

# La spectroscopie optique pour l'étude des disjoncteurs

*Dunpin HONG*

*Jean-Marc BAUCHIRE*



*François GENTILS*



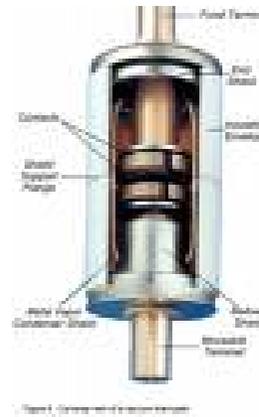
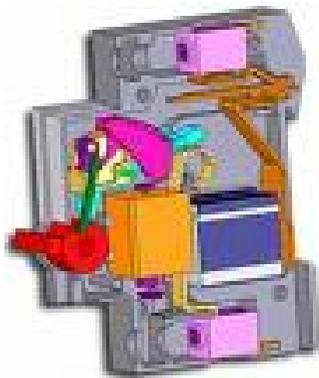
**6e Journées du Réseau Plasmas Froids - 02-05/10/07 - Bonascre**

# Plan de la présentation

- Introduction
  - Spectroscopie optique d'émission
  - Spectroscopie d'absorption
  - Conclusion
- 
- Mettre l'accent sur les méthodes utilisées et leurs mises en œuvre
  - Ajuster cette présentation en fonction de celles déjà faites par les autres conférenciers

# Introduction

- Le rôle d'un disjoncteur : isoler instantanément un sous-réseau en dysfonctionnement de type court-circuit ou surcharge.
- Le fonctionnement d'un disjoncteur : naissance d'un arc lors de la séparation des électrodes, évacuation de l'énergie stockée dans le sous-réseau à couper ( $\frac{1}{2}LI^2$ ), extinction de l'arc au passage du courant à zéro, pas de re-amorçage de l'arc.



- Des phénomènes physiques à étudier :

- arc (plasma thermique),
  - interaction arc – électrodes,
  - interaction arc – parois,
  - gaz chaud entourant l'arc, ...

- La spectroscopie optique et l'étude des disjoncteurs :

- mise en évidence de la présence des espèces,
  - mesure de la densité électronique,
  - mesure de la température électronique,
  - mesure de la densité de certains atomes et molécules

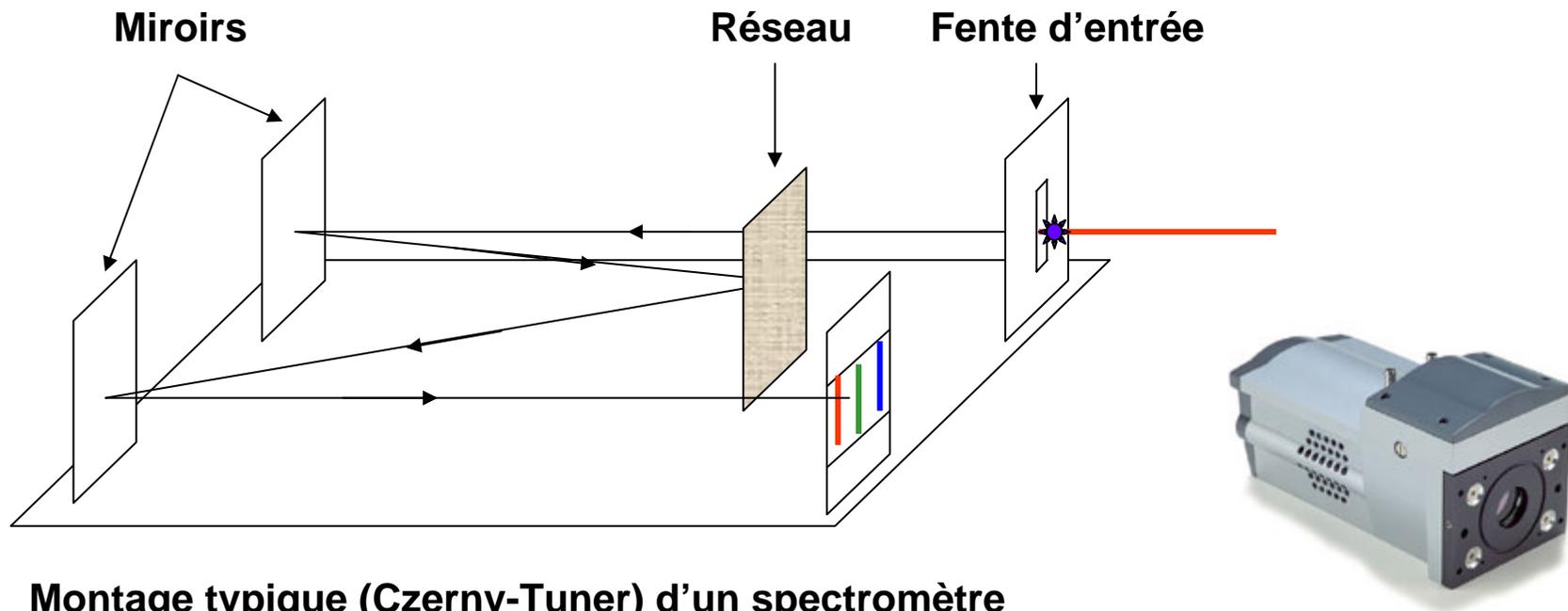
# Mesures utilisant la spectroscopie optique d'émission



- Équipements nécessaires et mesures résolues en temps (spectre unique, plusieurs spectres à des instants très proches, ...)
- Mesure qualitative : mise en évidence de la présence des espèces dans l'arc (trois exemples issus de nos travaux), photographie spectrale
- Mesure de densité électronique (hypothèse plasma homogène, paramètre Stark, effet de l'auto-absorption sur ce type de mesure)
- Mesure de température électronique (rapport d'intensité, étalonnage relatif en énergie, diagramme de Boltzmann, ...)

# Équipements

- Un spectromètre imageur couplé à une caméra CCD intensifiée

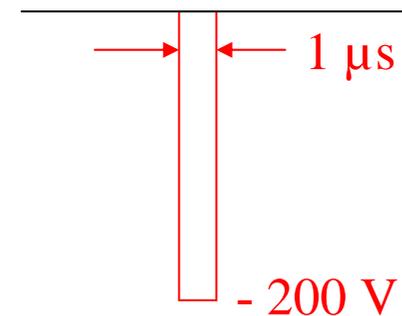
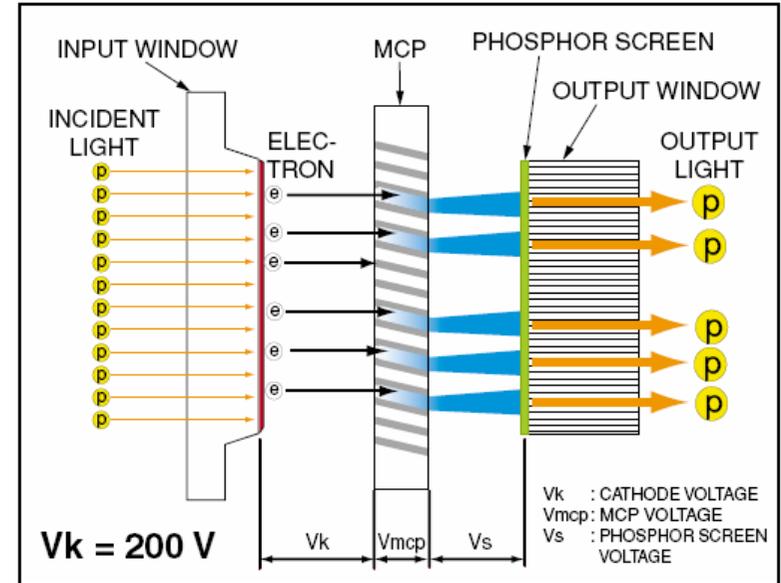
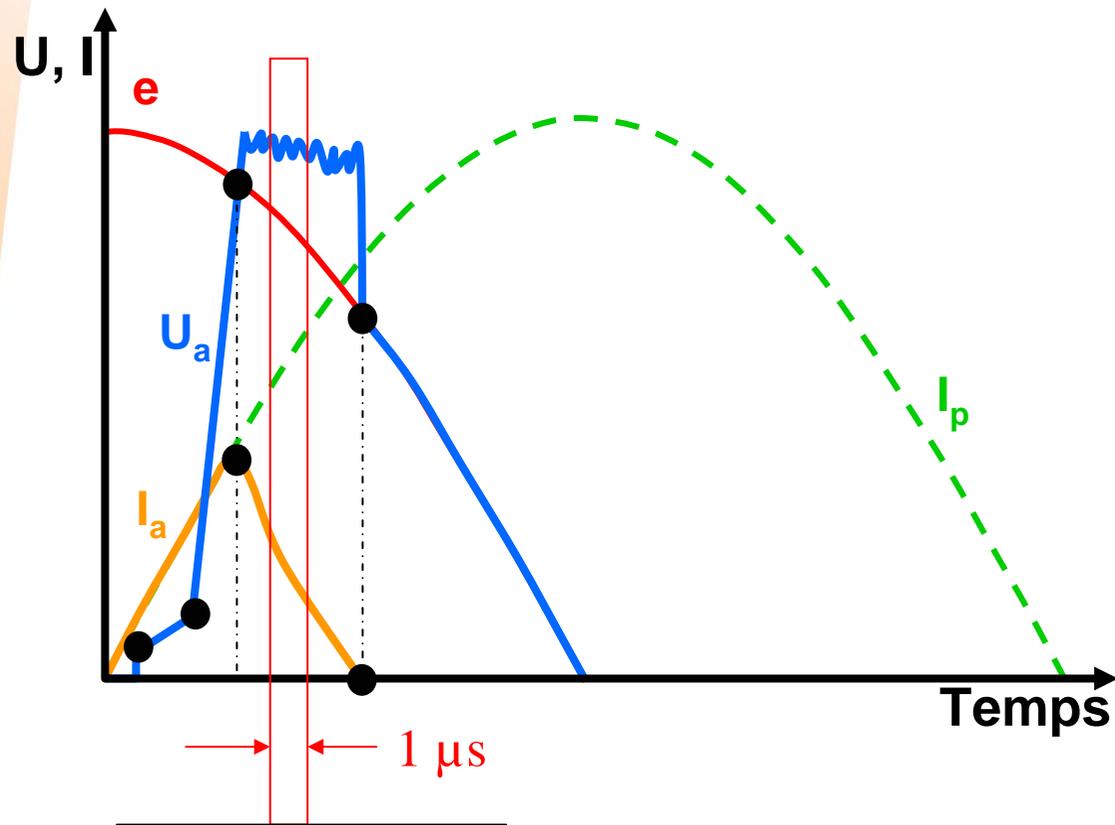


Montage typique (Czerny-Tuner) d'un spectromètre

Plasmas transitoires → Mesures résolues en temps → CCD intensifiée

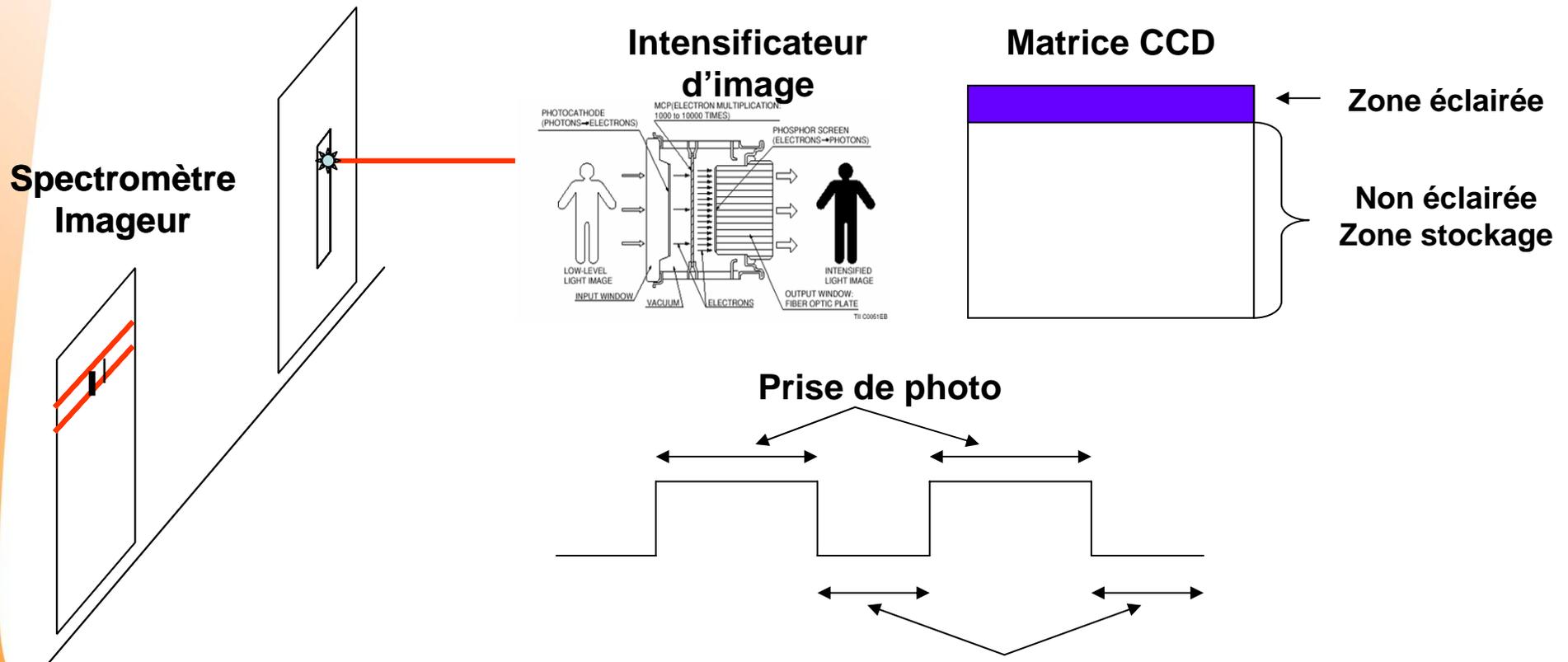
# Intensificateur et mesure résolue en temps

