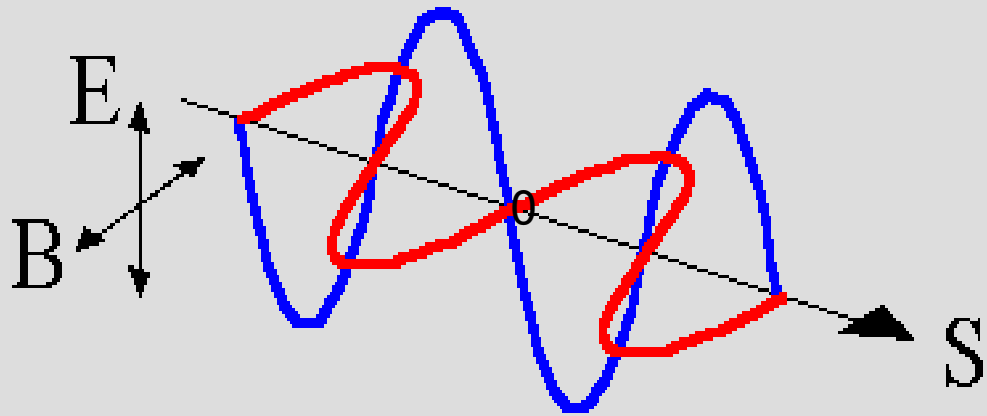
$\nu = 1 / T$: Fréquence (en Hz)

$\lambda = c / \nu$: Longueur d'onde (en m)

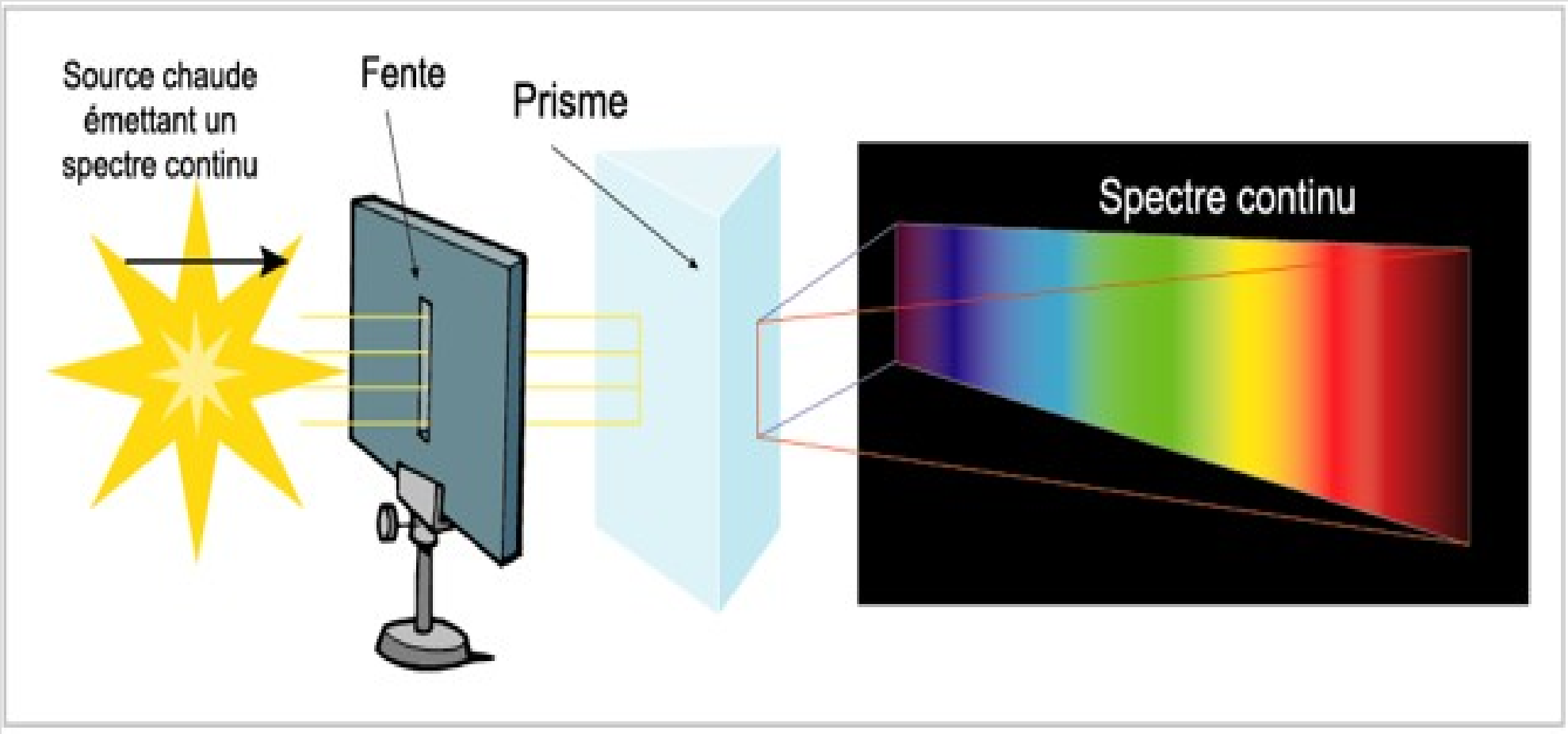
$I = ||\vec{E}_0||$: Intensité

Energie d'un photon = $h\nu$

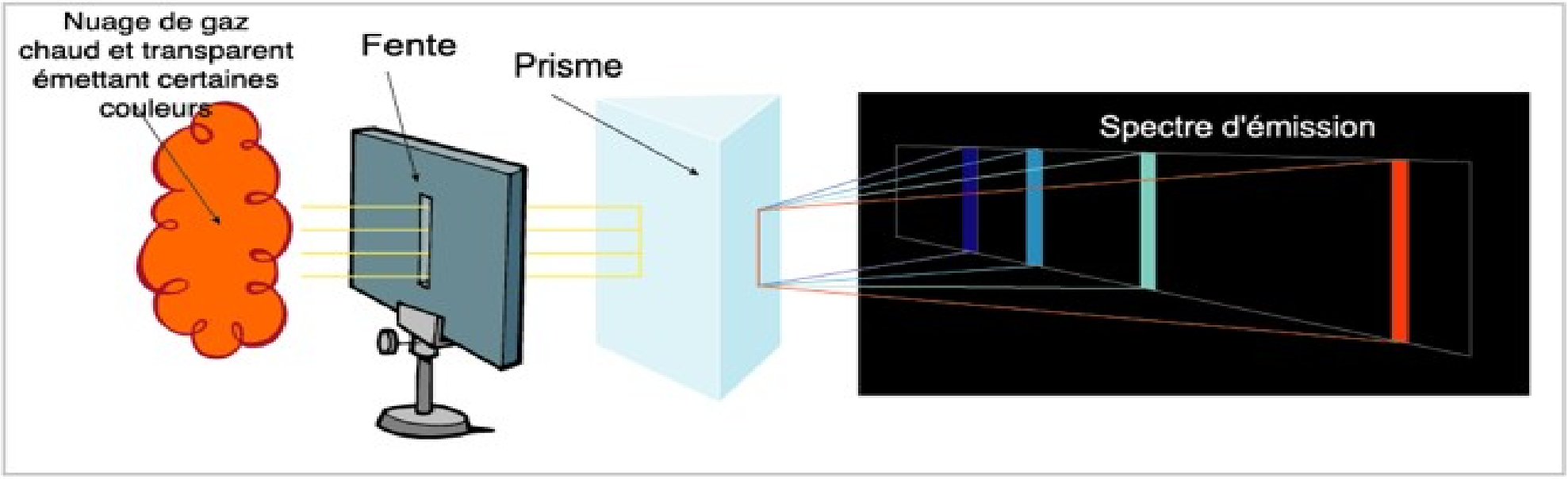
(h=constante de Planck)

