

Activités Plasmas au CORIA

Arnaud BULTEL & Pascal BOUBERT

Doctorants	Julien Annaloro	Noémie Brémare	Bastien Pérès
	Vincent Morel	Maxime Ribière	
Post-doctorants	Corine Duluard	Vincent Morel	Cathy Rond
	Seong-Yoon Hyun		
Visiteurs	Yacine Babou	Yousuke Ogino	Marco Panesi

Sommaire

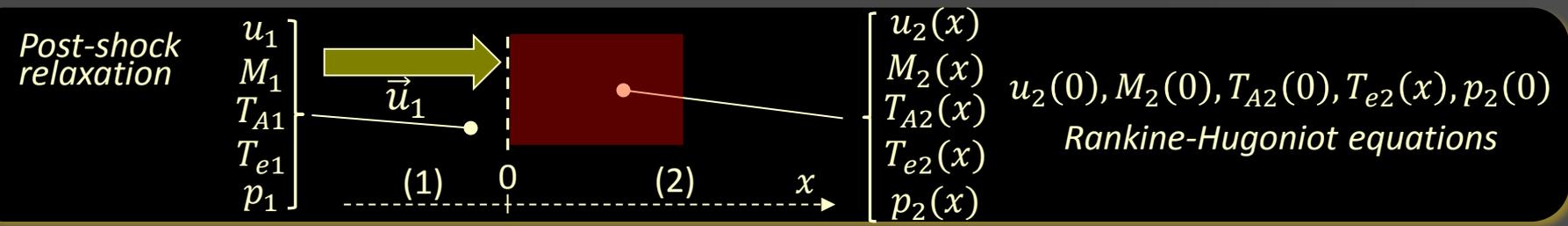
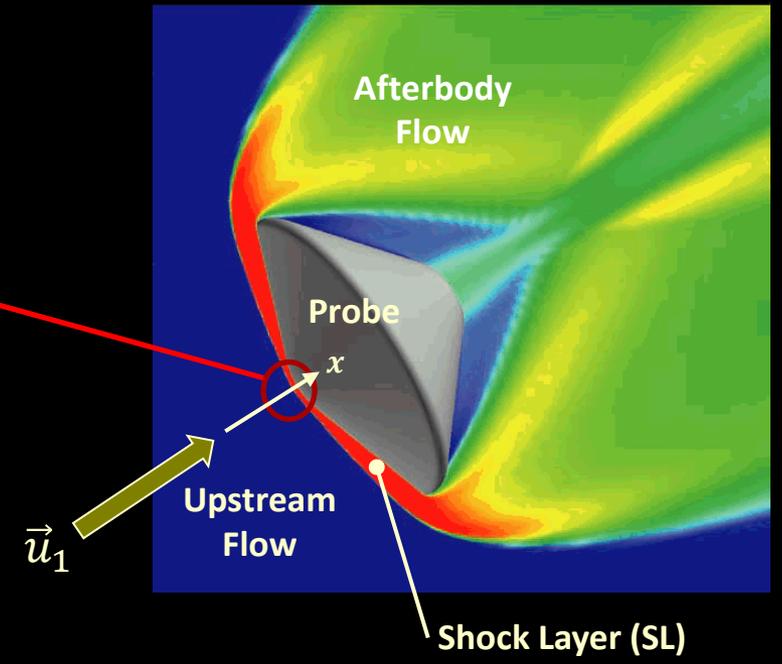
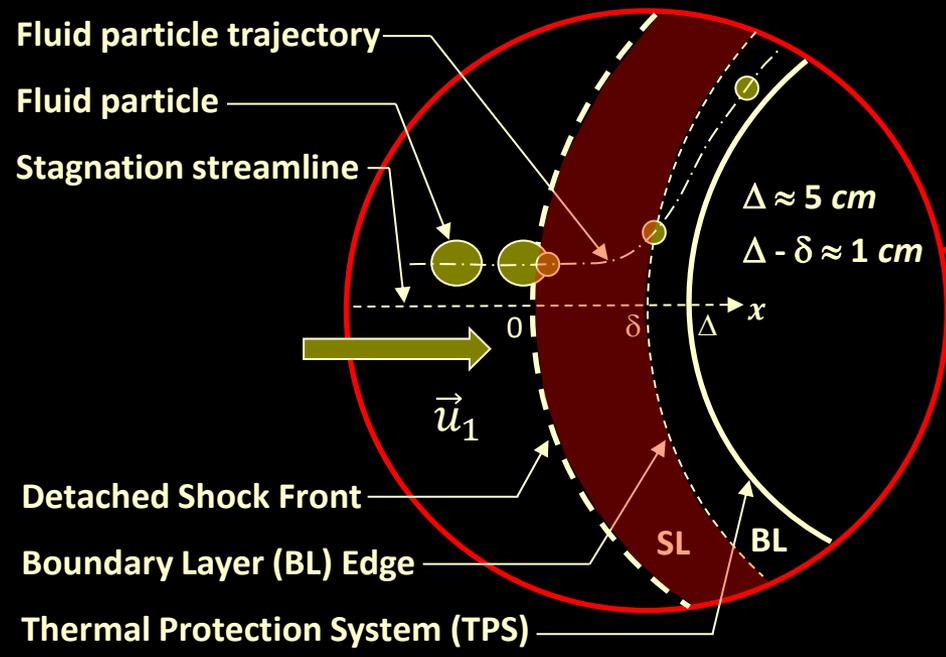
1. Activités sur les plasmas d'entrée atmosphérique
2. Activités sur les plasmas induits par laser
3. Activités sur les plasmas d'arcs électriques
4. Appel...

Sommaire

1. Activités sur les plasmas d'entrée atmosphérique
2. Activités sur les plasmas induits par laser
3. Activités sur les plasmas d'arcs électriques
4. Appel...

Planetary Atmospheric Entry

(u_1 5 to 15 km s⁻¹)



Nitrogen

Species, states and elementary processes

N_2, N_2^+, N, N^+ and e^-

N_2	$X^1\Sigma_g^+(v=0 \rightarrow v_{max}=67), A^3\Sigma_u^+, B^3\Pi_g, W^3\Delta_u, B'^3\Sigma_u^-, a'^1\Sigma_u^-, a^1\Pi_g, w^1\Delta_u, G^3\Delta_g, C^3\Pi_u, E^3\Sigma_g^+$	150 states
N_2^+	$X^2\Sigma_g^+, A^2\Pi_u, B^2\Sigma_u^+, a^4\Sigma_u^+, D^2\Pi_g, c^2\Sigma_u^+$	
N	$^4S_{3/2}, ^2D^o = (^2D_{5/2}^o + ^2D_{3/2}^o), ^2P^o = (^2P_{1/2}^o + ^2P_{3/2}^o), ^4P_{1/2}, \dots$ (63 states)	
N^+	$^3P_0, ^3P_1, ^3P_2, ^1D_2, ^1S_0, ^5S_2, ^3D_3, ^3D_2, ^3D_1$	

CR Model Database – CoRaM – N_2

Forward rate coefficient

$$k_i(T_{A,e}) = \sqrt{\frac{8 k_B T_{A,e}}{\pi \mu}} \int_{x_0}^{+\infty} x e^{-x} \sigma_i(x) dx$$

with $\sigma_i(x)$ the cross section and

$$x = \frac{\varepsilon}{k_B T_{A,e}} \text{ the reduced collision energy}$$

Backward rate coefficient from **Detailed Balance**

$\Rightarrow 100\ 000$ elementary processes

Vibrational processes	$N_2(X, v) + e^- \rightarrow N_2(X, w) + e^-$ $N_2(X, v) + e^- \rightarrow 2 N(^4S_{3/2}^o) + e^-$ $N_2(X, v) + (N_2 \text{ or } N) \rightarrow N_2(X, w) + (N_2 \text{ or } N)$ $N_2(X, v) + N(^4S_{3/2}^o) \rightarrow 3 N(^4S_{3/2}^o)$ $N_2(X, v_{max}) + N_2 \rightarrow 2 N(^4S_{3/2}^o) + N_2$ $N_2(X, v_1) + N_2(X, v_2) \rightarrow N_2(X, w_1) + N_2(X, w_2)$
Electronic excitation	$N_2(i) + e^- \rightarrow N_2(j) + e^-$ $N_2(i) + (N_2 \text{ or } N) \rightarrow N_2(j) + (N_2 \text{ or } N)$ $N_2^+(i) + e^- \rightarrow N_2^+(j) + e^-$ $N(i) + e^- \rightarrow N(j) + e^-$ $N(i) + (N_2 \text{ or } N) \rightarrow N(j) + (N_2 \text{ or } N)$ $N^+(i) + e^- \rightarrow N^+(j) + e^-$ $N^+(i) + (N_2 \text{ or } N) \rightarrow N^+(j) + (N_2 \text{ or } N)$
Excitation transfer	$N_2(A) + N_2(A) \rightarrow N_2(X) + N_2(B)$ $N_2(A) + N_2(A) \rightarrow N_2(X) + N_2(C)$ $N_2(A) + N_2(B) \rightarrow N_2(X) + N_2(C)$ $N_2(A) + N(^4S_{3/2}^o) \rightarrow N_2(X) + N(^2P^o)$ $N_2(B) + N(^4S_{3/2}^o) \rightarrow N_2(X) + N(^2P^o)$ $N_2(C) + N(^4S_{3/2}^o) \rightarrow N_2(X) + N(^2P^o)$
Dissociation	$N_2(i \neq X) + e^- \rightarrow N(j) + N(k) + e^-$ $N_2^+(i) + e^- \rightarrow N(j) + N^+(k) + e^-$
Ionisation	$N_2(i) + e^- \rightarrow N_2^+(j) + 2 e^-$ $N_2(i) + (N_2 \text{ or } N) \rightarrow N_2^+(j) + e^- + (N_2 \text{ or } N)$ $N(i) + e^- \rightarrow N^+(j) + 2 e^-$ $N(i) + (N_2 \text{ or } N) \rightarrow N^+(j) + e^- + (N_2 \text{ or } N)$
Charge exchange	$N_2(X) + N^+(^3P_0) \rightarrow N_2^+(X) + N(^4S_{3/2}^o \text{ or } ^2P^o)$ $N_2(X) + N^+(^3P_0) \rightarrow N_2^+(A) + N(4S_{3/2}^o)$
Dissociative recombination	$N_2^+(X) + e^- \rightarrow N(^4S_{3/2}^o) + N(^2D^o \text{ or } ^2P^o)$ $N_2^+(X) + e^- \rightarrow N(^2D^o) + N(^2D^o)$
Radiation	$N_2(B^3\Pi_g) \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+) + h\nu$ (1 st positive) $N_2(C^3\Pi_u) \rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + h\nu$ (2 nd positive) $N_2^+(B^2\Sigma_u^+) \rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_g^+) + h\nu$ (1 st negative) $N(i) \rightarrow N(j < i) + h\nu$ $N^+(i) \rightarrow N^+(j < i) + h\nu$

