

Caractérisation expérimentale des arcs de foudre dans un contexte aéronautique

Rafael SOUSA MARTINS¹, Clément ZAEPFELL¹, Philippe LALANDE¹,
Philippe RIVIERE² et Anouar SOUFIANI²

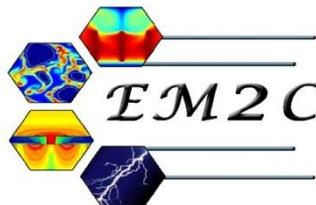
JERT 2018 - vendredi 23 novembre 2018

¹ONERA – Unité Foudre, Plasma et Applications (FPA)

²Laboratoire EM2C – CNRS UPR288, CentraleSupélec



CentraleSupélec



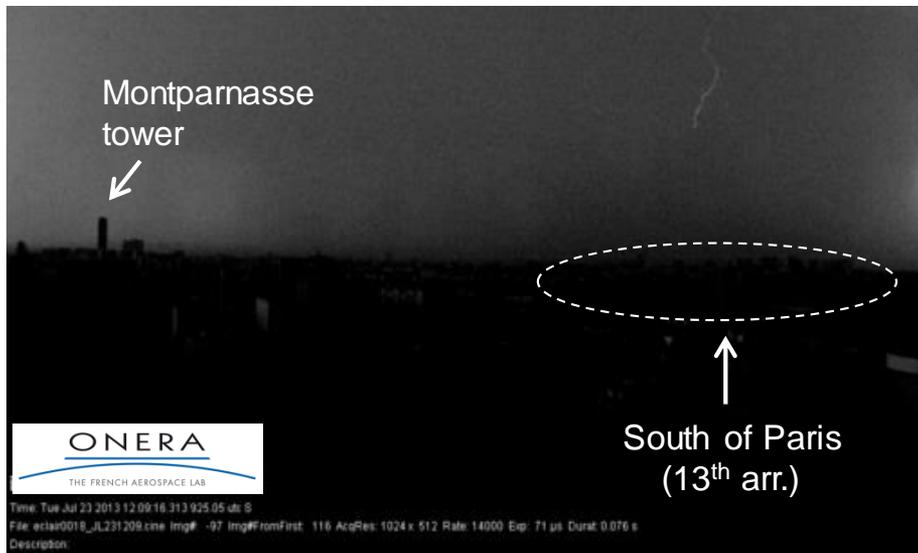
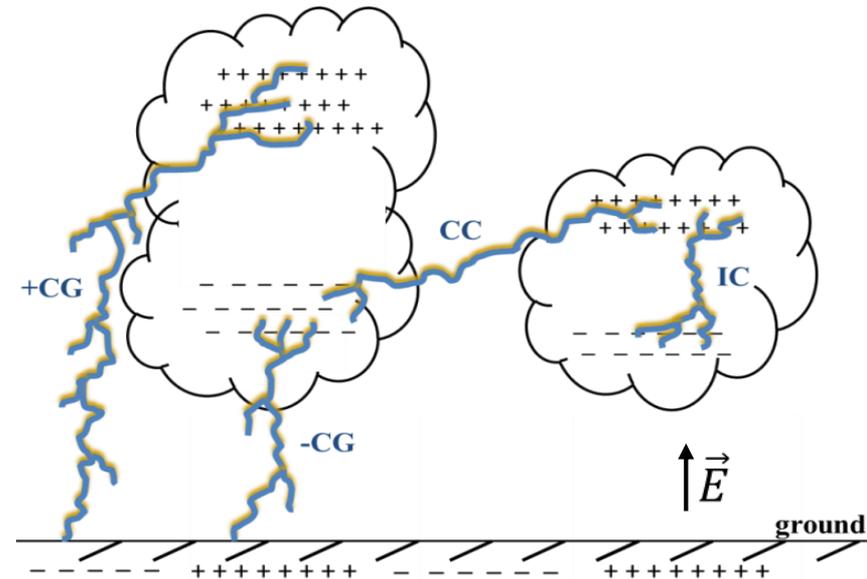
- I. La foudre dans un contexte aéronautique
- II. Caractérisation de l'arc libre :
 - spectroscopie d'émission
- III. Caractérisation de l'interaction arc/matériau :
 - thermographie infrarouge et calcul du flux radiatif
- IV. Conclusion et perspectives

- I. La foudre dans un contexte aéronautique
- II. Caractérisation de l'arc libre :
 - spectroscopie d'émission
- III. Caractérisation de l'interaction arc/matériau :
 - thermographie infrarouge et calcul du flux radiatif
- IV. Conclusion et perspectives

I. Context: Lightning Strike

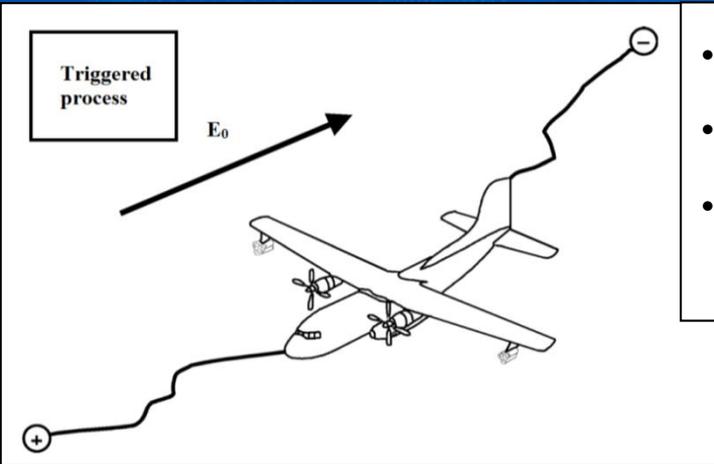
➤ Lightning Overview

- Distribution of electric charges in the cloud
 - Significant atmospheric electric field
- Lightning : high current transient electrical discharge
 - Path length of few km / current of hundreds of kA

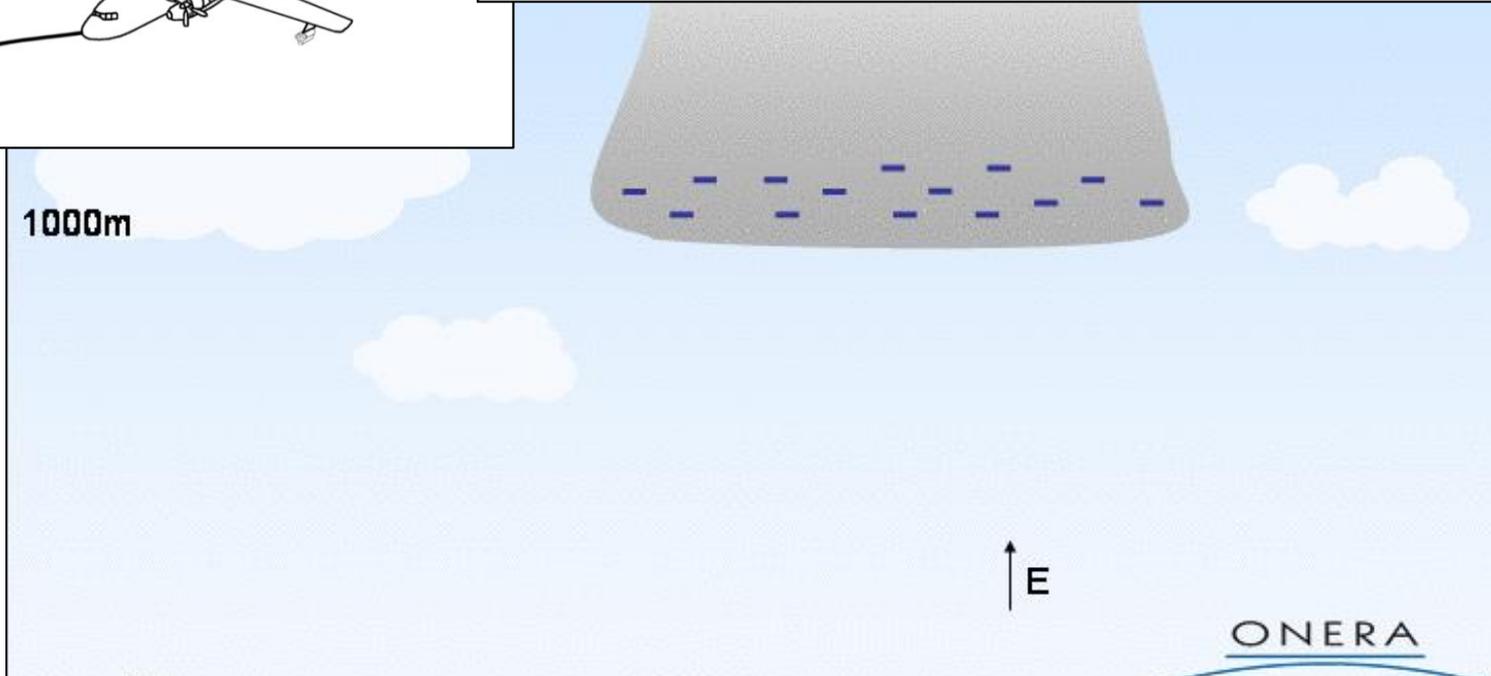


rate : 14 kfps
exposure : 71μs

I. Context: Lightning on aircraft



- Lightning strike to aircraft: interception or **triggering (90%)**
- An airline is stroke about every **1500 flight hours**
- In-service lightning statistics: Dassault Falcon (Roussel et al. (2015))
94% strikes occurrences during take-off or landing (**35 of 37**)



➤ Lightning effects on aircraft

- Indirect effects → EM coupling (cables, electronic components, etc...)

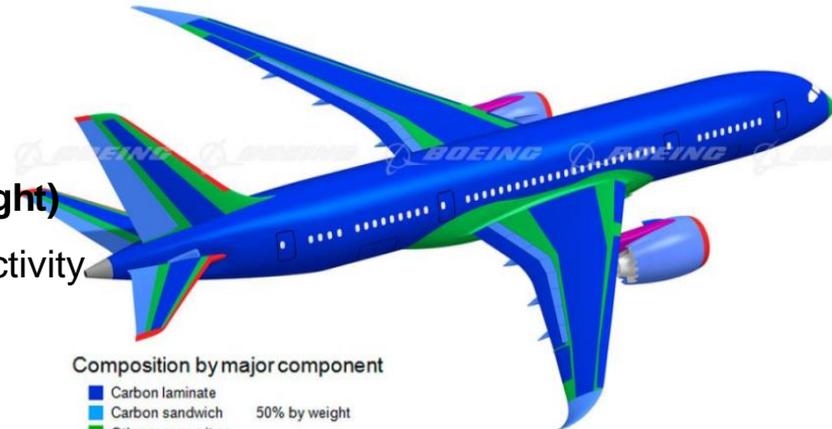
- **Direct effects** → thermo-mechanical constraints (deformation, puncture, delamination, etc...)

I. New challenges: fuel saving

➤ Modern aeronautical construction

- Carbon fiber composite material
- Airbus A350XWB and Boeing 787 Dreamliner (~50% weight)
- Composites vs Metal: - low thermal and electrical conductivity

- **Higher constraints:**
- Protection (metallic mesh)
 - Increase of weight and costs
 - Certification : Complexes and costly laboratory tests



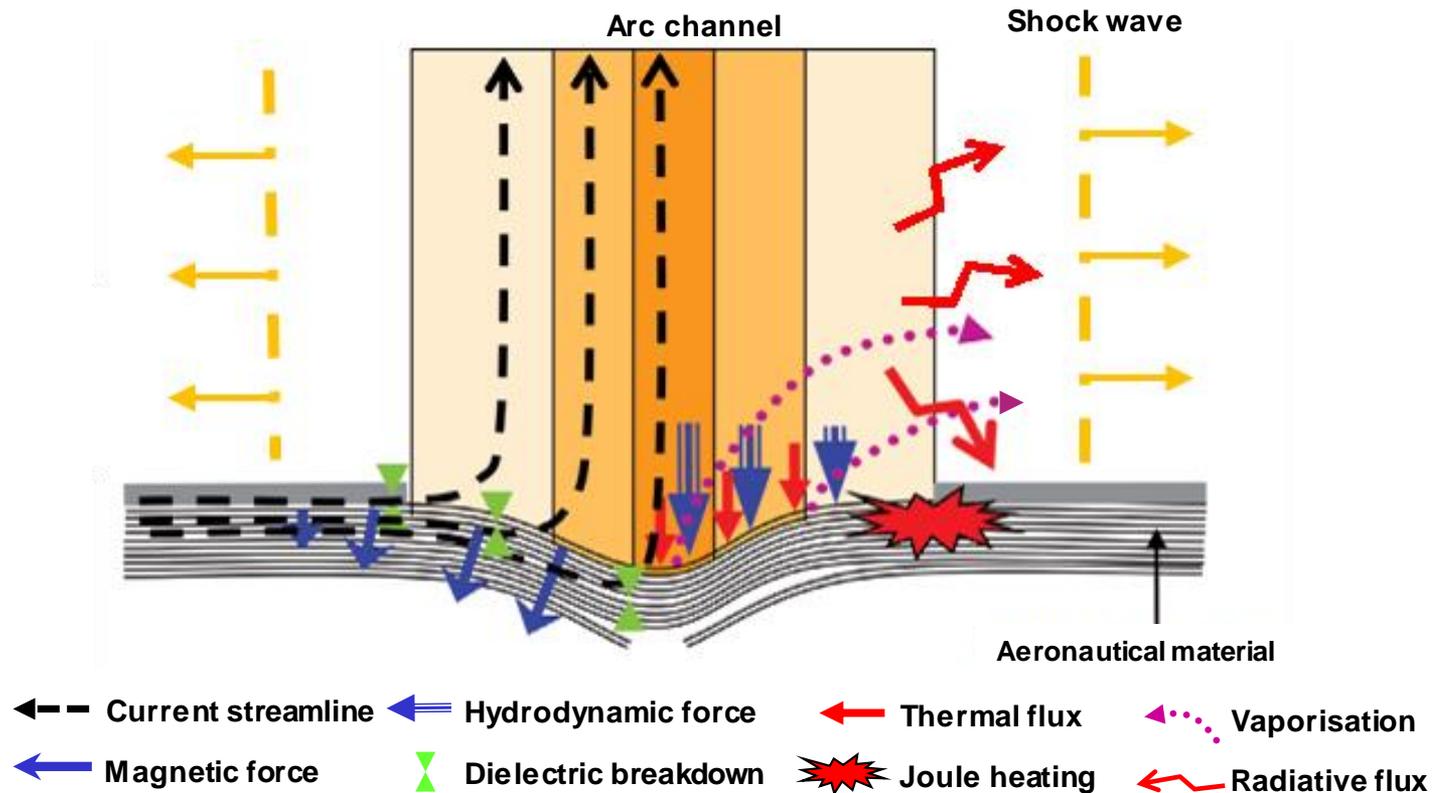
Copyright © 2012 The Boeing Company

➤ Objectives: Characterization of lightning arcs and arc-material interaction

- Understanding of lightning direct effects
 - Reliable and predictive models
 - Experimental database for model and code validations
- Optimization of lightning protection systems

