



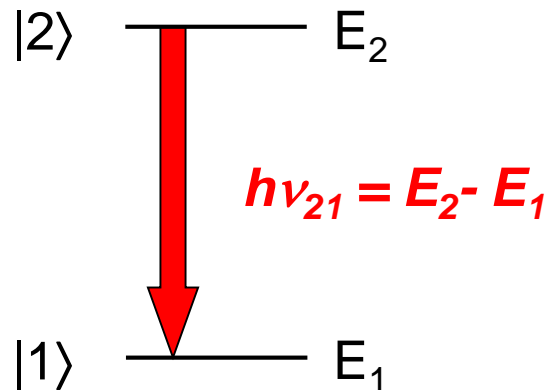
# Calibration d'un système de spectroscopie d'émission

**G. Henrion**

Institut Jean Lamour – UMR CNRS – Université de Lorraine  
NANCY (France)

Spectroscopie d'émission  $\longrightarrow$  étude du rayonnement émis spontanément par le plasma

Le plus souvent : spectre discret  $\longleftrightarrow$  transitions électroniques, ro-vibrationnelles.



Nombre de photons émis par unité de temps

$$N_{21}^{ph} = N_2 A_{21}$$

Puissance rayonnée (*par tout le plasma*)

$$P_{21} = N_{21}^{ph} h\nu_{21} = N_2 A_{21} h\nu_{21}$$

Puissance mesurée (*injustement appelée intensité*)

$$I_{21} = n_2 A_{21} h\nu_{21} \frac{\Omega}{4\pi} V \quad (W)$$

$N_2$  = nombre d'atomes dans l'état  $|2\rangle$

$n_2$  = densité d'atomes dans l'état  $|2\rangle$  ( $m^{-3}$ )

$A_{21}$  = probabilité de transition entre  $|2\rangle$  et  $|1\rangle$  = coef. Einstein d'émission spontanée ( $s^{-1}$ )

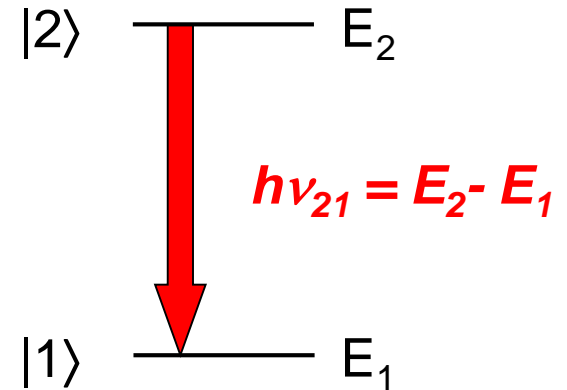
$\Omega$  = angle solide d'observation (strd)

$V$  = volume sondé (observé) du plasma ( $m^3$ )



$$I_{21} = n_2 A_{21} h \nu_{21} \frac{\Omega}{4\pi} V$$

constantes



↪ Accès directement à la densité  $n_2$

Population de  $|2\rangle$  dépend des processus radiatifs et collisionnels dans le plasma

