

SPECTROSCOPIE DES NÉBULEUSES À ÉMISSION ET DES ÉTOILES

1 Physique des rayonnements :

1.1 La loi de Plank et ses petites sœurs :

Ces relations permettent de décrire le flux lumineux à partir de la longueur d'onde du rayonnement et de la température de la source lumineuse.

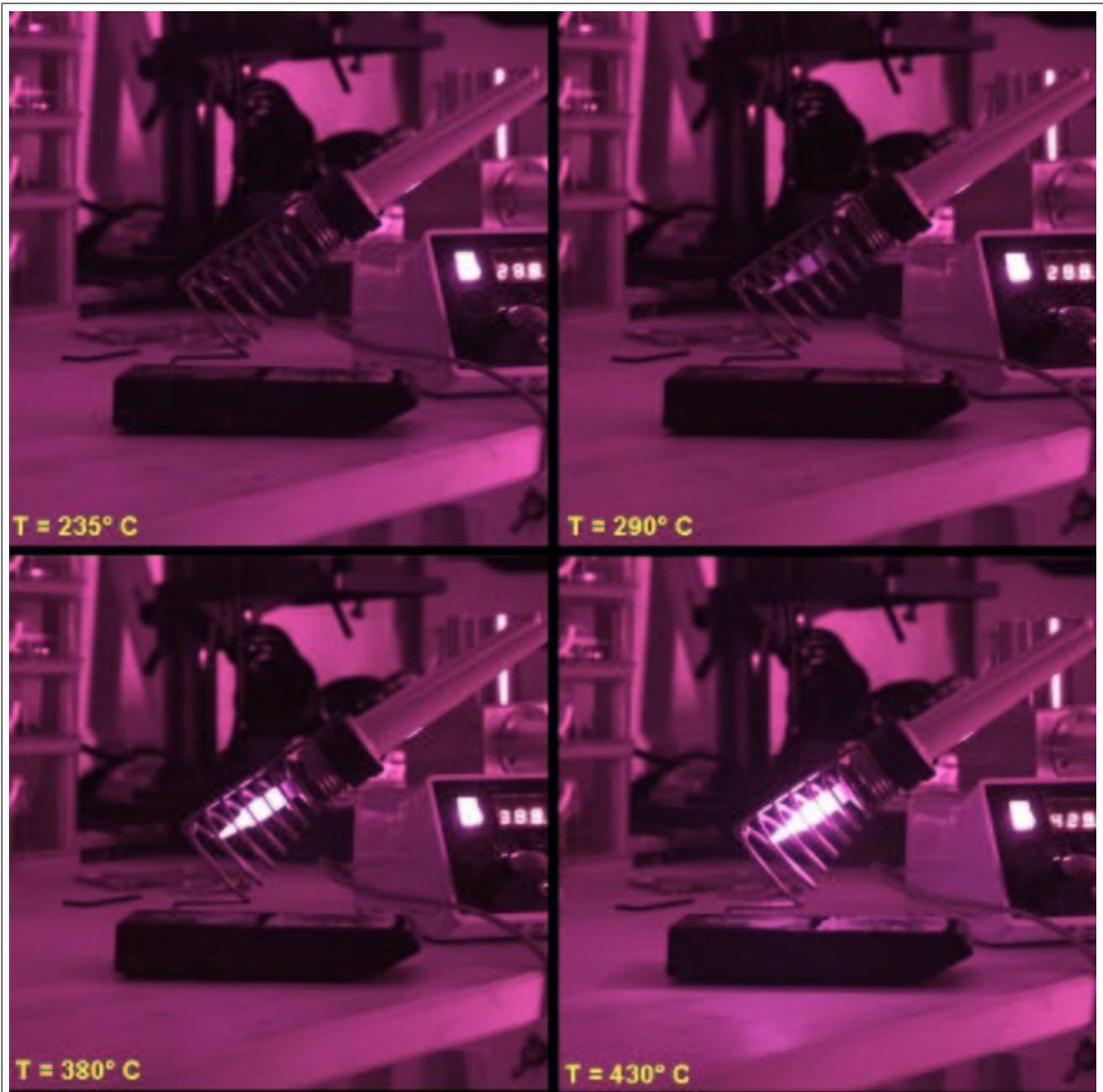


FIG. 1: .