I. Lightning arc: simplified picture

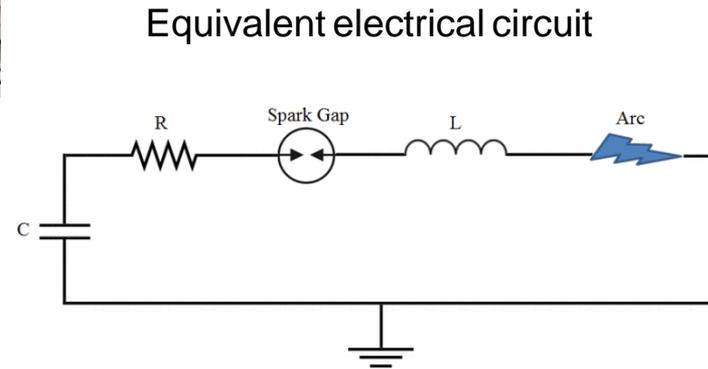
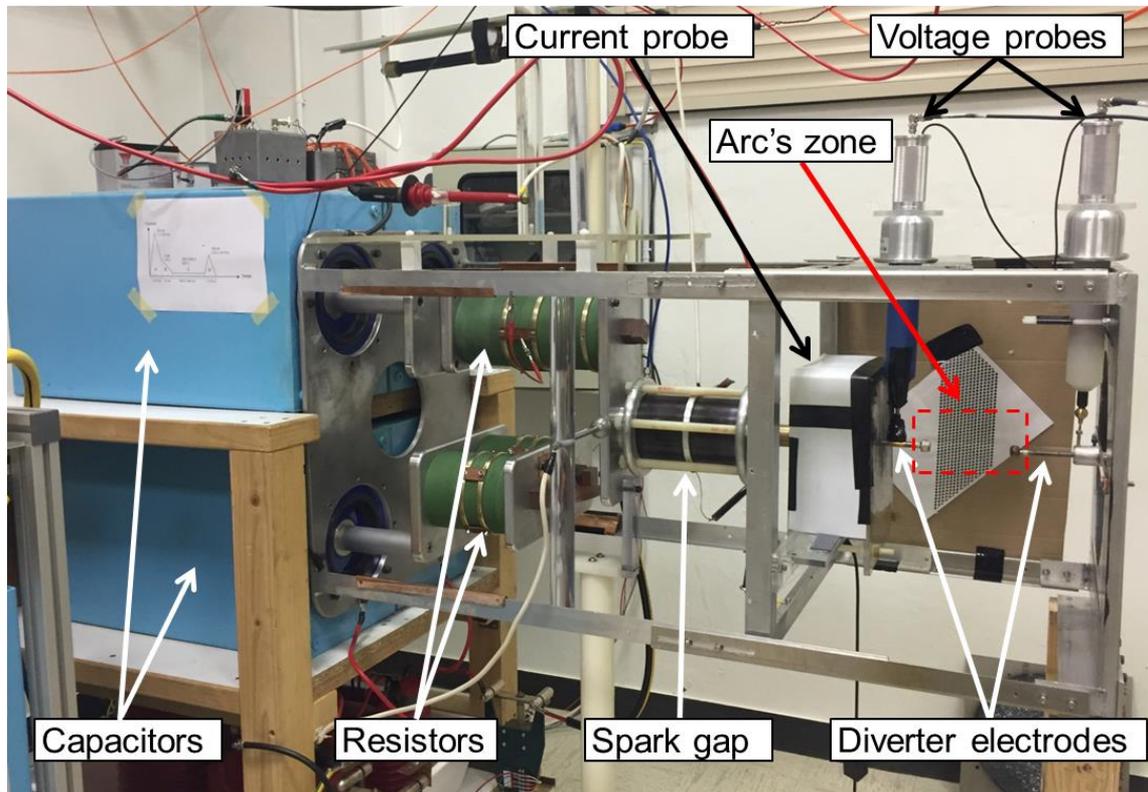
➤ Characteristics of lightning arcs



- **High current** → Joule heating; **temperature** increasing
- **Significant shock wave**; pressure increasing within arc
- **Many physical phenomena**: electromagnetism, fluid mechanics, radiative transfers, ...

- I. La foudre dans un contexte aéronautique
- II. **Caractérisation de l'arc libre :**
 - spectroscopie d'émission
- III. Caractérisation de l'interaction arc/matériau :
 - thermographie infrarouge et calcul du flux radiatif
- IV. Conclusion et perspectives

II. Experimental setup: GRIFON generator



Characteristics:

- $C = 208 \mu\text{F}$,
- $R = 193 \text{ m}\Omega$
- $L \sim 1 \mu\text{H}$

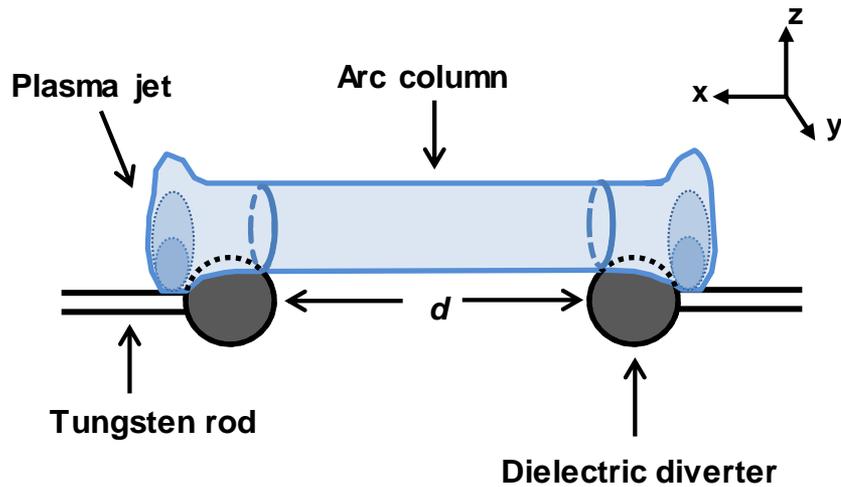
For a **100 kA current wave**:

- $V_{\text{CHARGE}} = 27 \text{ kV}$
- $E_{\text{STOCKED}} \sim 75 \text{ kJ}$

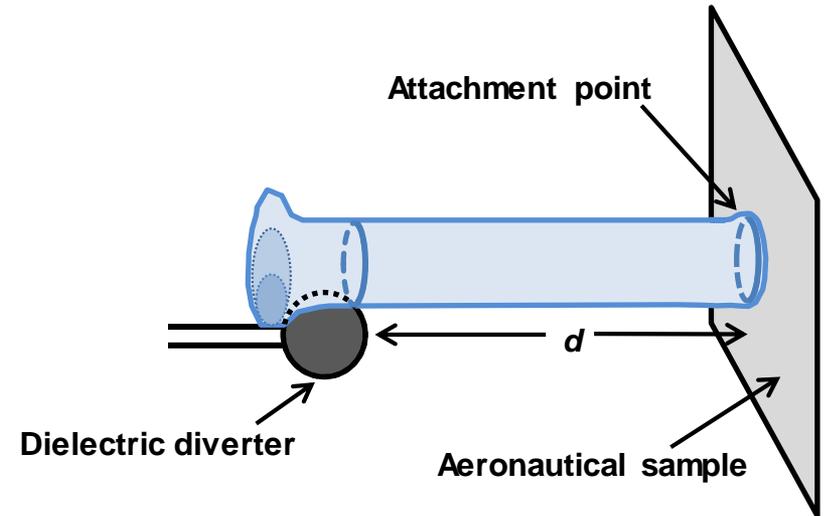
$T^+ : -0.273 \text{ ms}$

II. Experimental setup: Electrodes

For the free lightning channel



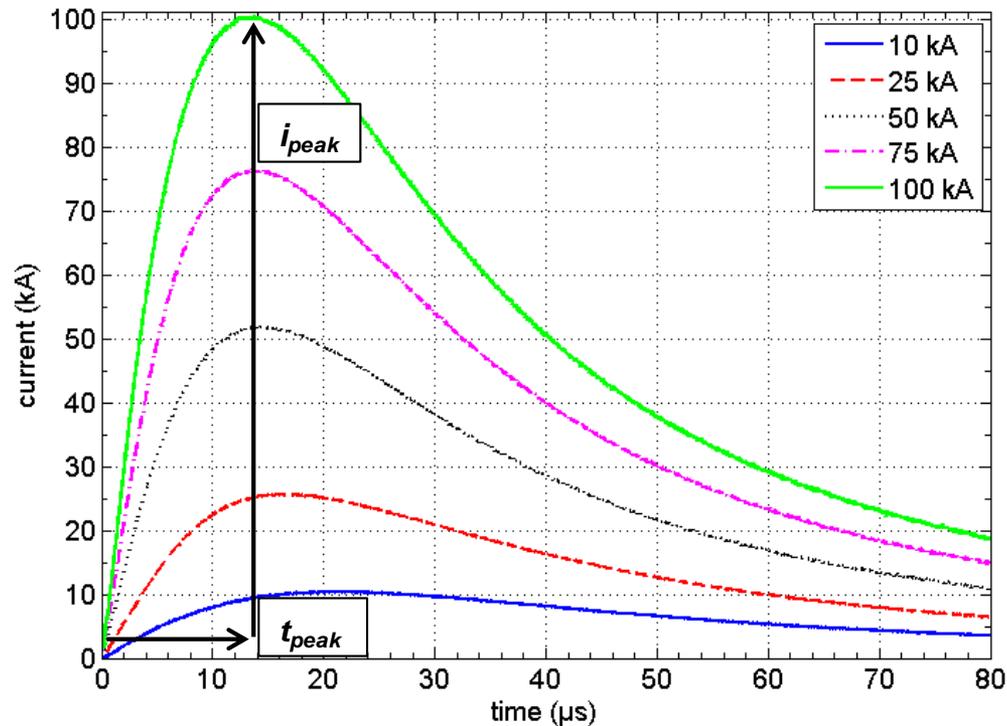
For the interaction arc/material



- Length d adjustable between **60 à 180 mm** (triggering: ignition **wire**)

II. Experimental setup: current waveform

The current is the main quantity that drives all others properties



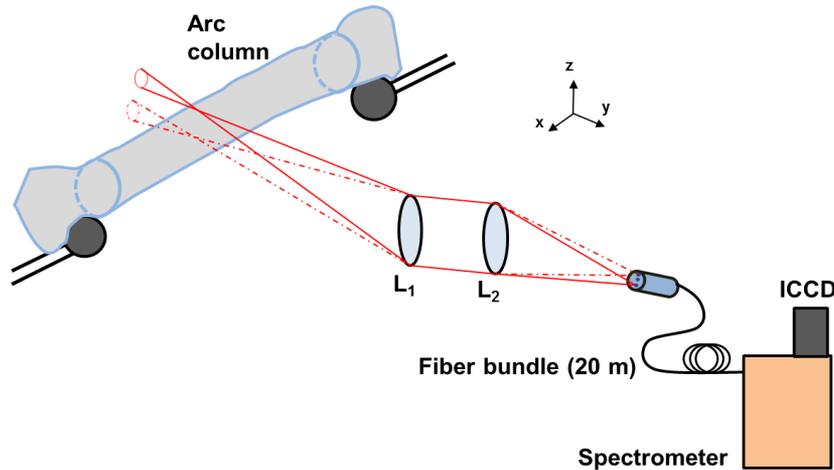
Parametric study: 5 peak levels (D-wave and 4 fractions)

- $I_{peak} = 10 \text{ kA to } 100 \text{ kA}$
- $t_{peak} = 13.5 \mu\text{s @ } 100 \text{ kA; } 21.3 \mu\text{s @ } 10 \text{ kA}$
- Reproducibility in 40 shots: 0.3 kA maximum standard deviation at 100 kA

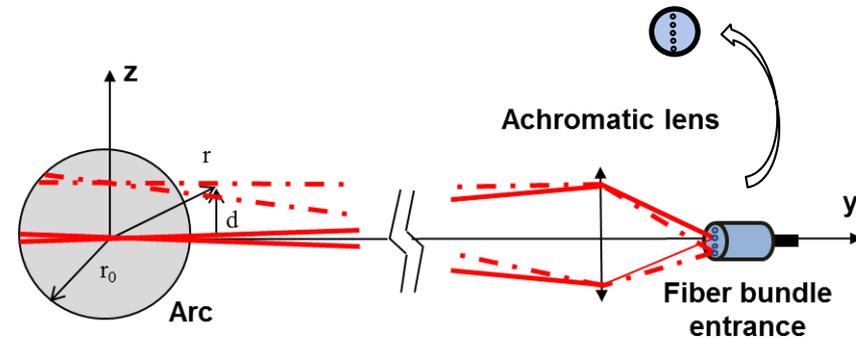
II. Diagnostics optiques de l'arc

Spectroscopie d'émission

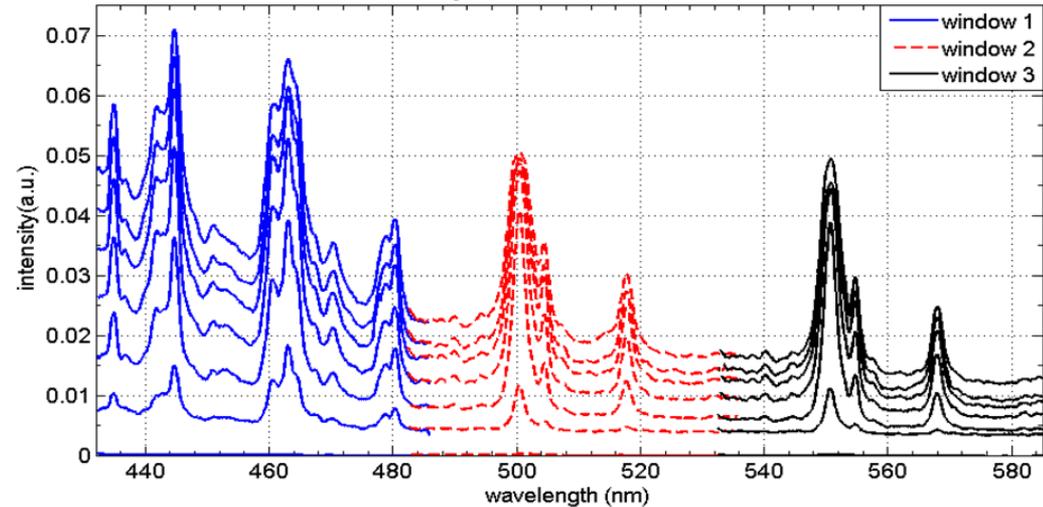
Caractérisation des grandeurs thermodynamiques intensives