$$n_2 = F(n_e, T_e, T_i, n_j, \dots)$$

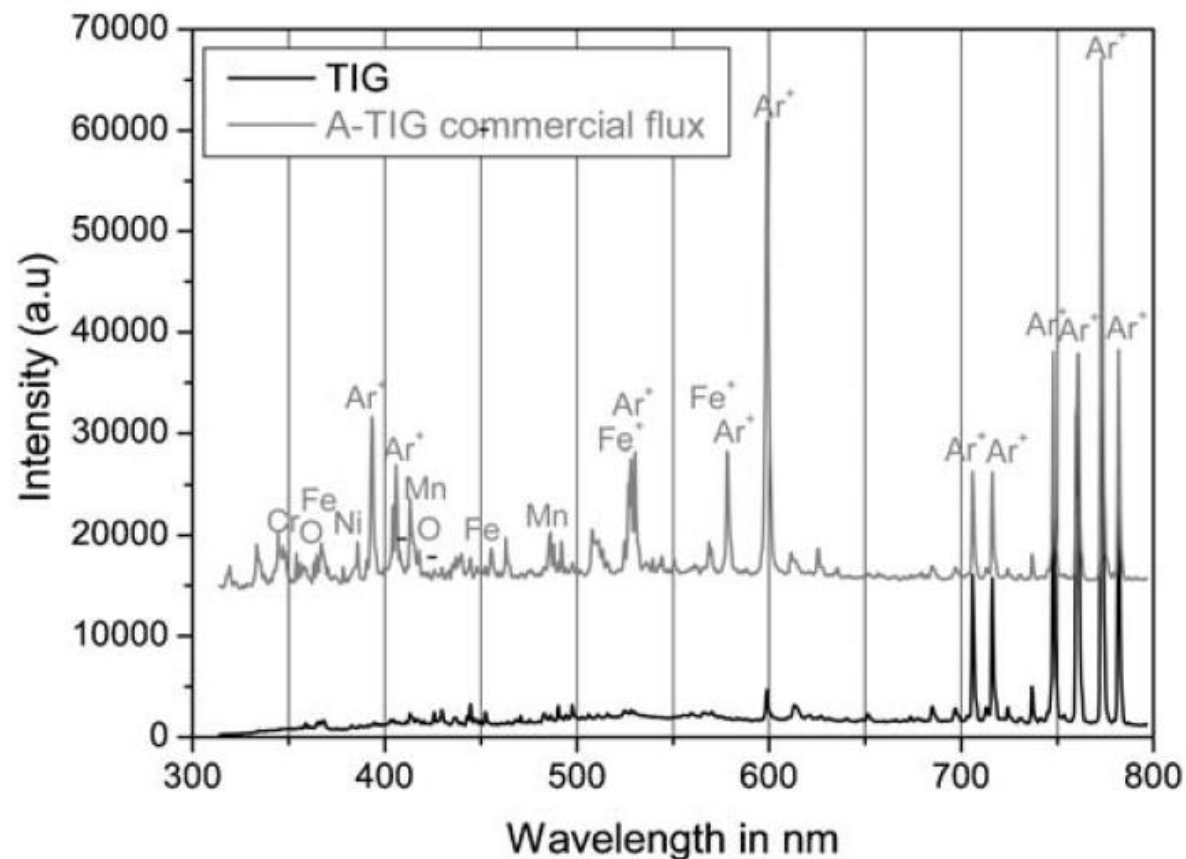
↪ Accès à ces grandeurs à partir de la mesure de  $I_{21}$

Informations **qualitatives** et/ou **relatives** (*nature, densités relatives*)

*Spectre d'émission optique d'un plasma de soudure.*

*S. Leconte et al. Sci. Technol. Weld.*

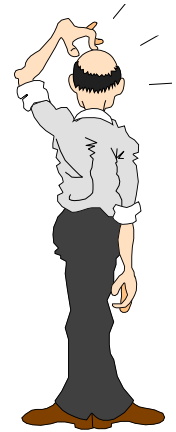
*Join. 11 (2006) 389*



Informations **quantitatives** et/ou **absolues**

**Nécessite de connaître :**

- Sections efficaces d'excitation
- Densité électronique
- Fonction de distribution en énergie des électrons (*a minima*  $T_e$ )
- Réponse spectrale du système de mesure



Intensité mesurée

$$n_m = I_{mn} \frac{4\pi}{\Omega} \frac{1}{V} \frac{1}{R(\lambda_{mn})} \frac{\lambda_{mn}}{hc} \frac{1}{A_{mn}}$$

Suivi de l'évolution de l'état  $|m\rangle$

Inconvénient : ne concerne que des états excités radiatifs

$$N_m/N_0 \leq 10^{-4} - 10^{-5}$$

Pas forcément représentatif de la population de l'espèce à l'état fondamental

$$n_m = F(n_0, n_e, \varepsilon)$$

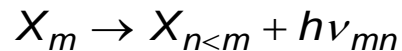
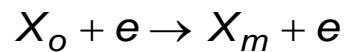
Rapports d'intensités de raies (e.g. réactive/inerte)

Permet de minimiser l'effet des paramètres électroniques

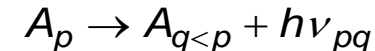
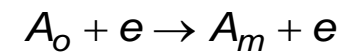
## Actinométrie optique

Ajout d'un gaz rare (actinomètre) en faible quantité connue dans le plasma.  
Mesure relative

Espèce à caractériser (*exposant x*)