## Obturbateur opto-électronique



# Plasma transitoire : reproductible ou non reproductible

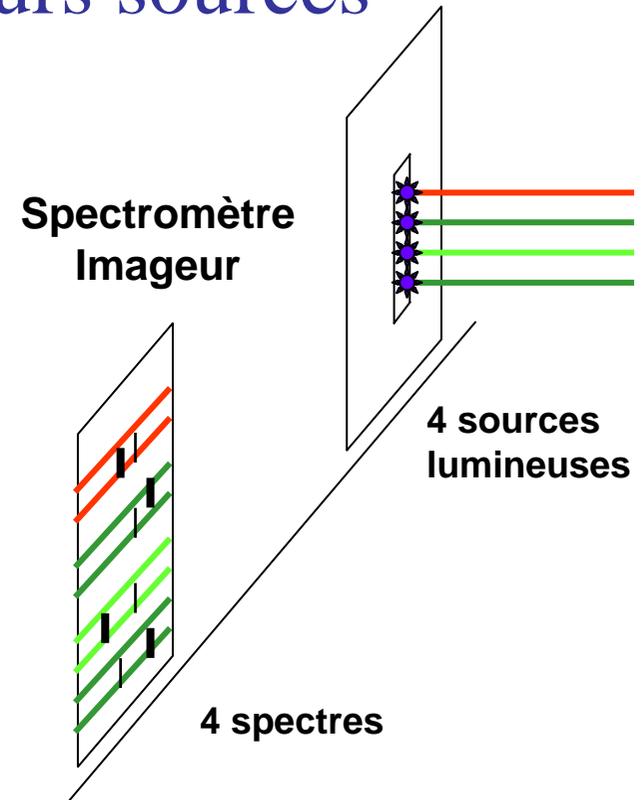
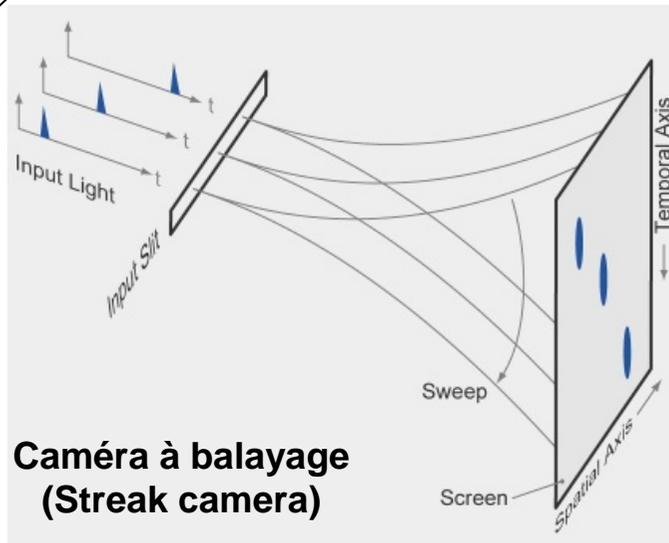
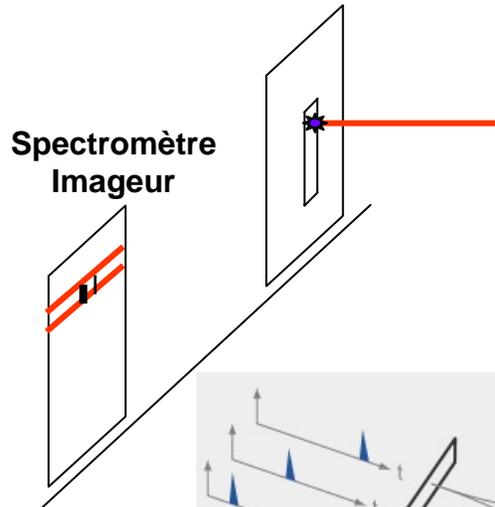
Plusieurs acquisitions successives durant une seule opération (  $\sim 1$  ms )



**Transfert d'image vers le bas ( $\sim 1\mu\text{s}/\text{ligne}$ )**

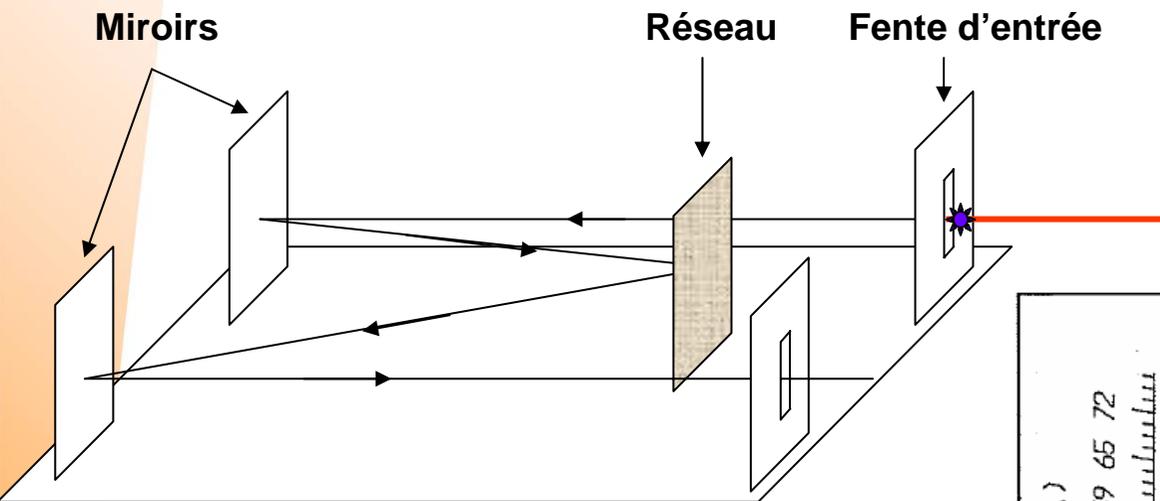
# Durée très courte

# Spectres simultanés de plusieurs sources

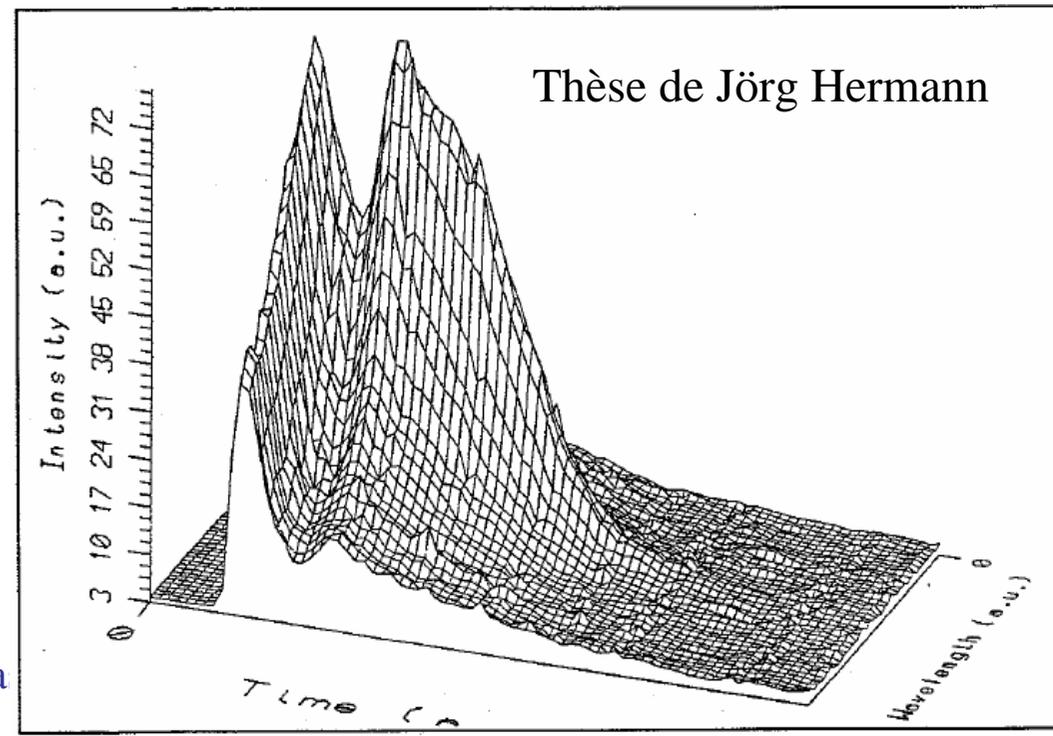


# Équipements

## ■ Un monochromateur couplé à un photomultiplicateur

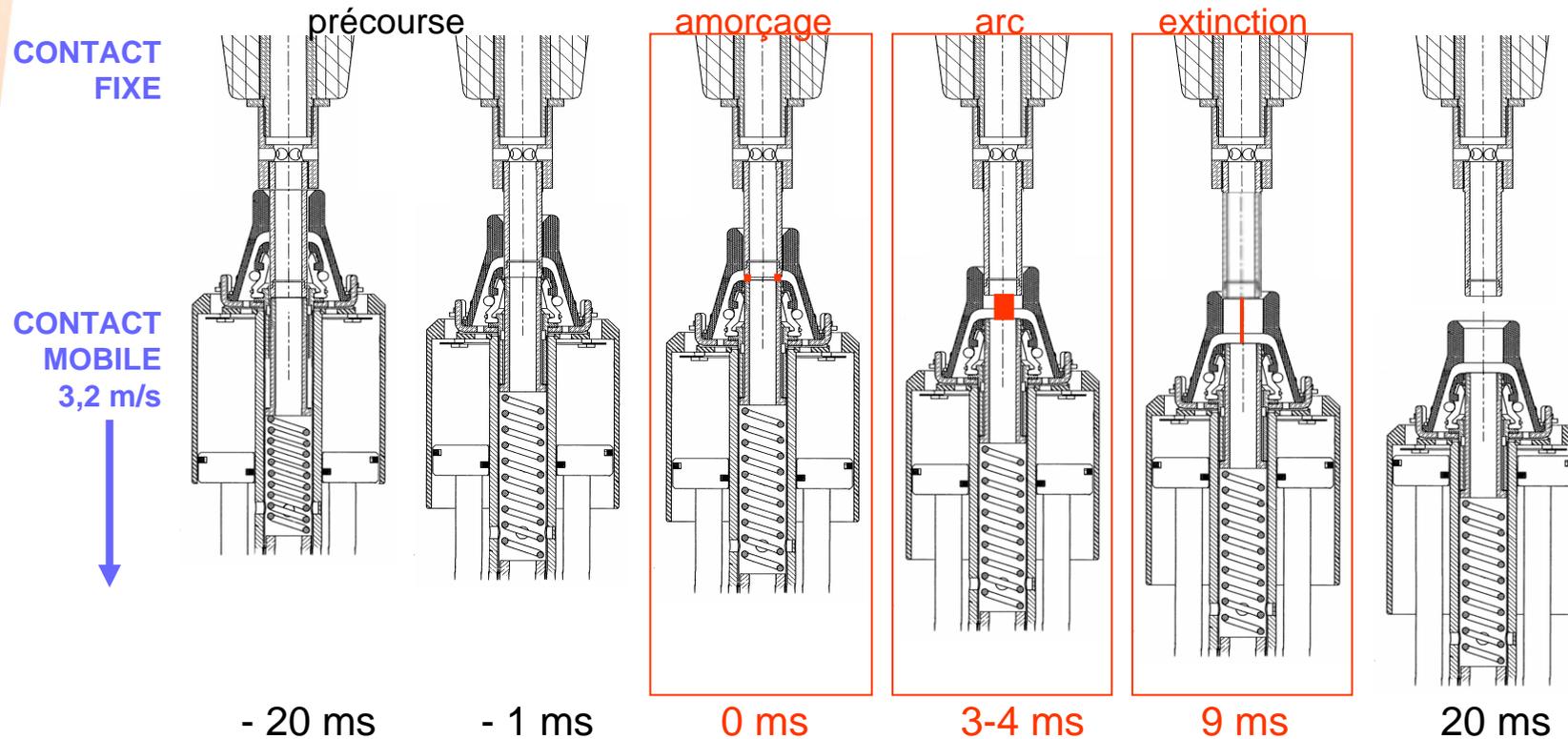
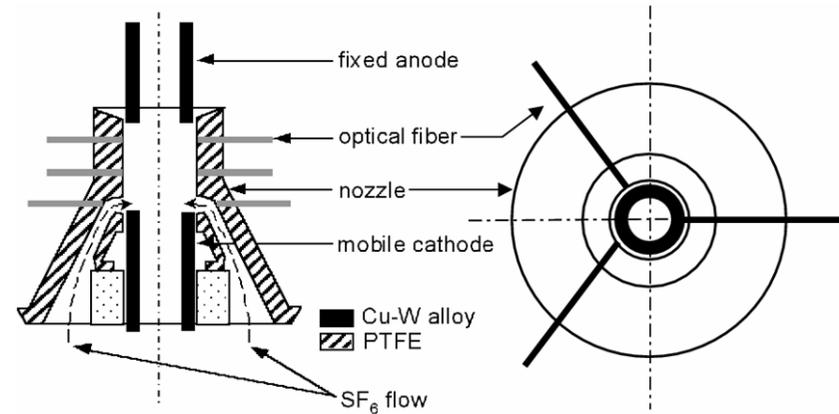