Escape factor

Nitrogen post-shock relaxation

Balance equations

1. Species balance

$$\frac{dy_{X_m}}{dx} = \frac{m_{X_m} [X_m]}{\rho u}$$

2. Momentum balance

$$\frac{d(p + \rho u^2)}{dx} = 0$$

3. Energy balance

Heavies (atoms, molecules, ions)

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{e_A}{\rho} + \frac{p_A}{\rho} + \frac{\rho_A}{\rho} \frac{u^2}{2} \right] = \frac{-Q_{A \rightarrow e} - Q_{Rad}}{\rho u}$$

Electrons

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{e_e}{\rho} + \frac{p_e}{\rho} + \frac{\rho_e}{\rho} \frac{u^2}{2} \right] = \frac{Q_{A \rightarrow e}}{\rho u}$$

150 states (vibrational and electronic)

100 000 elementary processes

CoRaM - N₂

Species density

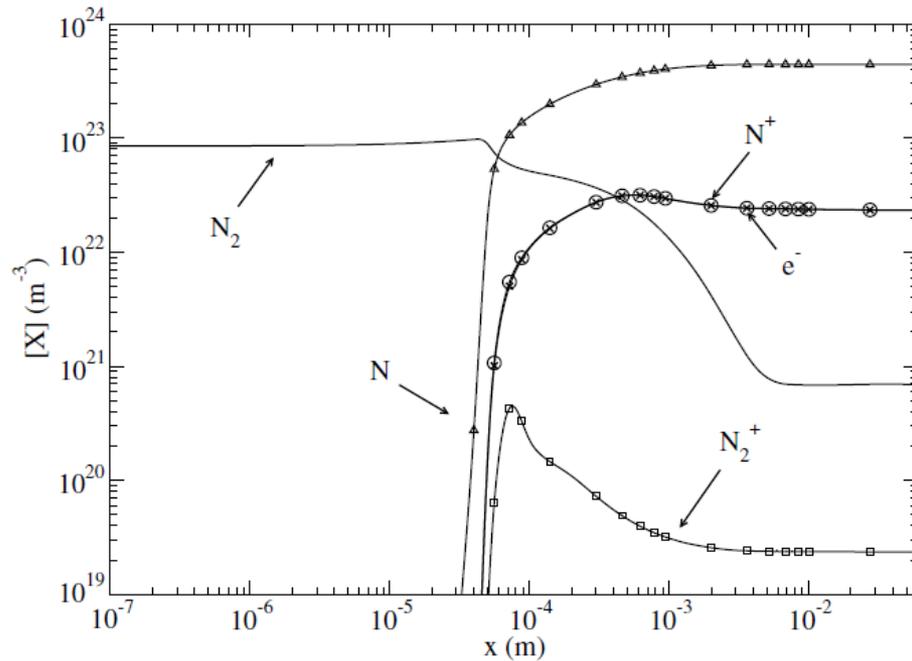


Fig. 5 Spatial profiles of the total number density of N_2 , N_2^+ , N , N^+ , and electrons in the conditions of Fig. 1.

Electron and vibrational temperatures

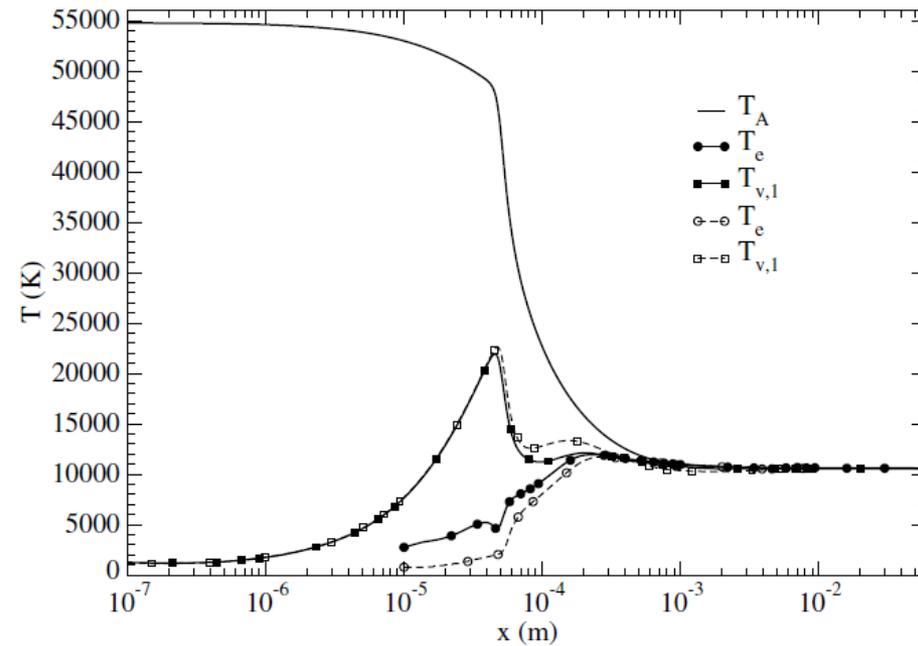


Fig. 3 Same figure as Fig. 2 but without electron-induced collisions leading to vibrational excitation and dissociation (nonfilled symbols).

Excited states population density

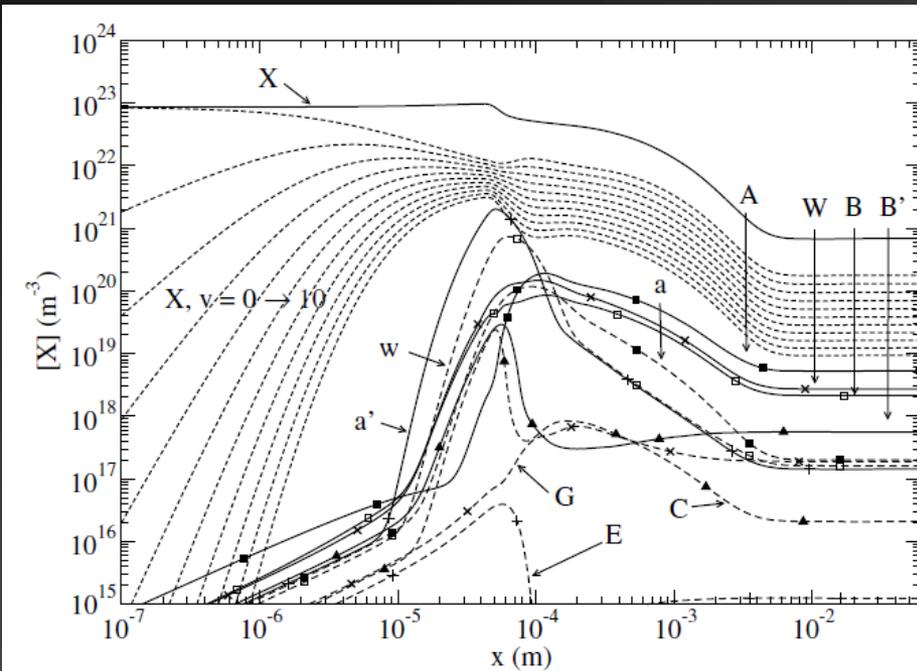


Fig. 6 Same figure as Fig. 5 but for the first 11 vibrational states of $N_2(X)$, the electronic ground state, and the excited states of N_2 .

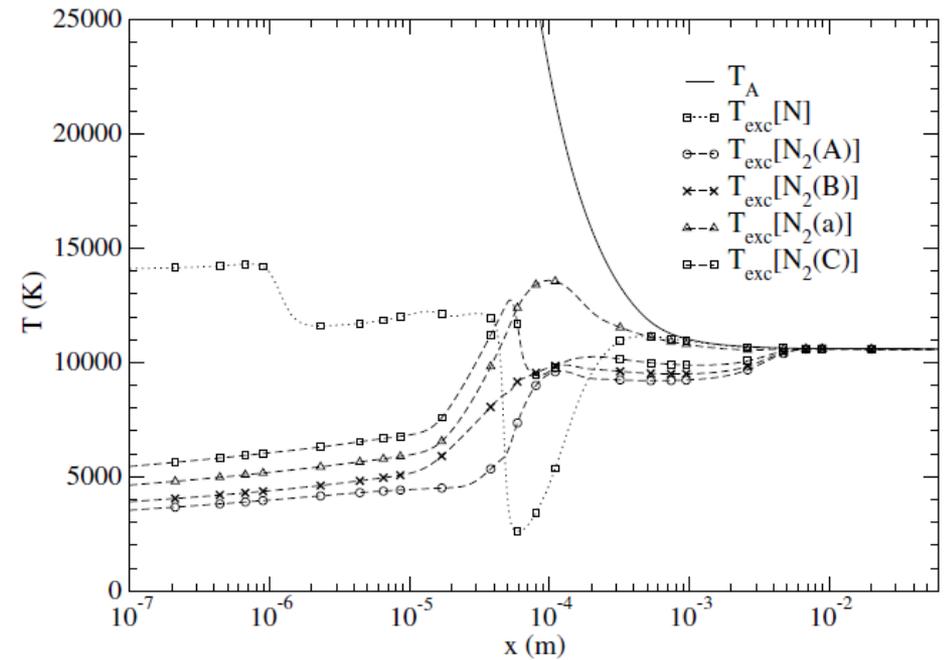


Fig. 4 Same figure as Fig. 2 but for atomic and molecular excitation temperatures defined by Eqs. (24) and (25), respectively.

Vibrational distribution

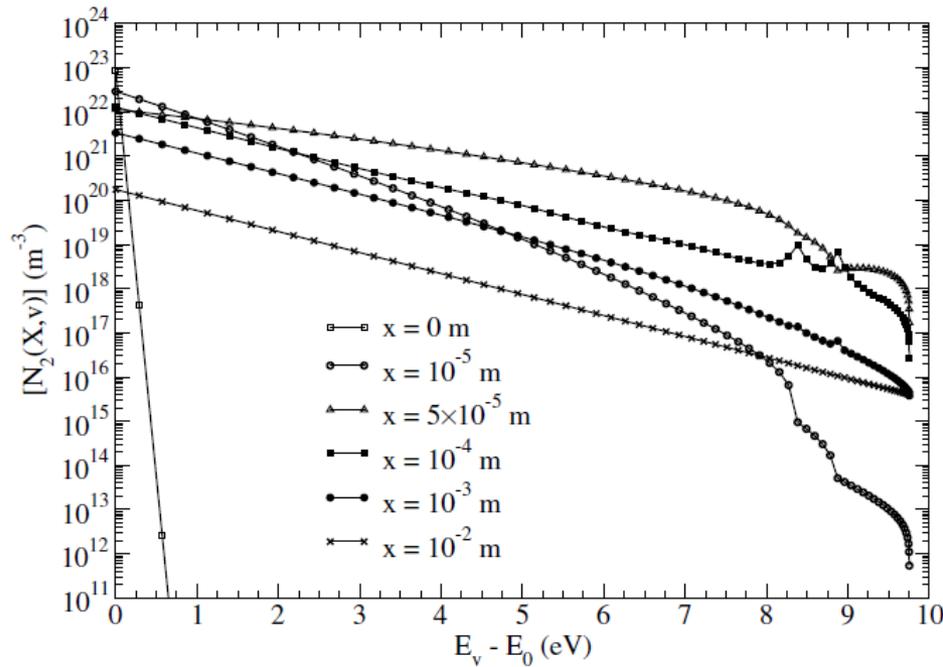


Fig. 7 Boltzmann plot of the $N_2(X)$ vibrational states at different positions in the conditions of Fig. 1. The dissociation limit corresponds to $E_v - E_0 = 9.754$ eV.