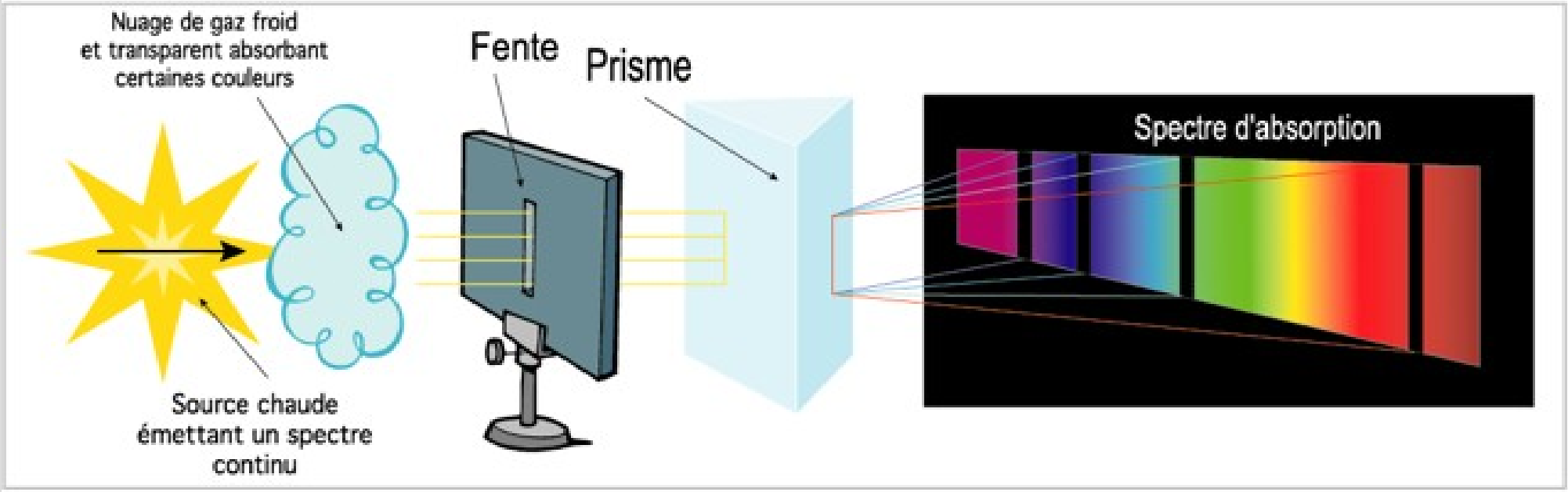


Spectroscopie

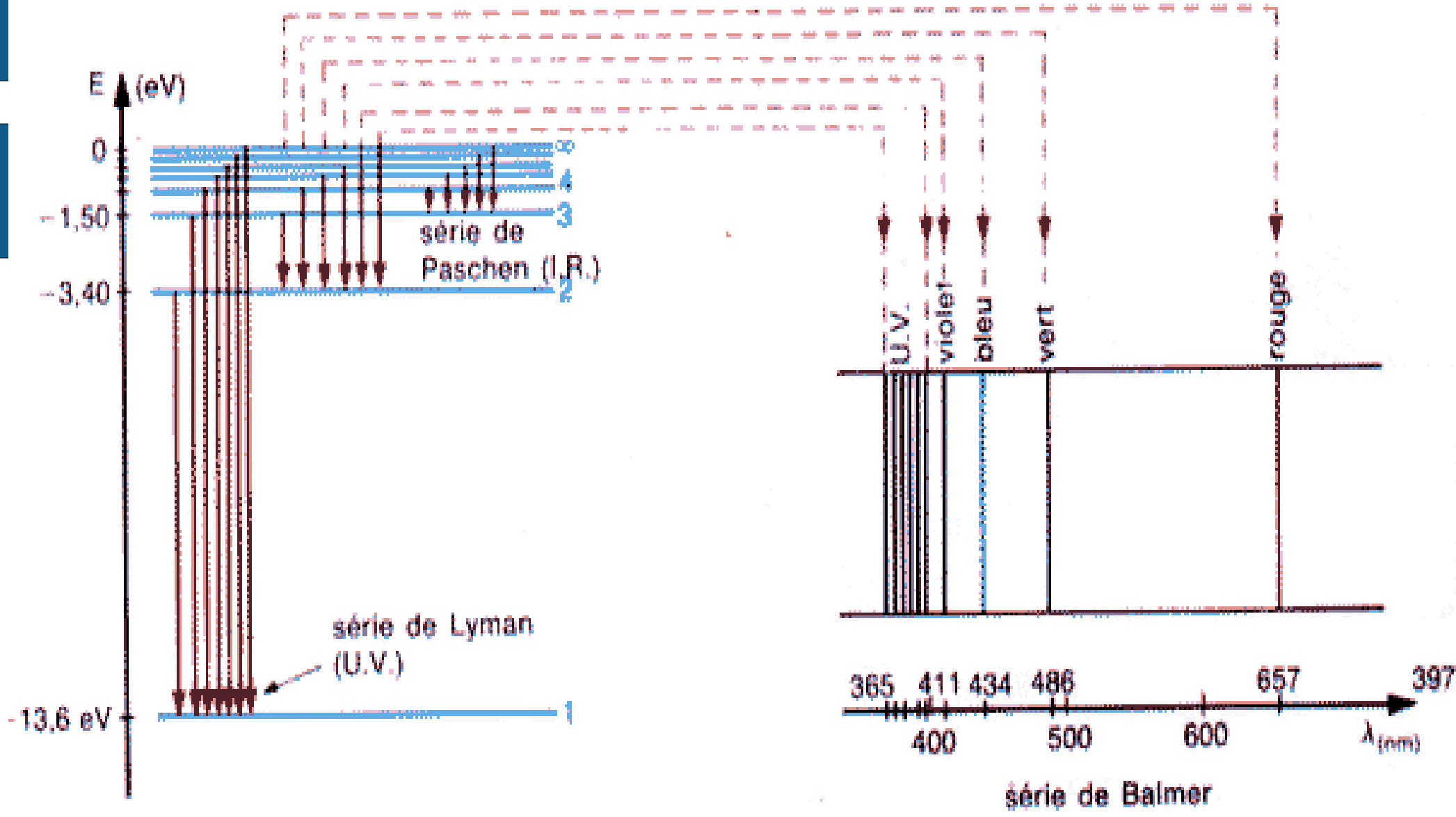


Spectroscopie





Atome d'Hydrogène



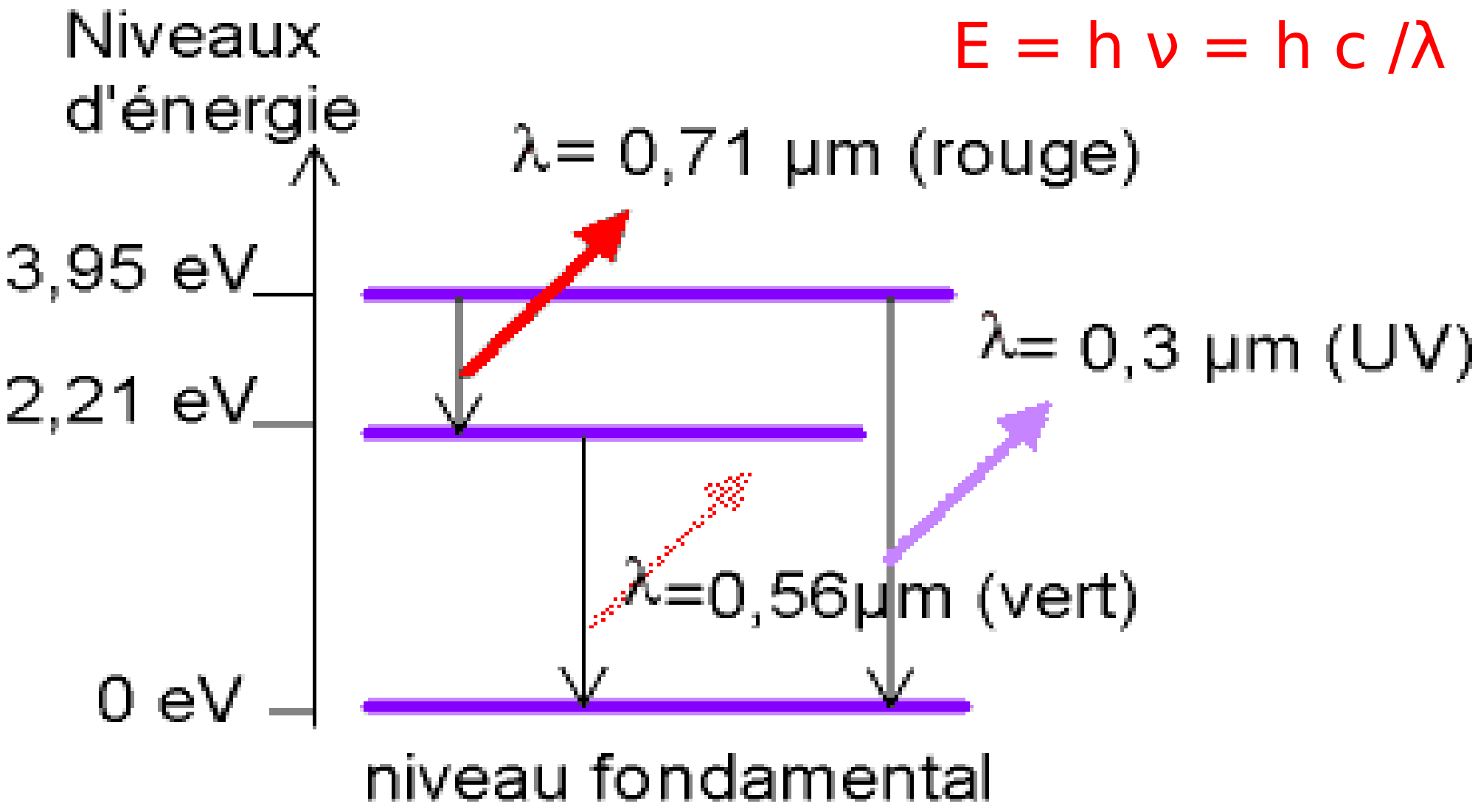
Atome d'Hydrogène de Bohr

$$h\nu = E_m - E_n = \frac{-E_0}{m^2} - \frac{-E_0}{n^2} = E_0\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