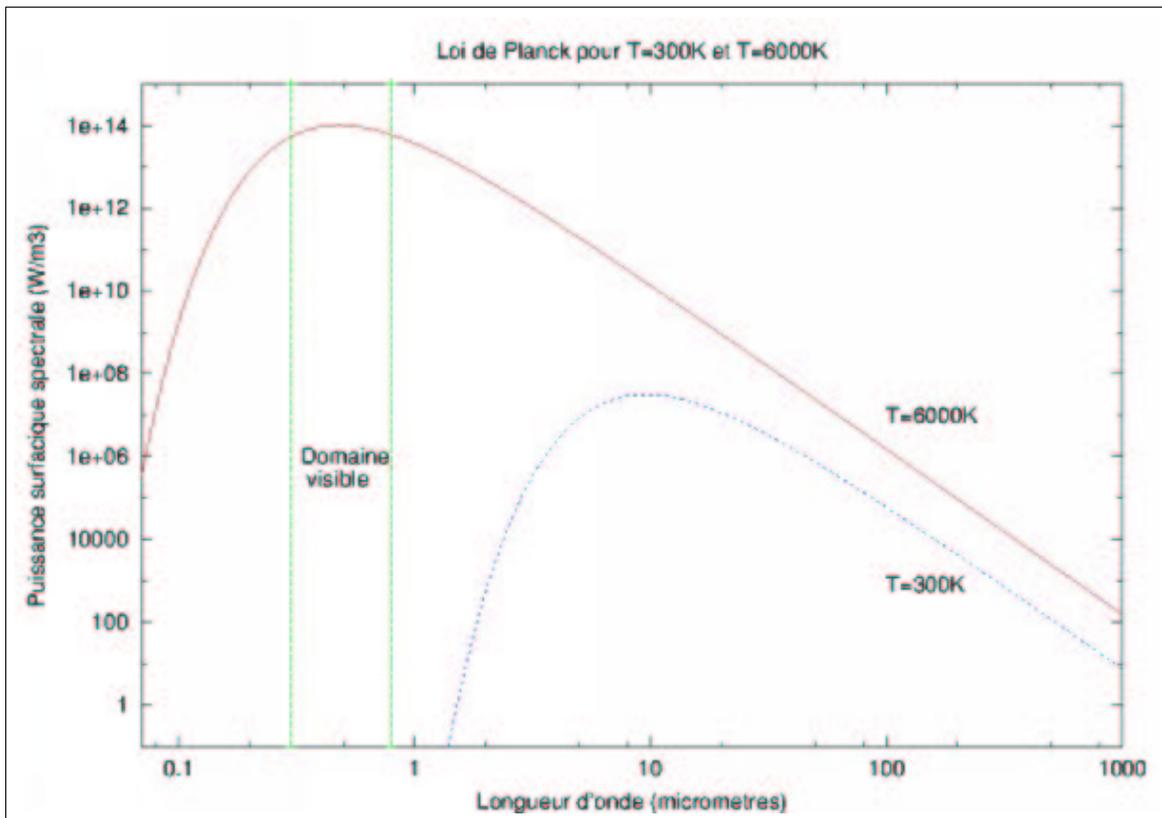


FIG. 2: Courbes de la puissance lumineuse en fonction de la longueur d'onde pour les températures $T_1 = 6000\text{ K}$ et $T_2 = 300\text{ K}$.

– La loi de PLANK :

$$dF_{\text{corps noir}} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{k_B \lambda T}} - 1} \cdot d\lambda$$

• Applications :

Quelle est la température du Soleil? (*Les courbes $I_{T(K)} = f(\lambda)$ sont donnée.*)

→ La courbe dont le maximum correspond au jaune est celle qui correspond à une température de 5 500 K.

– Loi de WIEN :

$$T \text{ (K)} = \frac{2,898 \times 10^6}{\lambda_{\text{max}} \text{ (nm)}}$$

• Cette loi dite du "déplacement de Wien" découle directement de la formule de Planck.