Atomic states distribution

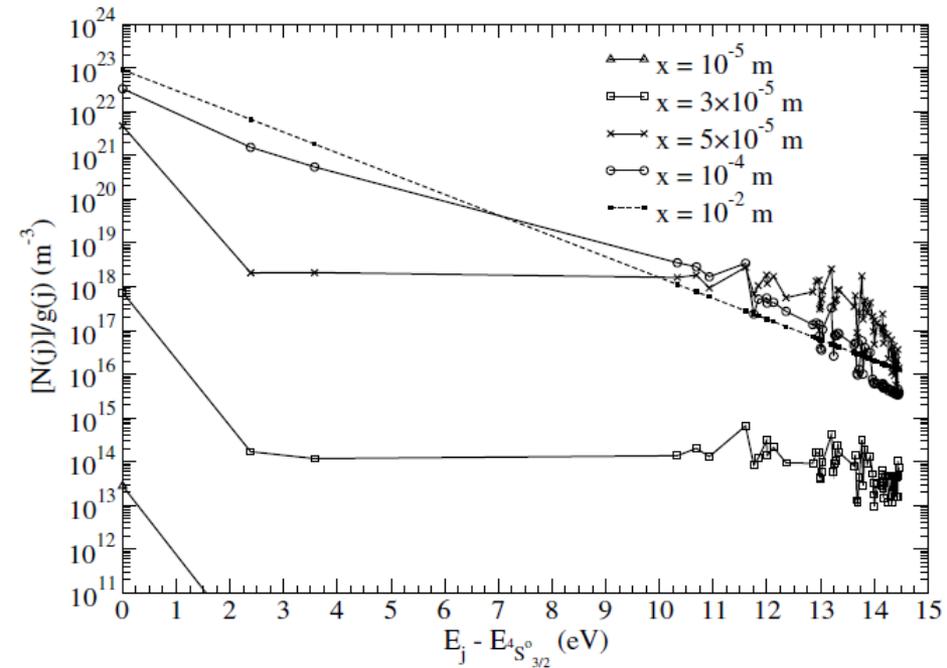


Fig. 10 Boltzmann plot of the N states at different positions in the conditions of Fig. 1. The dissociation limit corresponds to $E_j - E_{4S_{3/2}^o} = 14.534$ eV.

CoRaM-AIR

Type	Espèces	Etats
Molécules	N ₂	$X^1\Sigma_g^+(v=0\rightarrow 67)$, $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B'^3\Sigma_u^-$, $a'^1\Sigma_u^-$, $a^1\Pi_g$, $w^1\Delta_u$, $G^3\Delta_g$, $C^3\Pi_u$, $E^3\Sigma_g^+$
	O ₂	$X^3\Sigma_g^-(v=0\rightarrow 46)$, $a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+$, $c^1\Sigma_u^-$, $A'^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Sigma_u^-$, $f^1\Sigma_u^+$
	NO	$X^2\Pi(v=0\rightarrow 53)$, $a^4\Pi$, $A^2\Sigma^+$, $B^2\Pi$, $b^4\Sigma^-$, $C^2\Pi$, $D^2\Sigma^+$, $B'^2\Delta$, $E^2\Sigma^+$, $F^2\Delta$
Ions moléculaires	N ₂ ⁺	$X^2\Sigma_g^+$, $A^2\Pi_u$, $B^2\Sigma_u^+$, $a^4\Sigma_u^+$, $D^2\Pi_g$, $C^2\Sigma_u^+$
	O ₂ ⁺	$X^2\Pi_g$, $a^4\Pi_u$, $A^2\Pi_u$, $b^4\Sigma_g^-$
Atomes	NO ⁺	$X^1\Sigma^+$, $a^3\Sigma^+$, $b^3\Pi$, $W^3\Delta$, $b'^3\Sigma^-$, $A'^1\Sigma^+$, $W^1\Delta$, $A^1\Pi$
	N	$^4S_{3/2}^o$, $^2D_{5/2}^o$, $^2D_{3/2}^o$, $^2P_{1/2}^o$... (total de 252 niveaux)
	O	3P_2 , 3P_1 , 3P_0 , 1D_2 ... (total de 127 niveaux)
Ions atomiques	Ar	1S_0 , $^2[3/2]_2^o$, $^2[3/2]_1^o$, $^2[1/2]_0^o$... (total de 379 niveaux)
	N ⁺	3P_0 , 3P_1 , 3P_2 , 1D_2 ... (total de 9 niveaux)
	O ⁺	$^4S_{3/2}^o$, $^2D_{5/2}^o$, $^2D_{3/2}^o$, $^2P_{3/2}^o$... (total de 8 niveaux)
	Ar ⁺	$^2P_{3/2}^o$, $^2P_{1/2}^o$, $^2S_{1/2}$, $^4D_{7/2}$... (total de 7 niveaux)

CoRaM-AIR

$$p = 54 \text{ Pa}, T_e = T_A = 274 \text{ K} \rightarrow p = 80 \text{ kPa}, T_e = T_A = 11000 \text{ K}$$