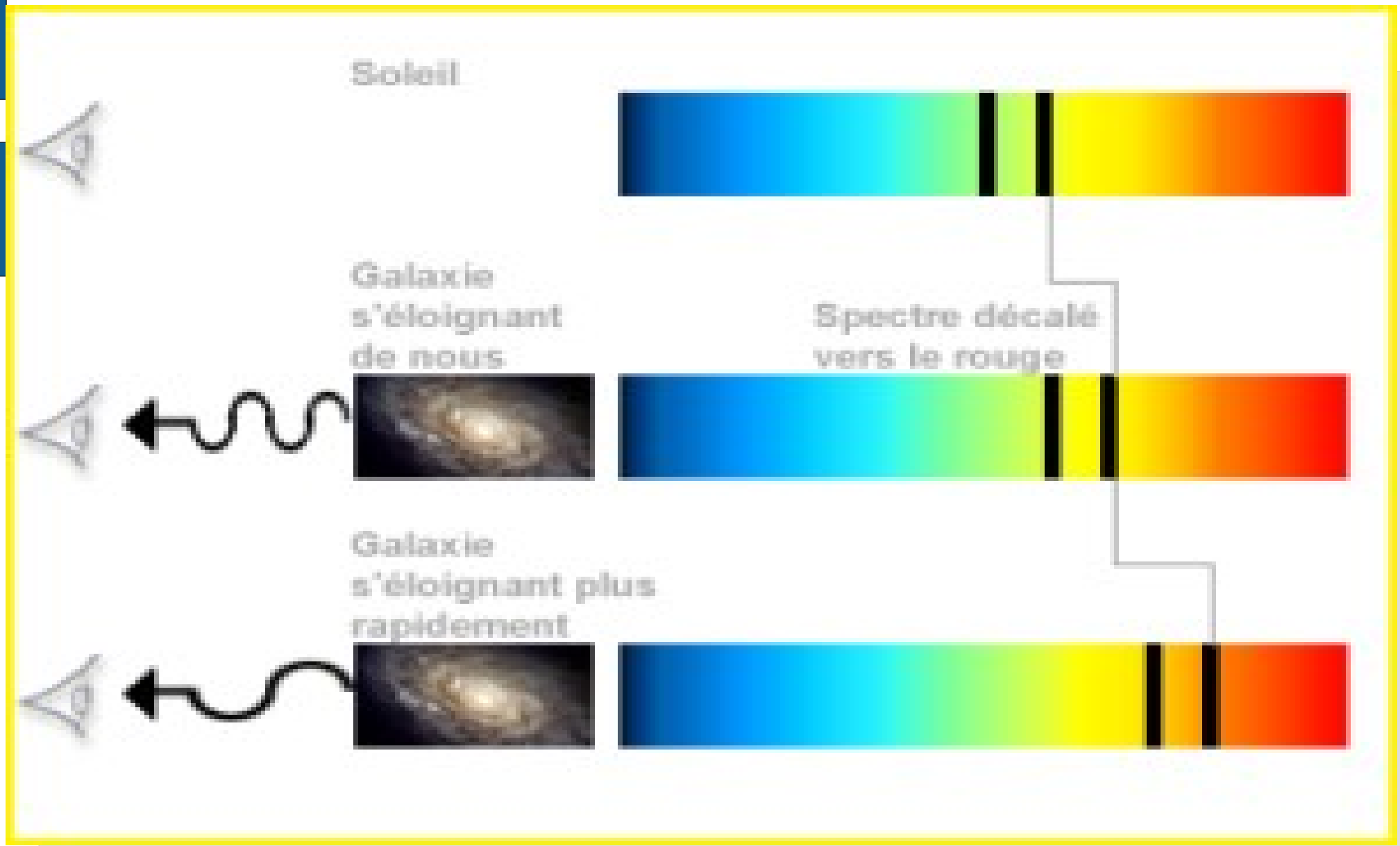
$$\lambda = \frac{c}{\nu} \qquad \nu = \frac{c}{\lambda} \qquad \text{d'où :} \quad h\frac{c}{\lambda} = E_0\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

$$\text{et} \quad \lambda = \frac{hc}{E_0} \times \frac{1}{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}}$$