Cordes de collection dans l'arc



Exemple d'acquisition (16 cordes) Multiplets de N II et O II



Spectromètre Acton SP-2750	Longueur focale 750 mm
Camera ICCD PI-Max 2	512 x 512 pixels Temps d'intégration : 200 ns
Fente d'entrée	20 μ m
Rés. spectrale	Réseaux : 300 traits (0.104 nm) 600 traits (0.052 nm)
Rés. spatiale	16 fibres, distante de 1.2 à 2 mm
Synchro	Photodiode

II. Caractérisation de l'arc libre

➤ Spectroscopie d'émission

- Caractérisation spatio-temporelle
- Détermination des grandeurs intensives (température, densité électronique et pression)
- Zone spectrale : sensibilité à la température (20 à 40 kK) → 3 plages spectrales **de 430 à 585 nm**
- Choix de la méthode : considération de **l'épaisseur optique** (milieu mince ou pas?)

$$\tau = \kappa \cdot l \rightarrow \text{Longueur des cordes : 1 à 6 cm}$$

- Coefficient d'absorption (à l'ETL) → $f(T, N_e)$

$$\kappa_{line}(\lambda, T, N_e) = \frac{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}{2hc^2} \sum_{line} \frac{hc}{4\pi} \left(\frac{g_u A_{ul}}{\lambda_{line}} \right) \frac{N_o(T, N_e)}{Q(T)} e^{-\frac{E_u}{kT}} f(\lambda - \lambda_{line}, T, N_e)$$



Constantes spectroscopiques

- 192 raies ioniques (N⁺ et O⁺)
 - Dégénérescences
 - Coefficients d'Einstein
 - Longueur d'onde
 - Energie du niveau haut
- NIST_lines

Fonction partition

- Dégénérescences
 - Energie des niveaux
- NIST levels

$$Q(T) = \sum_i g_i e^{-E_i/kT}$$

Population de l'espèce

- EM2C database
- Composition plasma d'arc
- Fonction de T et P
- Bijective entre P et N_e

Profil de raie

- Élargissement Doppler (< 0.01 nm)
- Élargissement collisionnel
- Van der Walls (particules neutres)
- **Stark (particules chargées)**
~ 0.5 nm à $N_e > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
- Profil Lorentzien
- Paramètres Stark (Konjevic et al. 2002)

$$f(\lambda, T, N_e) = \frac{1}{\pi \gamma^2 + (\lambda - \lambda_{line})^2}$$

II. Caractérisation de l'arc libre

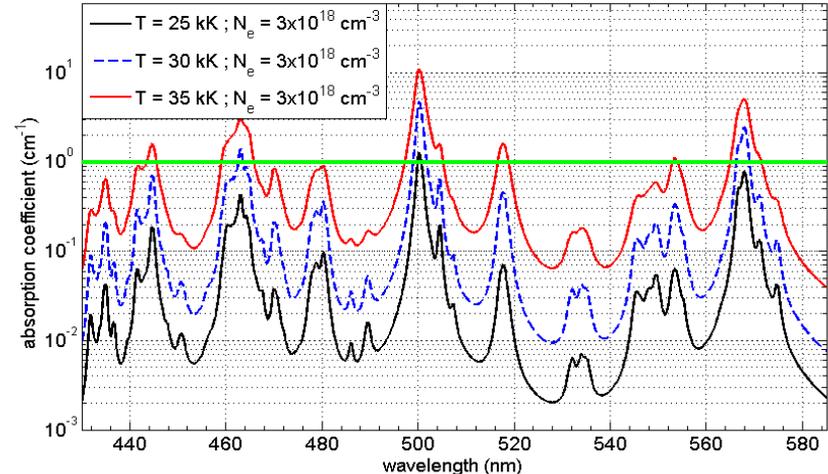
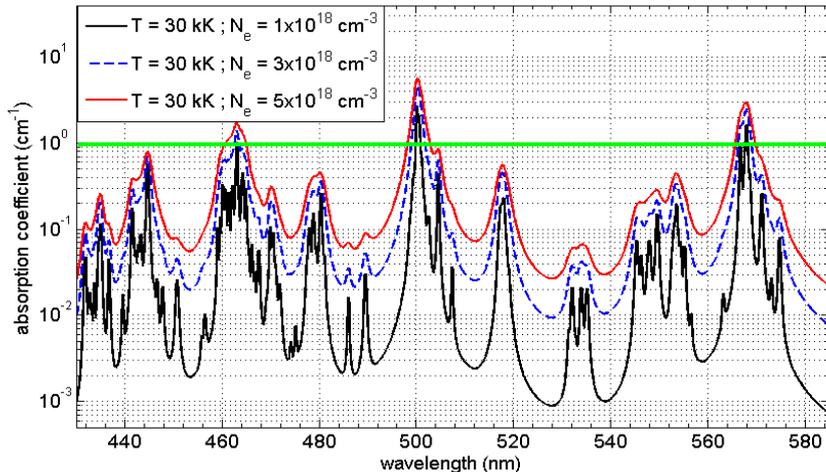
➤ Spectroscopie d'émission

- Caractérisation spatio-temporelle
- Détermination des grandeurs intensives (température, densité électronique et pression)
- Zone spectrale : sensibilité à la température (20 à 40 kK) → 3 plages spectrales **de 430 à 585 nm**
- Choix de la méthode : considération de **l'épaisseur optique** (milieu mince ou pas?)

$$\tau = \kappa \cdot l \rightarrow \text{Longueur des cordes : 1 à 6 cm}$$

- Coefficient d'absorption (à l'ETL) → $f(T, N_e)$

$$\kappa_{line}(\lambda, T, N_e) = \frac{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}{2hc^2} \sum_{line} \frac{hc}{4\pi} \left(\frac{g_u A_{ul}}{\lambda_{line}} \right) \frac{N_o(T, N_e)}{Q(T)} e^{-\frac{E_u}{kT}} f(\lambda - \lambda_{line}, T, N_e)$$

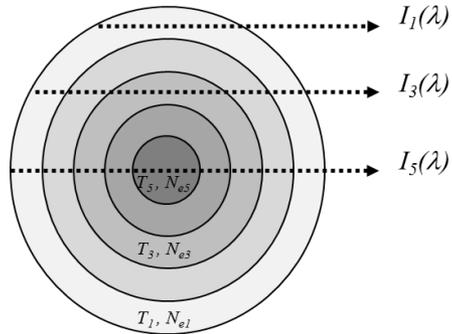


Épaisseur optique > 1 → milieu non-optiquement mince !
Interdit les méthodes classiques (inversion d'Abel, droite de Boltzmann, etc.)

II. Caractérisation de l'arc libre

➤ Equation du transfert radiatif

Alternative pour un milieu non-optiquement mince → Résolution de l'ETR par couche :



$$I_m(\lambda) = \sum_{i=1}^{i=2m-1} I_{\lambda i}^0 (1 - e^{-\kappa_{\lambda i} x_i}) e^{-\sum_{j=i+1}^{2m-1} \kappa_{\lambda j} x_j}$$

$$\kappa(\lambda) = \kappa_{line} + \underbrace{A\lambda + B}_{\text{Contribution du continuum}}$$

Contribution du continuum

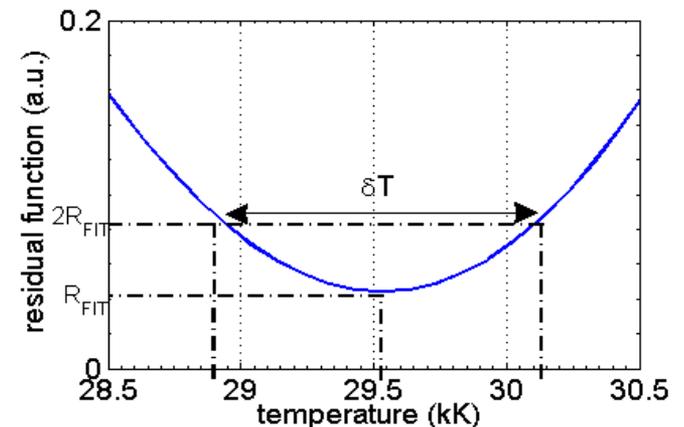
Spectre calculé :

$$I_{calc}(\lambda) = I_m(\lambda) * I_{slit}(\lambda)$$

Minimisation par moindres carrés :

$$R(T, N_e) = \left[\sum_{\lambda=\lambda_i}^{\lambda_f} (I_{\lambda}^{meas} - I_{\lambda}^{calc}(T, N_e))^2 \right]^{1/2}$$

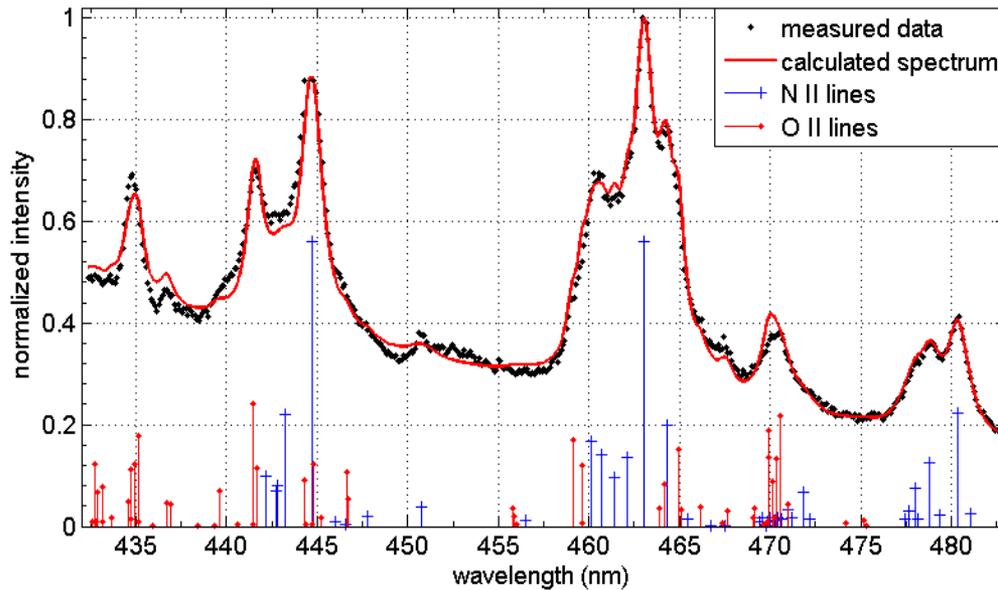
Critère pour l'erreur du paramètre :



II. Caractérisation de l'arc libre

➤ Résolution de l'ETR par couche : exemple d'ajustement

Pour la plage spectrale
(431-485nm) à 100 kA

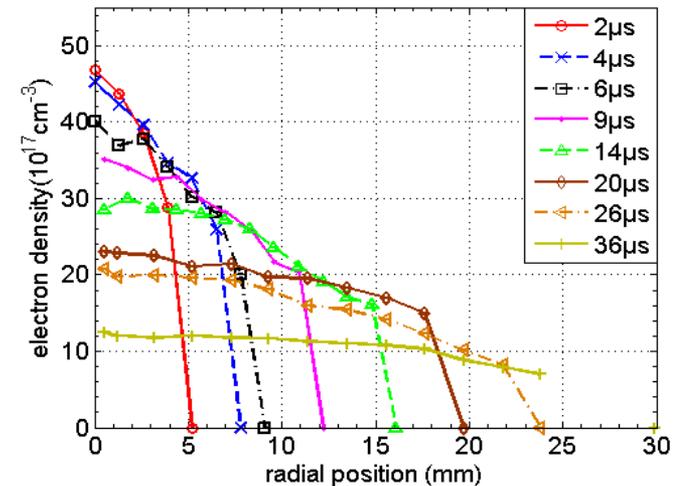
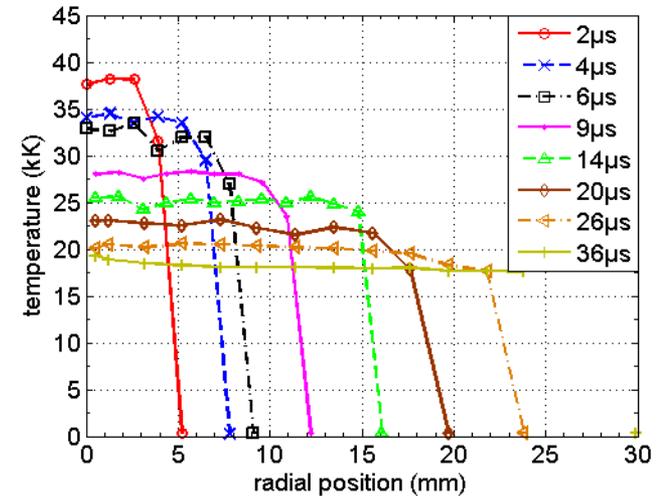


Erreur avec critère du résidu :