Montage typique (Czerny-Tuner) d'un monochromateur



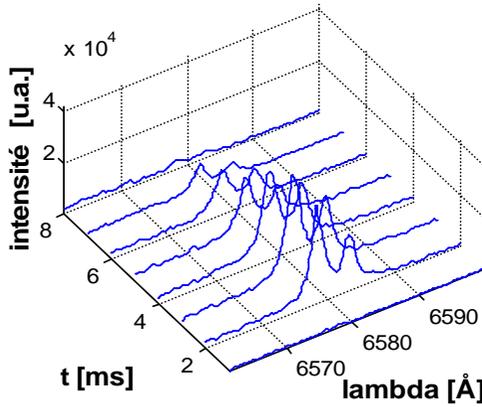
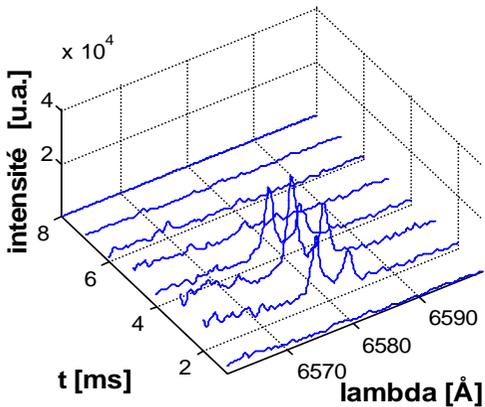
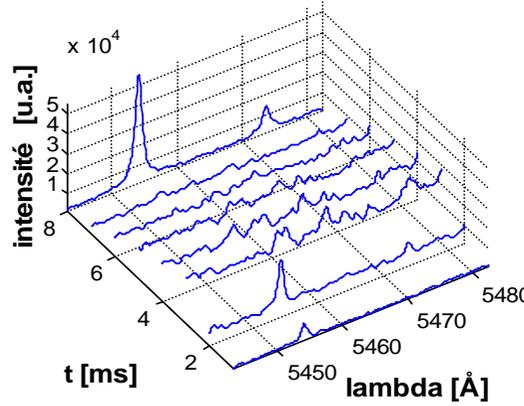
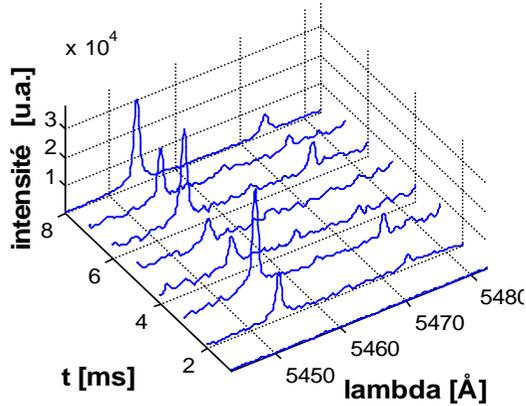
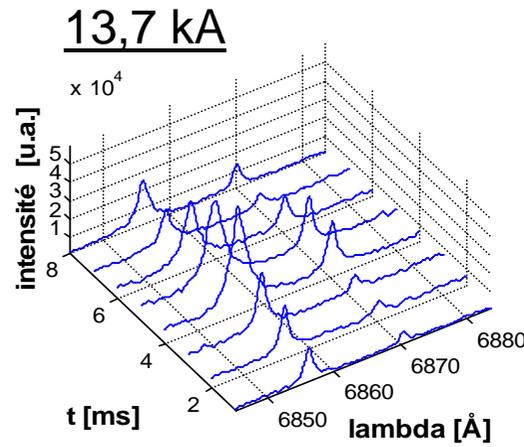
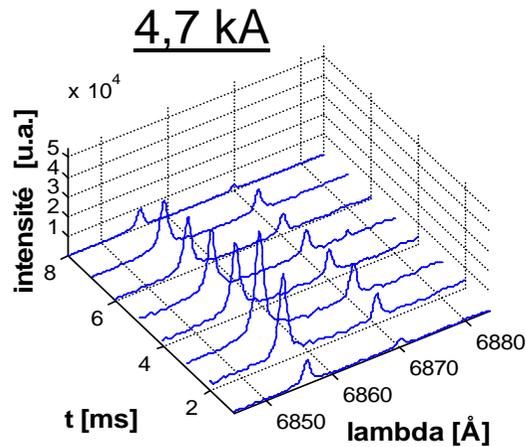
# Mesure qualitative : mise en évidence de la présence des espèces dans l'arc

■ Thèse de doctorat de F. Gents, 2000



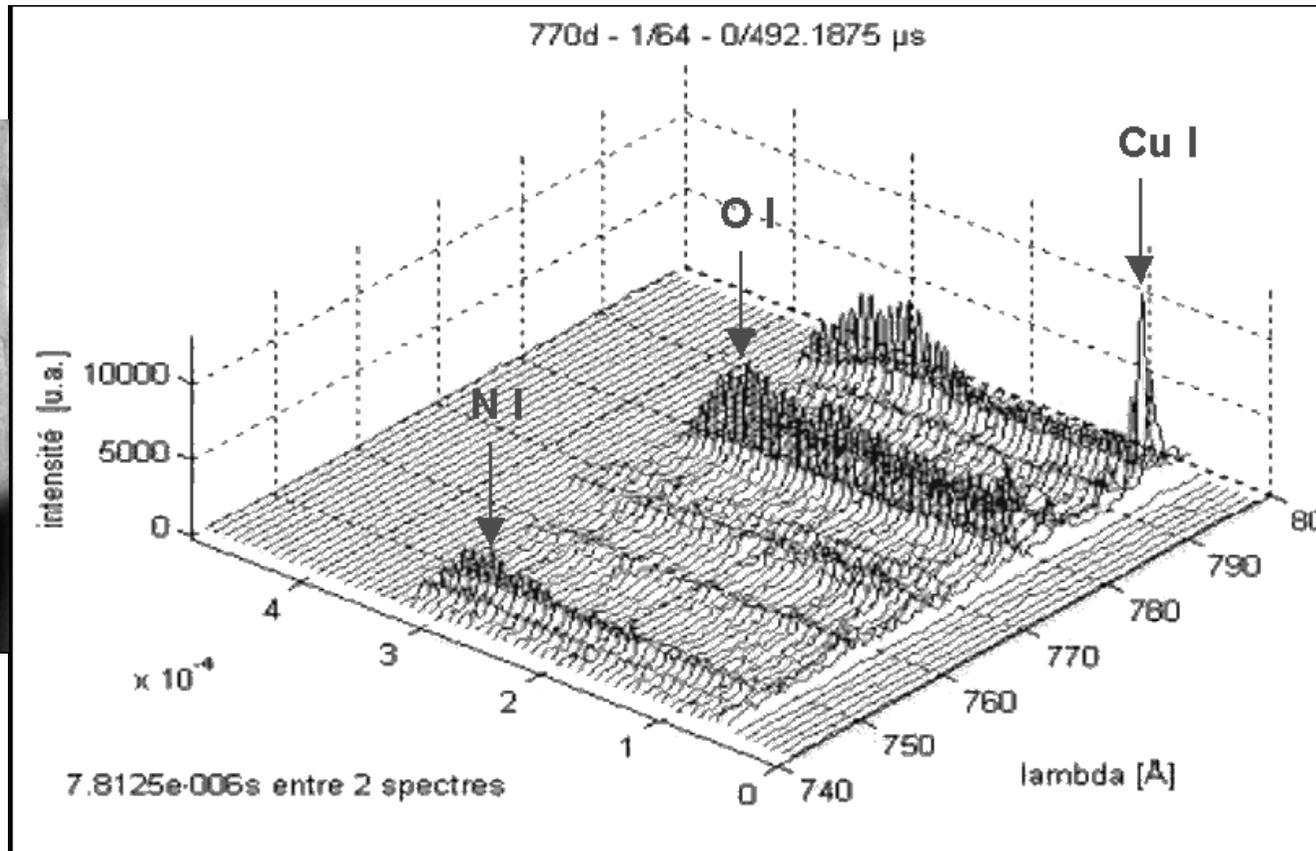
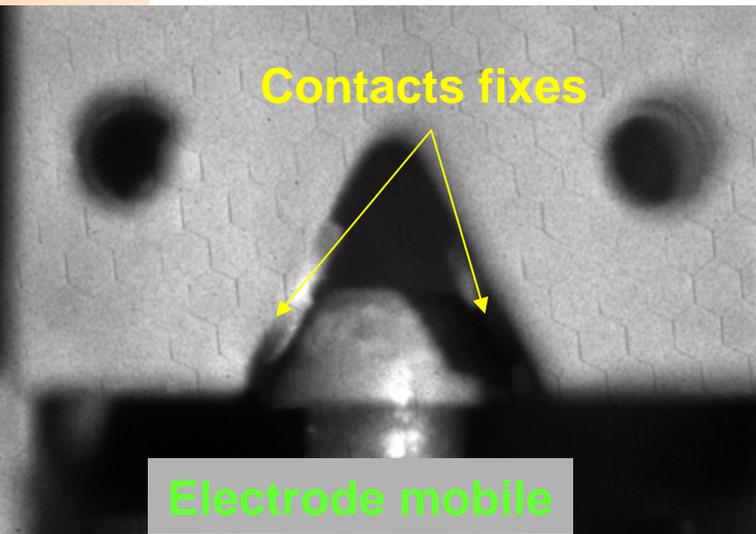
## SPECTRES RÉSOLUS EN TEMPS (F I, S II et C II)

- disparition **S II**
  - apparition **C II**
- ⇒ transition d'un plasma **SF<sub>6</sub>** vers un plasma **C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>**