Spectroscopie : raies atomiques



Effet Doppler(1842)/Fizeau

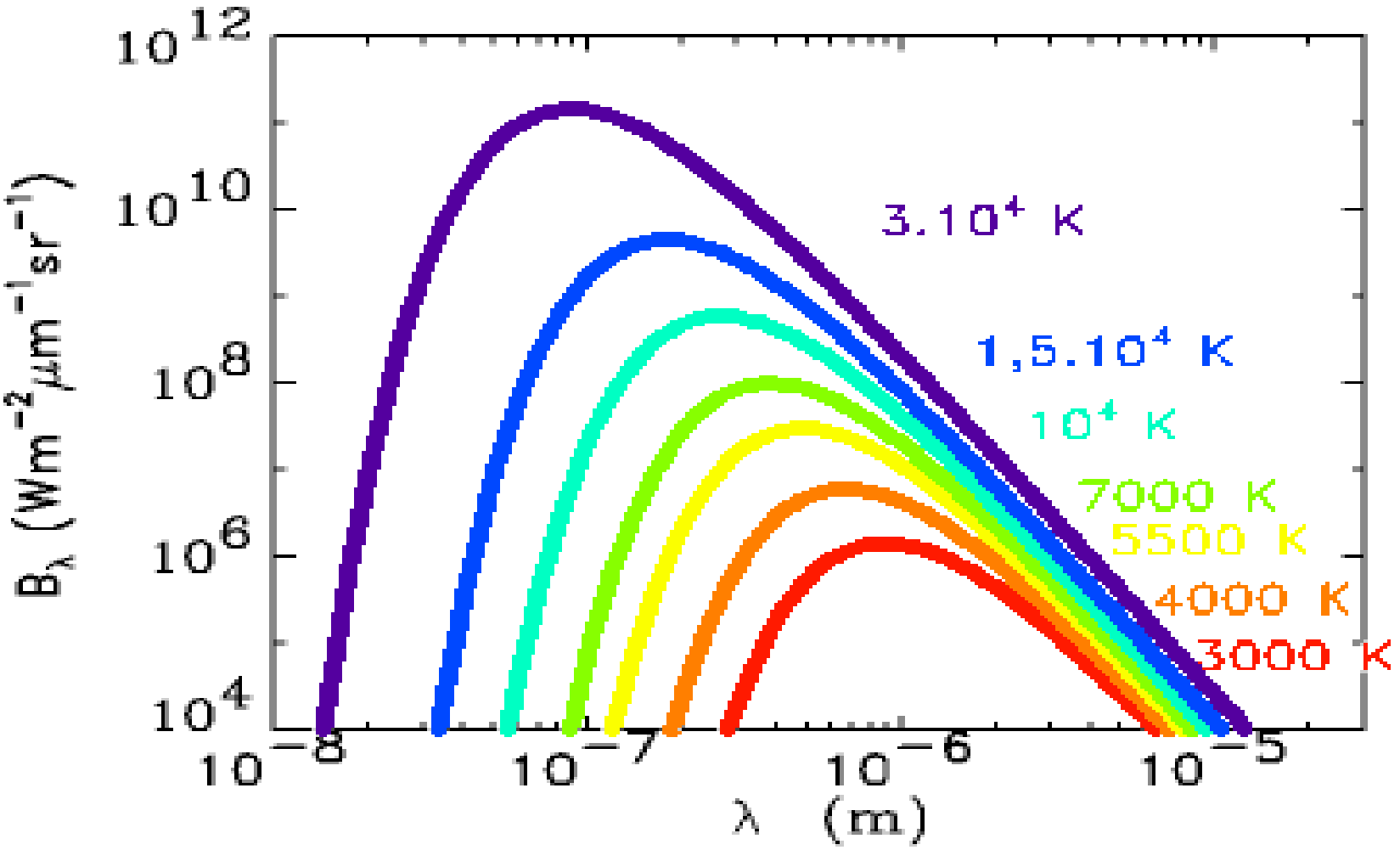


Effet Doppler/Fizeau

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \frac{v}{c}$$

- L'effet Doppler/Fizeau modifie les positions des raies spectrales (les longueurs d'onde)
- C'est un traceur de différence des vitesses entre l'émetteur et l'observateur

Rayonnement d'un corps noir



Rayonnement d'un corps noir
Loi de Planck

- Corps noir = Thermiquement isolé
- Système en équilibre thermodynamique
- Spectre d'un corps noir = rayonnement continu ne dépendant que de sa température
- Etudié par Planck (1905)
- Les échanges entre le rayonnement et la matière se font de manière quantique

Rayonnement d'un corps noir
Loi de Planck

$$B_\nu(T) = \frac{2hc^{-2}\nu^3}{\exp\frac{h\nu}{k_B T} - 1} \quad \mathrm{W\,m^{-2}Hz^{-1}sr^{-1}}$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{\exp\frac{hc}{\lambda\, k_B T} - 1} \quad \mathrm{W\,m^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}}$$

Rayonnement d'un corps noir
Loi de Planck

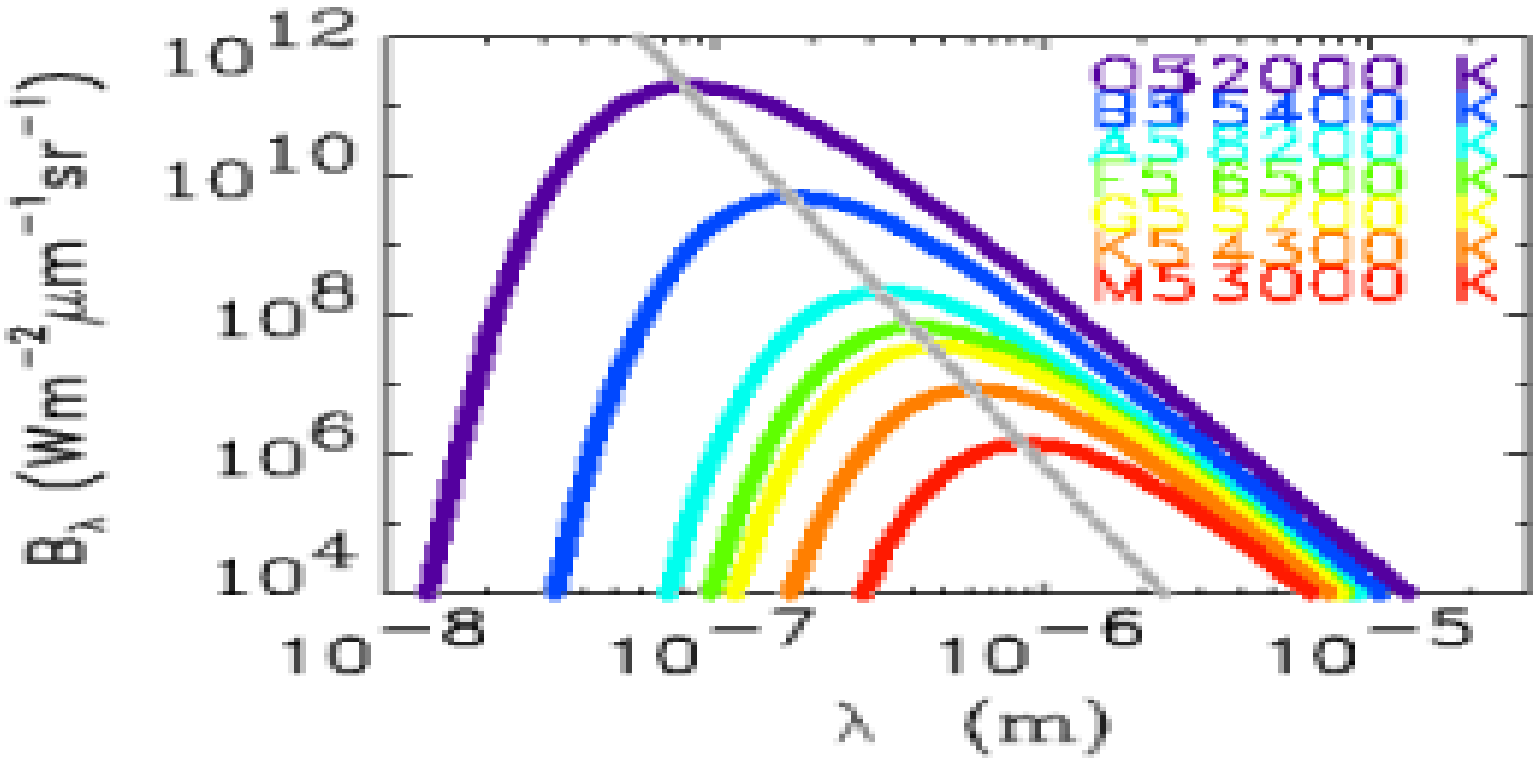
$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{\exp\frac{hc}{\lambda\, k_B T} - 1}$$

- h = 6.63 10^{-34} J.s : constante de Planck
- k = 1.38 10^{-23} J/K : constante de Boltzmann
- c = 3. 10^{8} m/s : vitesse de la lumière

- T : Température du corps noir (en Kelvin)