Actinomètre (*exposant a*)



$$I_{mn}^x = R(\lambda_{mn}) \frac{\Omega}{4\rho} h\nu_{mn} \tau_m^x A_{mn}^x n_o^x \cdot n_e \cdot \langle \sigma_m^x \cdot v_e \rangle$$

$$I_{pq}^a = R(\lambda_{pq}) \frac{\Omega}{4\pi} h\nu_{pq}^a \tau_p^a A_{pq}^a n_o^a \cdot n_e \cdot \langle \sigma_p^a \cdot v_e \rangle$$

durée de vie effective tenant compte éventuellement des pertes par collision

$$n_o^x = n_o^a \frac{R(\lambda_{pq}) I_{mn}^x}{R(\lambda_{mn}) I_{pq}^a} \cdot \frac{v_{pq}^a}{v_{mn}^x} \cdot \frac{\tau_p^a}{\tau_m^x} \cdot \frac{A_{pq}^a}{A_{mn}^x} \cdot \frac{\langle \sigma_p^a \cdot v_e \rangle}{\langle \sigma_m^x \cdot v_e \rangle}$$

impose que ces grandeurs doivent avoir la même valeur ou être connues

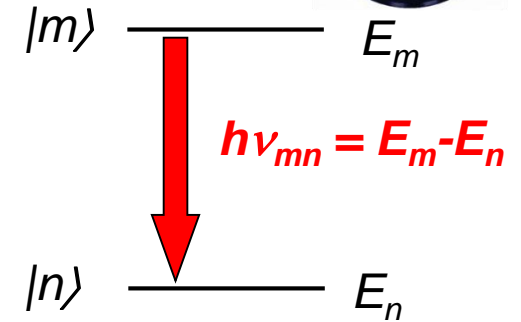


## Tracé de Boltzmann

Intensité d'une raie d'émission ( $\text{W/m}^3$ ):  
(puissance rayonnée dans tout l'espace)

$$I_{mn} = h\nu_{mn} R(\nu_{mn}) A_{mn} n_m = \frac{h\nu_{mn} R(\nu_{mn}) A_{mn}}{Q(T)} g_m n_o \exp\left(-\frac{E_m}{k_B T}\right)$$

(hypothèse ETL(P))



Rapport d'intensité de deux raies d'émission de la même espèce dans le même état d'ionisation :

$$\frac{I_{mn}}{I_{jk}} = \frac{h\nu_{mn}}{h\nu_{jk}} \frac{R(\nu_{mn})}{R(\nu_{jk})} \frac{A_{mn}}{A_{jk}} \frac{g_m}{g_j} \exp\left(-\frac{E_m - E_j}{k_B T}\right)$$

$$\frac{1}{k_B T} = \text{Ln} \left( \frac{I_{mn}}{I_{jk}} \frac{R(\nu_{jk})}{R(\nu_{mn})} \frac{h\nu_{jk} g_j A_{jk}}{h\nu_{mn} g_m A_{mn}} \right) \frac{1}{E_j - E_m}$$



Tracé de  $I_{mn} = F(E_m) = \text{tracé de Boltzmann}$

$$I_{mn} = h \nu_{mn} R(\nu_{mn}) A_{mn} n_m = \frac{h \nu_{mn} R(\nu_{mn}) A_{mn}}{Q(T)} g_m n_o \exp\left(-\frac{E_m}{k_B T}\right)$$

Suppose a minima ETLP

$$\frac{I_{mn} \lambda_{mn}}{g_m R(\lambda_{mn}) A_{mn}} = \frac{n_o h c}{Q(T)} \exp\left(-\frac{E_m}{k_B T}\right)$$

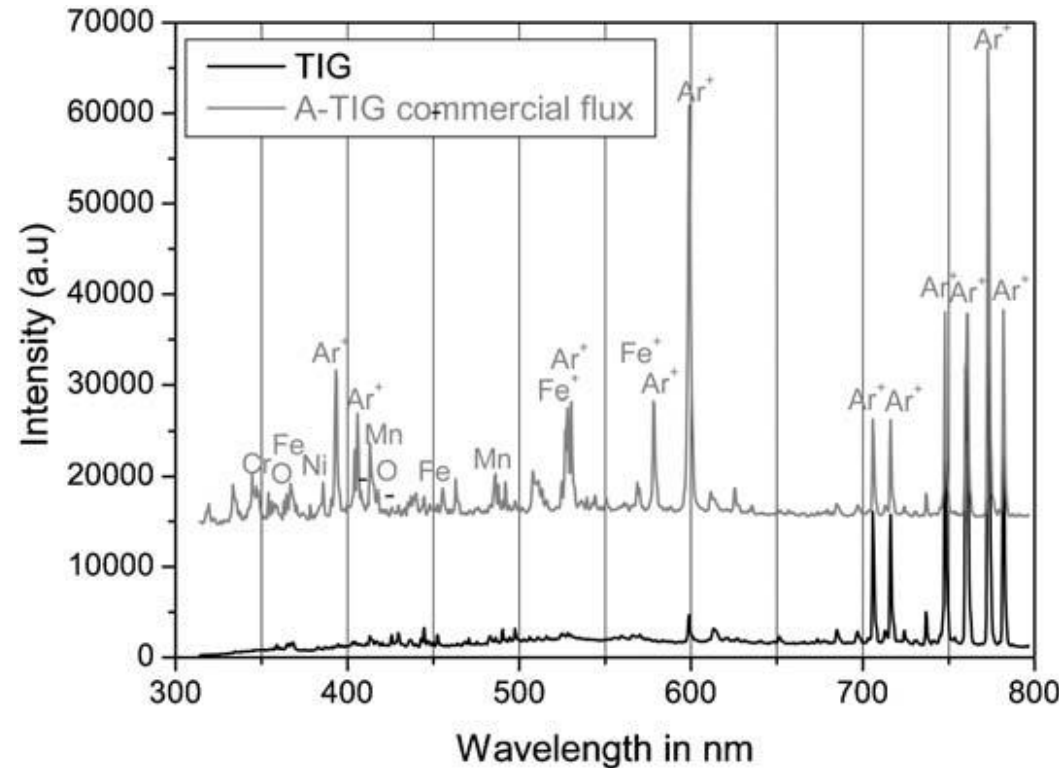
$$\text{Log}\left(\frac{I_{mn} \lambda_{mn}}{g_m A_{mn} R(\lambda_{mn})}\right) = C^{ste} - \frac{E_m}{k_B T}$$