Pour une température donnée, elle donne la valeur de la longueur d'onde λ_m où le flux est maximal.

• Applications :

1. Dans quel domaine de longueur d'onde le corps humain ($T = 37^\circ\text{C} = 310\text{ K}$) rayonne-t-il?

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2,898 \times 10^6}{310} \simeq 1\,000\text{ nm} = 1\ \mu\text{m} : \text{situé dans l'infra-rouge.}$$

2. Même question pour le Soleil connaissant sa température ($\simeq 6000\text{ K}$).

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2,898 \times 10^6}{6000} = 483\text{ nm} : \text{c'est le milieu du spectre visible.}$$

– Loi de STÉFAN :

$$\mathbf{F_{corps\ noir} = \sigma T^4}$$

$$\text{où } \sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$$

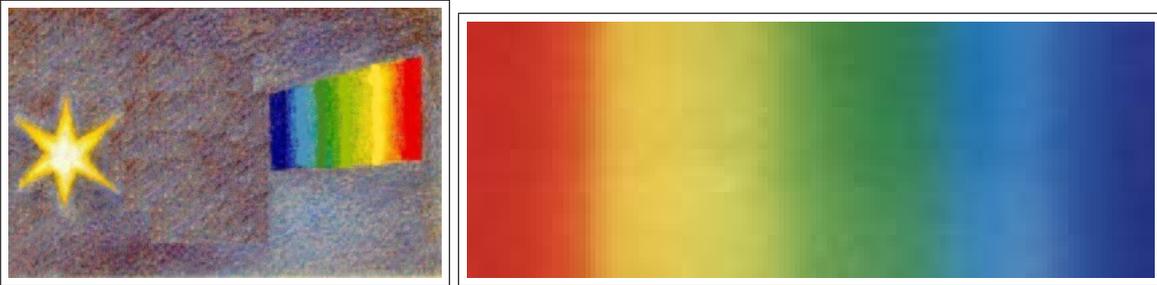
- La loi de STÉFAN est la simple intégration de la loi de Planck sur l'ensemble des longueurs d'onde.
- Applications :
 1. Pour $T=6\ 000\ \text{K}$, on a $F_{émis} = F_{recu} = 73\ 000\ 000\ \text{W.m}^{-2}$.
 2. Pour $T=300\ \text{K}$, on a $F_{émis} = F_{recu} = 459\ \text{W.m}^{-2}$.
- Remarques :
 - ★ La formule de STÉFAN est d'une importance capitale et rappelle que les flux incidents et partants ne sont fonction que de la température.
 - ★ Alors que la température du Soleil n'est que 20 fois plus élevée que celle de la Terre, son flux partant est 160 000 fois plus élevé !

1.2 Les lois de Kirchhoff :

Ces lois empiriques décrivent les conditions physiques conduisant aux 3 types de spectres rencontrés en astronomie.

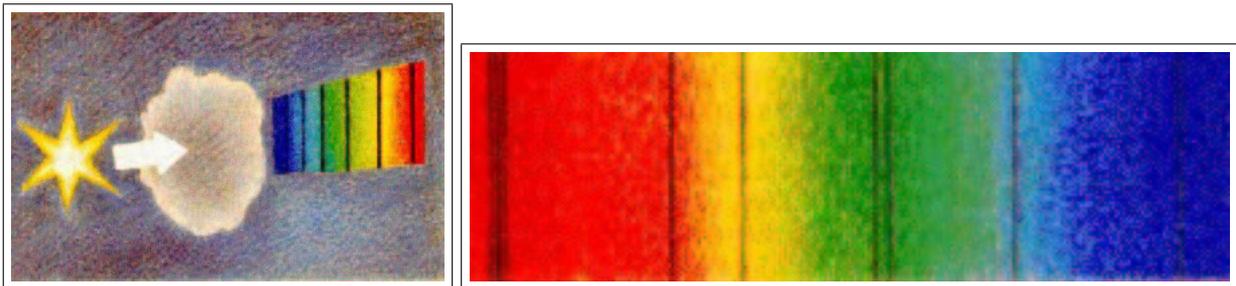
– Énoncé des 3 lois de KIRCHHOFF :