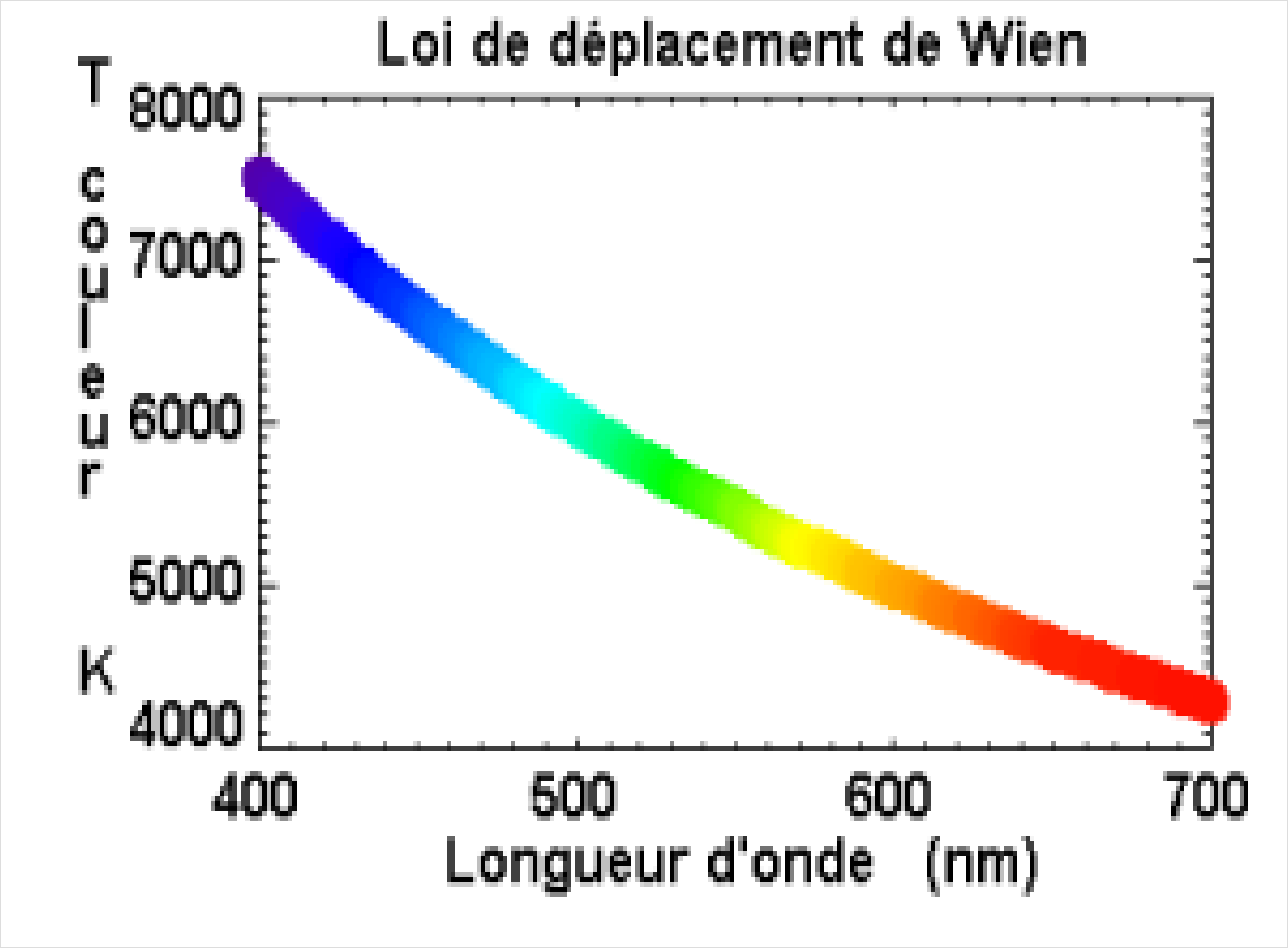
T(K) = T(Celsius) + 273.15

Rayonnement d'un corps noir
Loi de Wien (1893)



- Cette loi dite du "déplacement de Wien" découle directement de la formule de Planck.
- Notion de Température des Etoiles

Rayonnement d'un corps noir
Loi de Wien



$$\lambda_{max}\, T = 2.89\ 10^{-3}\ \mathrm{K\,m}$$

Rayonnement d'un corps noir
Loi de Stephan(1879)-Boltzman(1884)

Energie émise par seconde à toutes les fréquences

$$\mathbf{E} = \int B_\lambda(T) \, . \, d\Omega \, . \, d\lambda$$
$$= \sigma T^4$$

$\sigma = 5.67\ 10^{-8}$ $W/m^2/K^4$ Constante de Boltzman

Luminosité (en W) totale d'un corps noir :

$$L = E \, . \, S$$

Magnitudes et Classification des étoiles

- Classification suivant la brillance :

  ==> ***Magnitude***

- Autres critères de classification :
  - ***Couleur*** ==> ***Température***
  - ***Magnitude*** ==> ***Luminosité***

- Diagrammes ***Couleur - Magnitude***

  et ***Température - Luminosité***

Magnitudes : définition

- Différence de magnitudes de 2 étoiles A et B :

$$m_A - m_B = -2.5 \times \log (F_A/F_B)$$

- Plus un objet est brillant, plus sa magnitude est petite

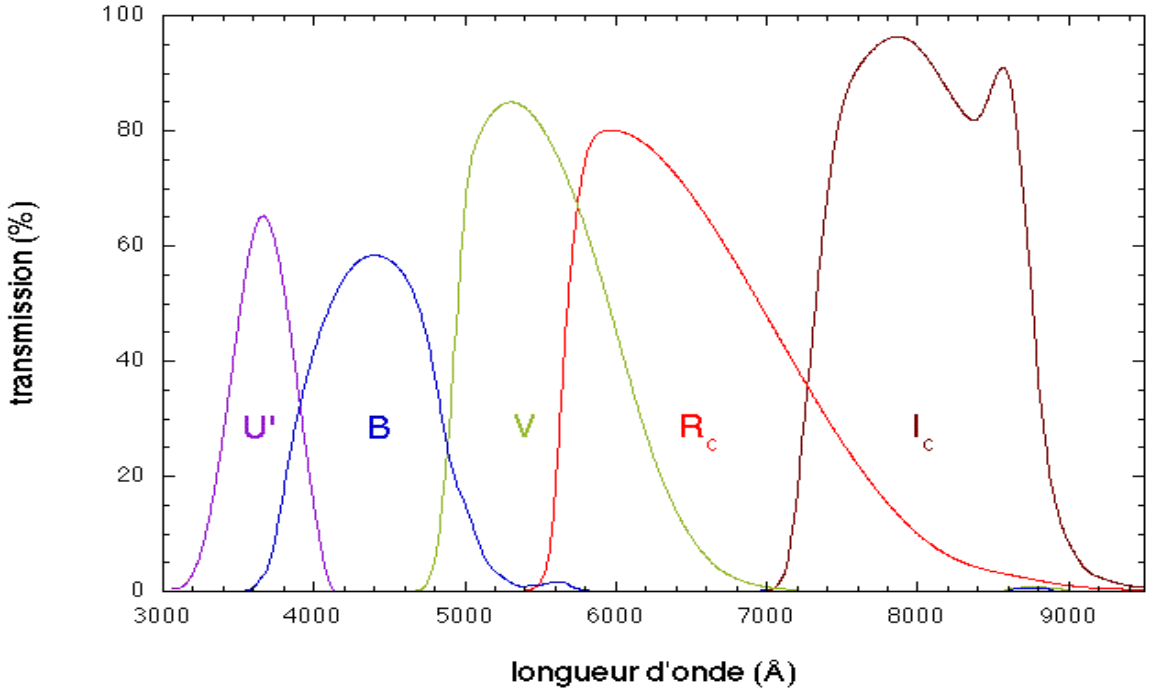
- Différence de magnitude de 2.5

<=> contraste de luminosité de 10

- Standard de référence : Véga => $m_{Véga} = 0$

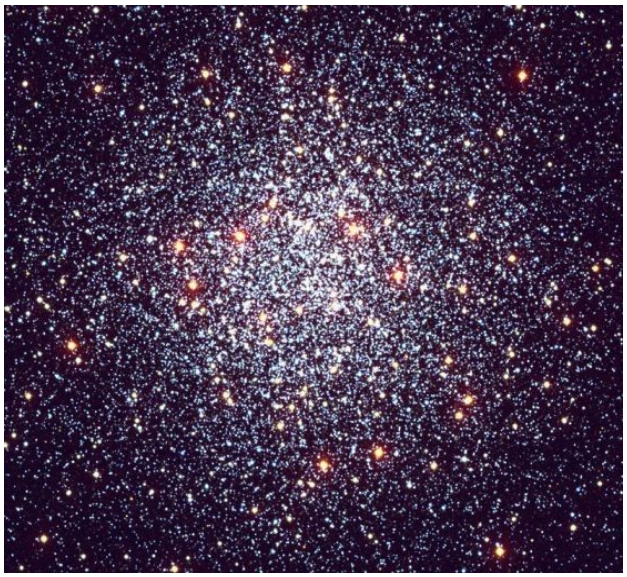
Magnitudes et Photométrie

- Brillance d'une étoile à travers un filtre particulier.
- Dans le visible : m_U, m_B, m_V, m_R, ... (ou U, B, V, R,...)



- En Infrarouge : J(1.25mic), H, K(2.2mic), L, M, N(10mic)....

Magnitudes et Indices de Couleur



- $m_U - m_B = (U-B)$, $m_V - m_K = (V-K)$, ...

- Etoiles chaudes (bleues) ont (B-V) négatif
- Etoiles froides (rouges) ont (B-V) positif

- Standard de référence : Véga

$$m_{Véga}(\lambda) = 0 = (U-B) = (B-I) = (J-K) = ...= 0$$

Magnitudes Apparente et Absolue

- La **magnitude apparente** (m) ne donne aucune indication sur la brillance intrinsèque d'un astre

- Problème du à la **distance** (*d*) qui est inconnue

- On s'affranchit de ce problème avec la **magnitude absolue** (M) : c'est la magnitude qu'aurait l'astre étudié si il se trouvait à

d =10 parsecs (1pc ~ 3.26a.l.)