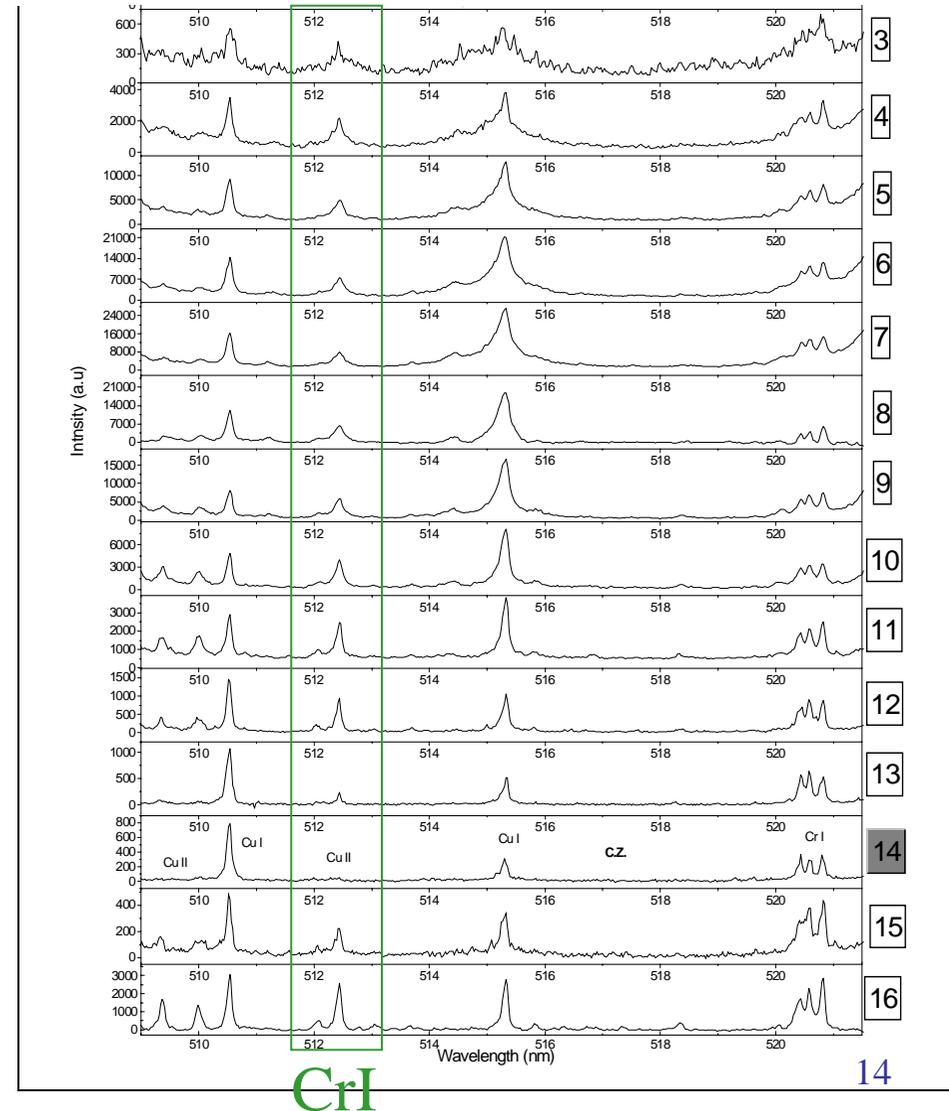
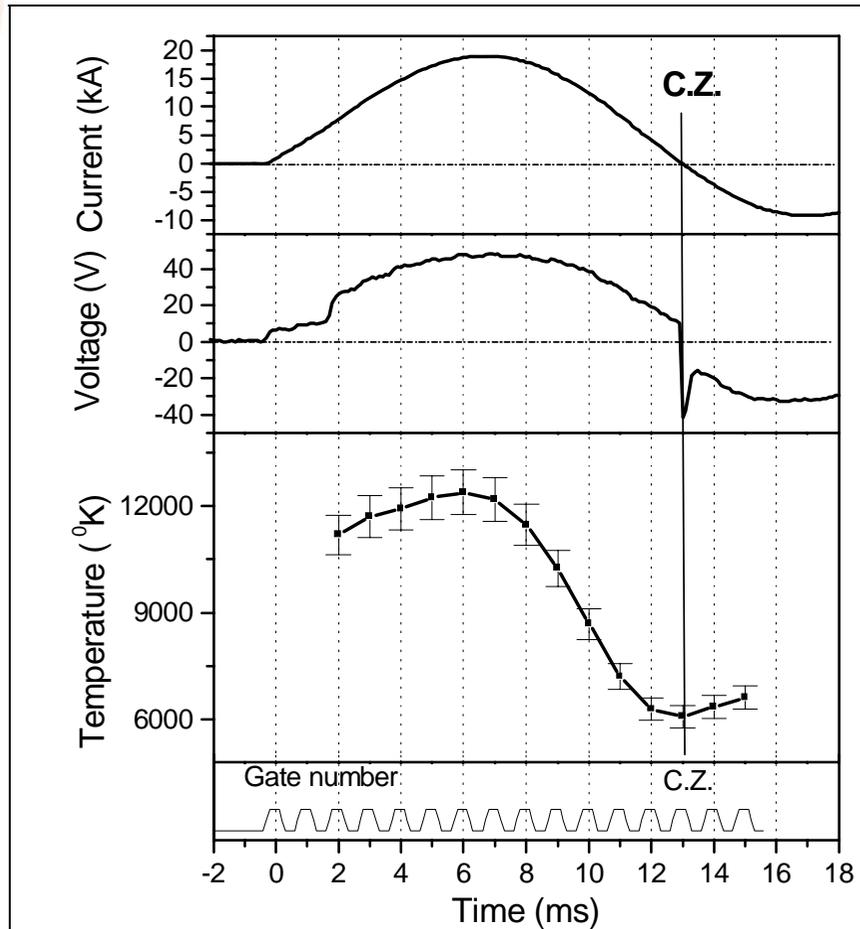


Study of the metallic – air plasma transition during the first instants of an arc by optical spectroscopy.

F. **Gentils** *et al*, in proc. of GD2004 Toulouse.



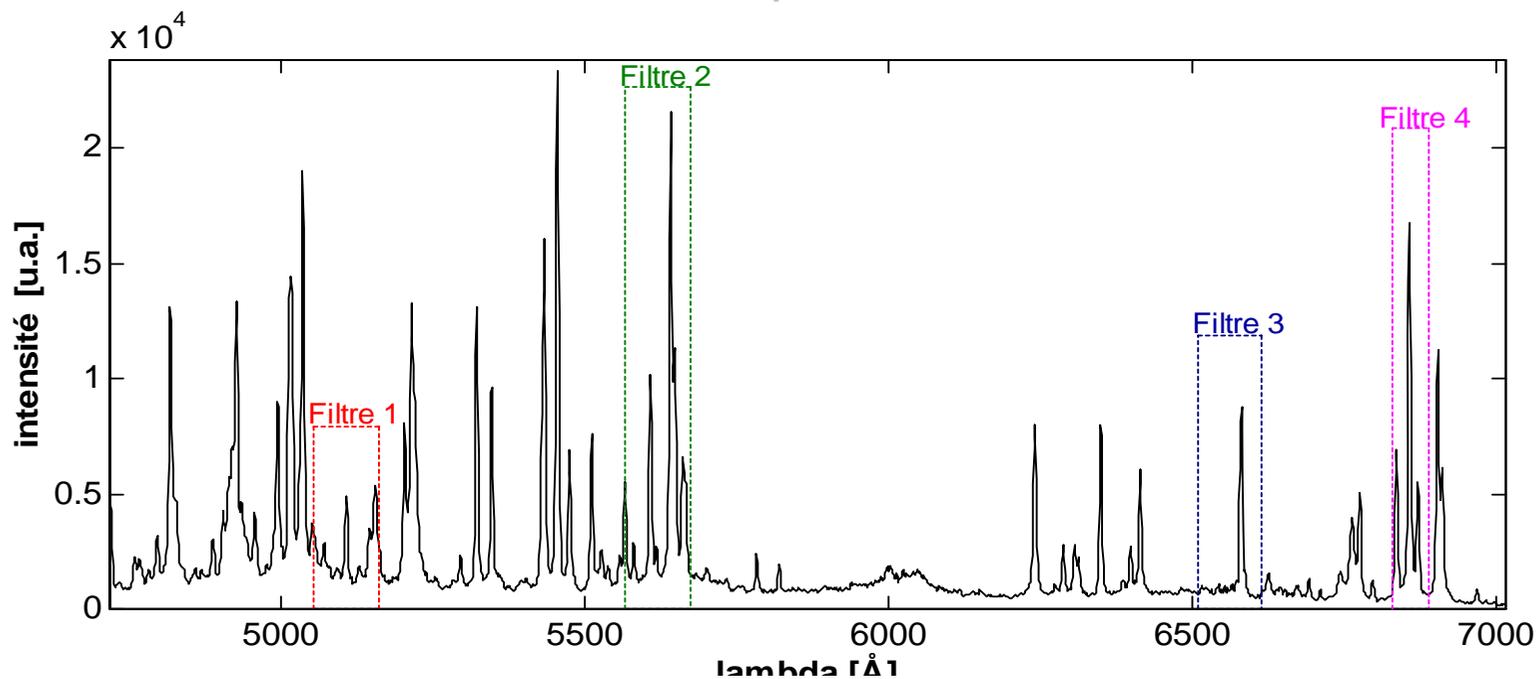
Optical diagnostics of the arc plasma using fast intensified CCD-spectrograph system. G. Pavelescu, ..., **D. Hong**, ... **J.M. Bauchire**, in Proc. of the 7th International Conference on Optics, SPIE vol 5581 (2004), PP767-774



CrI

# Photographie avec filtre interférentiel : localisation des zones d'émission des différentes espèces du plasma

## Émission caractéristique - filtre interférentiel



domaines spectraux  
d'émission distincts

Filtre	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4
Espèce	Cu I	S II	C II	F I



métal



SF<sub>6</sub>

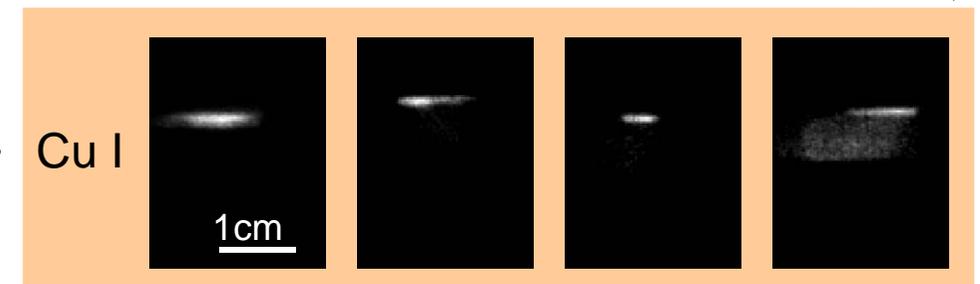
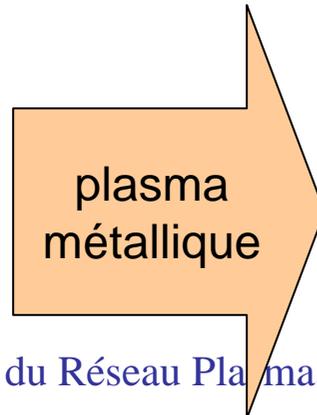
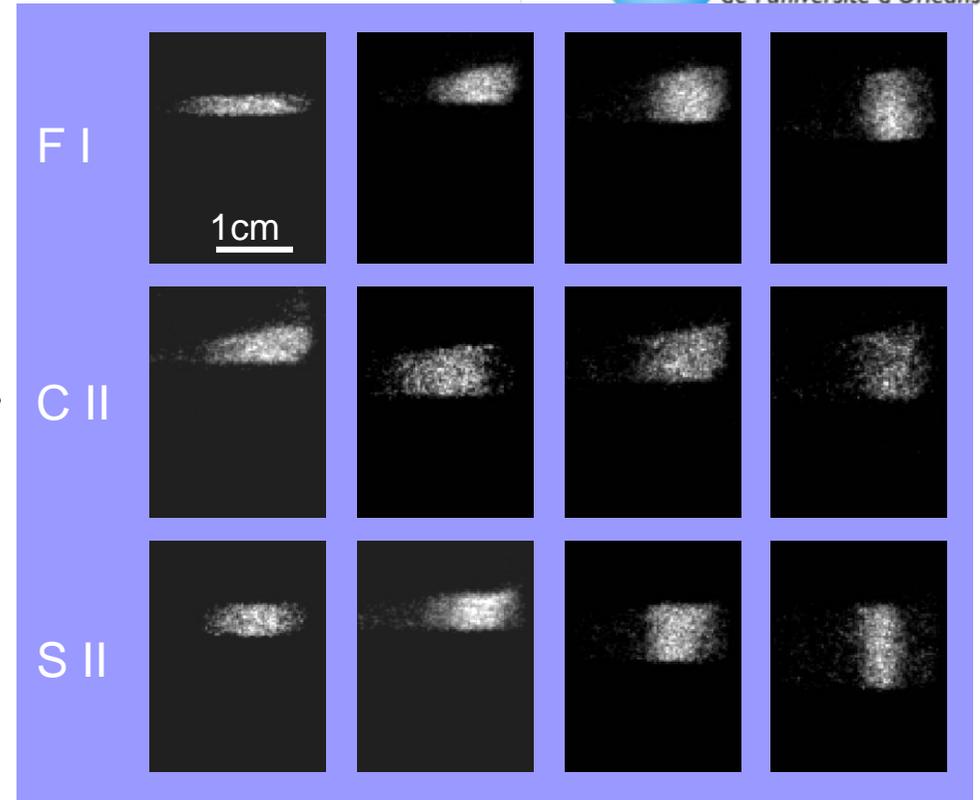
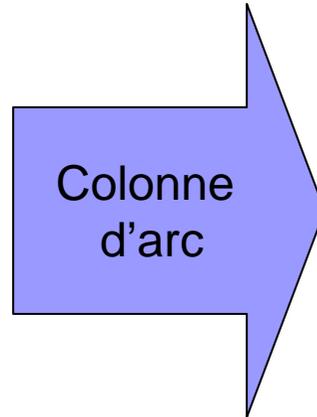
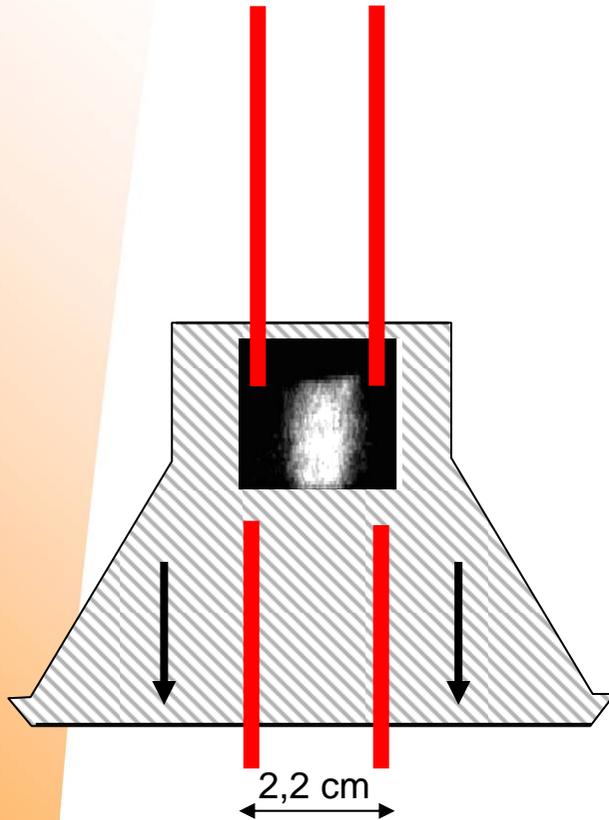