1. Les spectres continus d'émission :



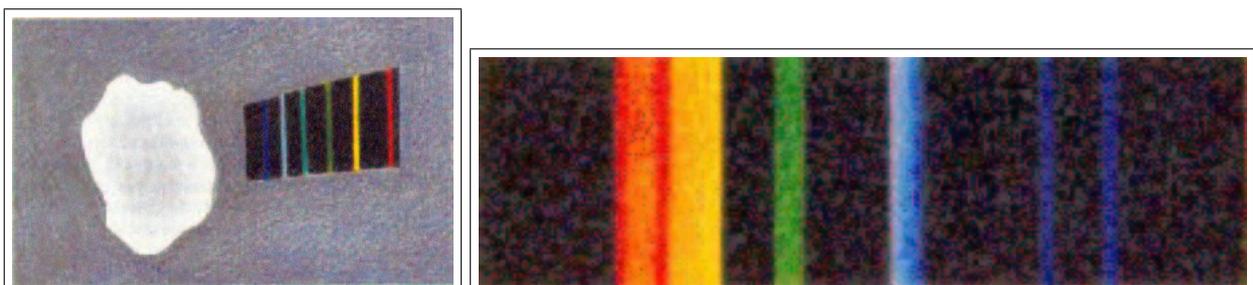
- Une source chaude lumineuse émet un continuum de rayonnement.
- Exemple : le spectre de la lumière émise par une lampe à incandescence est constituée de toutes couleurs (radiations).

2. Les spectres de raies et de bandes d'absorption :



- Quand la lumière d'une source lumineuse traverse un gaz peu dense (composé de molécules et/ou atomes), un plasma (composé d'ions) ou un liquide, certaines longueurs d'onde discrètes sont enlevées du continuum provoquant les raies d'absorption foncées.
- Exemple :
La lumière d'une étoile passant par les couches externes de l'atmosphère de l'étoile provoquent cet effet.

3. Les spectres de raies d'émission :



- **Quand des ions et/ou des molécules d'un gaz peu dense est excité d'une façon quelconque (collisionnelle, électriquement, chaleur ou par la lumière elle-même), le gaz émet certaines longueurs d'onde discrètes. Certain nebuleuses gazeuses ou les nebuleuses planétaires sont de bons exemples de ceci.**
- Exemple :
Les régions HII, les nébuleuses planétaires, les lampes à sodium des parkings.
- Remarque :
Comme la température du gaz est bien inférieure à celle de la source S, il émet bien moins qu'il n'absorbe et ses raies paraissent obscures, par contraste.

– Récapitulation :

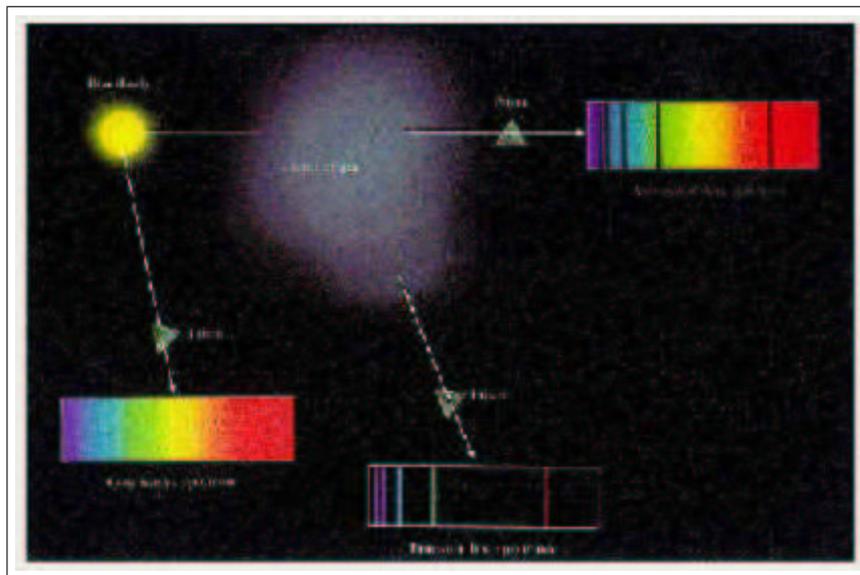


FIG. 3: .