$$\text{Log}\left(\frac{I_{mn} \lambda_{mn}^3}{g_n f_{nm} R(\lambda_{mn})}\right) = K^{ste} - \frac{E_m}{k_B T}$$

**Droite de pente  $-1/k_B T$**

Plasmas de soudage TIG et A-TIG.

S. Leconte et al. Sci. Technol. Weld. Join. 11 (2006) 389



Tracé de  $I_{mn} = F(E_m) =$  tracé de Boltzmann

$$I_{mn} = h \nu_{mn} R(\nu_{mn}) A_{mn} n_m = \frac{h \nu_{mn} R(\nu_{mn}) A_{mn}}{Q(T)} g_m n_o \exp\left(-\frac{E_m}{k_B T}\right)$$

Suppose a minima ETLP

$$\frac{I_{mn} \lambda_{mn}}{g_m R(\lambda_{mn}) A_{mn}} = \frac{n_o h c}{Q(T)} \exp\left(-\frac{E_m}{k_B T}\right)$$

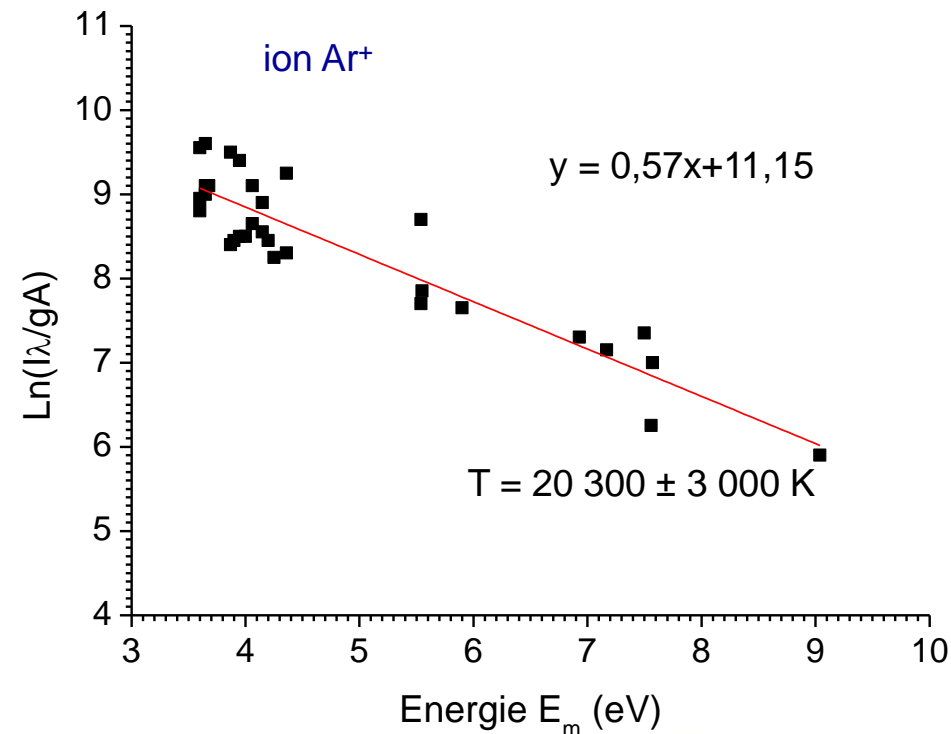
$$\text{Log}\left(\frac{I_{mn} \lambda_{mn}}{g_m A_{mn} R(\lambda_{mn})}\right) = C^{ste} - \frac{E_m}{k_B T}$$