~ 25% pour Ne

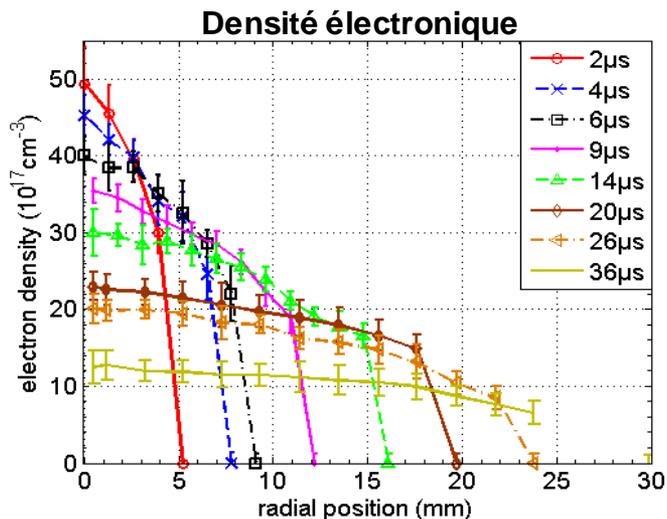
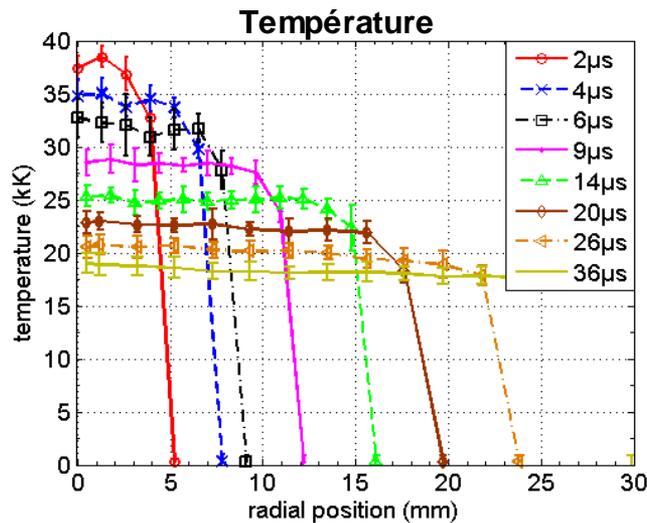
~ 10% pour T

Résultats pour T et N_e sur la plage

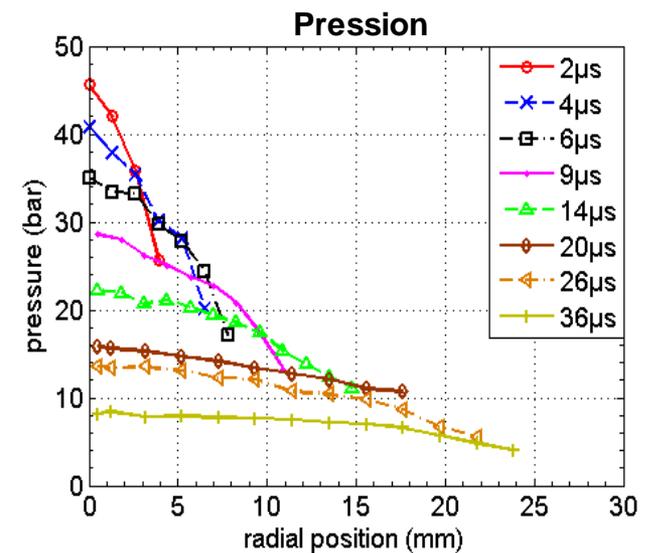
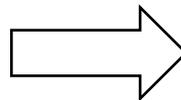


II. Caractérisation de l'arc libre

➤ Moyenne des résultats sur les 3 plages spectrales (100 kA)



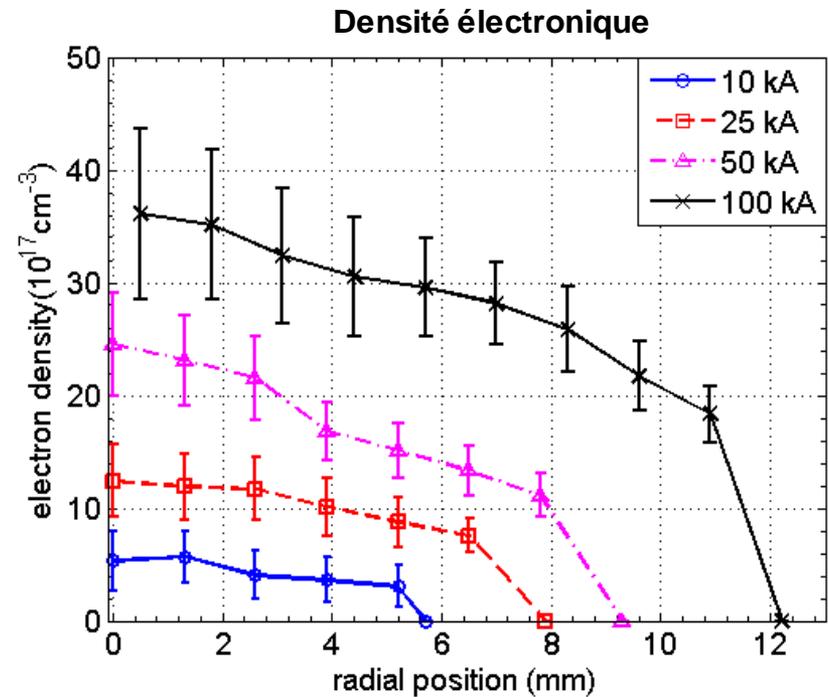
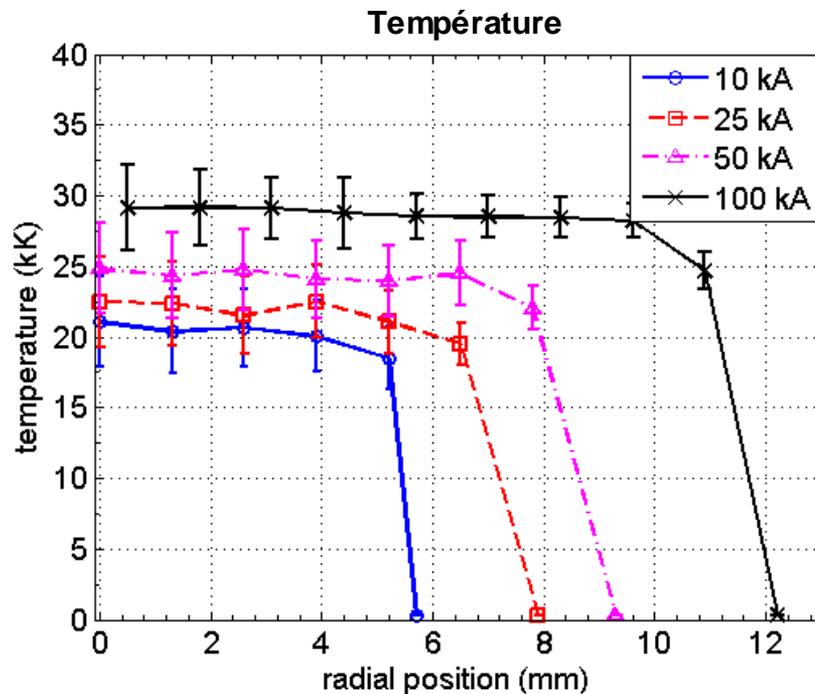
Composition d'un
plasma d'air
à l'équilibre



- T : diminue avec le temps, constante dans le canal
- N_e et P : diminuent avec le temps, et dans le rayon (force de Laplace)

II. Caractérisation de l'arc libre

➤ Comparaison pour différents niveaux de courant : $t = 9 \mu\text{s}$

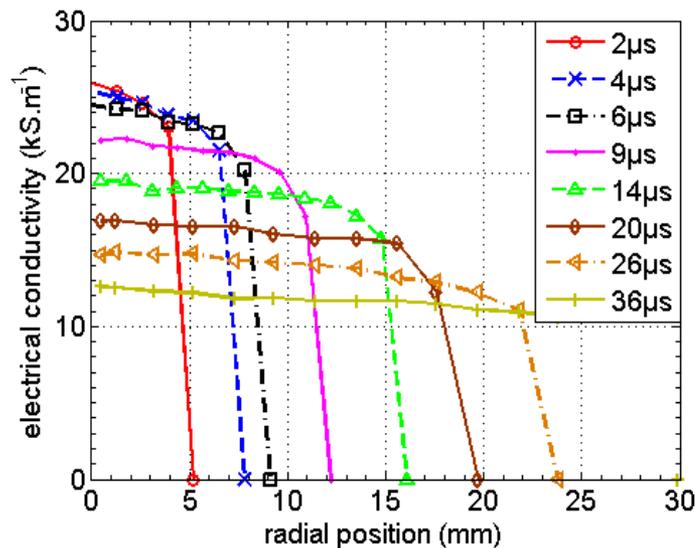


- T : sensibilité modérée au courant
- N_e : sensibilité importante au courant

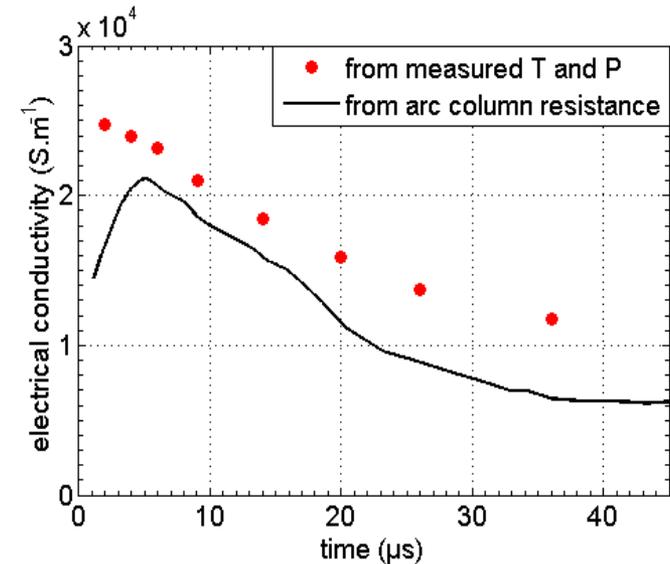
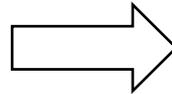
II. Caractérisation de l'arc libre

➤ Conductivité électrique (100 kA)

Déduites à partir des propriétés d'un plasma d'air à l'équilibre (D'Angola et al. 2008) $\sigma = f(T, P)$



Comparaison
aux mesures
« électriques »

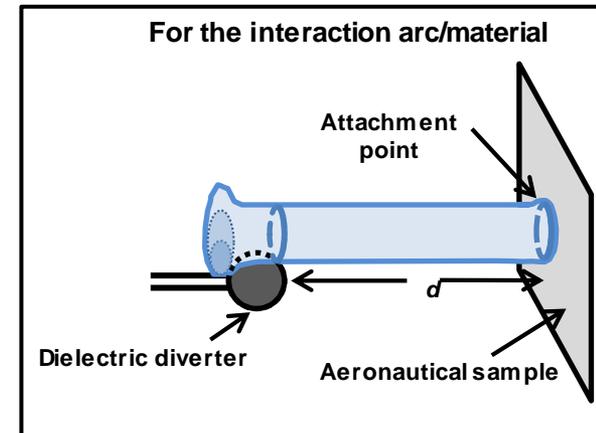
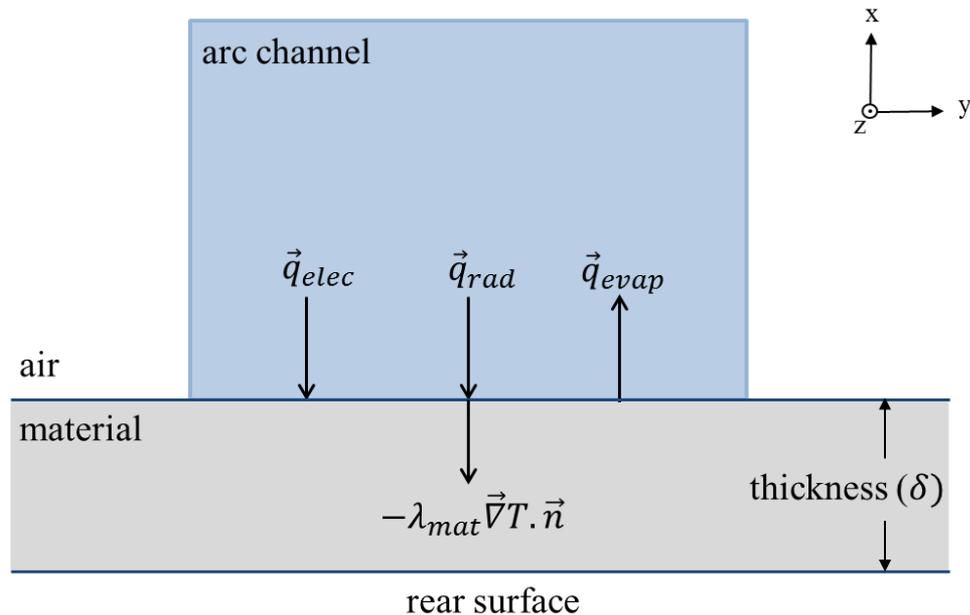


- Profils presque constants dans le canal (peu d'effet de la pression)
- Résultats en accord avec les mesures électriques (écart entre 9 à 50%)

Sousa Martins et al. 2016 JphysD

- I. La foudre dans un contexte aéronautique
- II. Caractérisation de l'arc libre :
 - spectroscopie d'émission
- III. Caractérisation de l'interaction arc/matériau :
 - thermographie infrarouge et calcul du flux radiatif
- IV. Conclusion et perspectives