- Mécanisme quantique des rayonnements :
→ Exemple : les raies de Balmer de l'hydrogène.

1.3 Les autres mécanismes de rayonnement :

–

2 Caractéristiques des raies spectrales :

3 Quelques grandeurs physiques accessibles dans les spectres stellaires :

4 Quelques grandeurs physiques accessibles dans les nébuleuses en émission :

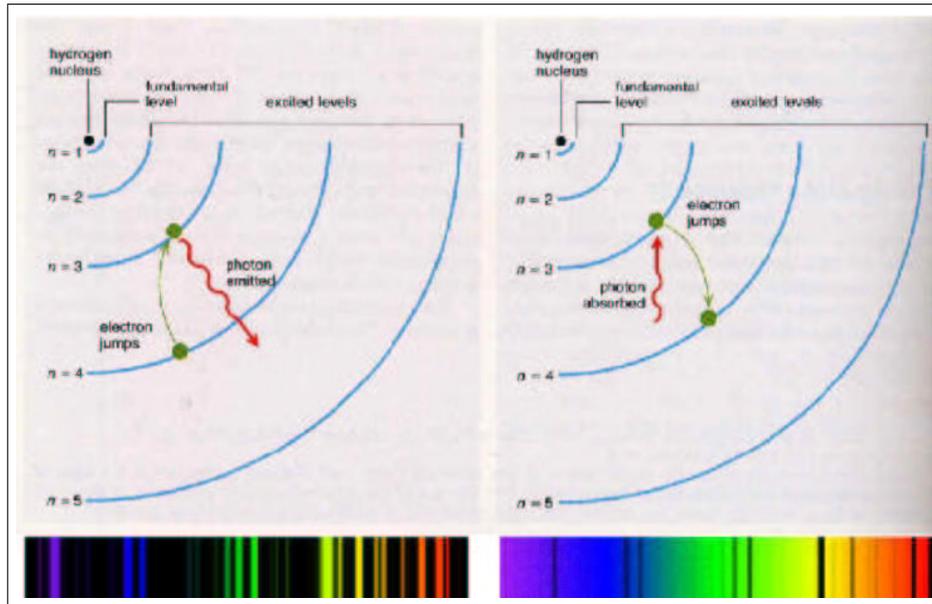


FIG. 4: .

Loi de WIEN :

$$T (K) = \frac{2,898 \times 10^6}{\lambda_{max} (nm)}$$

La température électronique du gaz d'une atmosphère stellaire :

$$T_e = M_A \left(\frac{FWHM(A)}{7,16 \times 10^{-6} \times \lambda_A} \right)^2$$

La température Teet la densité électronique Ned'une nébuleuse (réf. Astrophysique of Gazous nebulae, Osterbrock, p.98). Il faut résoudre le système à 2 équations et 2 inconnues :

Raies de [OIII] :

$$\frac{I_{\lambda_{4959}} + I_{\lambda_{5007}}}{I_{\lambda_{4363}}} = \frac{8,32 \cdot \exp\left(\frac{3,29 \cdot 10^4}{T}\right)}{1 + 4,5 \cdot 10^{-4} \frac{Ne}{\sqrt{T}}}$$

Raies de [NII] :

$$\frac{I_{\lambda_{6548}} + I_{\lambda_{6583}}}{I_{\lambda_{5755}}} = \frac{7,53 \cdot \exp\left(\frac{2,50 \cdot 10^4}{T}\right)}{1 + 2,7 \cdot 10^{-3} \frac{Ne}{\sqrt{T}}}$$

L'effet Doppler :

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot c$$

Raies de [OIII] :

$$\frac{I_{\lambda_{4959}} + I_{\lambda_{5007}}}{I_{\lambda_{4363}}} = \frac{1 + (4,0 \cdot 10^{-4}) \cdot X}{1 + (4,4 \cdot 10^{-2}) \cdot X} \cdot 7,7 \cdot 10^{\left(\frac{1,432 \cdot 10^4}{T}\right)}$$