Téflon C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>

# Photographie avec filtre interférentiel

Thèse de doctorat de F. Gentils, 2000

4,7 kA



- les matériaux ablatés de la tuyère **pénètrent** la colonne d'arc
- le cuivre reste **localisé** près des contacts

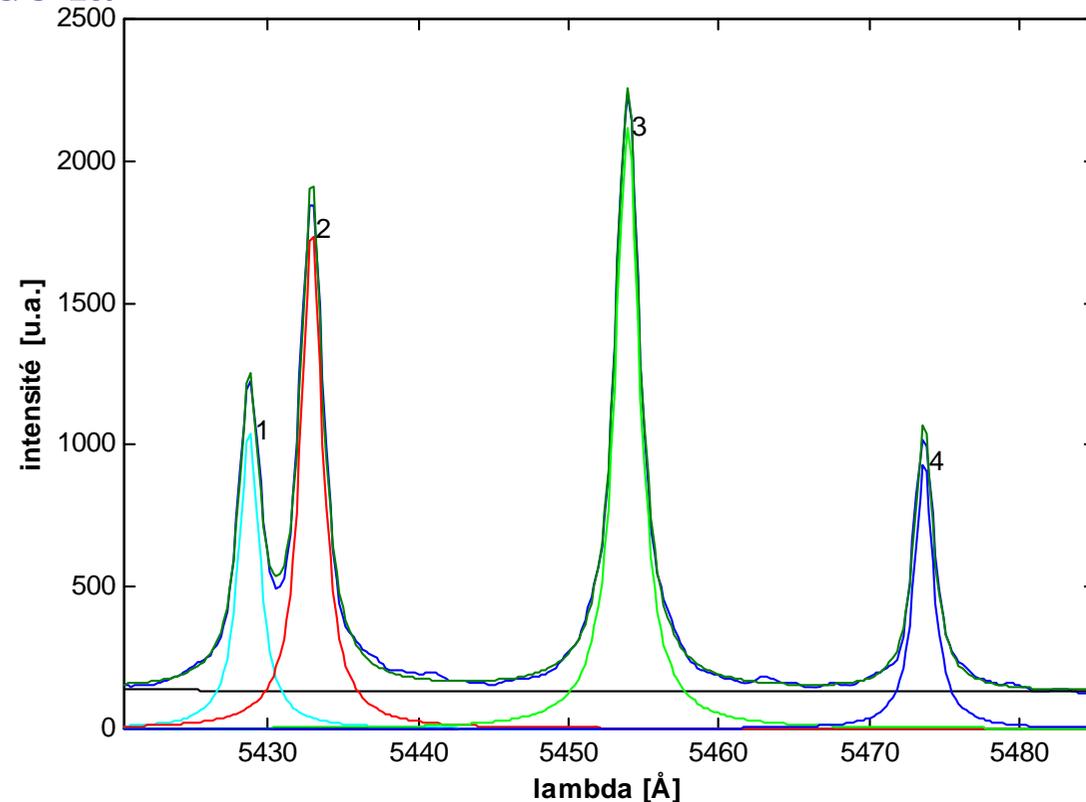
# Mesure de la densité électronique dans un plasma thermique

- Élargissement Stark
- si homogène dans la direction de la visée
- Raie CuI, AgI, SII, FI, etc ...

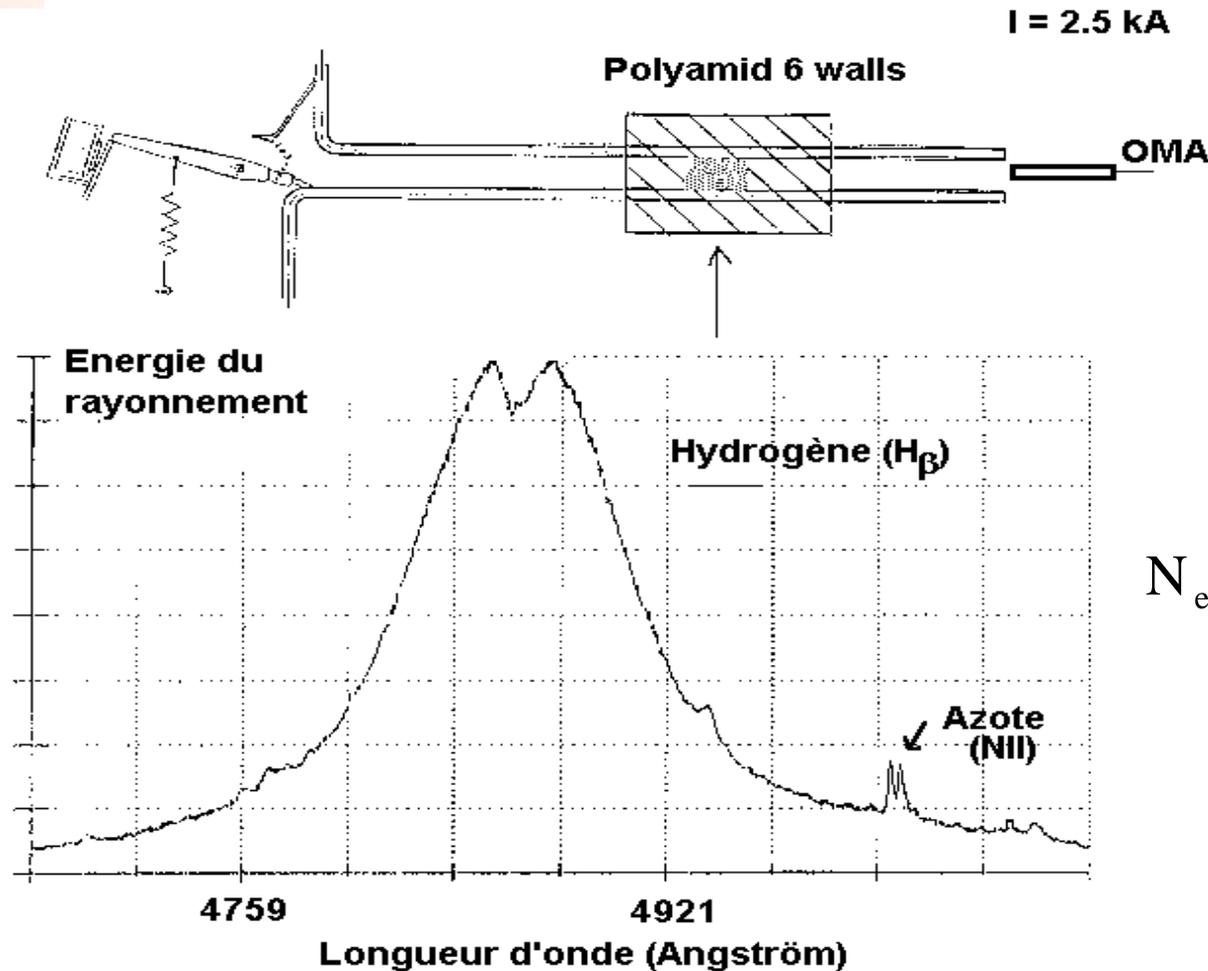
$$L(\lambda) = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta\lambda}{(\lambda - \lambda_0)^2 + \Delta\lambda^2}$$

- Profil mesuré

$$P_M(\lambda) = L(\lambda) * F_A(\lambda)$$



Étude des arcs par diagnostics optiques dans les disjoncteurs basse tension, Revue internationale de Génie Électrique, Volume 1 – n°2/1998, Hermès, C. Fiévet, ..., F. Gentils, ...



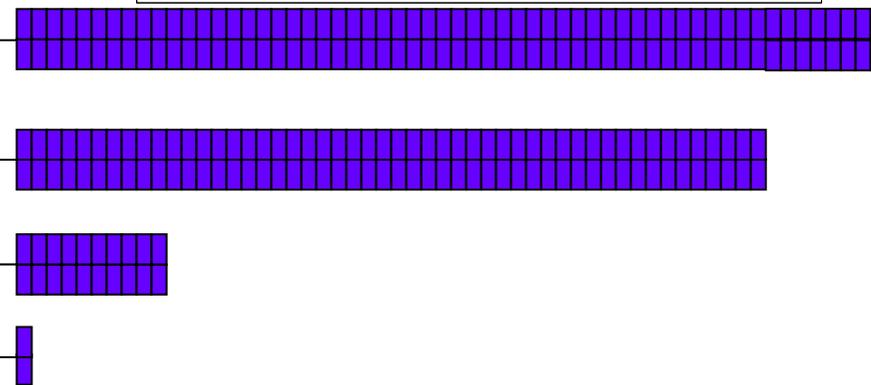
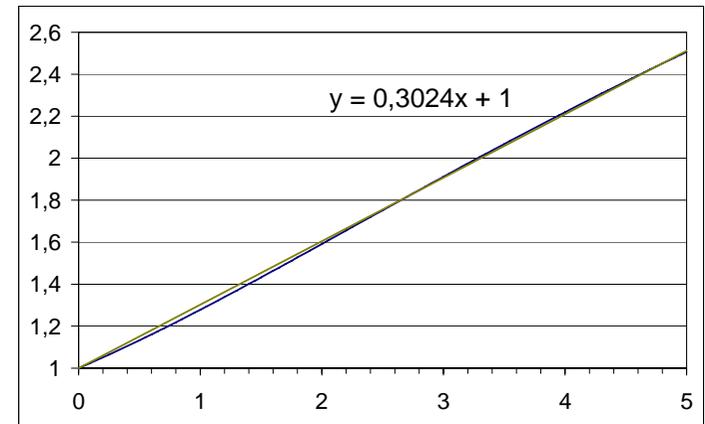
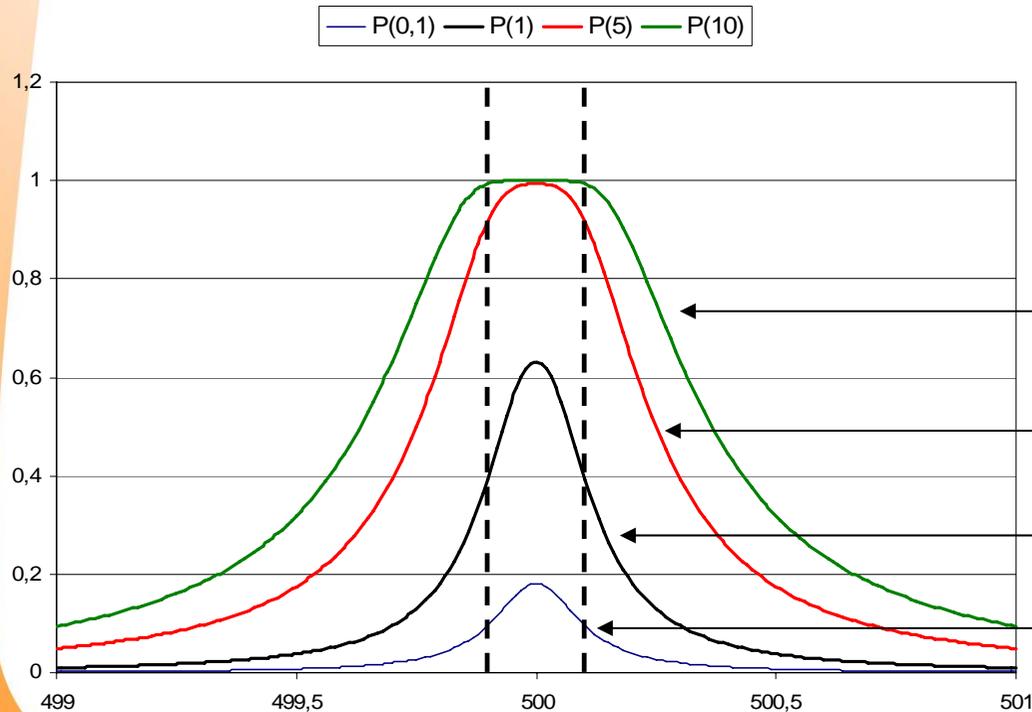
$$N_e = 3.34 \times 10^{14} (\Delta\lambda)^{1.488} \text{ cm}^{-3}$$