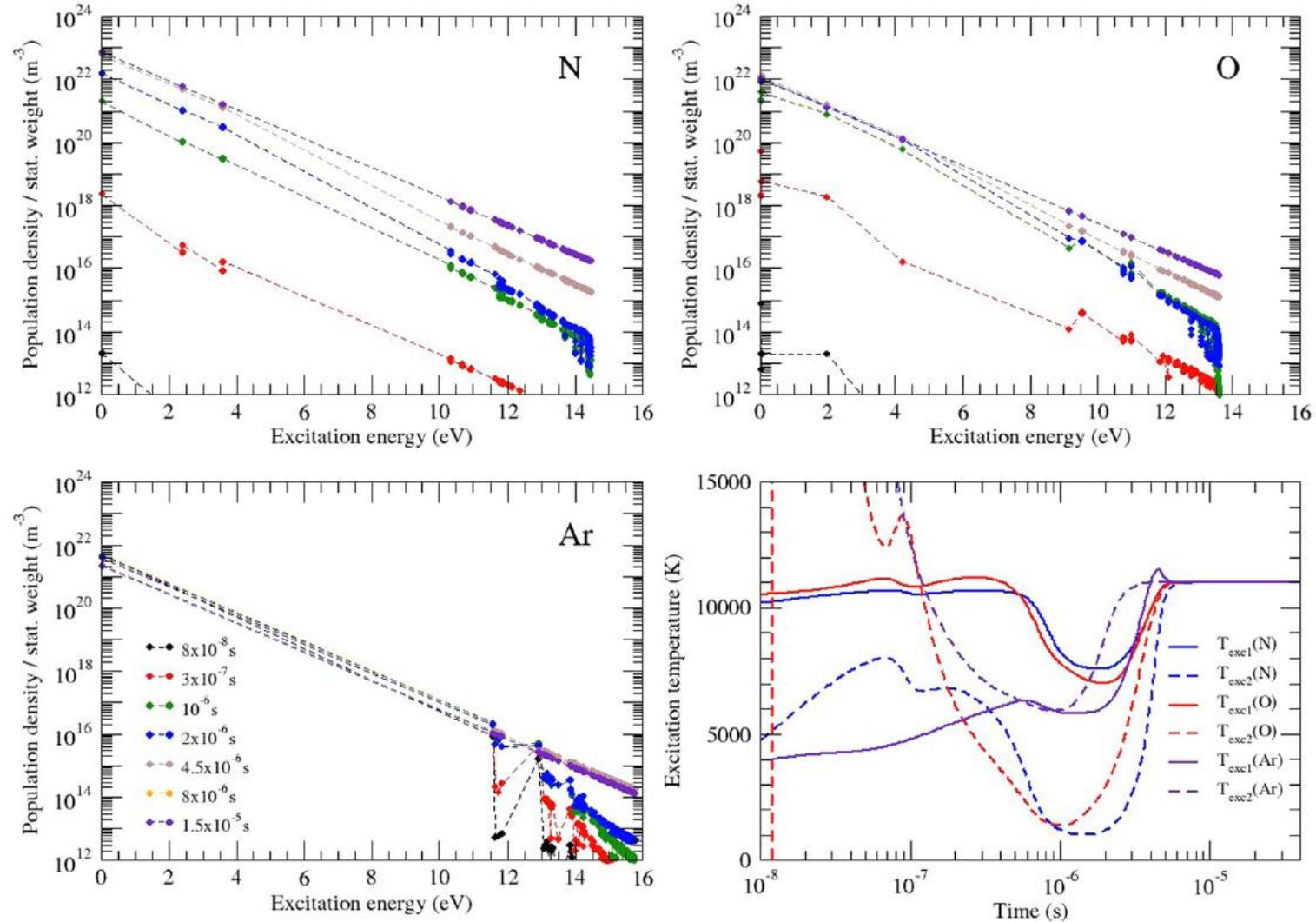


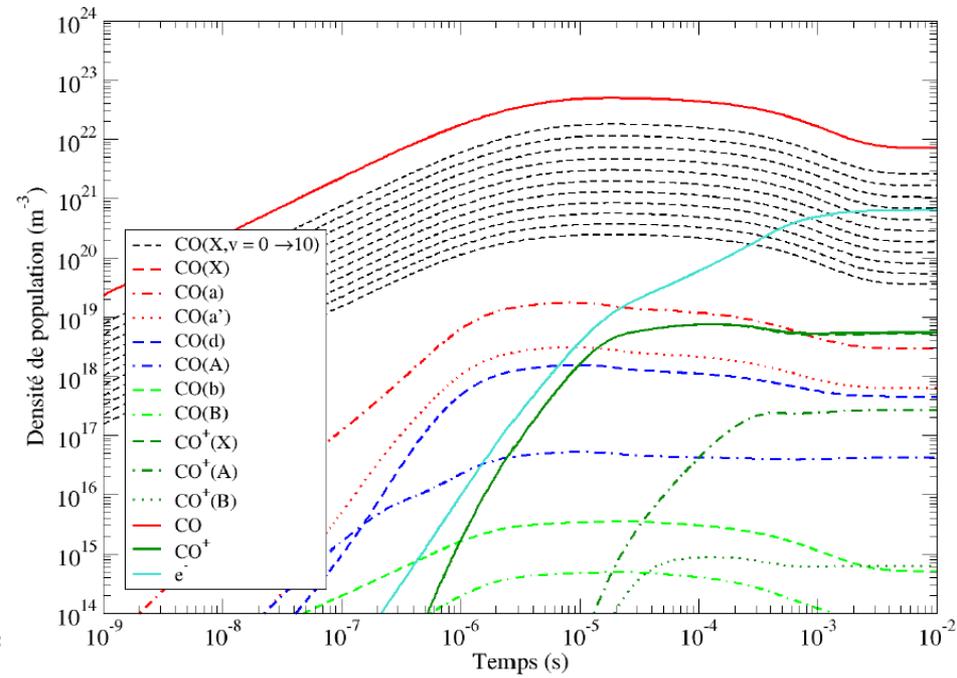
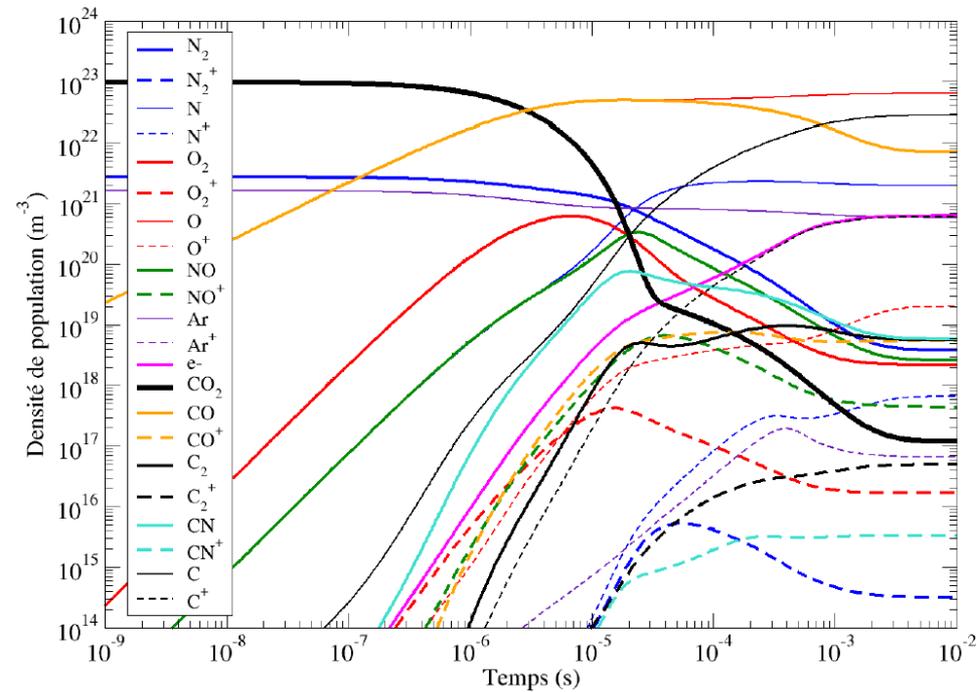
FIG. 5. Electronic Boltzmann plots of N, O, and Ar and time evolution of the electronic excitation temperatures in the same conditions as Fig. 1.

CoRaM-MARS

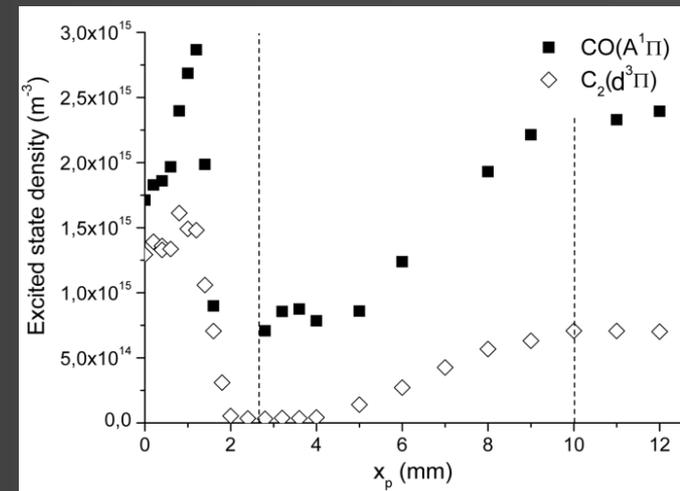
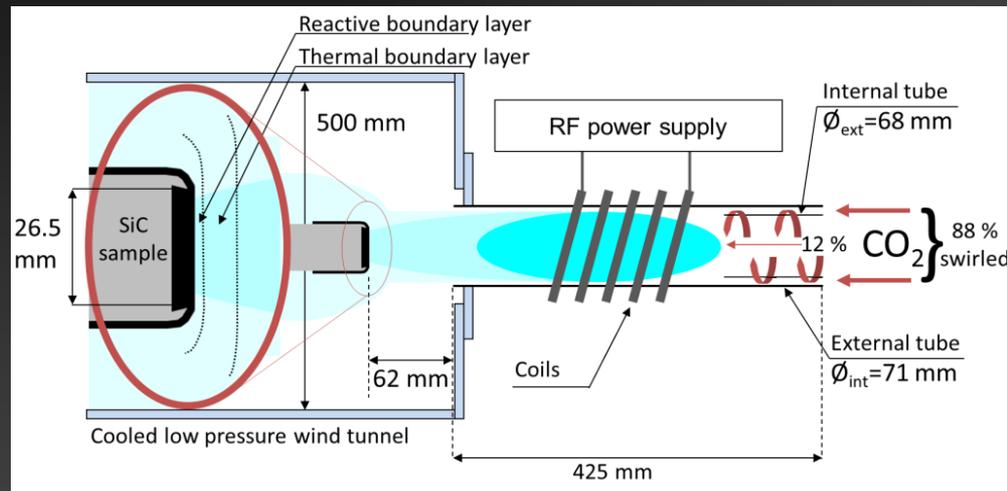
Type	Espèces	Etats
Molécules	CO ₂	$X^1\Sigma_g^+$
	N ₂	$X^1\Sigma_g^+(v=0\rightarrow 67)$, $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B'^3\Sigma_u^-$, $a'^1\Sigma_u^-$, $a^1\Pi_g$, $w^1\Delta_u$, $G^3\Delta_g$, $C^3\Pi_u$, $E^3\Sigma_g^+$
	O ₂	$X^3\Sigma_g^-(v=0\rightarrow 46)$, $a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+$, $c^1\Sigma_u^-$, $A'^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Sigma_u^-$, $f^1\Sigma_u^+$
	C ₂	$X^1\Sigma_g^+(v=0\rightarrow 36)$, $a^3\Pi_u$, $b^3\Sigma_g^-$, $A^1\Pi_u$, $c^3\Sigma_u^+$, $d^3\Pi_g$, $C^1\Pi_g$, $e^3\Pi_g$, $D^1\Sigma_u^+$
	NO	$X^2\Pi(v=0\rightarrow 53)$, $a^4\Pi$, $A^2\Sigma^+$, $B^2\Pi$, $b^4\Sigma^-$, $C^2\Pi$, $D^2\Sigma^+$, $B'^2\Delta$, $E^2\Sigma^+$, $F^2\Delta$
	CO	$X^1\Sigma^+(v=0\rightarrow 76)$, $a^3\Pi$, $a'^3\Sigma^+$, $d^3\Delta$, $e^3\Sigma^-$, $A^1\Pi$, $I^1\Sigma^-$, $D^1\Delta^-$, $b^3\Sigma^+$, $B^1\Sigma^+$
	CN	$X^2\Sigma^+(v=0\rightarrow 41)$, $A^2\Pi$, $B^2\Sigma^+$, $D^2\Pi$, $E^2\Sigma^+$, $F^2\Delta$
Ions moléculaires	N ₂ ⁺	$X^2\Sigma_g^+$, $A^2\Pi_u$, $B^2\Sigma_u^+$, $a^4\Sigma_u^+$, $D^2\Pi_g$, $C^2\Sigma_u^+$
	O ₂ ⁺	$X^2\Pi_g$, $a^4\Pi_u$, $A^2\Pi_u$, $b^4\Sigma_g^-$
	C ₂ ⁺	$X^4\Sigma_g^-$, $1^2\Pi_u$, $4\Pi_u$, $1^2\Sigma_g^+$, $2^2\Pi_u$, $\tilde{B}^4\Sigma_u^-$, $1^2\Sigma_u^+$
	NO ⁺	$X^1\Sigma^+$, $a^3\Sigma^+$, $b^3\Pi$, $W^3\Delta$, $b'^3\Sigma^-$, $A'^1\Sigma^+$, $W^1\Delta$, $A^1\Pi$
	CO ⁺	$X^2\Sigma^+$, $A^2\Pi$, $B^2\Sigma^+$, $C^2\Delta$
CN ⁺	$X^1\Sigma^+$, $a^3\Pi$, 1Δ , $c^1\Sigma^+$	
Atomes	N	$4S_{3/2}^o$, $2D_{5/2}^o$, $2D_{3/2}^o$, $2P_{1/2}^o$... (total de 252 niveaux)
	O	$3P_2$, $3P_1$, $3P_0$, $1D_2$... (total de 127 niveaux)
	C	$3P_0$, $3P_1$, $3P_2$, $1D_2$... (total de 265 niveaux)
	Ar	$1S_0$, $2[3/2]_2^o$, $2[3/2]_1^o$, $2[1/2]_0^o$... (total de 379 niveaux)
Ions atomiques	N ⁺	$3P_0$, $3P_1$, $3P_2$, $1D_2$... (total de 9 niveaux)
	O ⁺	$4S_{3/2}^o$, $2D_{5/2}^o$, $2D_{3/2}^o$, $2P_{3/2}^o$... (total de 8 niveaux)
	C ⁺	$2P_{1/2}^o$, $2P_{3/2}^o$, $4P_{1/2}$, $4P_{3/2}$... (total de 8 niveaux)
	Ar ⁺	$2P_{3/2}^o$, $2P_{1/2}^o$, $2S_{1/2}$, $4D_{7/2}$... (total de 7 niveaux)

CoRaM-MARS

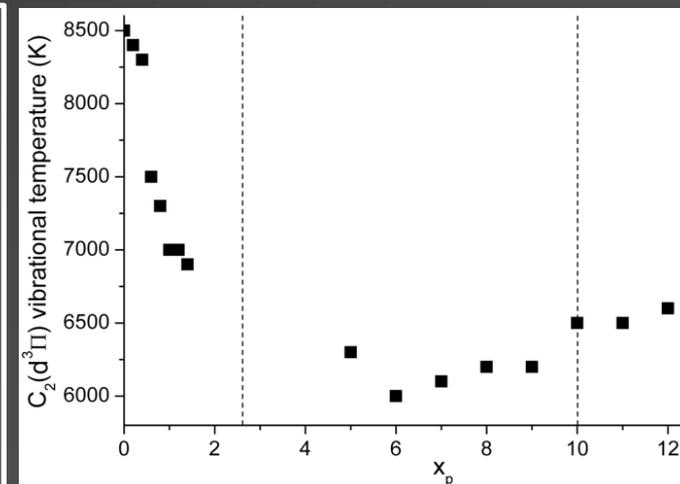
$$p = 600 \text{ Pa}, T_e = T_A = 260 \text{ K} \rightarrow p = 10 \text{ kPa}, T_e = T_A = 7000 \text{ K}$$