Magnitude Absolue et Module de distance

- Sur Terre, nous mesurons l'éclat apparent (ou flux reçu *F*) d'une étoile dont la distance est *d*
- La luminosité (*L*) de l'étoile est sa puissance totale rayonnée

$$F = L / (4 \pi d^2)$$

- Relation entre magnitudes absolue et apparente :

$$(m\text{-}M) = -2.5 \log (L / 4 \pi d_{pc}^2) + 2.5 \log (L / 4 \pi 10_{pc}^2)$$

$$= -2.5 \log (10_{pc}/d_{pc})^2 = -5 + 5 \log (d_{pc})$$

Classification spectrale des étoiles

- Classes actuelles basées sur le système de Harvard (1901) : **O B A F G K M**
- Subdivision décimale (de 0 à 9) pour différencier les spectres d'une même famille.
- Par ex. : .. A8, A9, F0, F1, F2 ... F8, F9, G0, G1...

  avec le type spectral F9 présentant des caractères plus proches de ceux du type G0 que de ceux du type F0.

Classification spectrale des étoiles

• **Caractéristiques du spectre stellaire utilisées :** présence ou absence de raies de certains éléments (non due à des différences de composition chimique mais à des différences de T_{eff})

• **Les raies de l'hydrogène :** abondance à peu près la même dans toutes étoiles et nombreuses raies pour T_{eff} ~ 10 000 K

• **Etoiles chaudes :**

- O = raies d'hélium ionisé mais pas de raies de H
- B0 à A0 : intensité des raies de He décroit et celle des raies de H augmente progressivement pour atteindre un maximum vers le type A0.
- Au-delà de A0 : Intensité des raies de l'H décroit alors que celle des raies dues aux métaux augmente

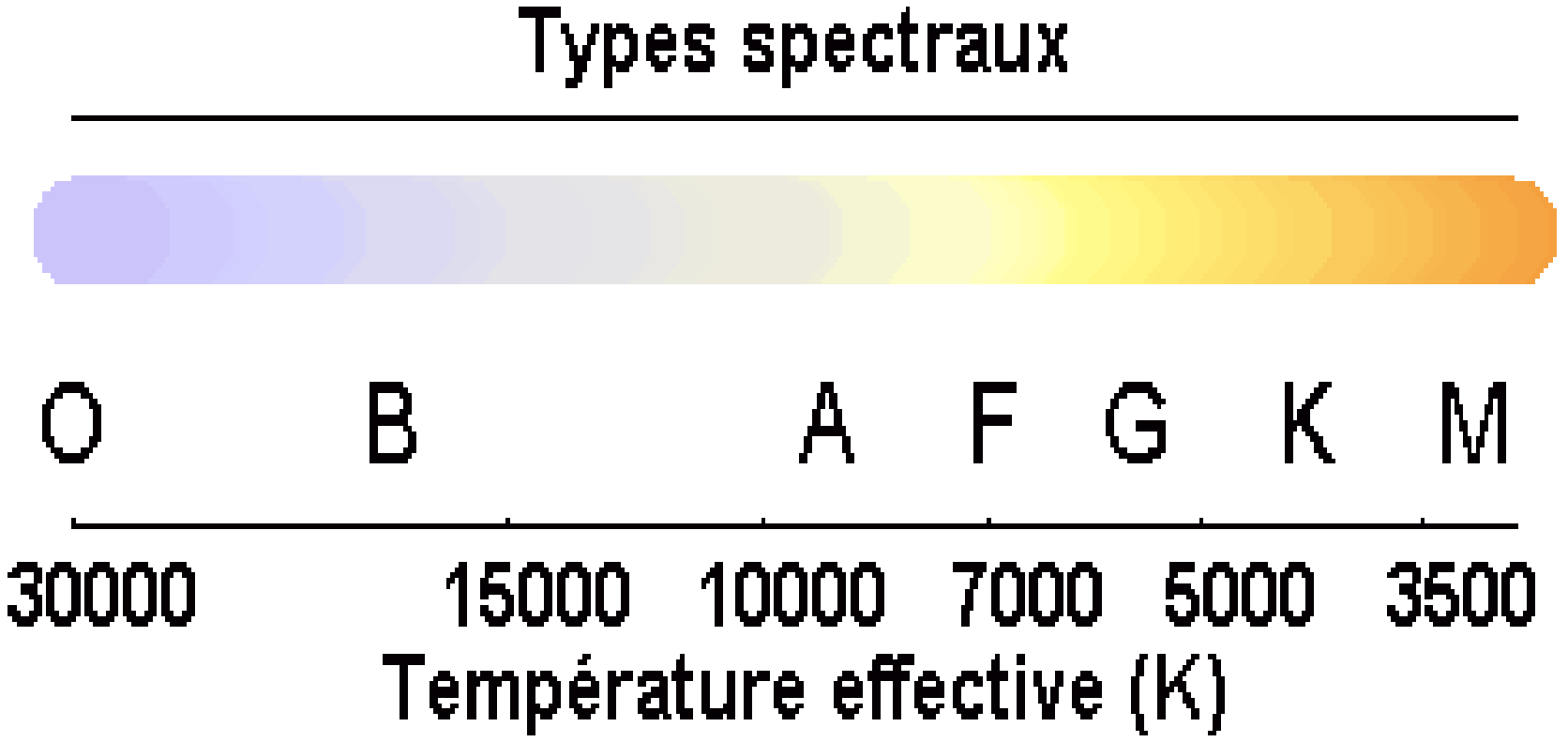
Classification spectrale des étoiles

- **Etoiles froides :**
  - H est neutre et dans le niveau fondamental => raies très faibles.
  - Raies des métaux neutres deviennent de plus en plus intenses alors que les bandes caractéristiques des molécules apparaissent.
  - En 2000, deux nouvelles classes spectrales : **L** et **T**

    Décrivent les spectres des étoiles les plus froides (T_{eff} entre 1000 et 2000 K) ne comportant quasiment que des raies moléculaires

Classification spectrale et Température Effective

- La classification de Harvard (OBAFGKM) correspond à un séquence de T_{eff} décroissante



Classes de Luminosité des étoiles

- Luminosité totale d'une étoile de rayon R :

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{E} \,.\, \boldsymbol{S}$$

$$= \sigma \, \mathbf{T_{eff}}^4 \times 4 \pi \boldsymbol{R}^2$$

- Si 2 étoiles ont la même Teff et $\boldsymbol{L_1} > \boldsymbol{L_2}$, alors $\boldsymbol{R_1} > \boldsymbol{R_2}$

Classes de Luminosité des étoiles

- **Ia** et **Ib** : étoiles supergéantes (raies les + fines)
- **II** : étoiles géantes brillantes
- **III** : étoiles géantes
- **IV** : étoiles sous-géantes
- **V** : étoiles naines (raies les + larges)

- Le Soleil est une étoile de type spectral **G2V**

Classification des étoiles

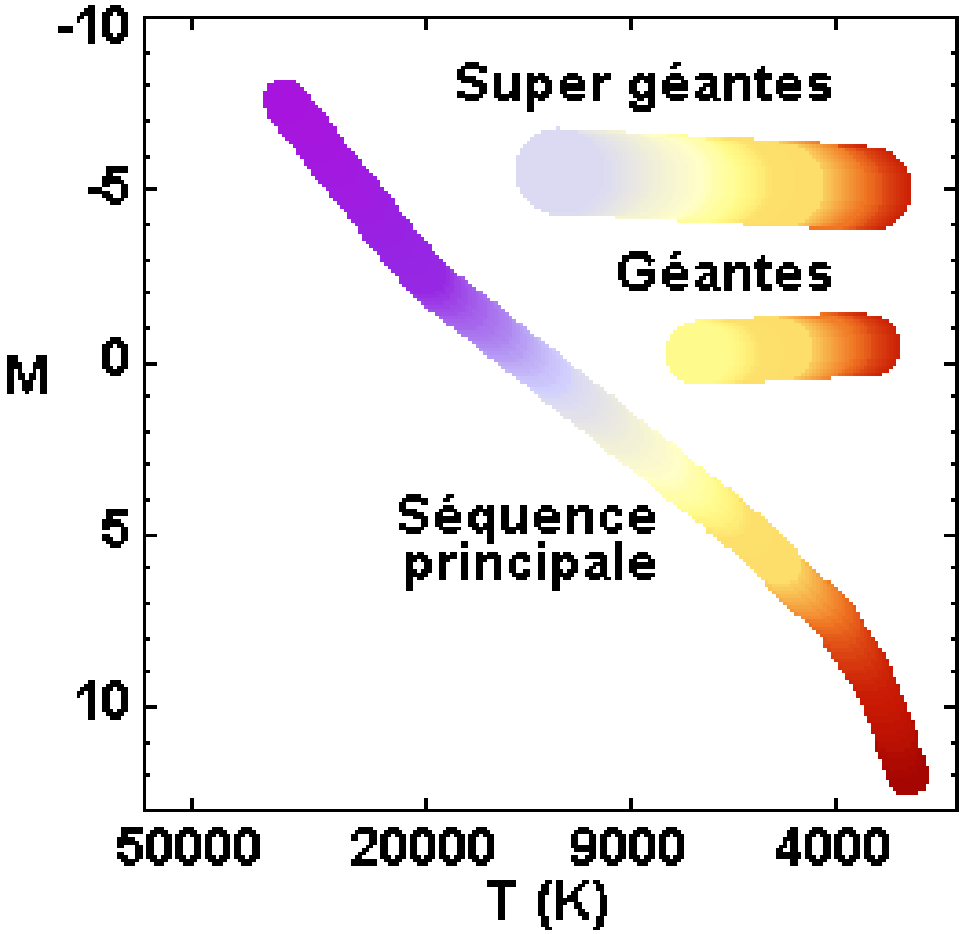
- On peut donc classer les etoiles à partir de différents critères.