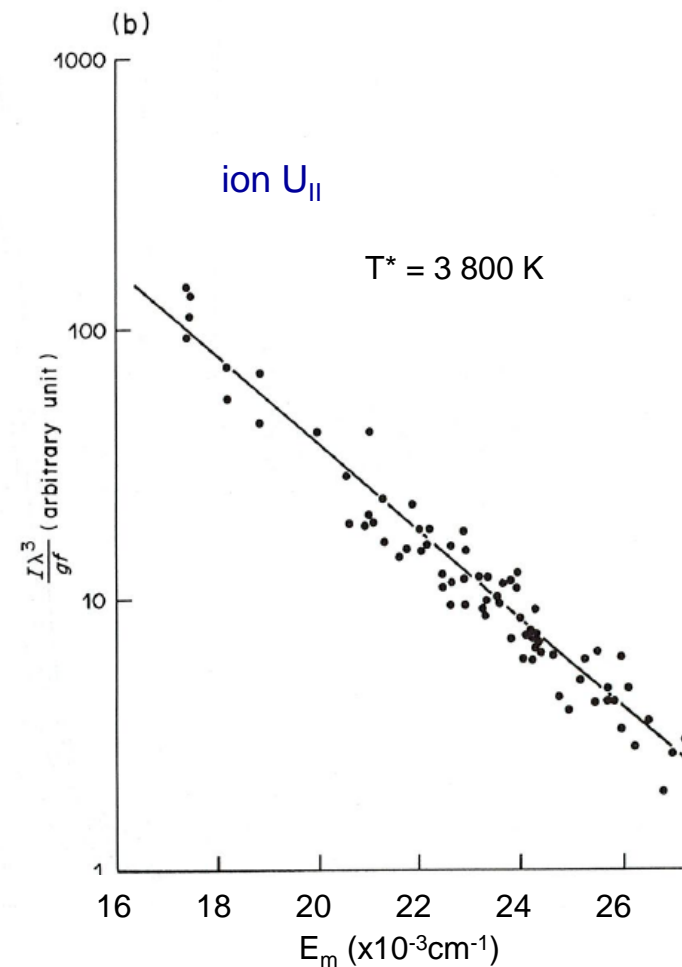
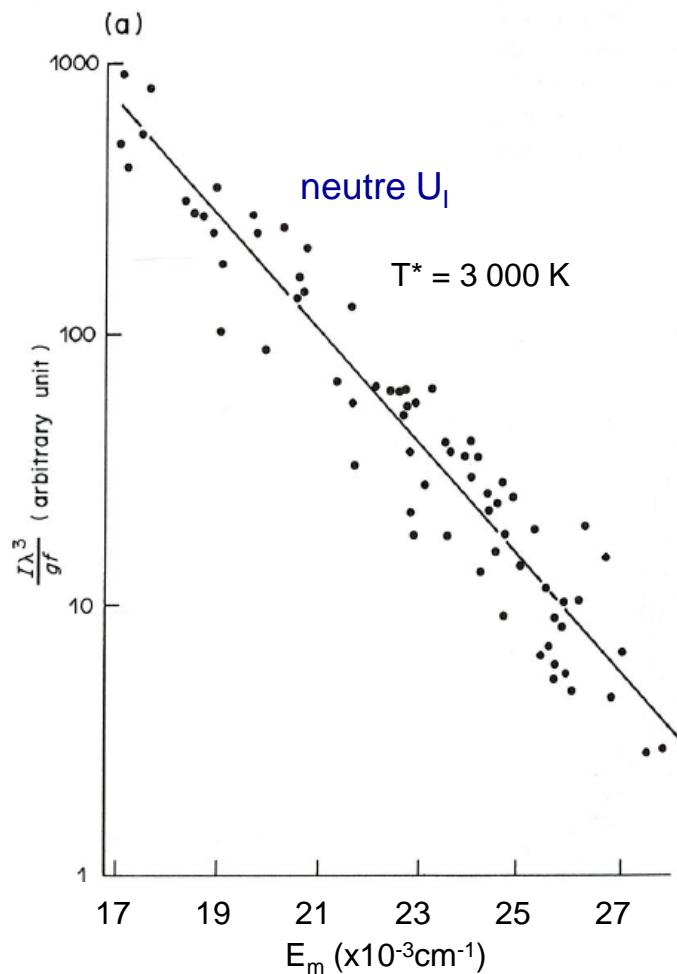
$$\text{Log}\left(\frac{I_{mn} \lambda_{mn}^3}{g_n f_{nm} R(\lambda_{mn})}\right) = K^{ste} - \frac{E_m}{k_B T}$$

**Droite de pente  $-1/k_B T$**

Plasmas de soudage TIG et A-TIG.