Rayonnement hors-équilibre d'une couche limite

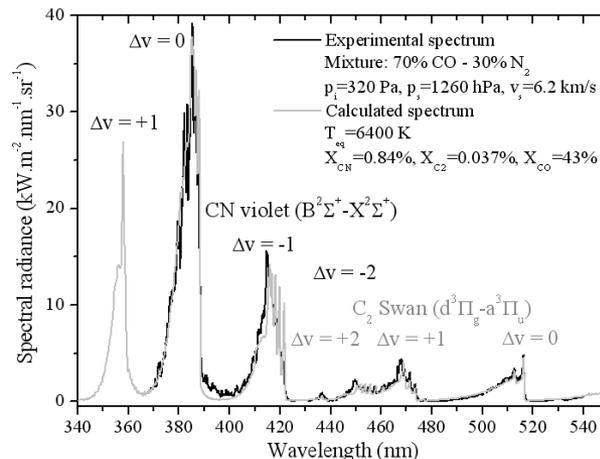


Le rayonnement joue un rôle primordial dans l'échauffement des protections thermiques des sondes martiennes, le comportement des espèces excitées radiatives est analysé dans la couche limite d'un échantillon de SiC dans un plasma de CO_2 . On peut distinguer deux couches limites, l'une thermique et l'autre chimique où les populations des états émetteurs s'écartent fortement de l'équilibre (ici C_2 et CO). Dans la même zone, les températures représentatives de la répartition de population dans les modes internes (vibration et rotation) augmentent fortement.

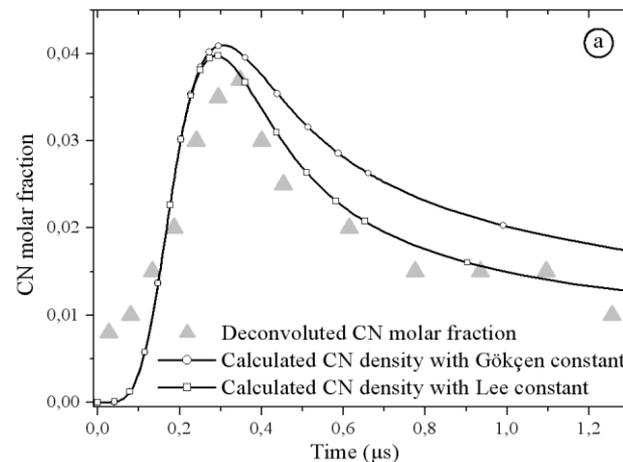


Rayonnement derrière une onde de choc intense

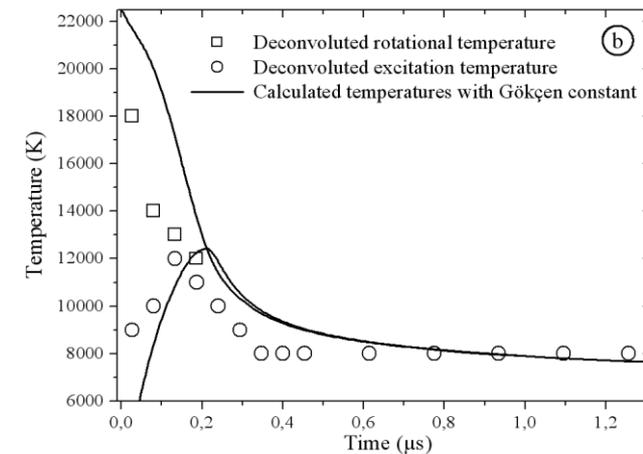
Lors d'une entrée atmosphérique d'engin spatial, le rayonnement parvenant à la surface du bouclier thermique provient de trois zones : la couche limite, la couche de choc quasi-équilibrée et la couche de choc hors-équilibre. Les tubes à choc permettent de reproduire les conditions relatives aux deux dernières zones avec un milieu quasi-homogène. L'enregistrement des spectres en fonction du temps permet d'en déduire l'évolution du flux pour chaque longueur d'onde ainsi que celle des températures de vibration et de rotation. Lorsqu'elle se produit, l'auto-absorption sur le diamètre du tube permet une estimation de la population des états sur leur état fondamental (voir ci-dessous l'exemple de CN).



Spectre de d'émission d'une couche de choc quasi-stationnaire et sa simulation théorique



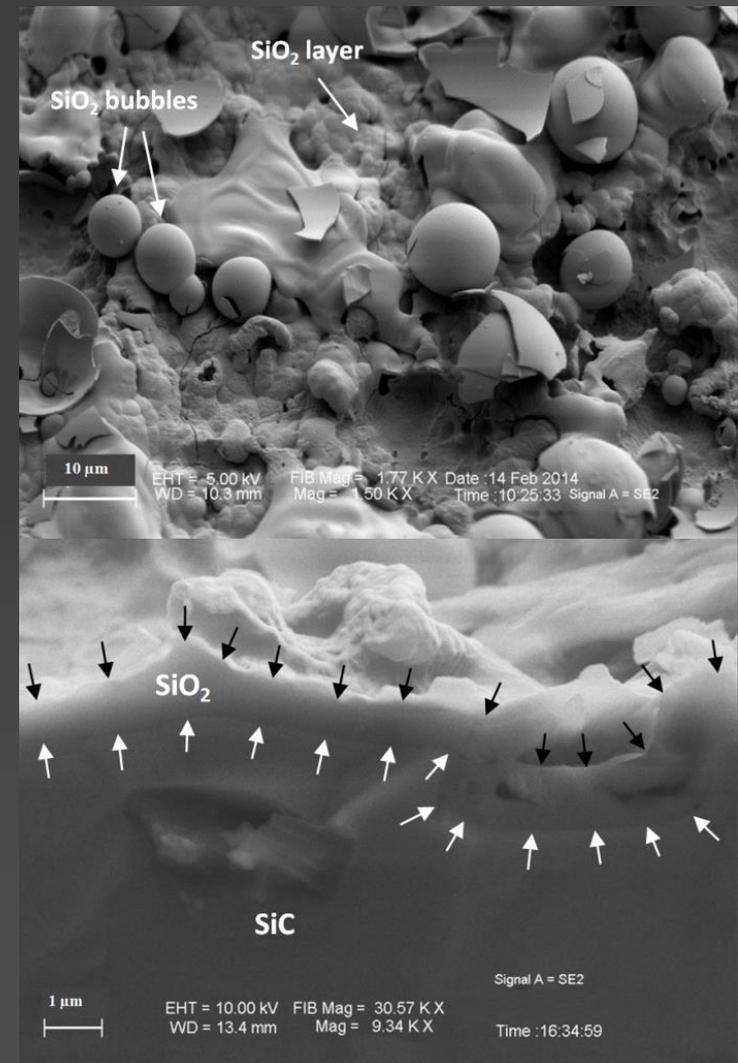
Evolution des densités de CN(X) déduite de l'auto-absorption et comparaison avec les modèles



Températures déduites des spectres d'émission et comparaison avec un modèle Rankine-Hugoniot

Interaction plasma-surface

L'immersion d'une céramique de type SiC dans un plasma contenant de l'oxygène atomique et moléculaire (plasmas d'air ou de CO₂) induit une oxydation passive (formation d'une couche de SiO₂ protectrice) en dessous de 1800 K, et une oxydation active (dégazage de SiO) au dessus de 2000 K, dans les deux cas avec une émission de CO. Entre ces deux températures, les fissures de la couche de SiO₂ laissent fuir du CO qui forme des bulles en surface. Du carbone provenant du SiC a également été détecté sur la surface sous une forme apparentée au graphène.

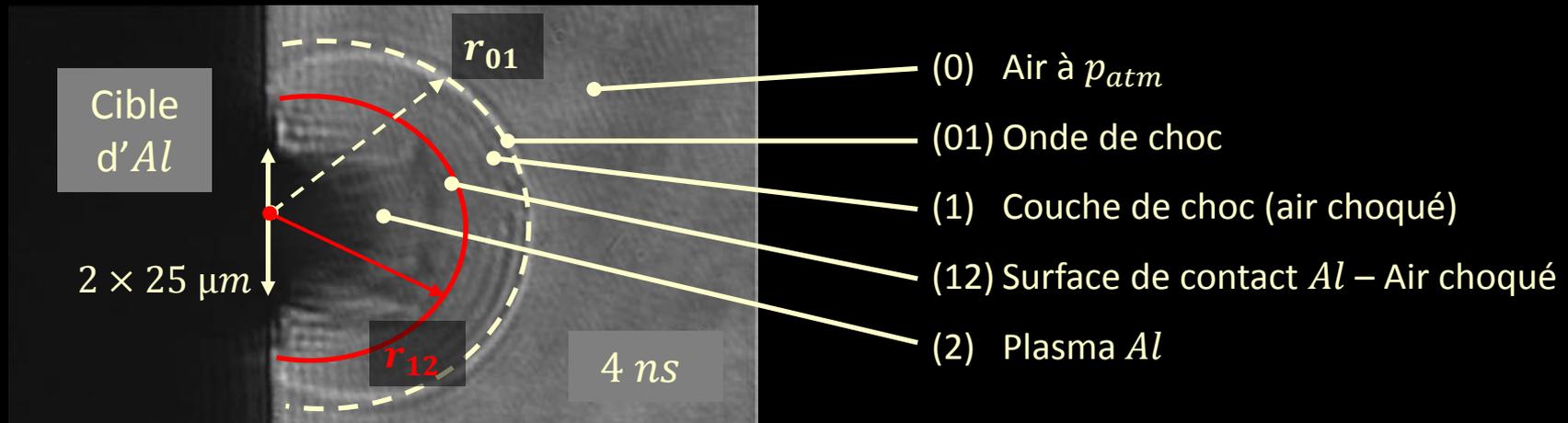


Sommaire

1. Activités sur les plasmas d'entrée atmosphérique
2. Activités sur les plasmas induits par laser
3. Activités sur les plasmas d'arcs électriques
4. Appel...