# Plasmas optiquement épais

$$I_\lambda(\lambda) = \beta_\lambda(\lambda) (1 - e^{-\tau(\lambda)}) A \Delta \Omega \quad (W / nm)$$

$$\tau(\lambda) = \alpha(\lambda) l = \frac{\lambda^4 A_{ik}}{8\pi c} \frac{g_k}{g_i} N_i P(\lambda) l$$

$$\frac{\Delta \lambda_M}{\Delta \lambda_S} \approx \sqrt{\frac{\tau_0}{2} - 1} = \sqrt{\ln \frac{2}{1 + e^{-\tau_0}}}$$



# Mesure de température électronique

- Hypothèse plasmas en ETL
- rapport d'intensité : deux raies provenant des niveaux différents d'atomes de degré d'ionisation identique

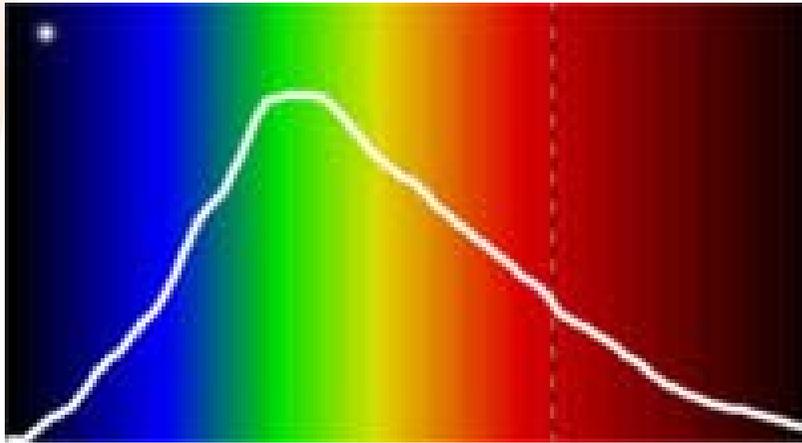
$$I(\lambda_0) = \frac{hc}{\lambda_0} A_{ul} N_u \frac{\Delta\Omega_0}{4\pi} \Delta V_0 S(\lambda_0) \quad ("V")$$

$$I(\lambda_1) = \frac{hc}{\lambda_1} A_{ji} N_j \frac{\Delta\Omega_1}{4\pi} \Delta V_1 S(\lambda_1) \quad ("V")$$

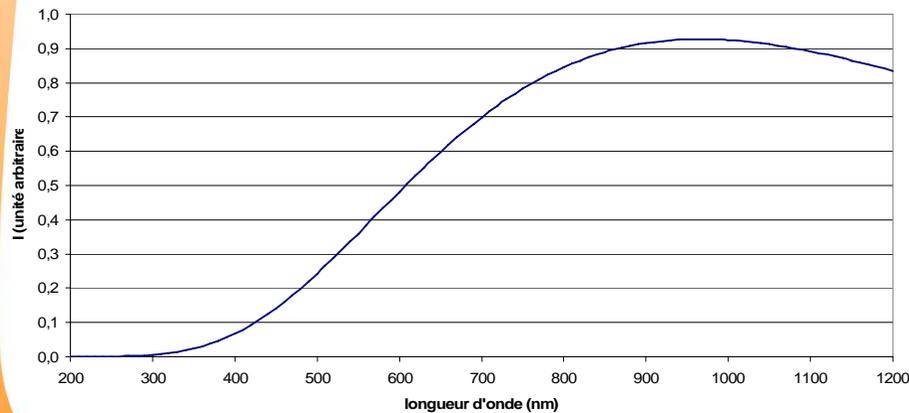
$$\frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_0)} = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \frac{A_{ji}}{A_{ul}} \frac{N_j}{N_u} \frac{S(\lambda_1)}{S(\lambda_0)} = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \frac{A_{ji}}{A_{ul}} \frac{S(\lambda_1)}{S(\lambda_0)} \frac{g_j}{g_u} e^{\frac{E_u - E_j}{kT_e}}$$

- étalonnage relatif en énergie
- diagramme de Boltzmann
- deux raies de même espèce, de degré d'ionisation différent

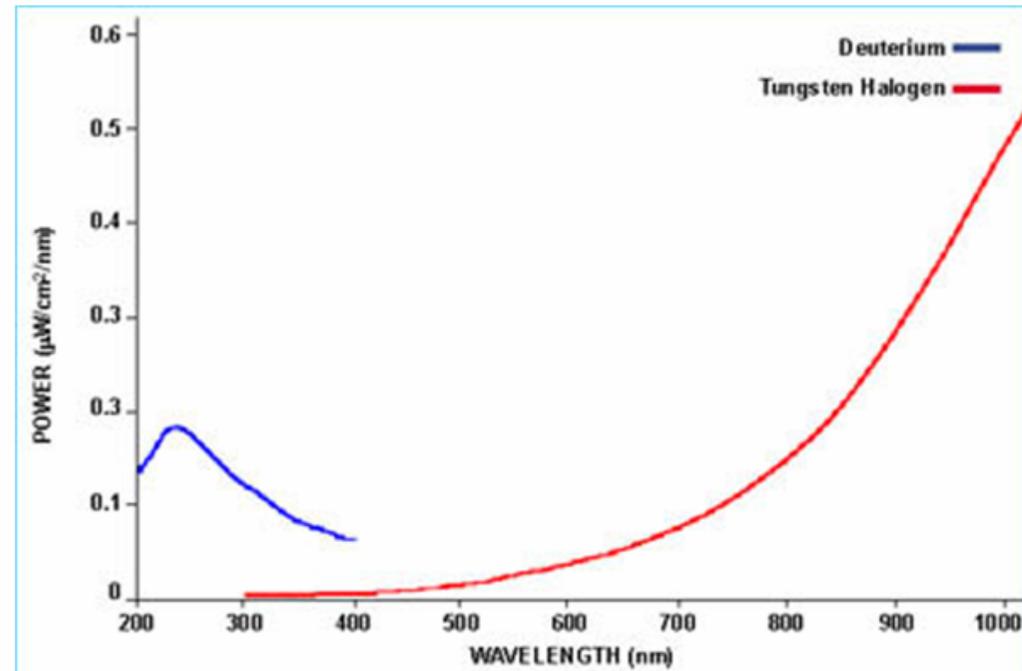
# Réponse spectrale et étalonnage relatif (ou absolu avec beaucoup de précaution)



Rayonnement d'un corps noir à 3000 K



DH-2000-CAL Spectral Output



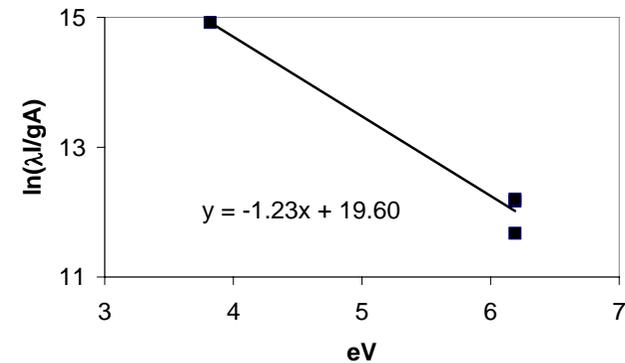
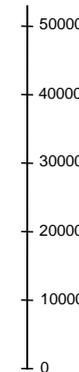
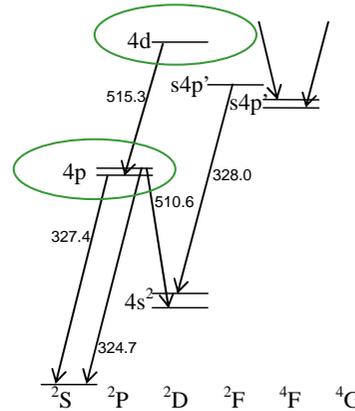
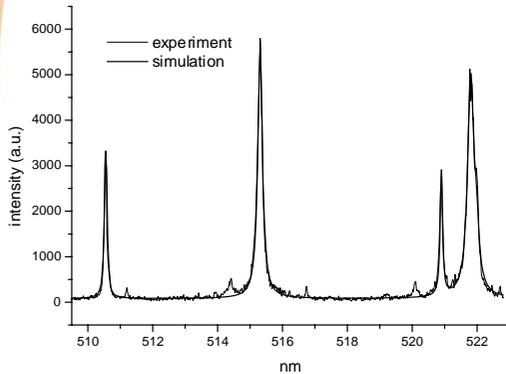
# Diagramme de Boltzmann

$$I(\lambda) = \frac{hc}{\lambda} A_{ul} N_u \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \Delta V S(\lambda) \quad ("V")$$

$$R = \frac{\lambda I(\lambda)}{g_u A_{ul} S(\lambda)} = \frac{hc\Delta\Omega\Delta V}{4\pi} \frac{N_T(T)}{F(T)} e^{\frac{-E_u}{kT}}$$

$$N_u = \frac{g_u}{F(T)} N_T(T) e^{\frac{-E_u}{kT}}$$

$$\ln(R) = \ln\left(\frac{\lambda I(\lambda)}{g_u A_{ul} S(\lambda)}\right) = \ln\left(\frac{hc\Delta\Omega\Delta V}{4\pi} \frac{N_T(T)}{F(T)}\right) - \frac{E_u}{kT}$$



**D Hong, G Sandolache, J M Bauchire, F Gentils and C Fleurier,**  
 IEEE Transaction on Plasma Science, vol. 33, no. 2, pp. 976-981, April 2005

A partir des raies de degrés d'ionisation différents : la connaissance de Ne est nécessaire.

Exemple AII et AIII (thèse de F. **Gentils**)



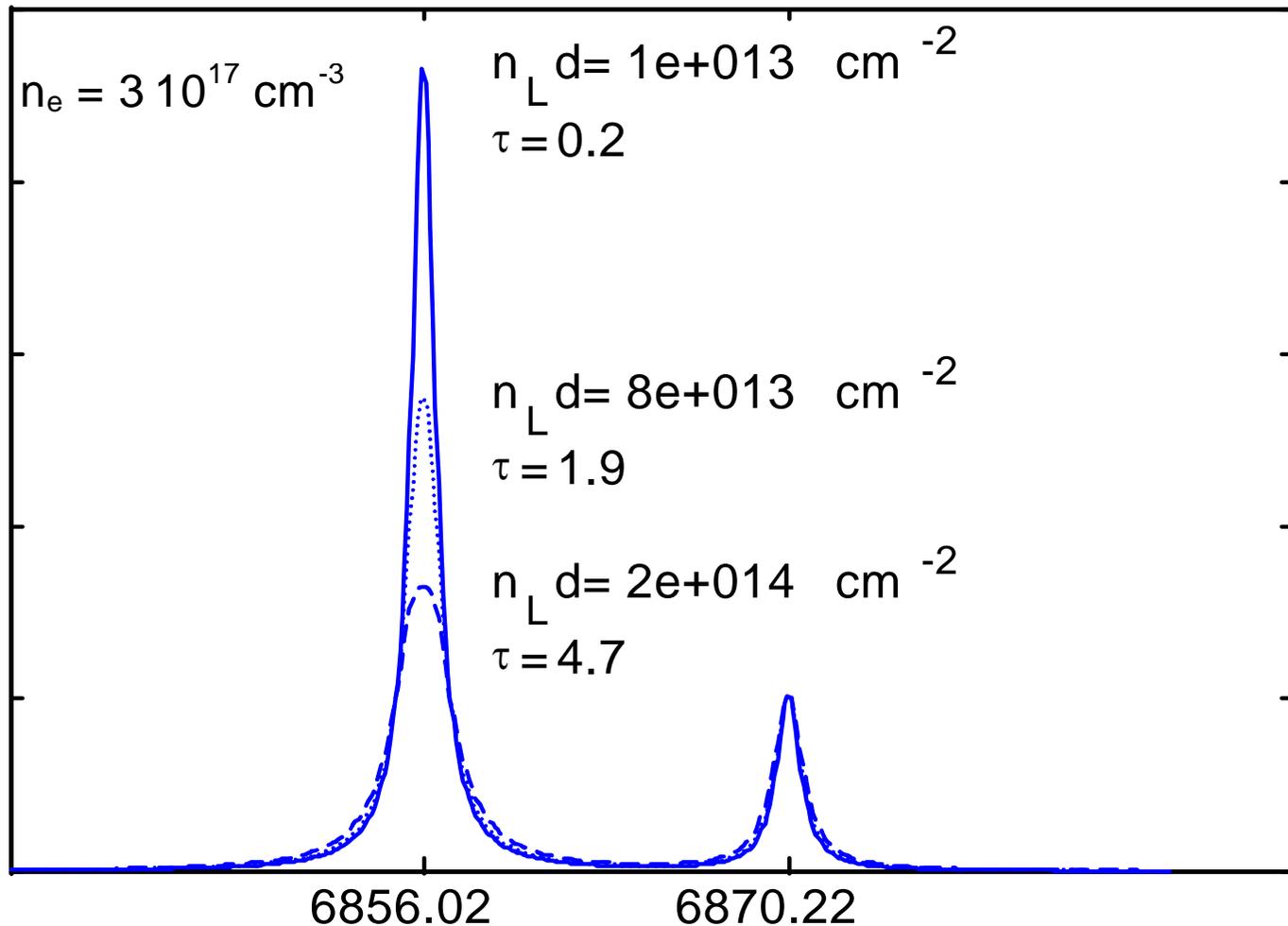
$$I(\lambda_0) = \frac{hc}{\lambda_0} A_{ul} N_u \frac{\Delta\Omega_0}{4\pi} \Delta V_0 S(\lambda_0) \quad ("V")$$

$$\frac{I_{AIII}(\lambda_1)}{I_{AII}(\lambda_0)} = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \frac{A_{AIII} g_{AIII}}{A_{AII} g_{AII}} \frac{S(\lambda_1)}{S(\lambda_0)} \frac{2}{N_e} \left( \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{\frac{-E_{AIII} + E_{AII} - E_i}{kT_e}}$$