S. Leconte et al. Sci. Technol. Weld. Join. 11 (2006) 389



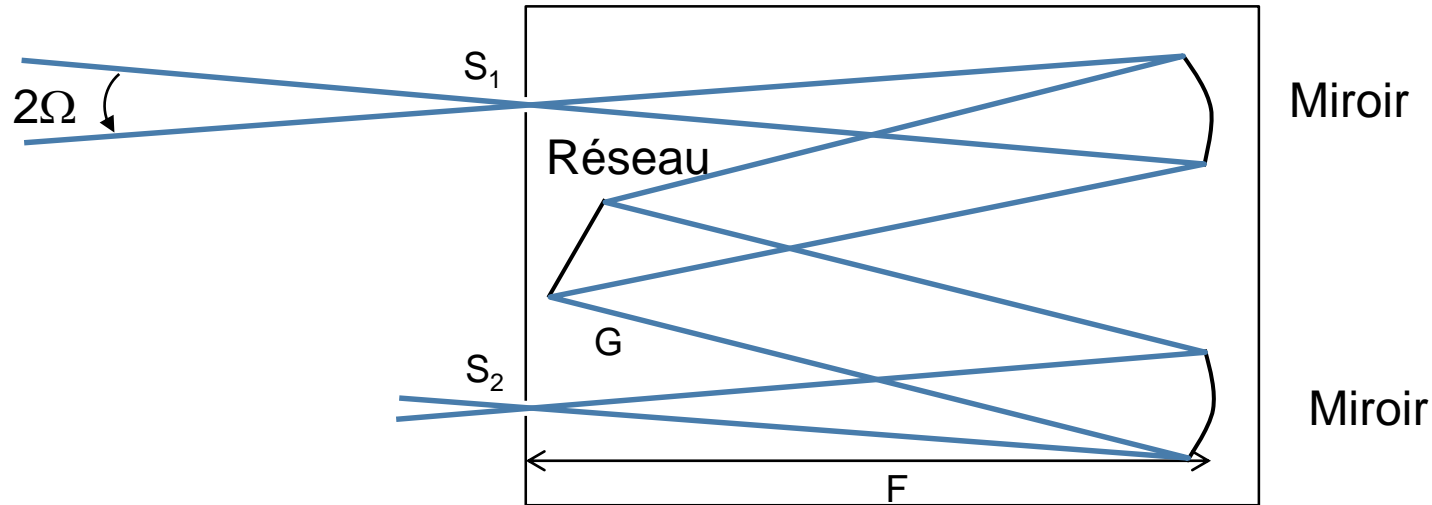


Tracé de Boltzmann à partir des raies  
d'uranium neutre et ionisé d'un plasma  
de cathode creuse  
G. Henrion et al. JQSRT 37 (1987) 477

# Spectroscopie instrumentale



## Monochromateur



Les éléments importants :

$G$  = densité de traits du réseau (traits/mm)

$S_{1,2}$  = largeur des fentes entrée, sortie (taille du pixel)