Aspects aérodynamiques des plasmas induits par laser

Ombroscopie d'un plasma induit par impulsion femtoseconde (50 fs, 0.14 mJ)



Z. Wu, X. Zhu and N. Zhang, J. Appl. Phys. **109** 053113 (2011)

ECHREM

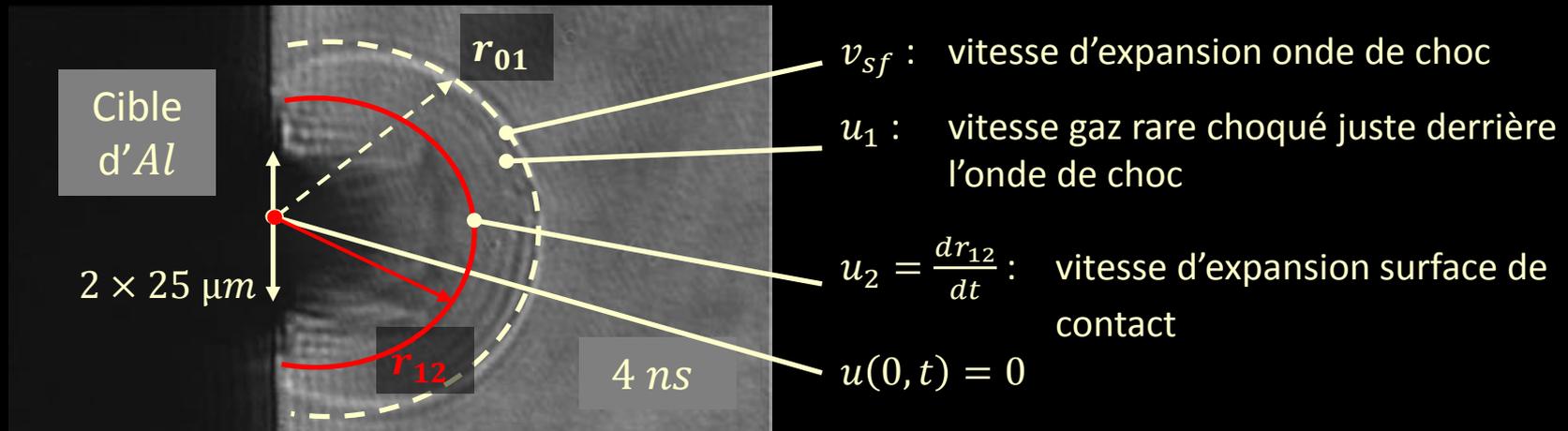
Euler code for
 CHemically REactive
 Multicomponent
 laser-induced plasmas

Hypothèses

1. Symétrie sphérique
2. Deux couches de rayon r_{01} et r_{12} se développant dans *He, Ne, Ar, Kr* ou *Xe*
3. Chaque couche en déséquilibre chimique caractérisée par p, ρ, T, ε uniforme
4. Vitesse u dépendant de r et de t

Aspects aérodynamiques des plasmas induits par laser

Ombroscopie d'un plasma induit par impulsion femtoseconde (50 fs, 0.14 mJ)



Z. Wu, X. Zhu and N. Zhang, J. Appl. Phys. **109** 053113 (2011)

ECHREM

Equations de bilan (en approximation eulérienne)

1. Masse
2. Quantité de mouvement
3. Energie

Couche (1) Ionisation – recombinaison CoRaM-RG
 Couche (2) Ionisation – recombinaison CoRaM-Al

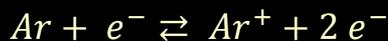
Conséquences du déséquilibre thermo-chimique sur la modélisation



Couche (1)

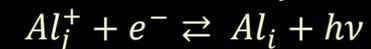
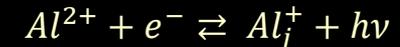
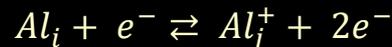
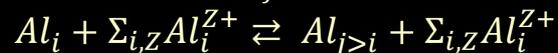
Modèle CR CoRaM-RG

→ Ar (2 niv.), Ar^+ (1 niv.), Ar_2^+ (1 niv.)



Couche (2)

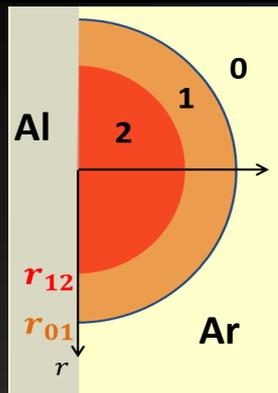
Modèle CR CoRaM-Al → Al (80 niv.), Al^+ (170 niv.), Al^{2+} (1 niv.)



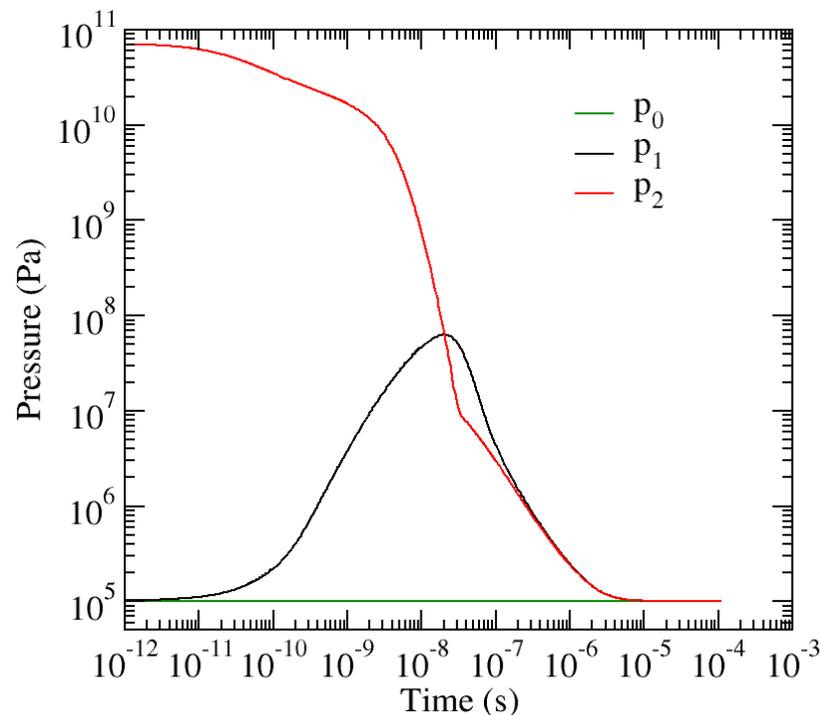
65 000 processus élémentaires

$$k_i(T_{A,e}) = \sqrt{\frac{8k_B T_{A,e}}{\pi \mu}} \int_0^{+\infty} x e^{-x} \sigma_i(x) dx \text{ avec } x = \frac{\varepsilon}{k_B T_{A,e}}$$

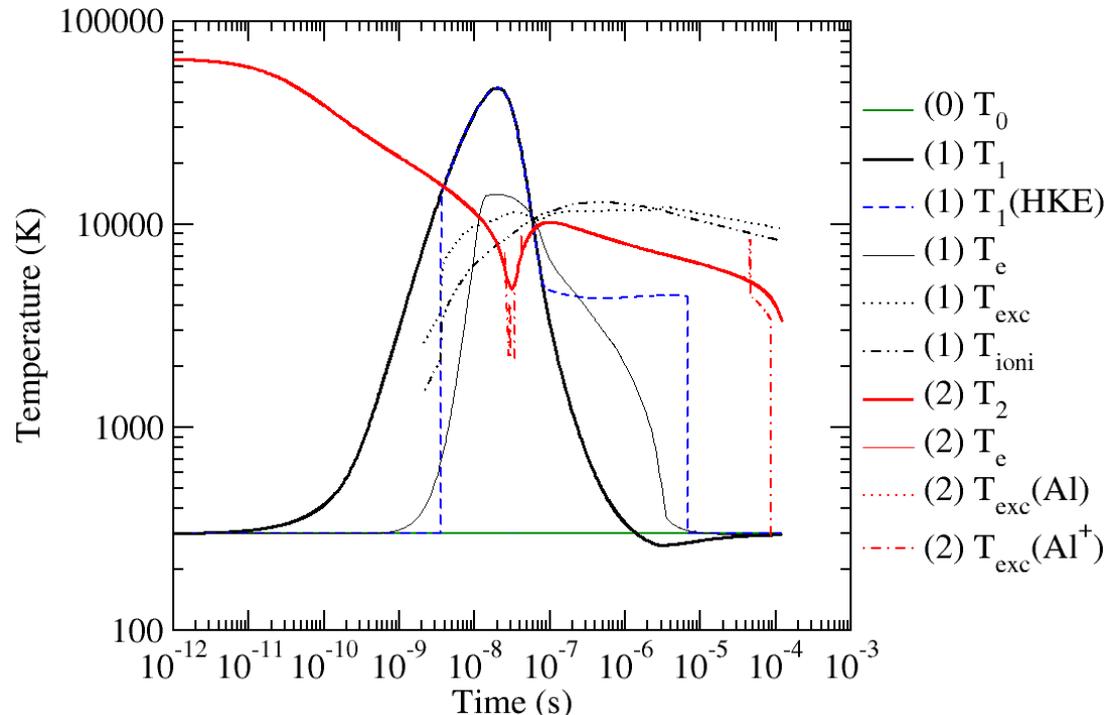
$k'_i(T_{A,e})$ obtenu par le bilan détaillé en déséquilibre thermique



Résultats (30 ps, 532 nm, 10 mJ, 10 J cm^{-2} , $3.6 \times 10^{-14} \text{ m}^3$, $9.7 \times 10^{-11} \text{ kg}$)

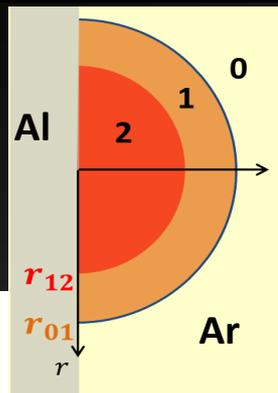


Pression initiale très forte dans (2)
(2) pousse (1), puis (1) pousse (2)