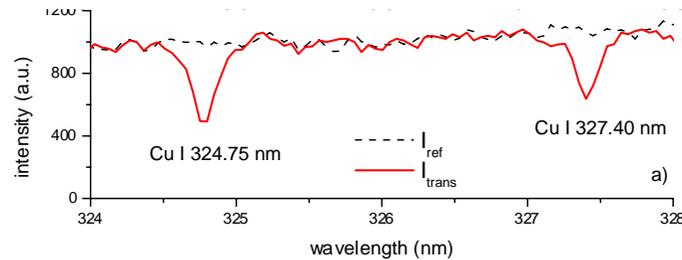
A partir des raies d'espèces différentes : il faut coupler cette mesure à un programme de calcul de la composition du plasma étudié en fonction de la température.

Exemple : SII et FI dans un disjoncteur utilisant SF6 (thèse de F. **Gentils**)

Influence de l'épaisseur d'optique : simulation des  
profils auto-absorbés des raies **F I 6856,02 et 6870,22**  
Å pour  $T=17000\text{K}$  (thèse de **F. Gentils**)



# Spectroscopie d'absorption



- Nécessité d'une source auxiliaire
- Montages optiques
- Mesure de la concentration de cuivre à l'état fondamental
- Mesure de la concentration de molécules C<sub>2</sub> et de la température de gaz
- Mesure de la population des états excités de cuivre et détermination de la température

# Source auxiliaire dite Z-pinch

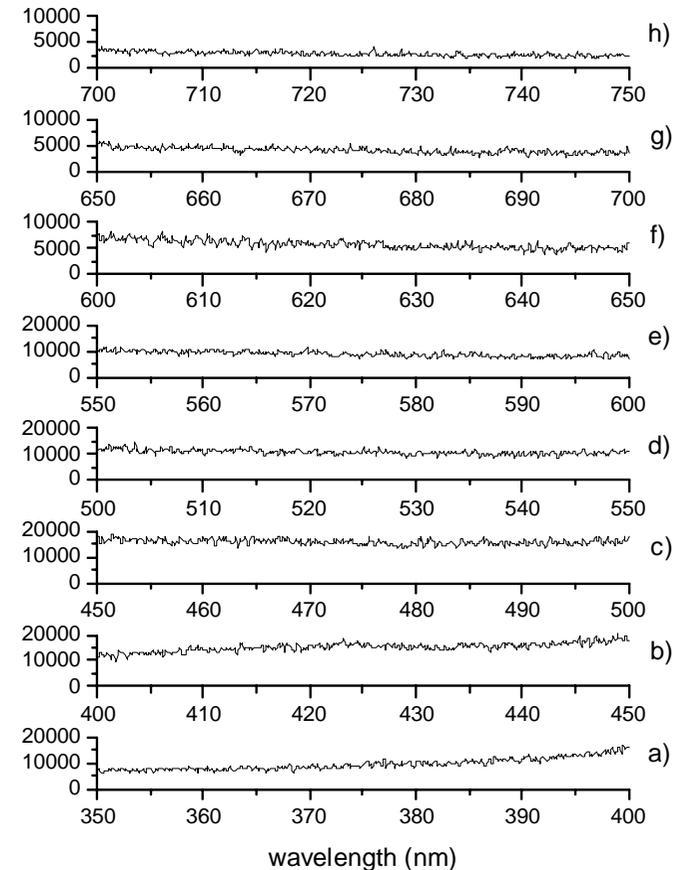
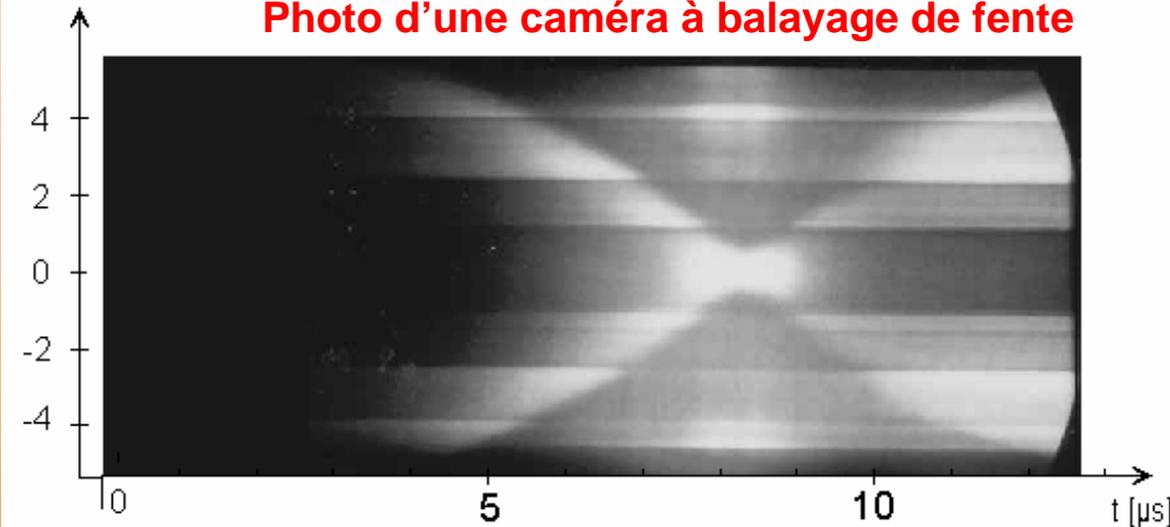


compression maximale :  
Instant pinch

décharge électrique rapide ( $T=40 \mu\text{s}$ )  
dans un tube cylindrique ( $\phi=10\text{cm}$ )

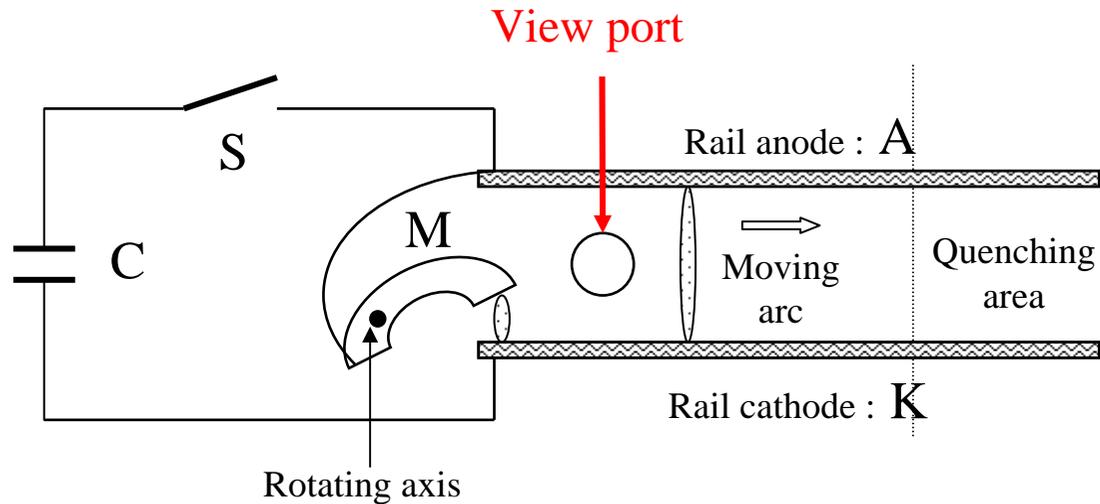
plasma radius [cm]

Photo d'une caméra à balayage de fente

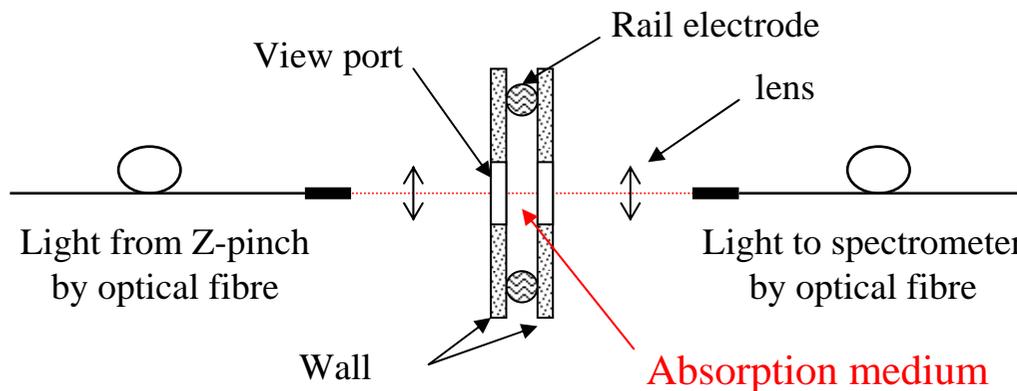


**D Hong, G Sandolache, K Lan, J M Bauchire, E Le Menn, C Fleurier.**  
A radiation source developed for broad band optical absorption spectroscopy  
measurements,  
Plasma Sources Sci. Technol., 12 (2003) 1-7.

# Montage expérimental

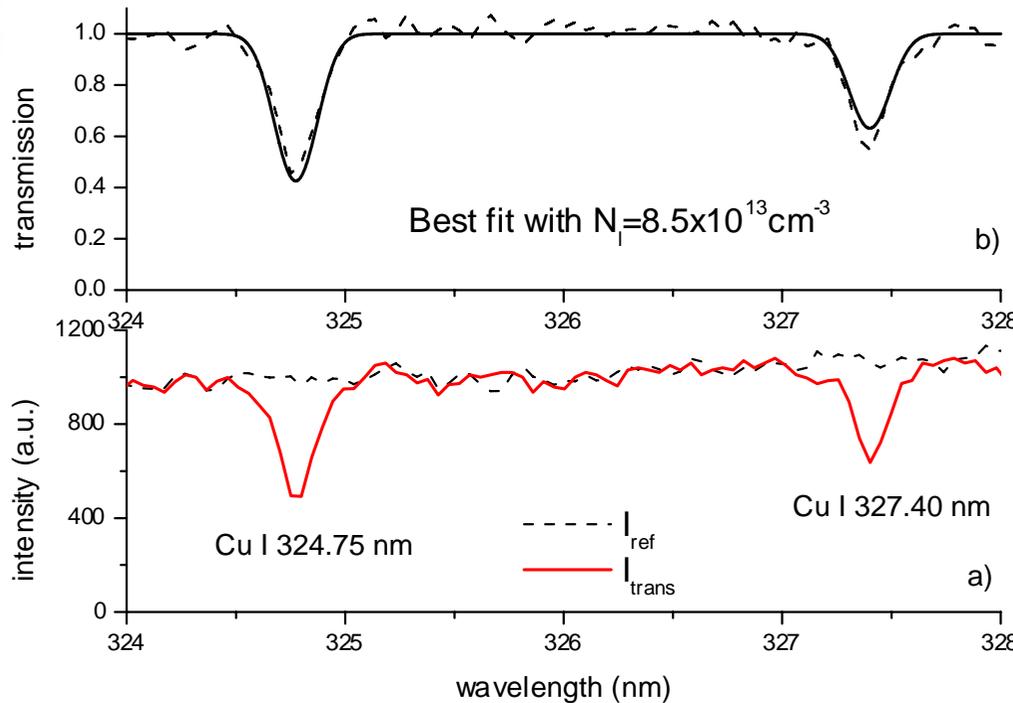


**i) side view**



**ii) end view**

# Spectre d'absorption → densité des atomes cuivre



Coefficient d'absorption :

$$\alpha_T(\lambda) = \frac{\lambda_0^4 A_{ik}}{8\pi c} \frac{g_k}{g_i} N_i S(\lambda)$$