Raies de [NII] :

$$\frac{I_{\lambda_{6548}} + I_{\lambda_{6584}}}{I_{\lambda_{5755}}} = \frac{1 + (5,3 \cdot 10^{-4}) \cdot X}{1 + (0,26) \cdot X} \cdot 5,2 \cdot 10^{\left(\frac{1,086 \cdot 10^4}{T}\right)}$$

Raies de [NeIII] :

$$\frac{I_{\lambda_{3969}} + I_{\lambda_{3869}}}{I_{\lambda_{3342}}} = \frac{1 + (7,0 \cdot 10^{-5}) \cdot X}{1 + (2,6 \cdot 10^{-3}) \cdot X} \cdot 10,4 \cdot 10^{\left(\frac{1,87 \cdot 10^4}{T}\right)}$$

$$X = 10^{-2} \cdot \frac{N_e}{\sqrt{T}}$$

Raies de [OIII] :

$$\frac{I_{\lambda_{4959}} + I_{\lambda_{5007}}}{I_{\lambda_{4363}}} = \frac{7,15}{1 + 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{N_e}{\sqrt{T}}} \cdot 10^{\frac{14300}{T}}$$

Raies de [NII] :

$$\frac{I_{\lambda_{6548}} + I_{\lambda_{6584}}}{I_{\lambda_{5755}}} = \frac{8,50}{1 + 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{N_e}{\sqrt{T}}} \cdot 10^{\frac{10800}{T}}$$

Ne identique :

$$\left(\frac{I_{\lambda_{6548}} + I_{\lambda_{6584}}}{I_{\lambda_{5755}}} \right) \cdot 7,15 \cdot 10^{\frac{14300}{T}} - \left(\frac{I_{\lambda_{4959}} + I_{\lambda_{5007}}}{I_{\lambda_{4363}}} \right) \cdot 10^{\frac{10800}{T}} = 0,9 \cdot \left(\frac{I_{\lambda_{6548}} + I_{\lambda_{6584}}}{I_{\lambda_{5755}}} \right) \cdot \left(\frac{I_{\lambda_{4959}} + I_{\lambda_{5007}}}{I_{\lambda_{4363}}} \right)$$

Si $\tau_0 < 1$:

$$\kappa_n = 1,13 \cdot 10^{20} \cdot \frac{W}{\lambda^2 f_{nm}}$$

Si $\tau_0 > 1$:

$$\kappa_n = 1,88 \cdot 10^{18} \cdot W^2$$

Pour τ_0 intermédiaire :

$$\kappa_n = 6,61 \cdot 10^{14} \cdot \frac{\Delta V_D}{\lambda f} \cdot \exp^2 \left(\frac{1,5 \cdot 10^5 \cdot W}{\lambda \cdot \Delta V_D} \right)$$

Abondances :

– Pour les ions dans les nébuleuses :

$$\frac{(N^{2+})}{(H^+)} = \frac{\left(\frac{T_e}{10^4} \right)^{-0,30}}{3,19} \cdot \frac{I_{[NIII]}(5754)}{I_{H\beta}(4861)}$$

$$\frac{(O^+)}{(H^+)} = \frac{\left(\frac{T_e}{10^4} \right)^{-0,44}}{9,36} \cdot \frac{I_{[OII]}(7320) + I_{[OII]}(7330)}{I_{H\beta}(4861)}$$

$$T_e([OII]) \leq T_e(HeI) \leq T_e([OIII])$$

– Pour les atomes dans les nébuleuses, voici l'ICF () p.12 [5] :

$$\frac{(He)}{(H)} = \left[\left(0,87 \cdot \frac{S}{S - S^+} \right) + \left(0,13 \cdot \frac{O}{O - O^+} \right) \right] \cdot \frac{(He^+)}{(H^+)}$$

Ne et Te de Kwok :

$$\frac{I_{\lambda_{4363}}}{I_{\lambda_{4959}} + I_{\lambda_{5007}}} = 0,132 \cdot e^{-32990/T_e}$$

Largeur équivalente de? :

$$LEW = \Delta\lambda \left(1 - 2 \frac{F_{line}}{F_{eb} - F_{er}} \right)$$