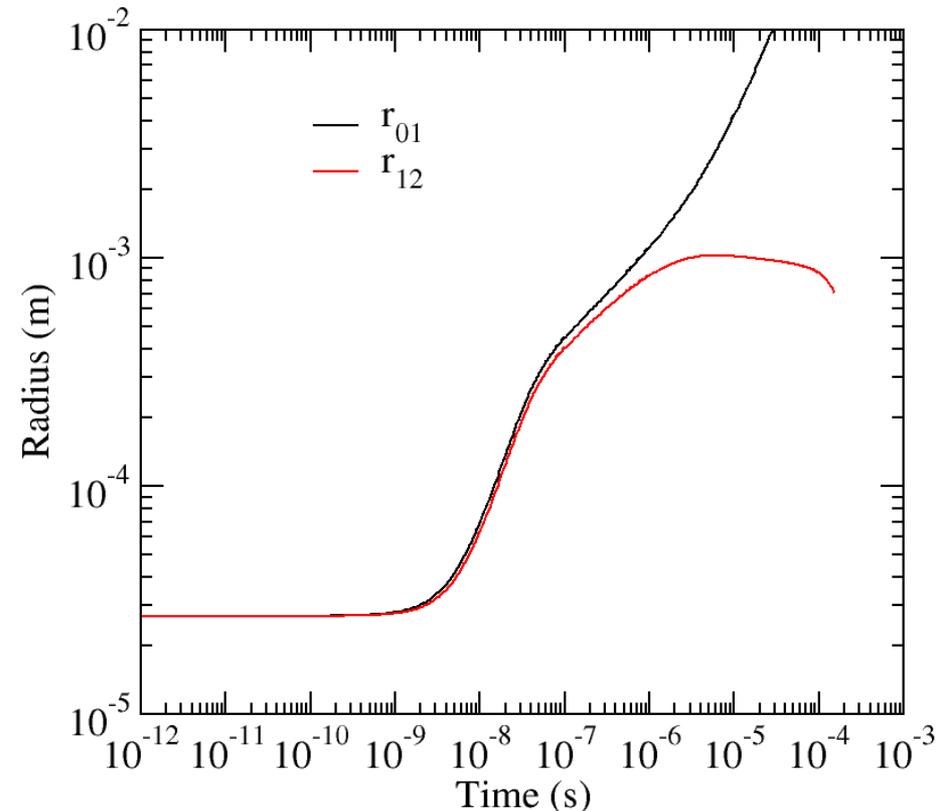
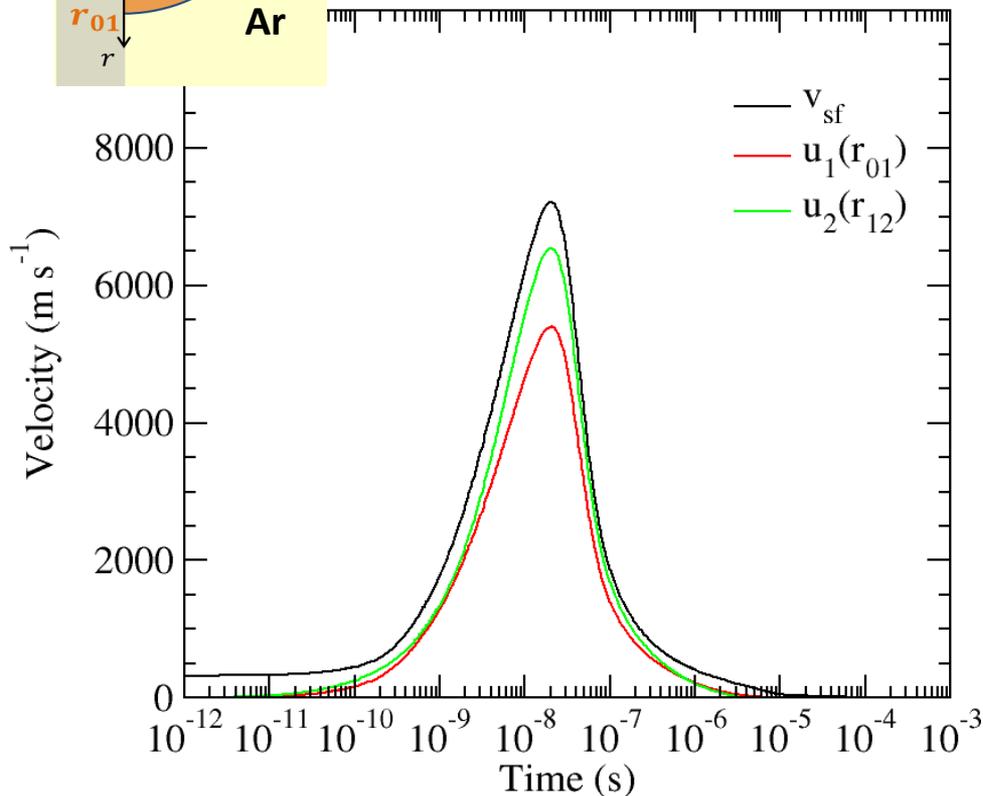


Couche (1) : faible déséquilibre

Couche (2) : retard de la recombinaison et la désexcitation



Résultats (30 ps , 532 nm , 10 mJ , 10 J cm^{-2} , $3.6 \times 10^{-14} \text{ m}^3$, $9.7 \times 10^{-11} \text{ kg}$)

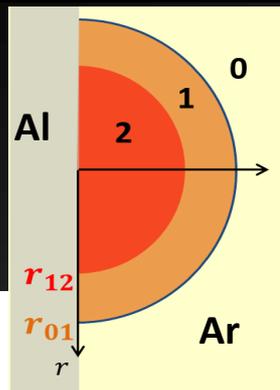


Vitesse maximale pour $\tau \cong 20 \text{ ns}$

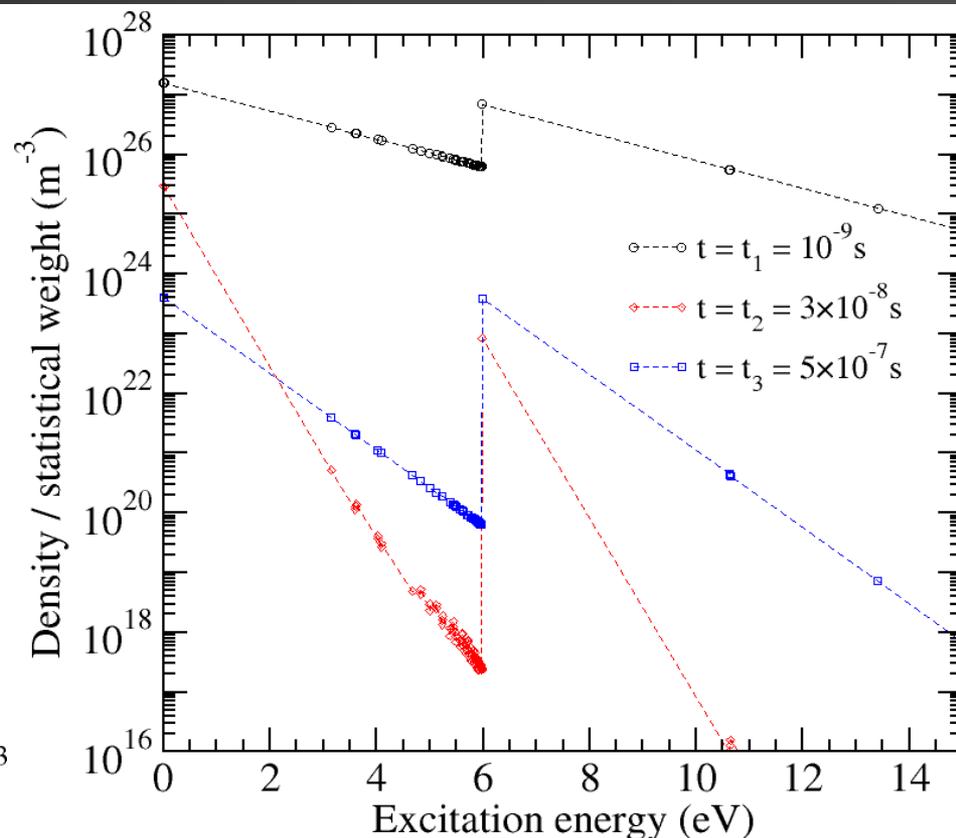
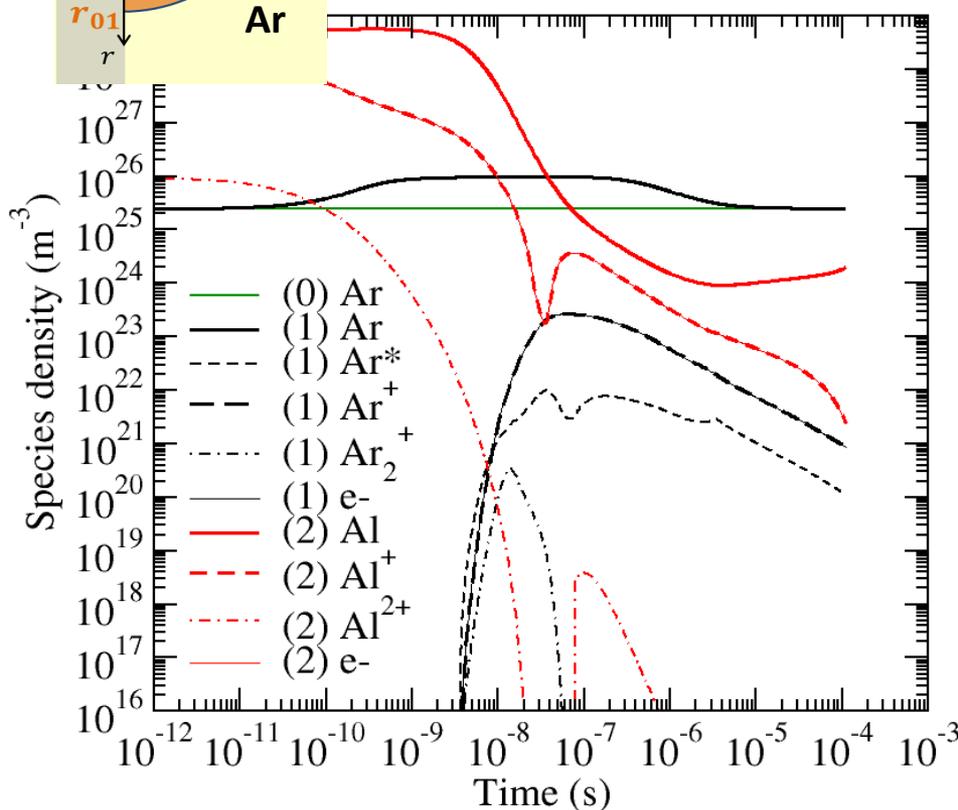
Nombre de Mach maximal : $Ma = 20$

Couche de choc très fine

Multiplication du rayon de (2) d'un facteur 40



Résultats (30 ps, 532 nm, 10 mJ, 10 J cm^{-2} , $3.6 \times 10^{-14} \text{ m}^3$, $9.7 \times 10^{-11} \text{ kg}$)



Couche (1) : $\alpha_i < 0.003$

Couche (2) : $n_e \cong 3 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ à $1 \mu\text{s}$