- Critères directement observables :
  - **magnitude** (attention à la distance) et **couleur**

- Critères déduits :
  - **luminosité** (magnitude absolue) et $\mathbf{T_{eff}}$ (type spectral)

Classification des étoiles : Diagramme HR

- Mise en évidence d'une relation entre la luminosité intrinsèque et la T_{eff} des étoiles.
- Le diagramme de Hertzsprung-Russell (HR) est fondamental pour l'étude de l'évolution et de la physique stellaire.



Classification des étoiles : Diagramme HR

- Les classes de luminosité dans le diagramme HR.

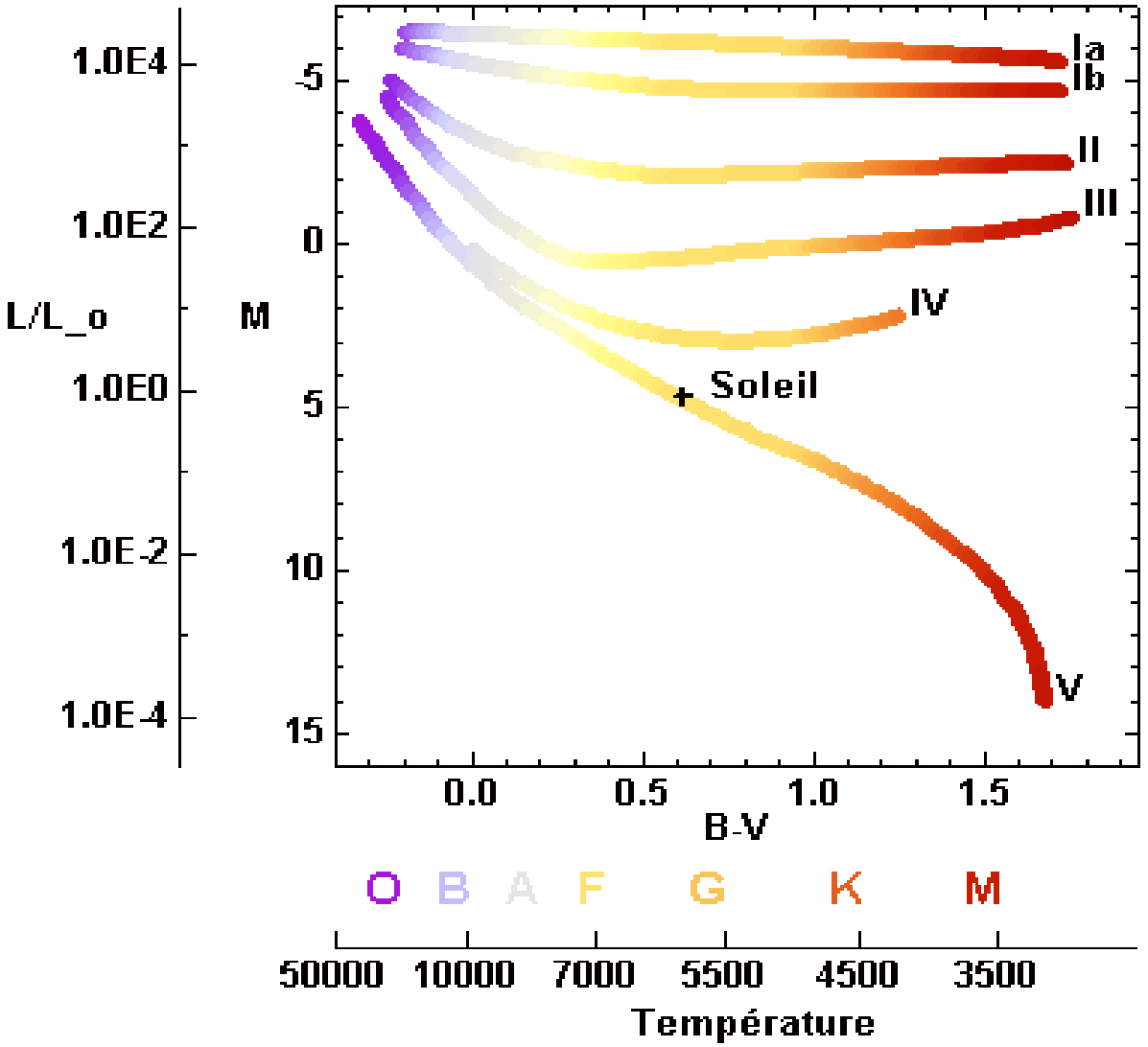
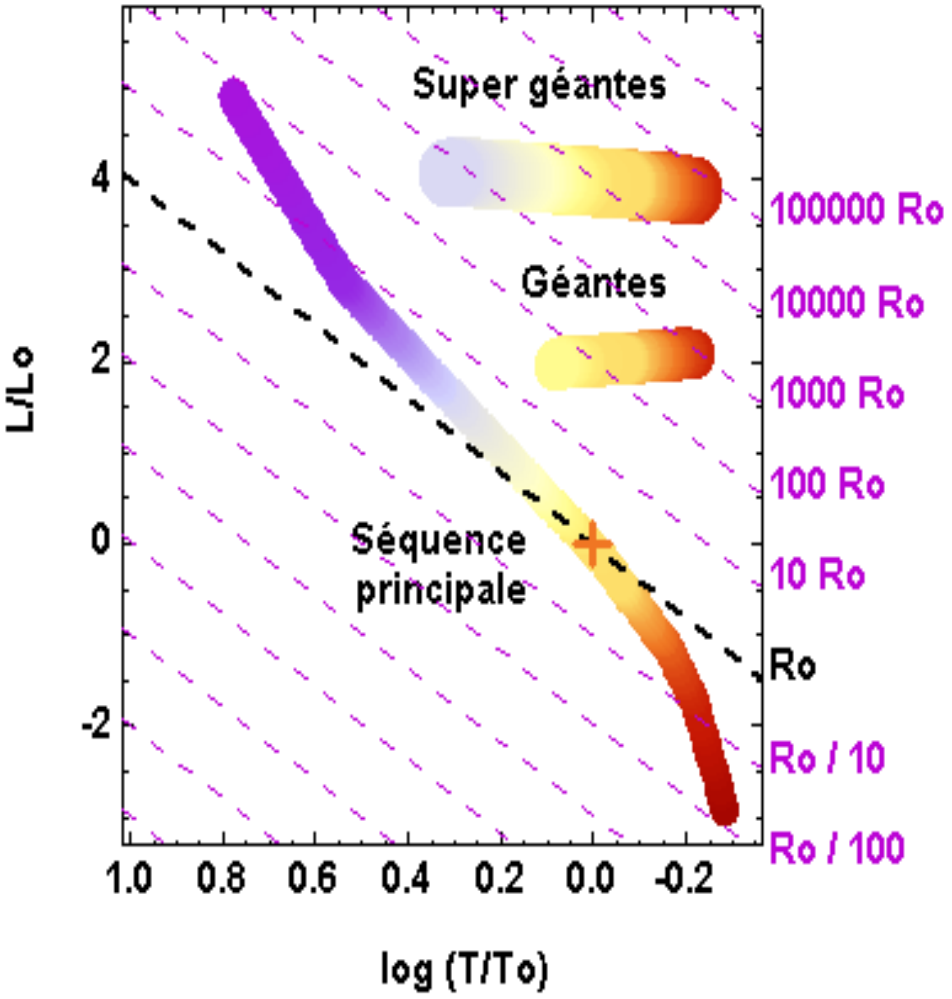