Mécanismes et flux incidents

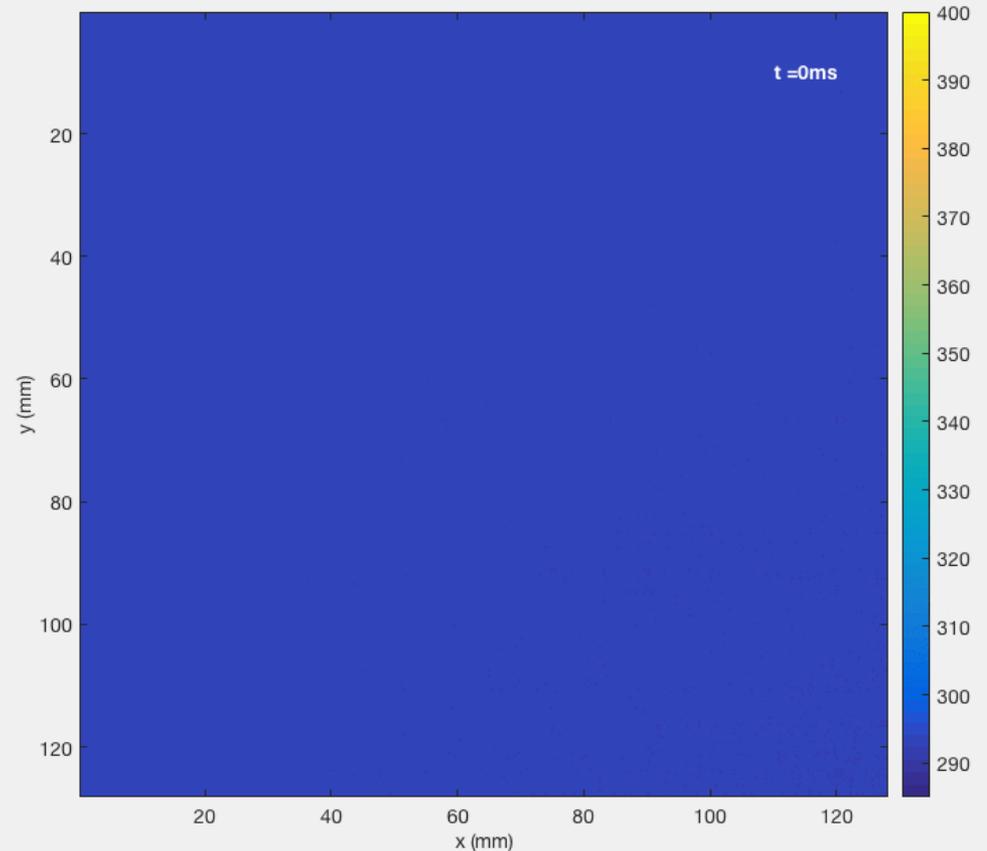
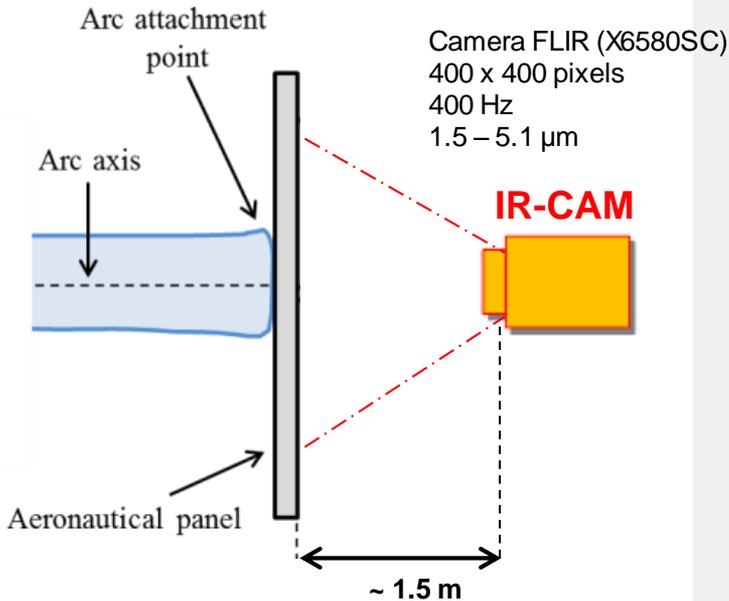


Objectives :

- Estimer les flux incidentes lors du foudroiement par méthode inverse
- Corréler les flux estimés avec des paramètres d'arc $\rightarrow T, P, I$
 - Modélisation du flux radiatif $\rightarrow T, P$
 - Modélisation du flux électrique par l'analyse de la gaine $\rightarrow I$

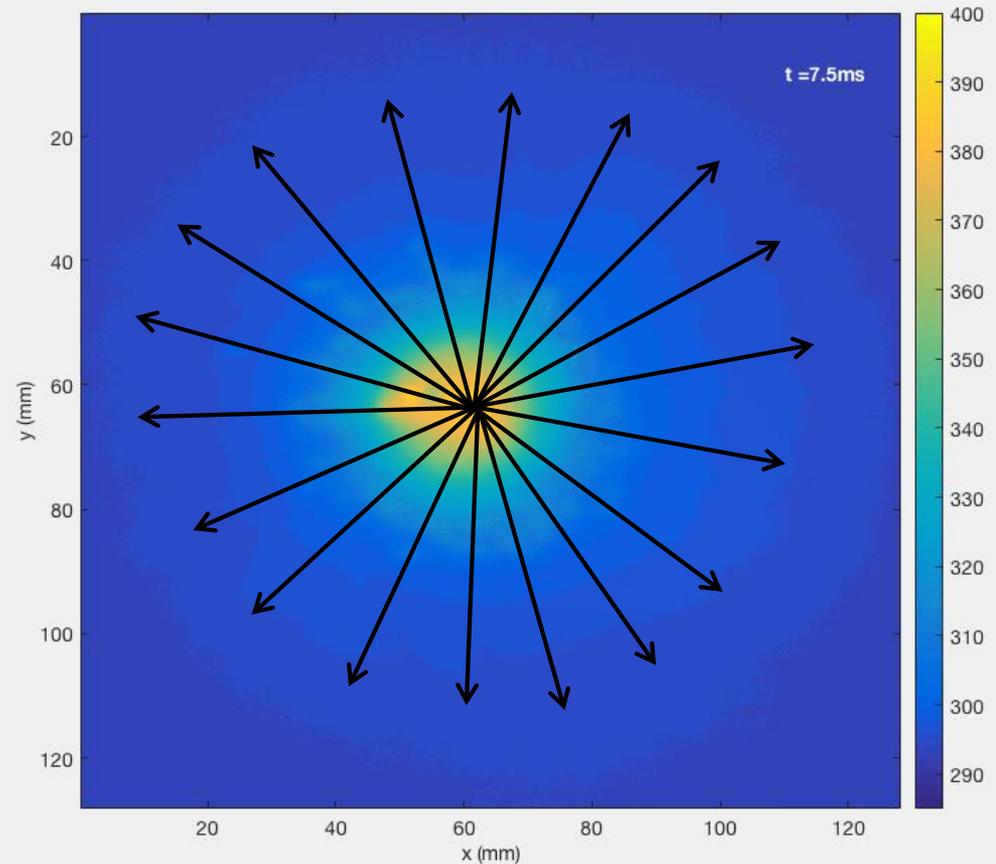
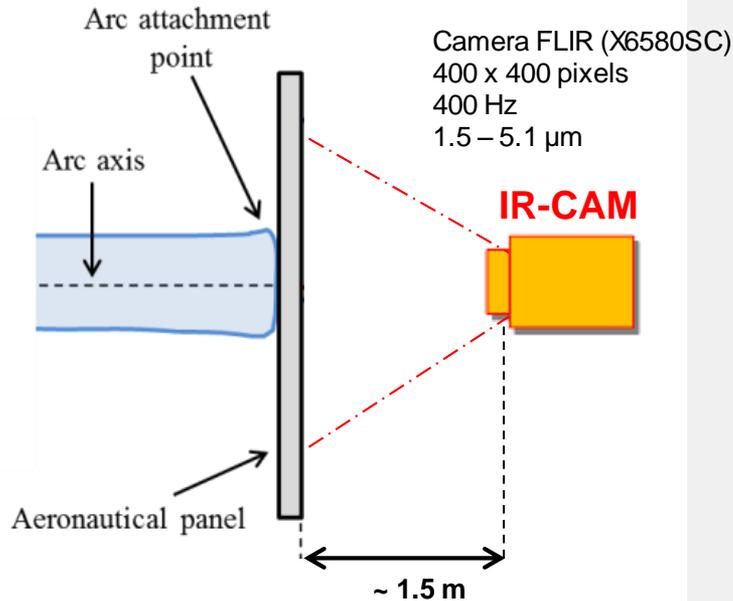
Diagnostic : thermographie infrarouge

Exemple mesure : Aluminium 1.2 mm suite à une onde D (100 kA)



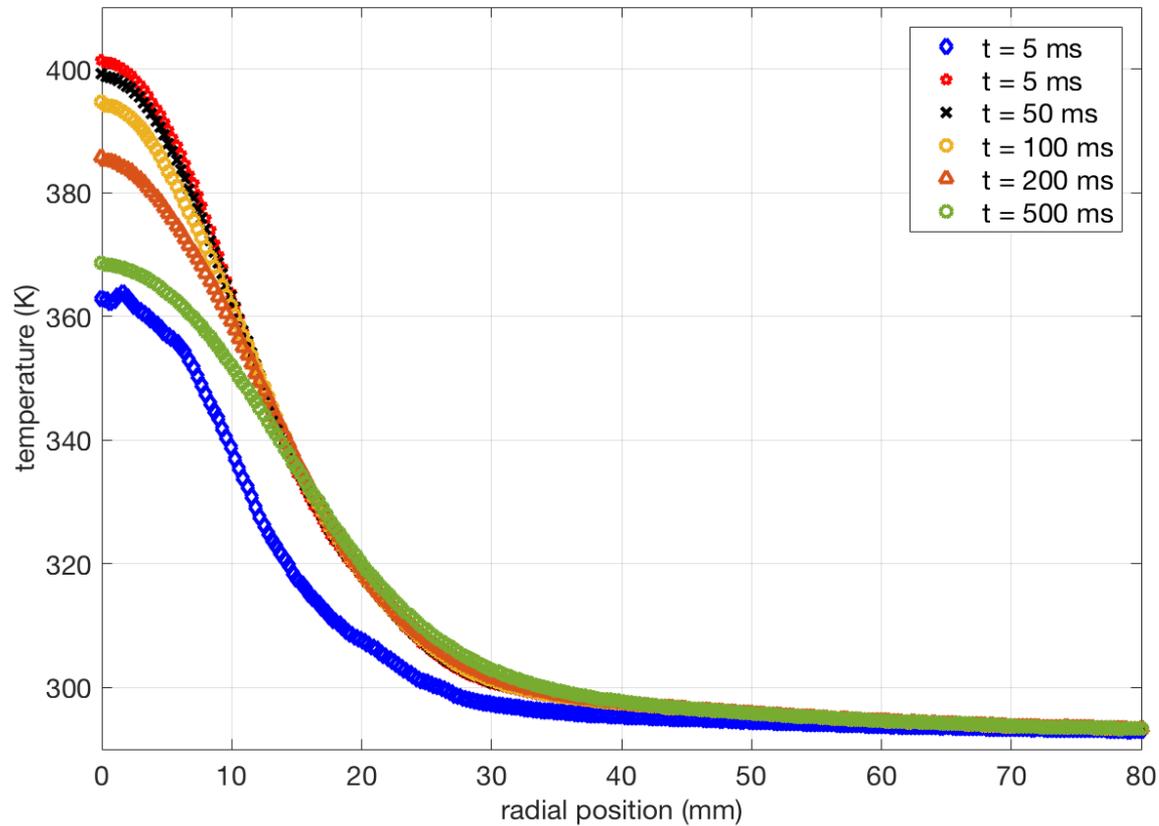
Diagnostic : thermographie infrarouge

Exemple mesure : Aluminium 1.2 mm suite à une onde D (100 kA)



Mesures thermographie-IR

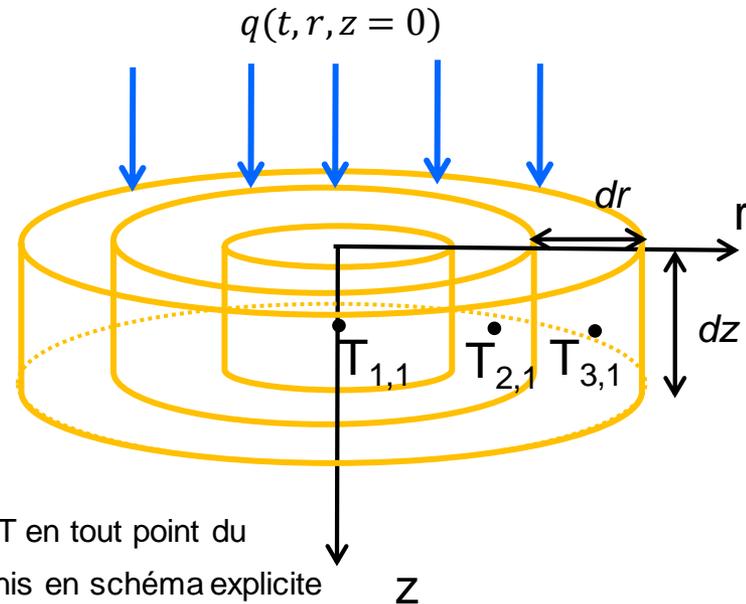
Exemple profile radial : Aluminium 1.2 mm



Modélisation thermique/électrique

Problème direct \rightarrow Input : $q_1(t, r) + q_2(t, r)$

Output : $T(t, r, z)$



Equation de la chaleur :

$$\rho C_p \frac{d}{dt} T = \nabla \cdot \lambda \nabla T + P_{Joule}$$

Code thermique : Calcul de T en tout point du matériau (2D axis) - volume finis en schéma explicite

Equation de Poisson :

$$\frac{d}{dt} V = \nabla \cdot \sigma \nabla V = 0$$

$$P_{Joule} = \sigma |\nabla V|^2$$

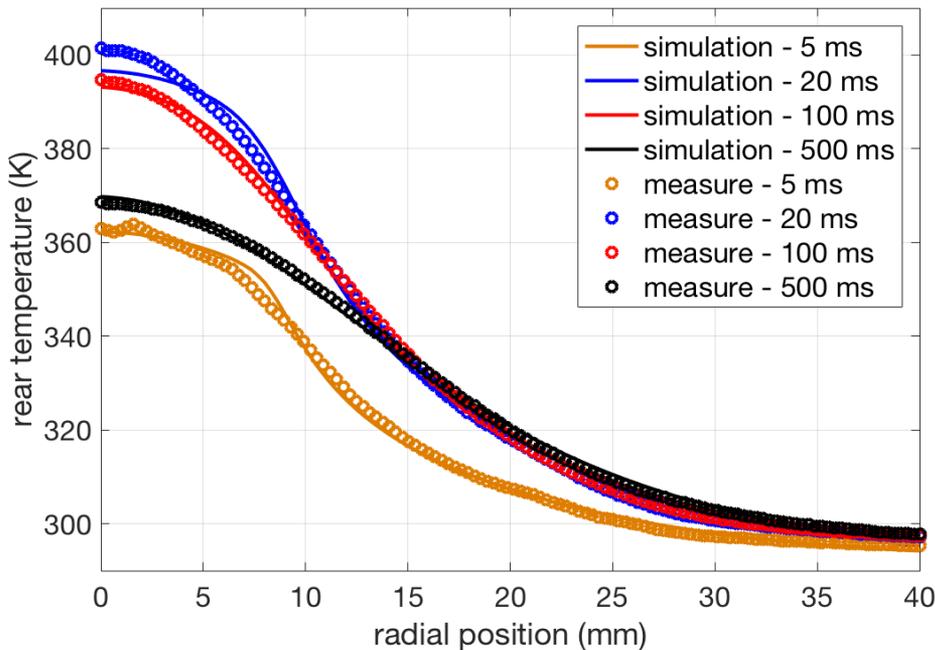
Code électrique : Calcul de V en tout point du matériau \rightarrow 2D axis en volume finis en schéma implicite : méthode des directions alternées (matrix tri-diag au lieu de penta-diag)