$F$  = focale

## Monochromateur - Les paramètres importants (intrinsèques à l'appareil) :

**pouvoir de résolution** :  $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN$

*Exemple THR1500*

G=2400 tr/mm ; m = 1 ; réseau = 110 mm

R = 1x110x2400 = 264000

$\Delta\lambda = 0,0021 \text{ nm @ } 546 \text{ nm}$

$\Delta\lambda$  = plus petit écart discernable entre deux raies voisines

m = ordre de diffraction

N = nombre de traits éclairés du réseau

souvent donné par  $\Delta\lambda @ \lambda$

**dispersion** : largeur de la bande spectrale par unité  
(nm/mm) de longueur dans le plan focal de sortie

*THR1500*  
0,25 nm/mm

*TRIAX550*  
1,55 nm/mm

*SP2500*  
1,52 nm/mm

*S4000*  
~ 40nm/mm

**ouverture numérique** :  $NA = n \sin(\Omega)$

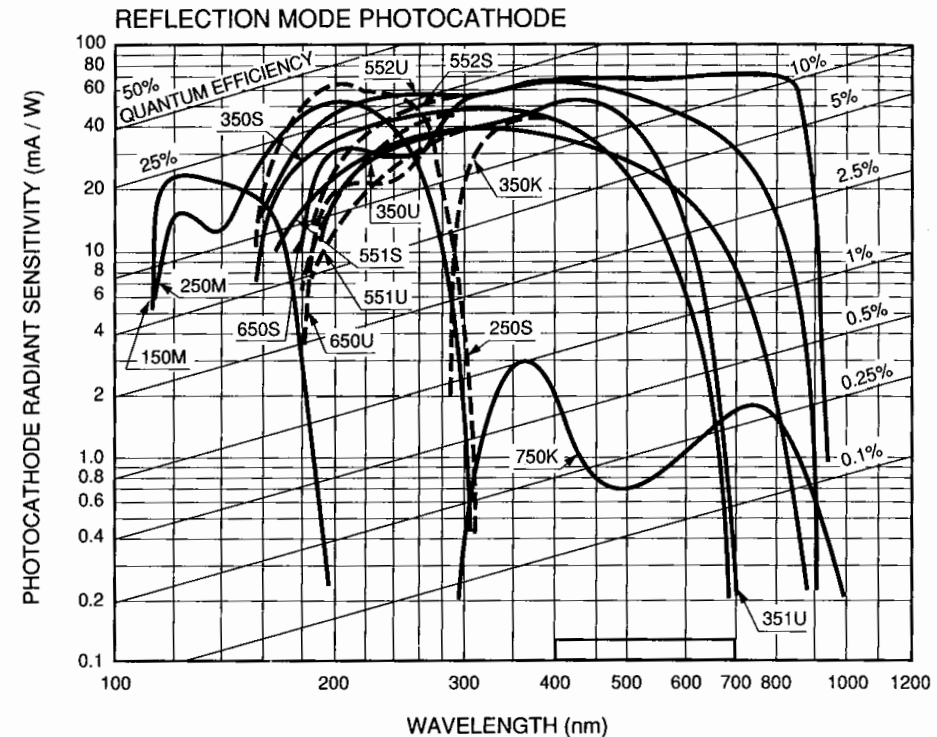
(F/#)

paramètre essentiel pour un éclairage optimal du réseau

## Réponse spectrale

Chaque élément du montage optique possède une sensibilité et une « réponse » qui dépend de la longueur d'onde

- hublot de la manip
- lentille(s) de focalisation
- fibre optique
- spectro (miroirs + réseau)
- détecteur (PM, CCD, ...)