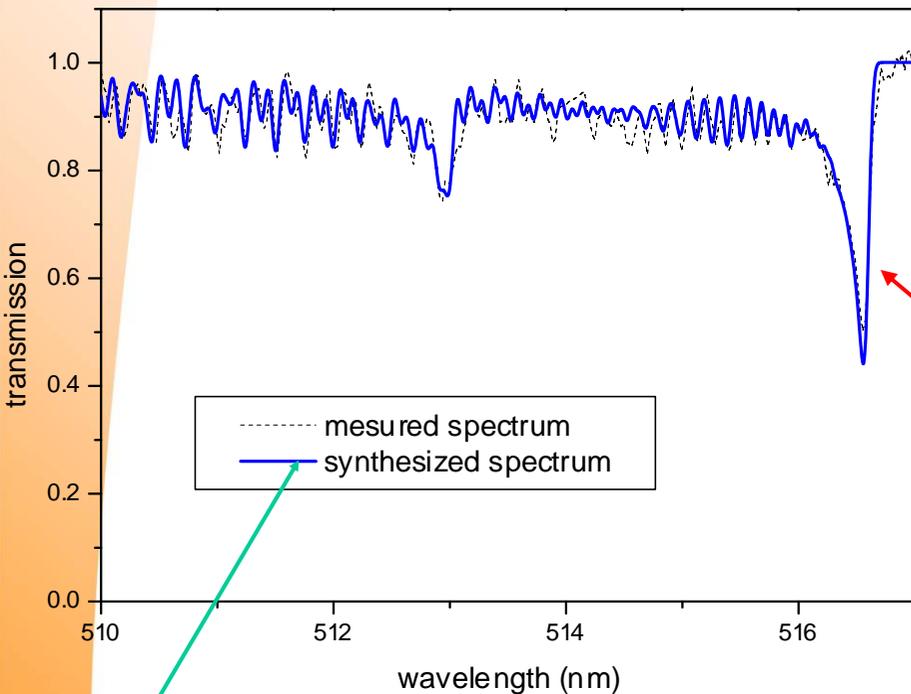
Synthèse d'un spectre de transmission (d'après la loi Beer-Lambert) :

$$t_T = e^{-\alpha_T(\lambda) l_p} * F_a$$

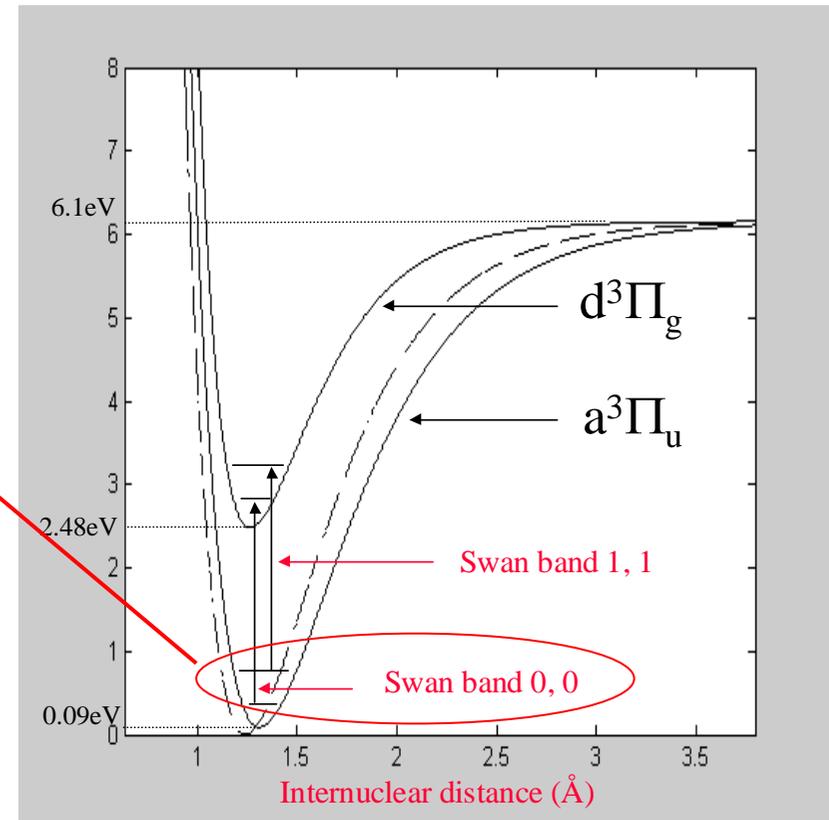
avec  $F_a$  : fonction d'appareil pour un milieu homogène

# Spectre d'absorption moléculaire

## C<sub>2</sub> bandes Swan (0,0) et (1,1)



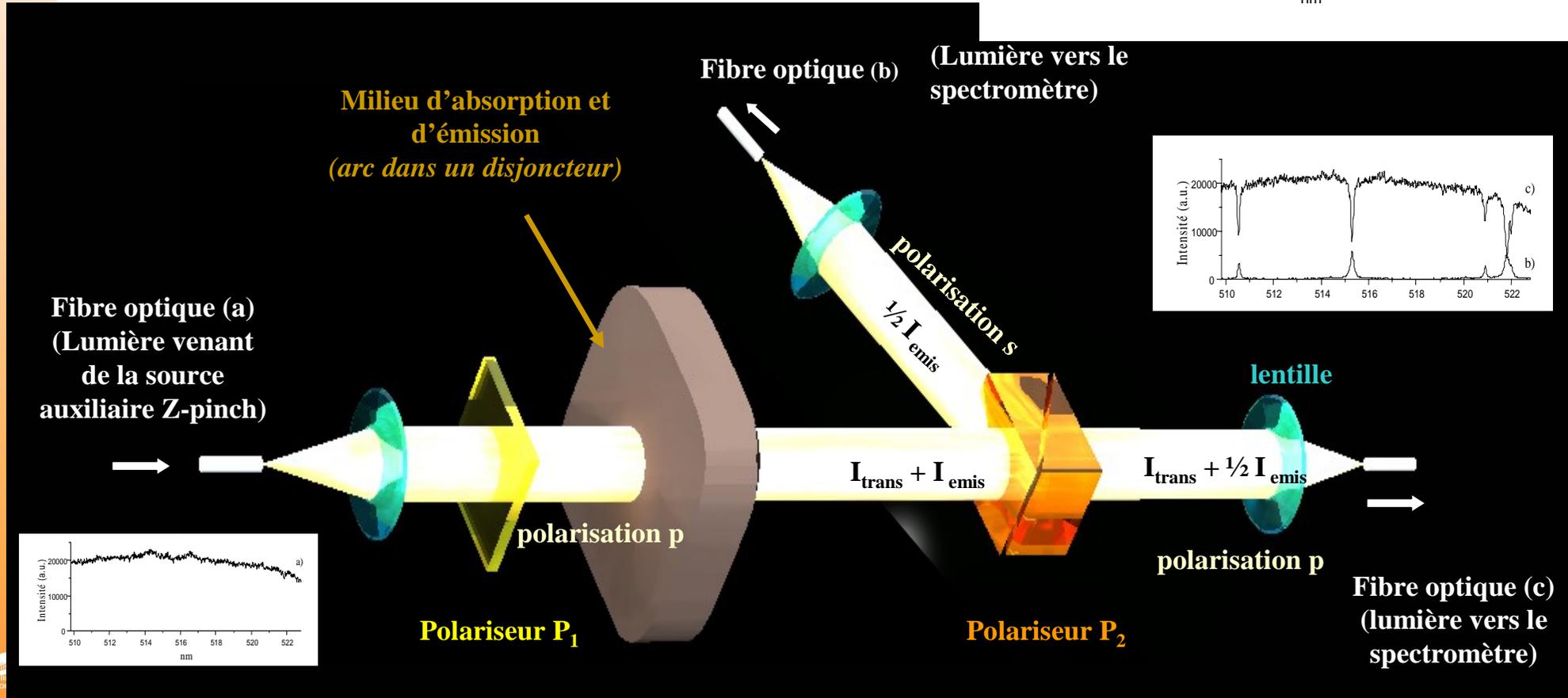
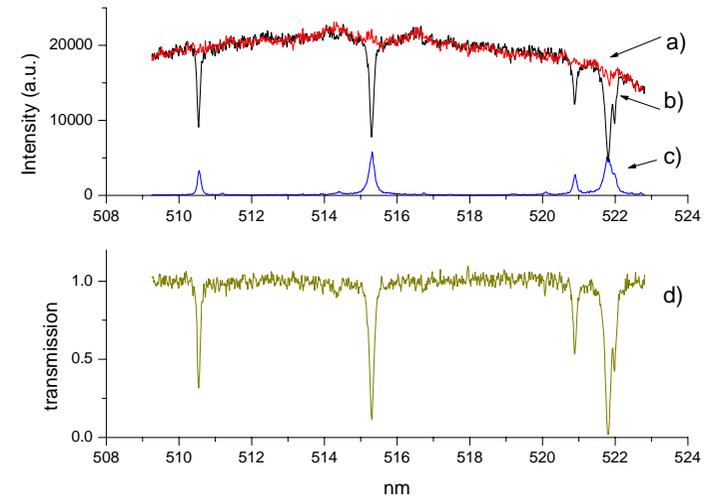
$$N_{C_2} = 6.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$
$$T_r = T_v = 3200 \text{ K}$$



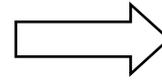
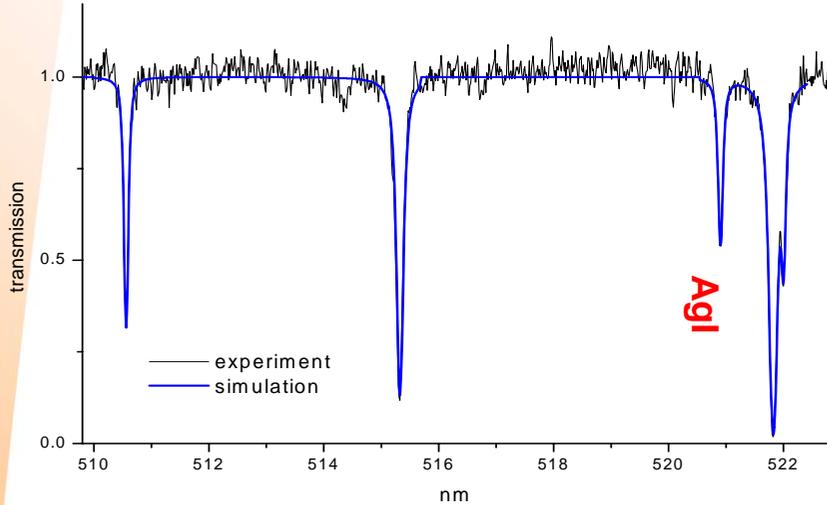
# Absorption large bande par un arc

L'émission du milieu sondé n'est pas négligeable

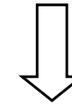
$$S_d = \frac{S_b - S_c}{S_a}$$



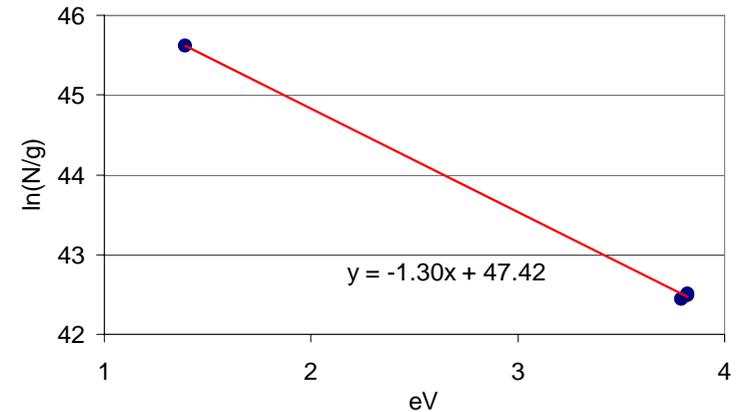
# Transmission de l'arc (raies CuI et AgI)



CuI (nm)	$E_l$ (eV)	$N_l$ ( $m^{-3}$ )
510.55	1.39	$3.9 \times 10^{20}$
515.32	3.79	$5.4 \times 10^{18}$
521.82	3.82	$1.1 \times 10^{19}$
522.01	3.82	$1.2 \times 10^{19}$



Hypothèse ETL



$$T_e = \frac{1}{-1.3} = 0.77 \text{ eV} \approx 9000 \text{ K}$$

D Hong, G Sandolache, J M Bauchire, F Gentils and C Fleurier,  
**IEEE Transaction on Plasma Science**, vol. **33**, no. 2, pp. 976-981, April **2005**

# Conclusion



- La spectroscopie permet d'obtenir des données de l'arc et de son environnement dans un disjoncteur, ces données sont généralement non accessibles par d'autres techniques de mesure.
- Ces méthodes sont utilisables sur les autres types de plasma à condition de veiller à ce que les hypothèses utilisées soient réalistes.

**Merci pour votre attention !**