Ajustement des mesures : obtention des flux

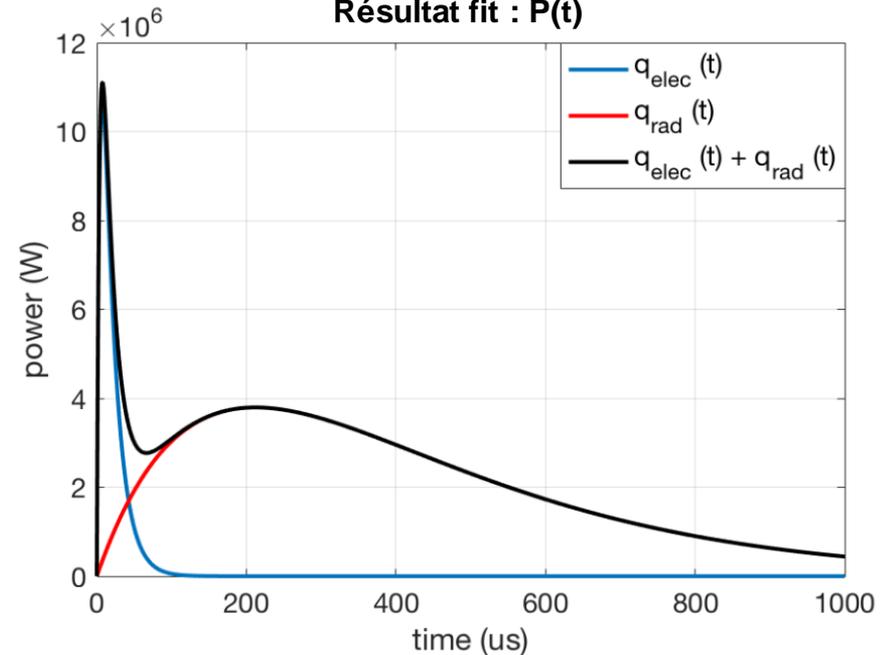
Flux total comme somme de deux bi-exponentiel : $q(r,t) = P_0 \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \underbrace{\frac{2}{\pi^{3/2} r_{arc}^2} e^{-\left(\frac{r}{r_{arc}}\right)^4}}_{\text{Normalisé en } 2\pi r dr}$

$q_{elec}(r,t) \rightarrow P1, \tau_1, \tau_2$
 $q_{rad}(r,t) \rightarrow P2, \tau_3, \tau_4$

Ajustement des profils mesurés



Résultat fit : P(t)

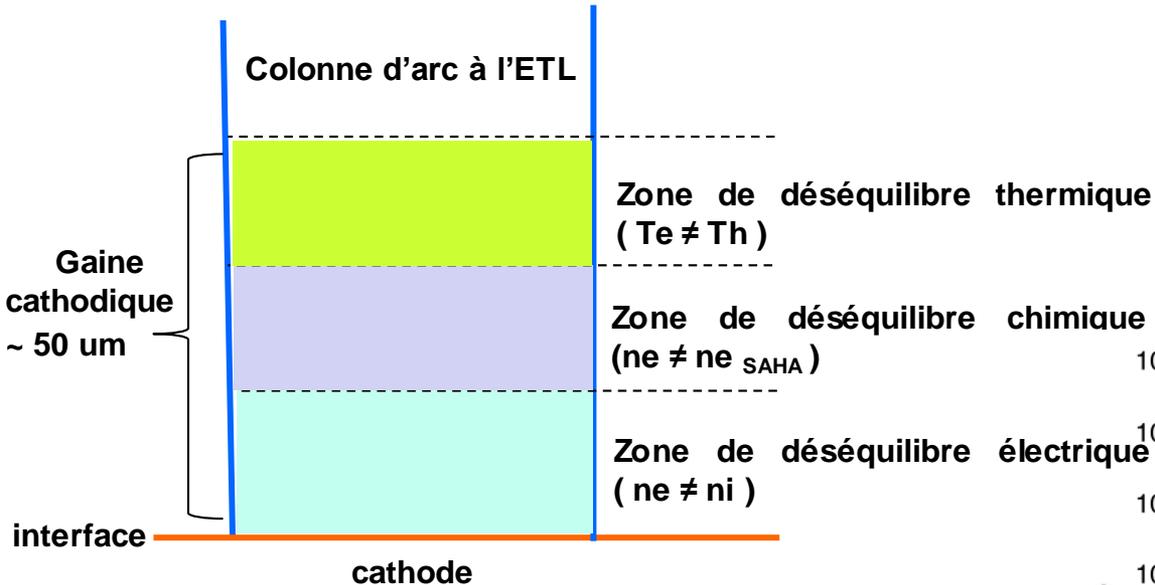


Conclusion :

- Bon ajustement des profils mesurés
- Atteint de $T_{melting}$ pour le cas Al à 100 kA
- Essais sur matériaux avec $T_{melting}$ plus élevée
exemple : titane et tungstène

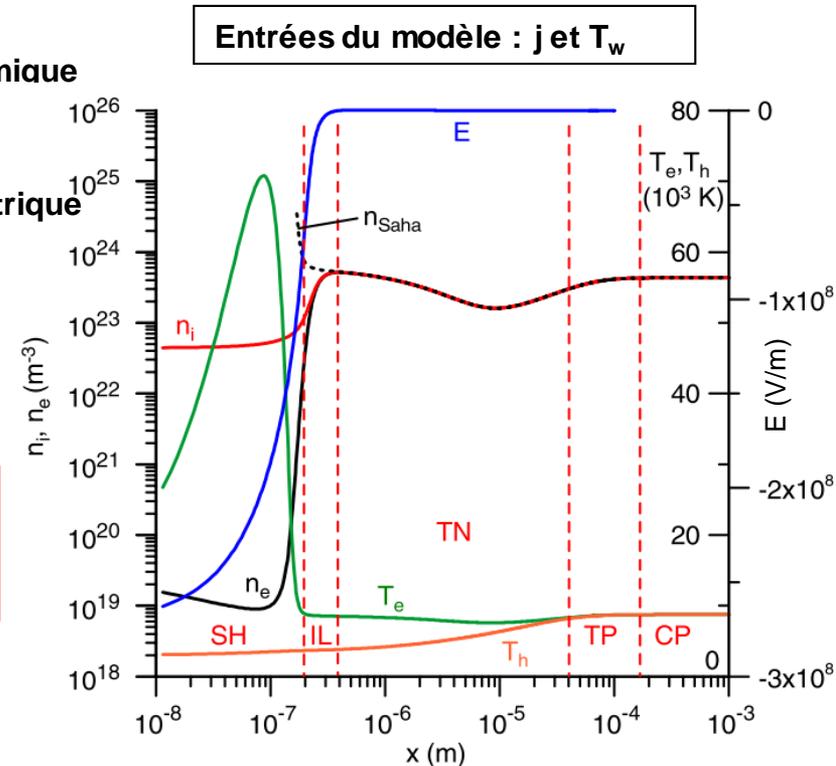
Modélisation du flux électrique

Modèle Benilov et al. (de 1995 à 2016 : plusieurs dizaines de papiers dans IOP dans la problématique HID lamps)



Objective: $q_{elec} = f(I)$

Simplification usuelle: $q_{elec} = j \cdot V_{electrode}$



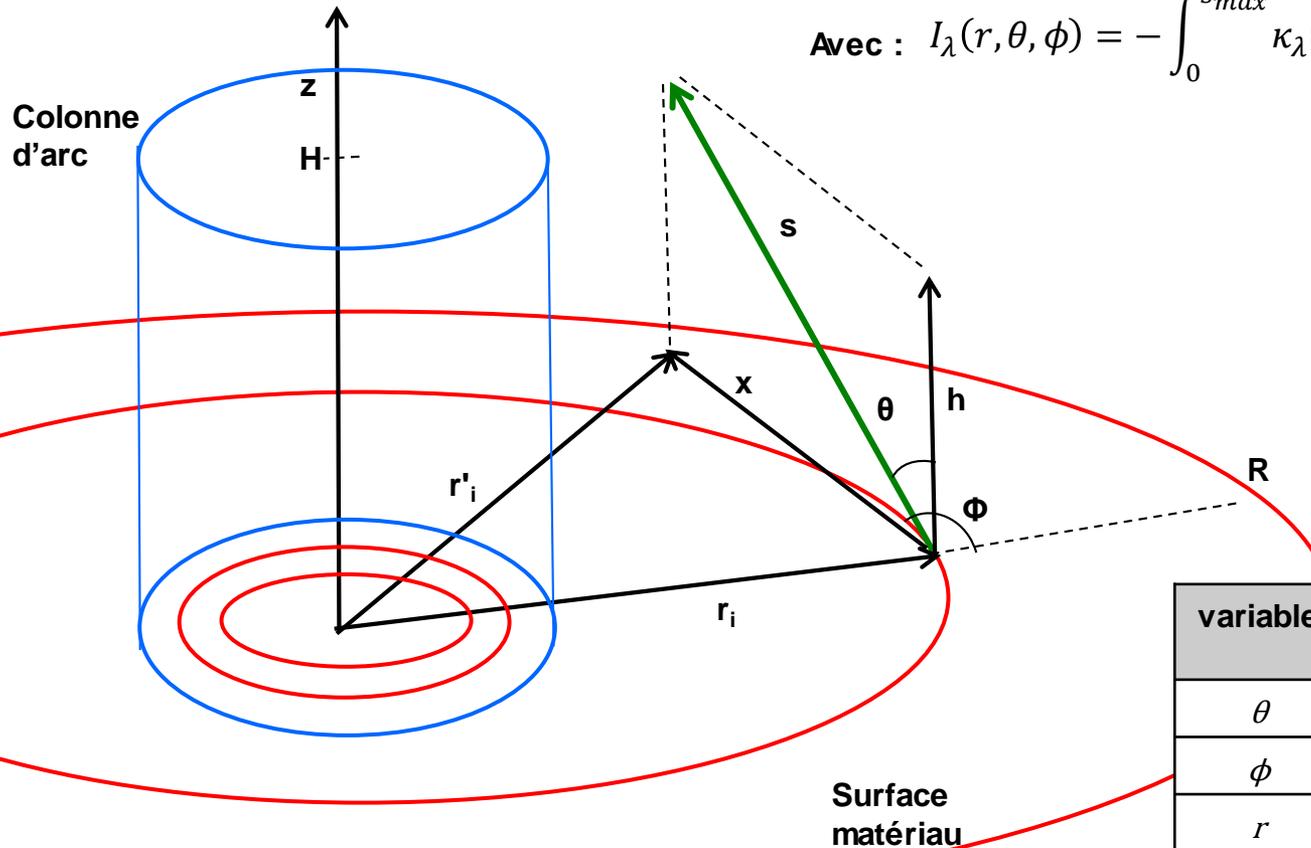
M. Benilov (2008) *JphysD*

Calcul du flux radiatif

Utilisation des champs de température et pression mesurés par spectroscopie d'émission

$$q_{rad\lambda}(r) = \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\phi=0}^{2\pi} I_{\lambda}(r, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

Avec : $I_{\lambda}(r, \theta, \phi) = - \int_0^{s_{max}} \kappa_{\lambda}(s) I_{\lambda}^0 \exp\left(- \int_0^s \kappa(s') ds'\right) ds$



variable	interval	discretization points
θ	0 to $\pi/2$	20
ϕ	0 to 2π	100
r	0 to 200 mm	200
s	domain $H \times R$	$\delta s = 20 \mu\text{m}$

Calcul du flux radiatif

Utilisation des champs de température et pression mesurés par spectroscopie d'émission

$$q_{rad\lambda}(r) = \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\phi=0}^{2\pi} I_{\lambda}(r, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

Avec :
$$I_{\lambda}(r, \theta, \phi) = - \int_0^{s_{max}} \kappa_{\lambda}(s) I_{\lambda}^0 \exp\left(- \int_0^s \kappa(s') ds'\right) ds$$

Absorption coefficient from High Temperature Gas Radiation (HTGR) database from EM2C

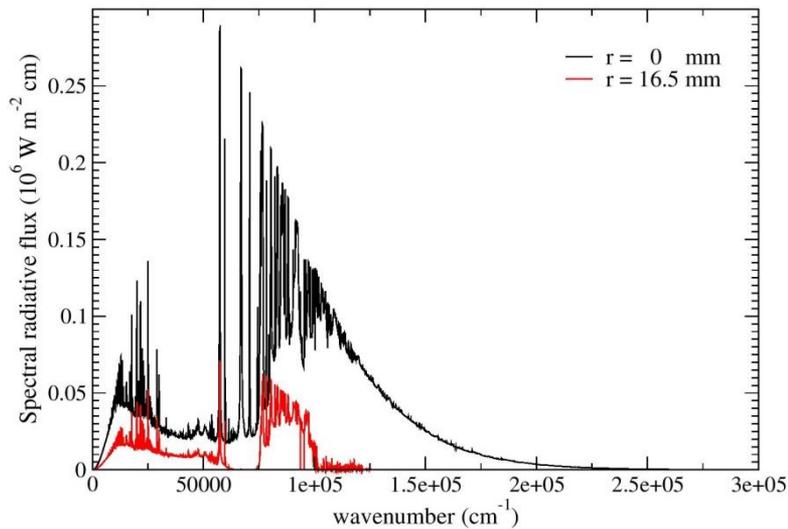
Spectral lines	bound-bound	Atomic : N, O, N ⁺ , N ⁺⁺ , N ⁺⁺⁺ , O ⁺ , O ⁺⁺ , O ⁺⁺⁺ Molecular : 19 e ⁻ systems (N ₂ , N ₂ ⁺ , NO, O ₂)
	bound-free	Photoionization : N, O, N ₂ , O ₂ , NO Photodetachment : N ⁻ , O ⁻ Photodissociation : O ₂
Continuum	free-free	Bremsstrahlung : Ion-electron , atom-electron and molecule-electron