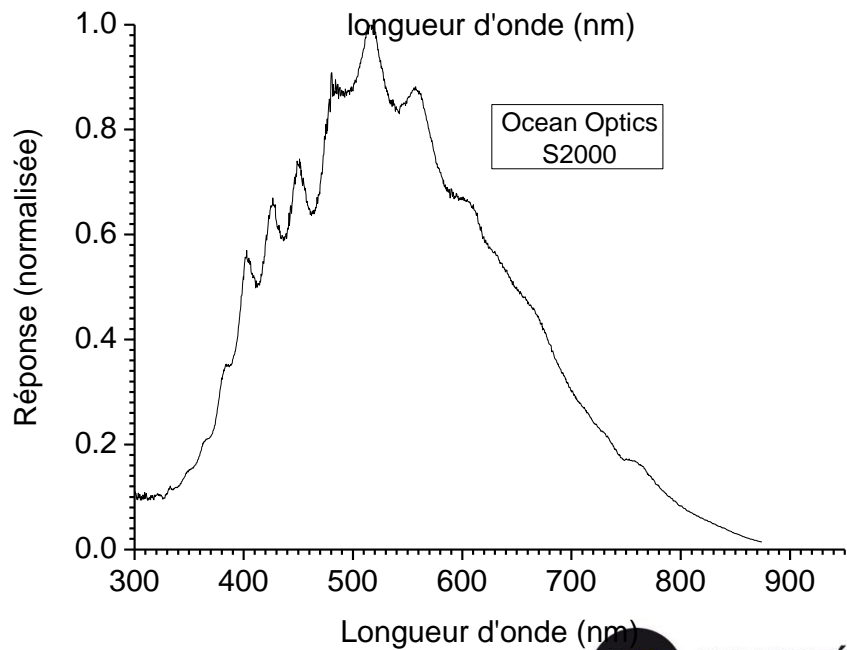
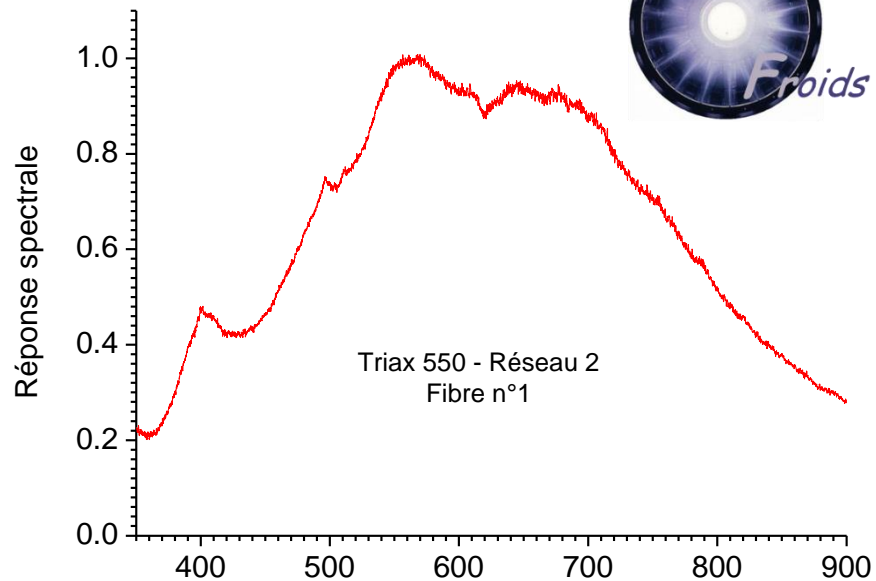
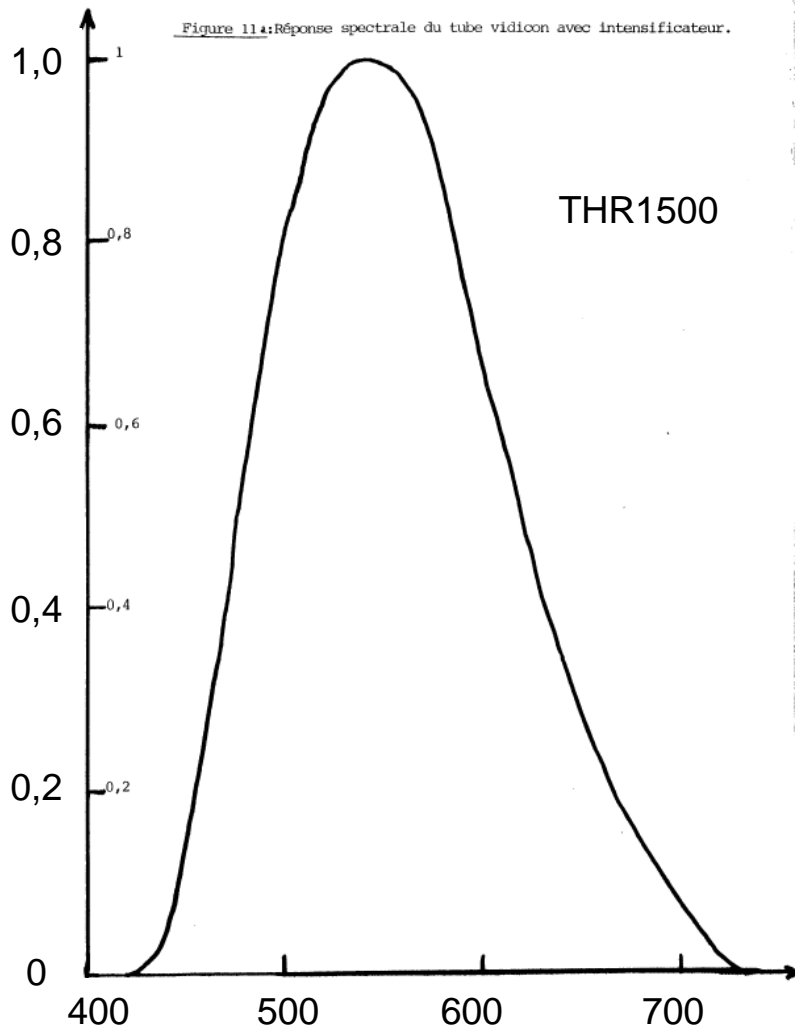


Mesures absolues et/ou comparaison d'intensité de raies



**Détermination de la réponse spectrale de l'ensemble**

Figure 11: Réponse spectrale du tube vidicon avec intensificateur.



Calibration à l'aide d'une source étalonnée (ruban W ou autre)

on connaît précisément l'émissivité de la source étalon en fonction de la longueur d'onde

**Il est indispensable de mettre la source à la place du plasma et de conserver le reste du montage optique identique**

L'apport des outils numériques permet de faire une calibration numérique moyennant des spectres standards connus