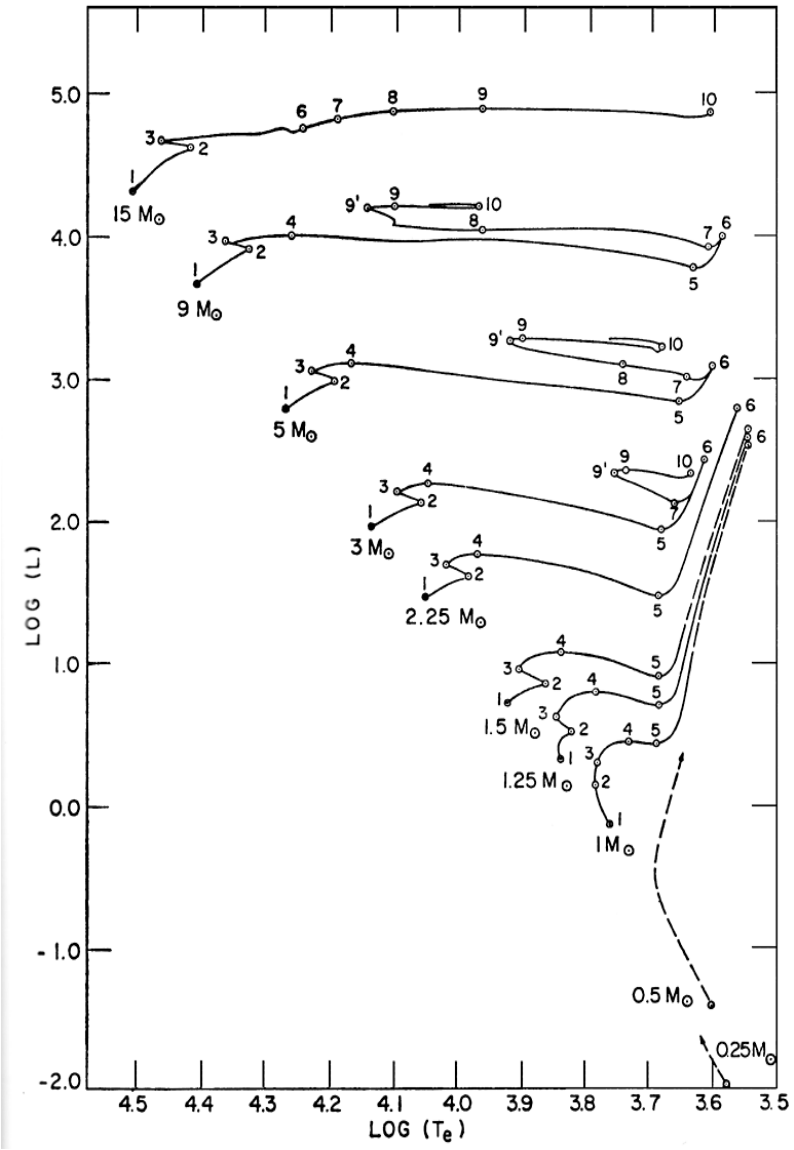
Diagramme HR et Rayon des étoiles



- $L \sim T_{eff}^{4} R^{2}$
- $\log L = 2\log R + 4\log T_{eff}$
- Pour R fixé (courbes d'iso-rayons) :

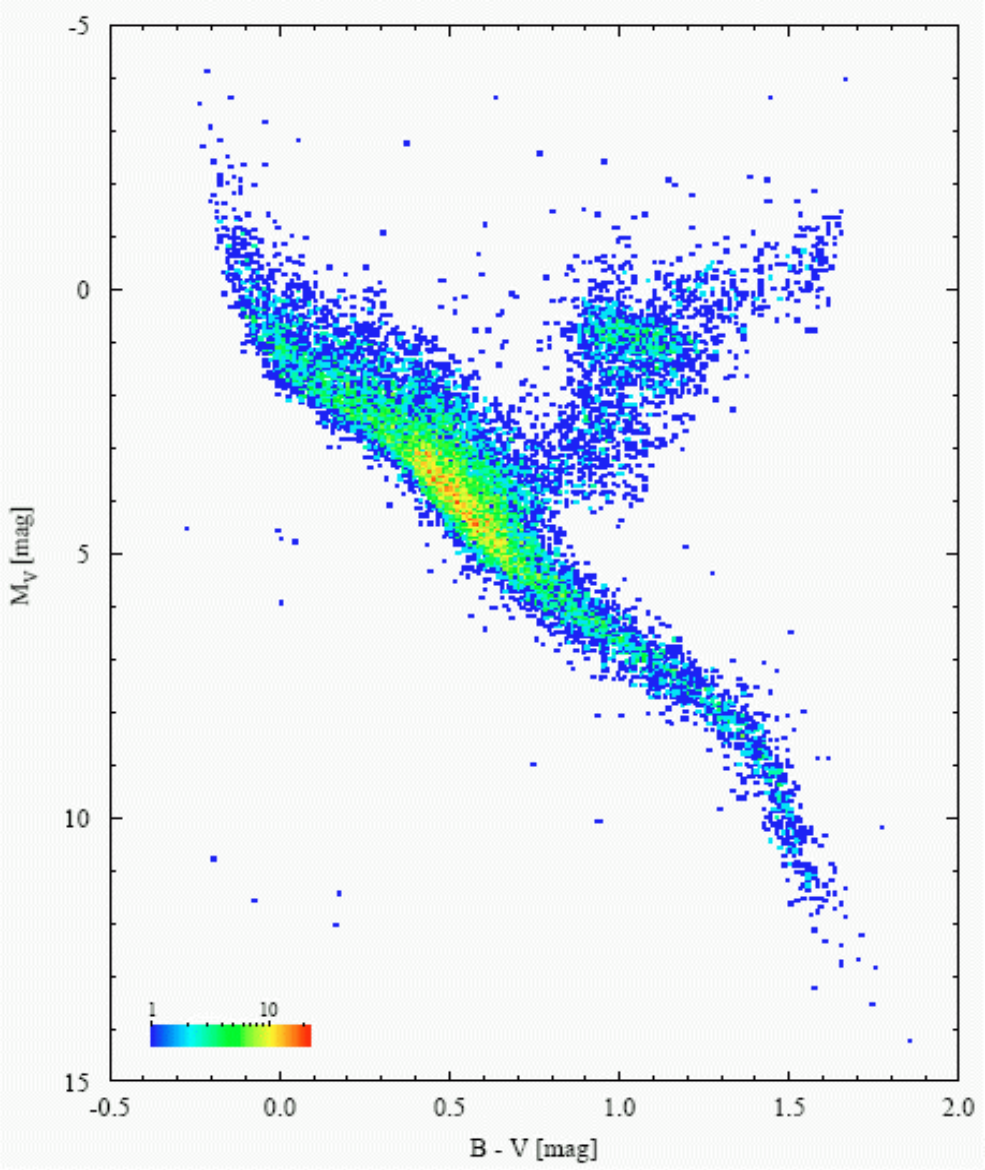
$$Y = 4X + Cte$$

Diagramme HR et Age des étoiles



- L'évolution d'une étoile dépend essentiellement de sa masse et de sa composition chimique initiale.
- 1 M_0 : 10 milliards d'années sur la séquence principale
- 0.1 M_0 : 20 à 30 milliards d'années
- 50 M_0 : quelques millions d'années

Classification des étoiles : Diagramme HR



- Diagramme HR des étoiles les plus proches du Soleil (d < 1kpc)
- Distance connue par parallaxe (Hipparcos)
- **Séquence principale** : étoiles de classe V

  Dans le cœur : H -> He

  Les étoiles justes formées sont situées sur l'extrémité inférieure de la séquence.

Classification des étoiles : Diagramme HR et âge des amas

- Amas d'étoiles : toutes se trouvent à la même distance

  => Diagramme couleur-magnitude apparente

- Toutes les étoiles ont le même âge
- Les étoiles les plus massives (chaudes) ont déjà quitté la séquence principale

  => possibilité de dater un amas d'étoiles

Classification des étoiles : Diagramme HR et âge des amas