S. Chauveau et al. (2003) JQSRT

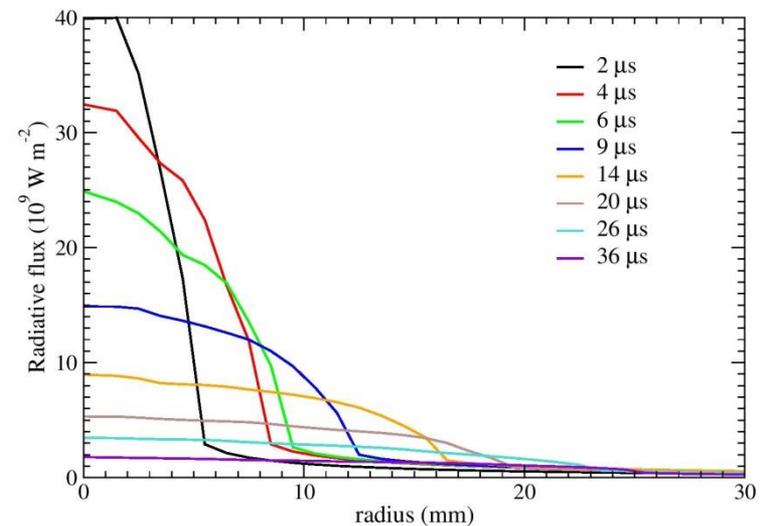
Calcul du flux radiatif

Résultat à 14 us :

Flux radiatif spectral



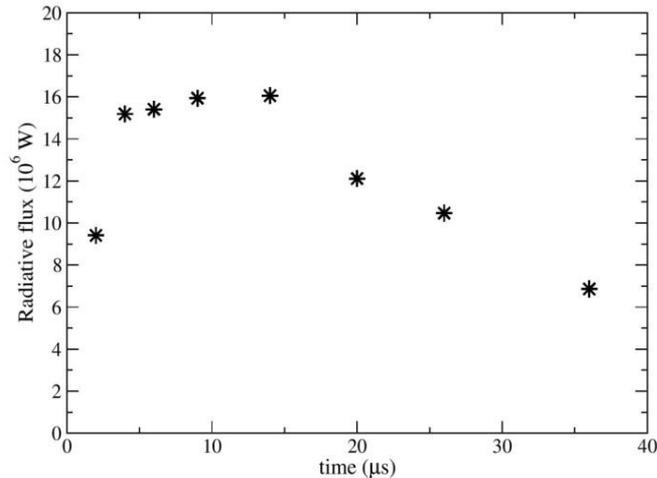
Flux radiatif



- Coefficient d'absorption : 4 millions de points spectraux pour chaque couple T et P
- Programme parallélisé : hydride de MPI et OpenMP

Calcul du flux radiatif

Flux radiatif arrivant sur la paroi à différents instants



$$q_{rad_i} = \epsilon_i q_{rad}$$

Quel ϵ_i utiliser ?

Variation entre 0,3 à 0,8 pour plaque d'Al en fonction de l'état de surface et de la longueur d'onde

q_{rad} peut être \geq à q_{elec}

Récapitulatif des différents mécanismes

Exchange Mechanism	Approximate expression	Approximate Value
Joule heating - arc column	$\int_t V_{arc} I_{arc} dt$	3100 J
Joule heating - aluminum plate	$\int_t \int_S \frac{j^2}{\sigma} dV dt$	4 J
Energy from electrical flux	$EVF \times Q$	54 J – 135 J
Radiative exchange	$\int_t \int_S q_r dS dt$	180 J – 480 J

- I. La foudre dans un contexte aéronautique
- II. Caractérisation de l'arc libre :
 - spectroscopie d'émission
- III. Caractérisation de l'interaction arc/matériau :
 - thermographie infrarouge et rayonnement
- IV. Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

Conclusion :

- Premières **caractérisations expérimentales fines** de l'arc de foudre impulsif
- Caractérisation de l'arc libre
 - Caractérisation spatio-temporelle de la température et de la pression dans l'arc
 - Résolution de l'ETR dans un plasma non-optiquement mince
- Caractérisation **l'interaction arc-matériau**
 - Résolution du problème inverse et l'exploitation des mesures IRT : résultats encourageants
 - Résolution de l'équation de transfert et calcul du flux radiatif théorique

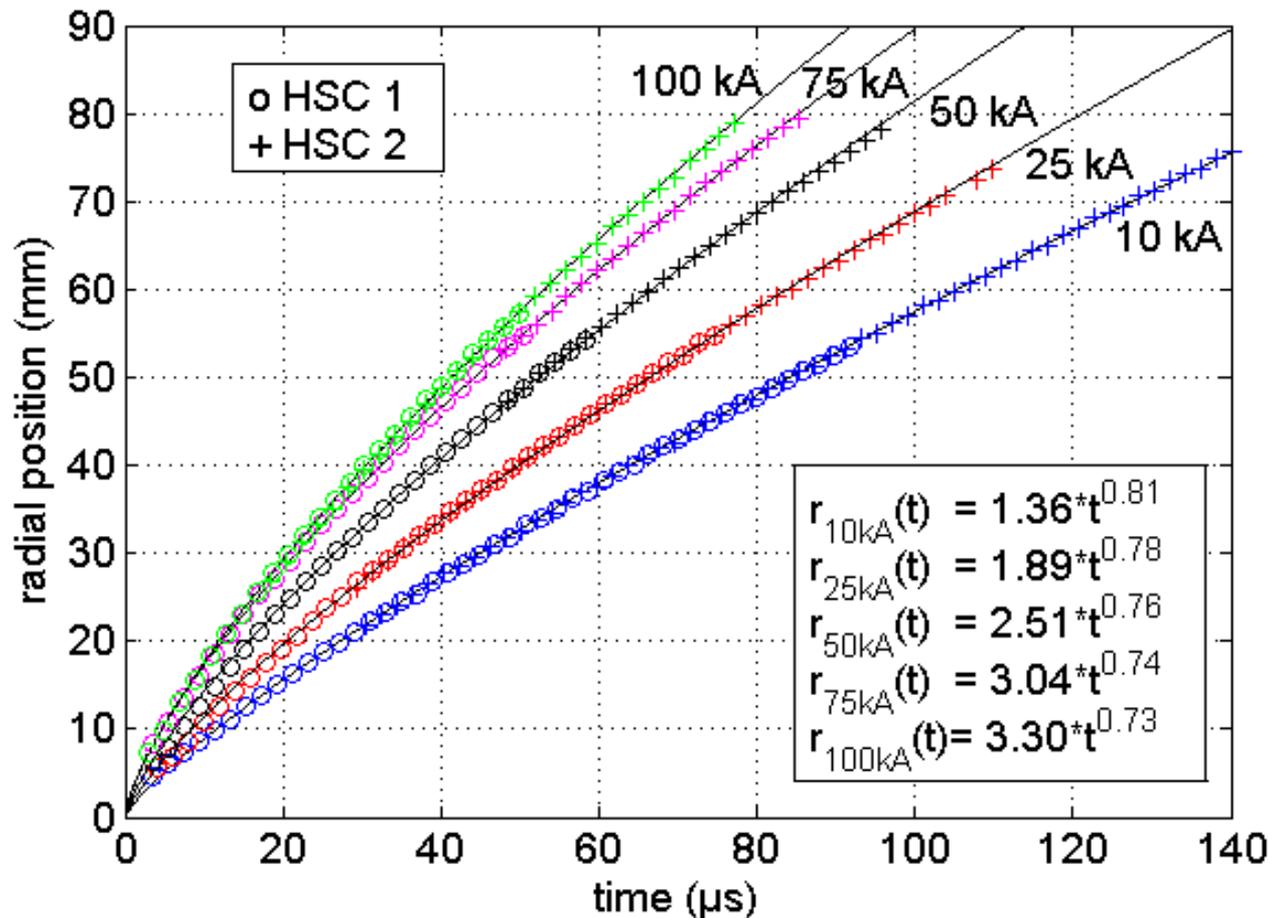
Perspective :

- Poursuivre de l'étude sur différents matériaux, épaisseurs et niveau de courant (tungstène et titane)
- Estimation des flux par mesures IRT + estimation théorique

Fin

Je vous remercie de votre attention !!!

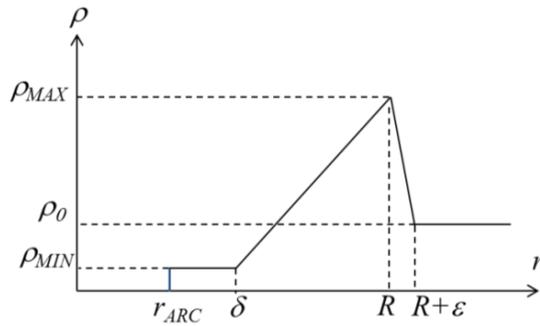
Ajustement des positions de l'onde de choc par fonctions du type $r(t) = \alpha t^\beta$



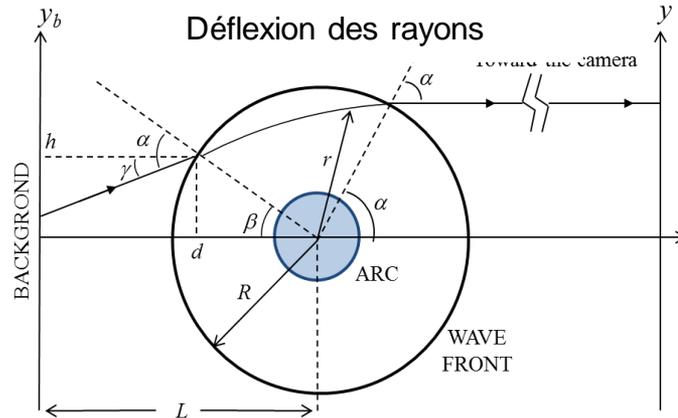
Annexes

Densité à l'intérieur du choc

Profil de densité



Déflexion des rayons



Equation des rayons

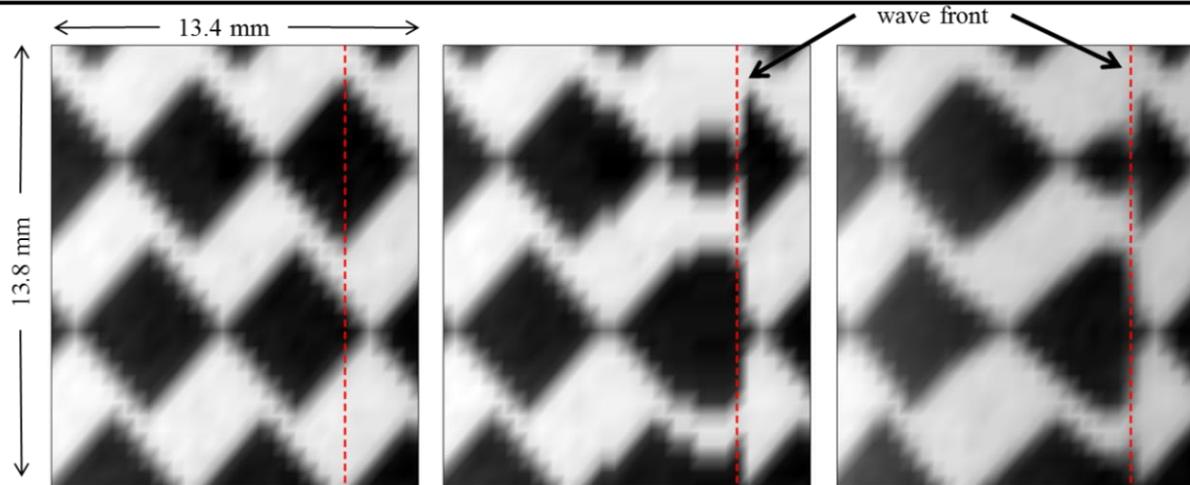
$$\frac{dy}{dx} = \frac{2}{n_0} \int_y^R \frac{\partial n}{\partial r} \frac{y}{\sqrt{r^2 - y^2}} dr$$

Relation de Gladstone-Dale

$$n - 1 = K\rho$$

$$\text{background} \rightarrow \text{pixel} : y_b(y) = R \sin(\alpha - \theta) + \frac{2yd}{n_0} \left[\frac{n_{MAX} - n_{MIN}}{\delta} \int_y^R \frac{dr}{\sqrt{r^2 - y^2}} - \frac{n_{MAX} - n_0}{\epsilon} \int_R^{R+\epsilon} \frac{dr}{\sqrt{r^2 - y^2}} \right]$$

Exemple de reconstruction de la distorsion de l'images

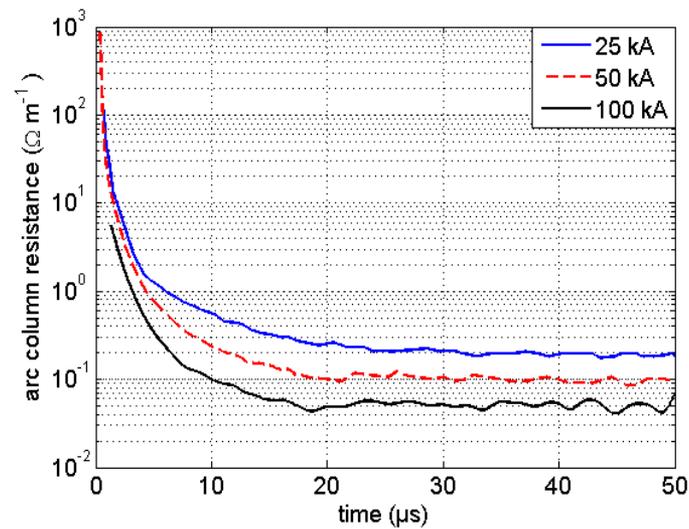
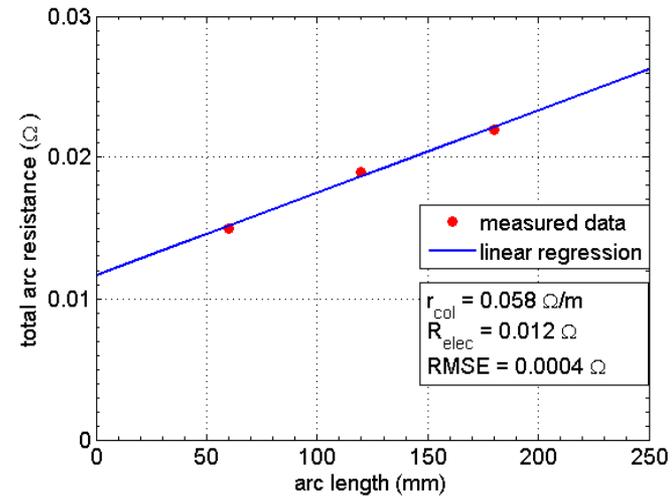
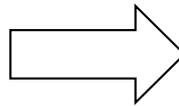
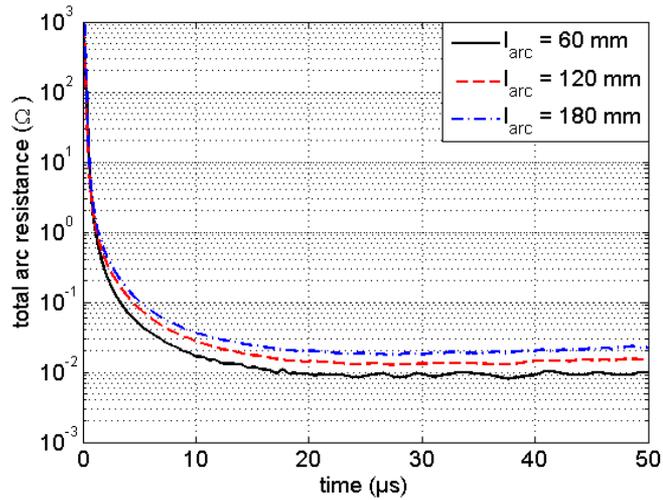


Référence

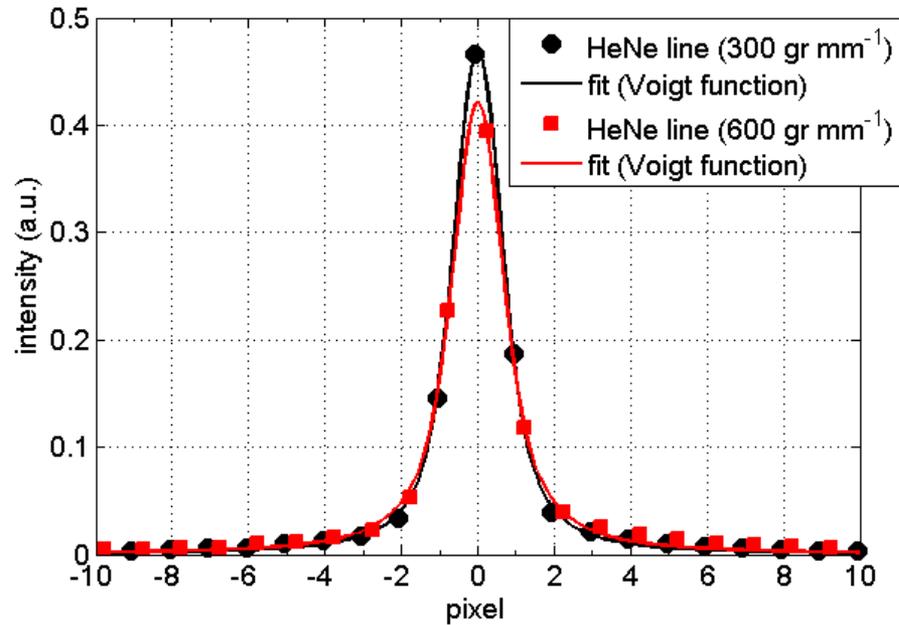
Simulation

Mesuré

Régression linéaire pour l'étude de la résistance linéique



Fonction de l'appareil de le spectromètre (raie laser HeNe à 632.816 nm)



Temps d'établissement de l'ETL (Equilibre thermodynamique locale)

$$t_{ETL} = \frac{1}{\bar{K}_{cin} \bar{\nu}_{e-h}} \quad (\text{B. Chéron (2001) ; B. Peyrou (2012))}$$

\bar{K}_{cin} : Taux d'énergie transférée par l'électron lors d'une collision

$\bar{\nu}_{e-h}$: Fréquence de collision élastique entre les particules lourdes et les électrons

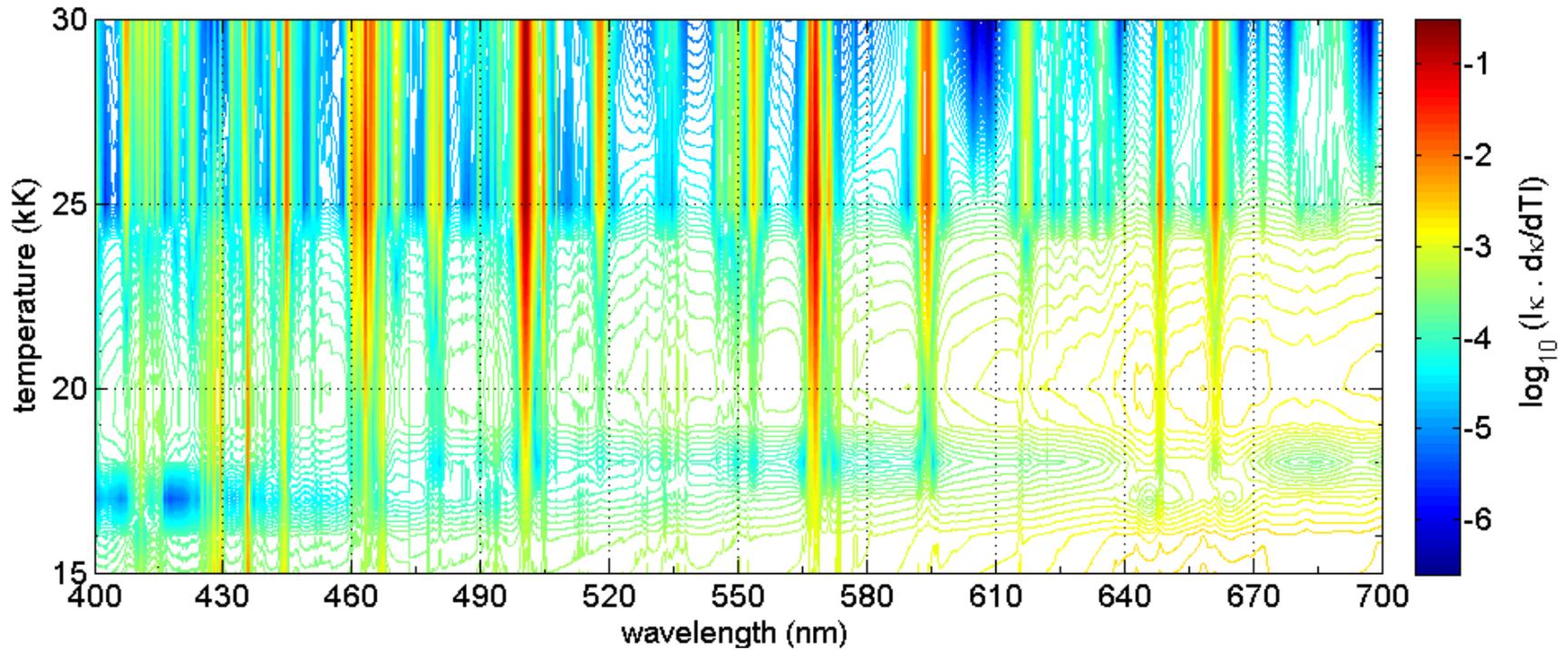
- Pour 10 000 K et 1 bar : **0.6 μ s**
- Pour 30 000 K et 10 bar : **0.9 ns**

Ecart à l'équilibre de 10% par effet du champ électrique (B. Peyrou (2012))

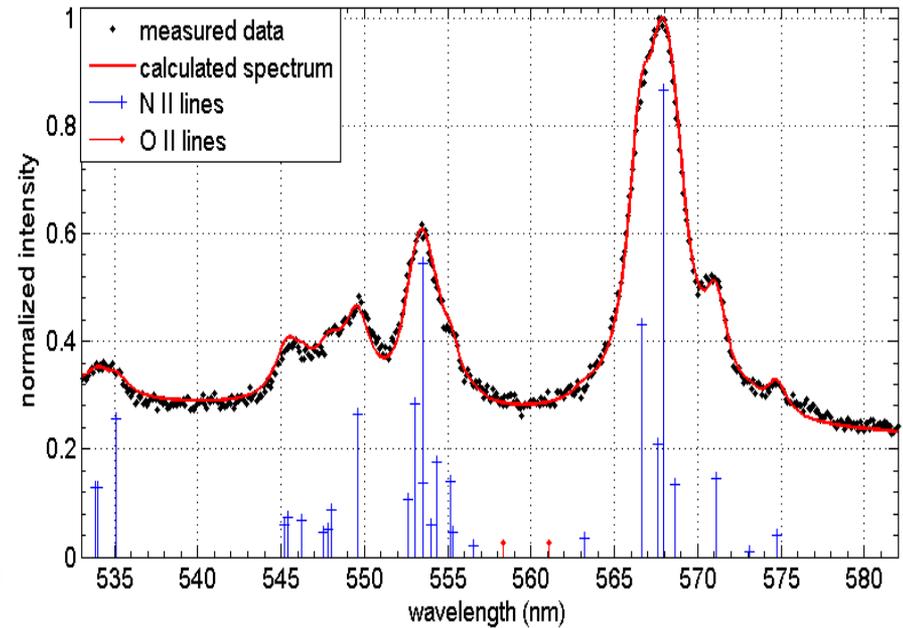
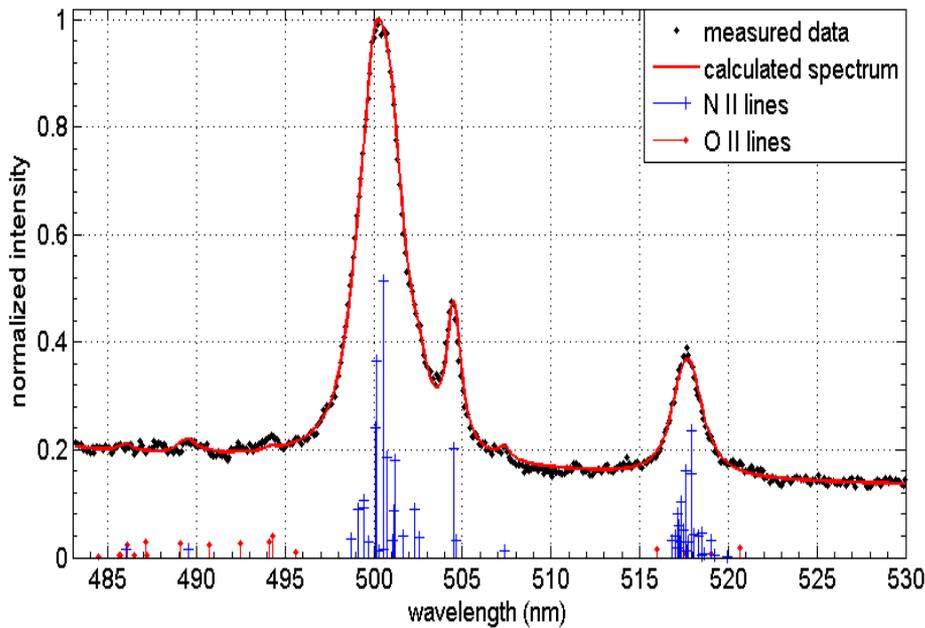
Calcul à 10 μ s (environ 28 kK, 25 bar) : $r_{col} \sim 0.1 \Omega/m$ et $I \sim 95 \text{ kA} \rightarrow E_{int} \sim 9.5 \text{ kV/m}$

A 30 000 K et 10 bar le champ pour un écart à l'ETL de 10% = **190 kV/m**

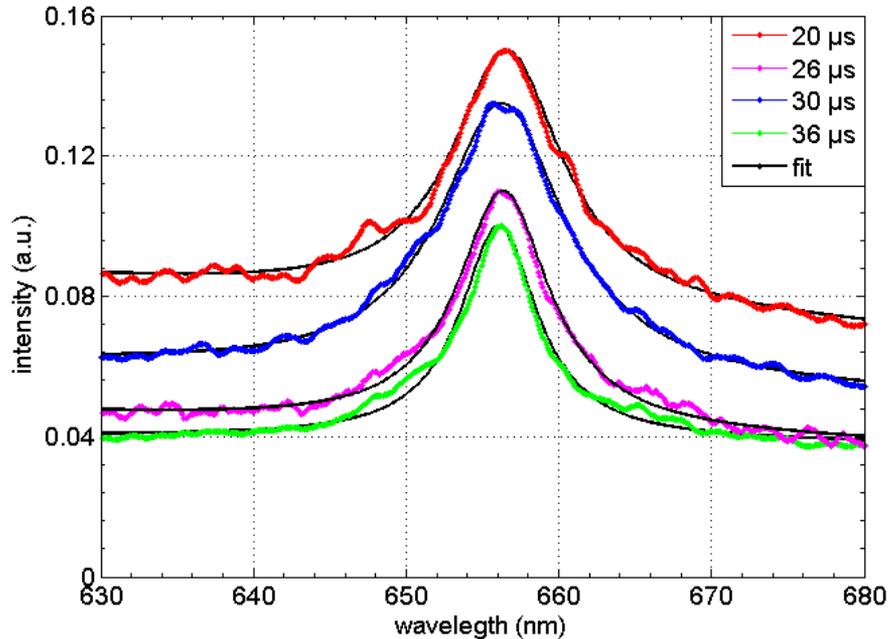
Étude de la sensibilité des raies à la température



Exemples d'ajustement en différentes plages spectrales



Exemples de traitement H-alpha



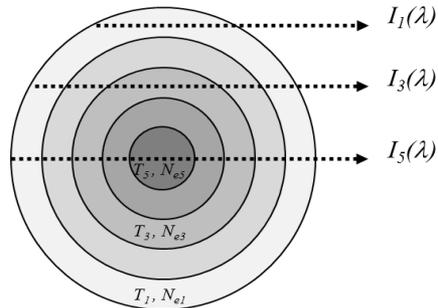
Relation N_e avec w_s (Kepple and Griem 1968) :

$$N_e = \left(\frac{w_s \times 10^{18}}{2.5\alpha_{1/2}} \right)^{3/2}$$

$$\bar{N}_{e_{RTE}}(t) = \frac{1}{\pi r_{arc}^2} \int_0^{r_{arc}} 2\pi r N_e(t, r)_{RTE} dr$$

Time (μs)	Electron density (10^{17} cm^{-3}) from Ha- line ($N_{e_{H\alpha}}$)	Electron density (10^{17} cm^{-3}) from N II and O II line ($\bar{N}_{e_{RTE}}$)
20 μs	33.74	16.95
23 μs	28.77	-
26 μs	24.05	12.35
30 μs	18.90	-
33 μs	15.11	-
36 μs	12.29	8.55

Emission sortant par couche (contribution à la corde central)



$$I_m(\lambda) = \sum_{i=1}^{i=2m-1} I_{\lambda i}^0 (1 - e^{-\kappa_{\lambda i} x_i}) e^{-\sum_{j=i+1}^{j=2m-1} \kappa_{\lambda j} x_j}$$