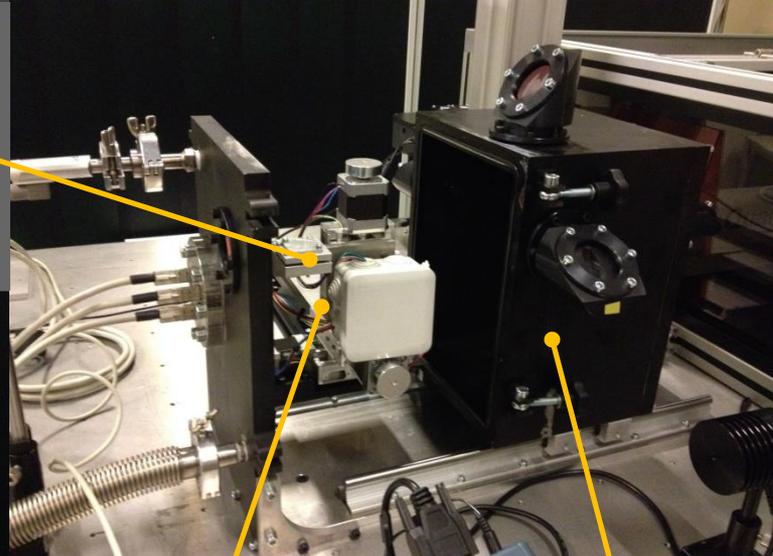
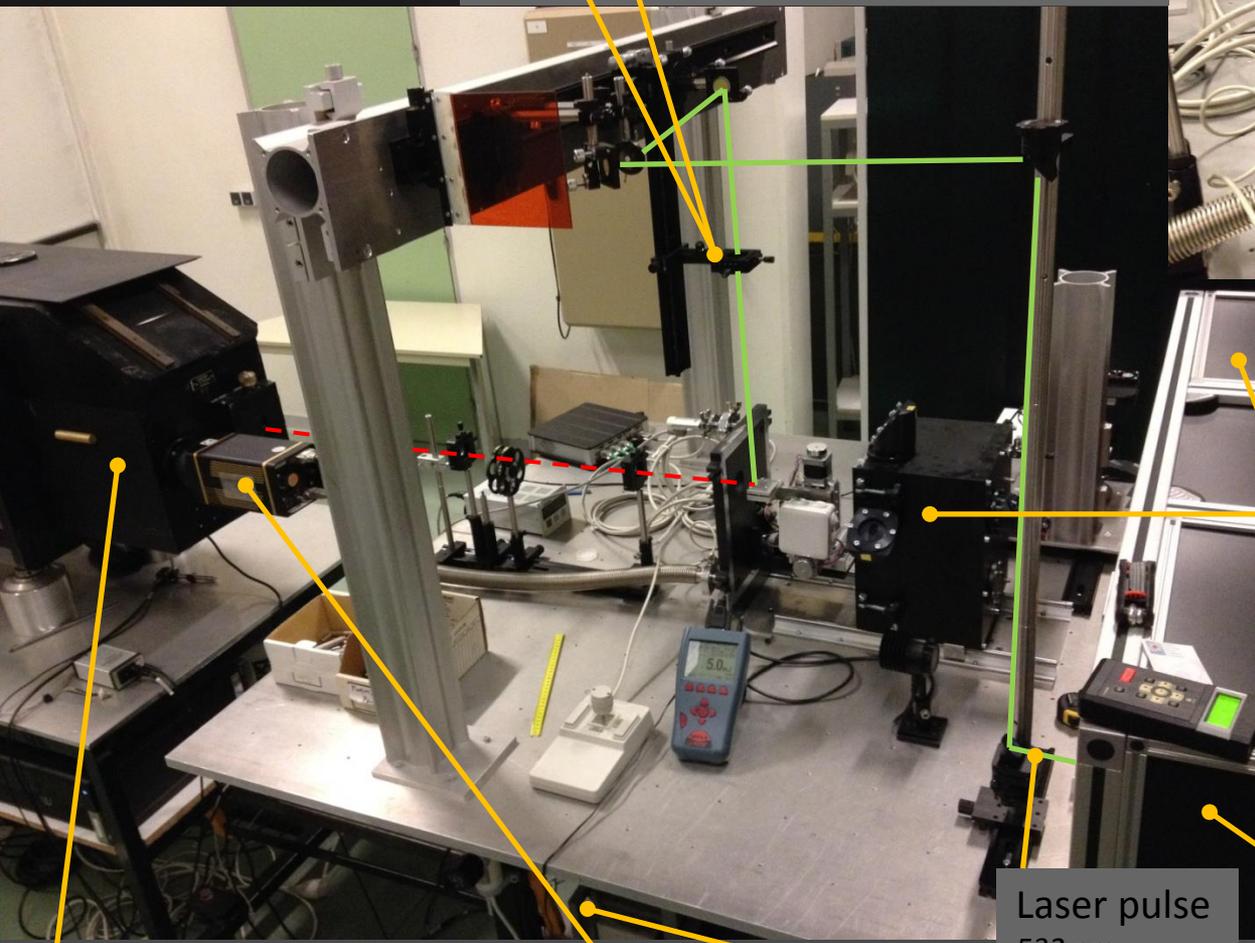
Déséquilibre d'excitation uniquement $\sim 30 \text{ ns}$

Résultats très proches si σ_{exc} et σ_{ioni} divisées par 10

CORIA
LIBS platform

For 10 mJ at **532 nm** :

- **f = 50 cm** Fluence $F \approx 9 \text{ J cm}^{-2}$ (center)
Irradiance $\phi \approx 3 \times 10^{11} \text{ W cm}^{-2}$ (center)
Waist diameter $\approx 250 \mu\text{m}$
- **f = 5 cm** Fluence $F \approx 900 \text{ J cm}^{-2}$ (center)
Irradiance $\phi \approx 3 \times 10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ (center)
Waist diameter $\approx 25 \mu\text{m}$



Vacuum (xyz)-stage samples holder
 $12 \times 12 \times 12 \text{ mm}^3$

Vacuum chamber
Ultimate pressure 0.3 Pa
Equipped with Brewster windows

Laser source
QUANTA-RAY Spectra Pro 250 (10 Hz, 2 – 10 ns, $\varnothing 10 \text{ mm}$, 0.5 mrad)
355 nm – 420 mJ
532 nm – 800 mJ
1064 nm – 1400 mJ

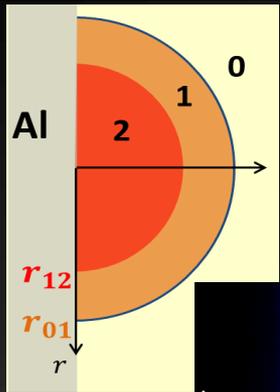
Laser pulse
532 nm

Laser source
EKSPLA PL-2251 (10 Hz, 30 ps, $\varnothing 6 \text{ mm}$, 100:1, 0.5 mrad)
355 nm – 14 mJ – Vert. Polar.
532 nm – 20 mJ – Horiz. Polar.
1064 nm – 34 mJ – Vert. Polar.

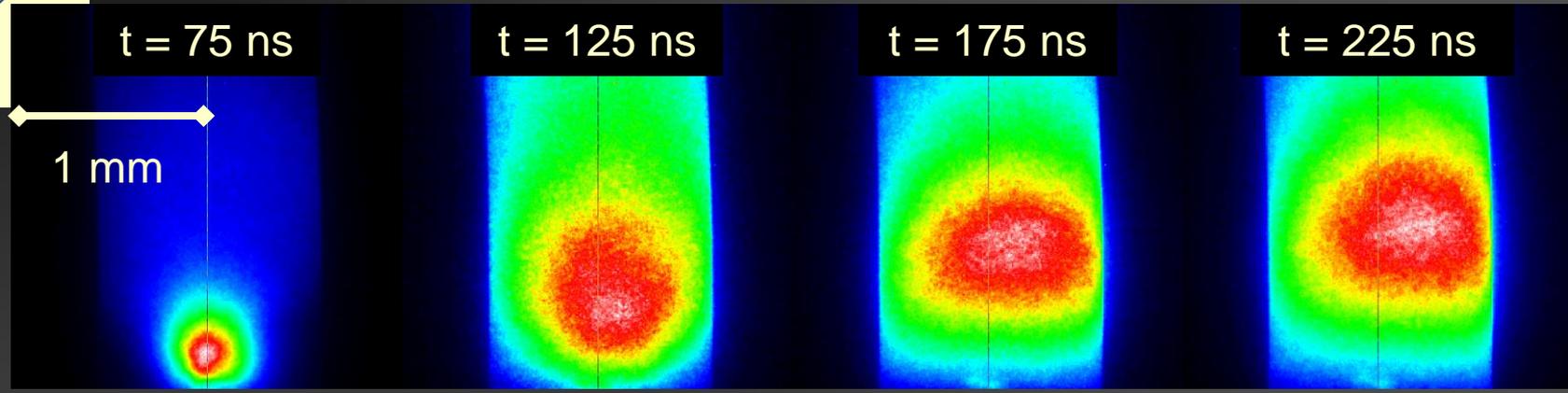
Ebert-Fastie Spectrometer
Focal length $f = 2 \text{ m}$
Aperture $f / 15$
Spectral resolution $\approx 0.05 \text{ nm}$ at 700 nm

ICCD Camera
250 nm – 750 nm
Minimum gate 1 ns

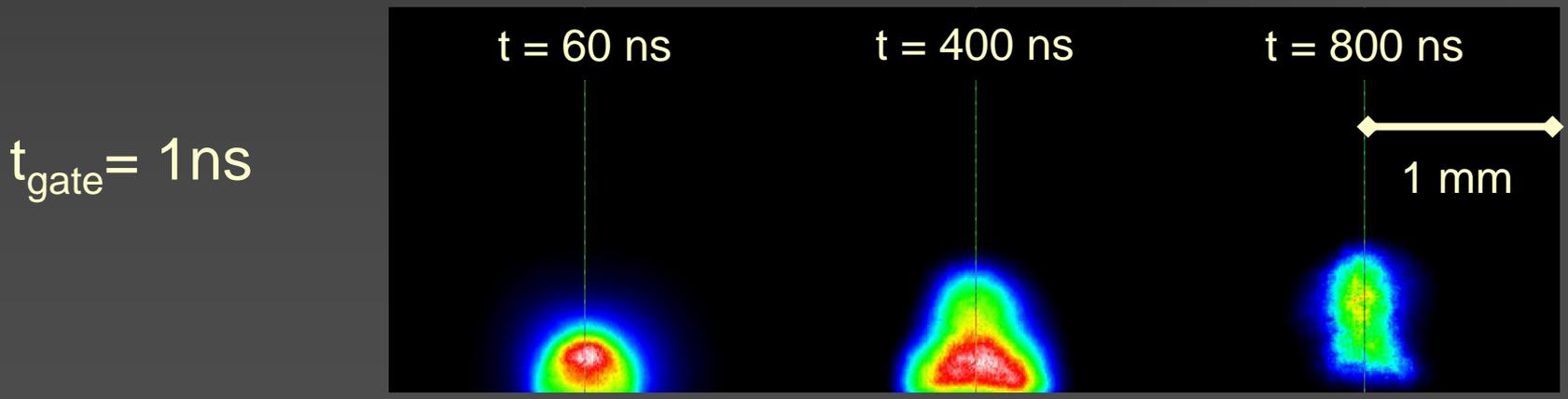
Pumping system
Primary + turbomolecular pumps
Pumping speed $5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$



Aluminum at low pressure



Comparison with the atmospheric pressure case

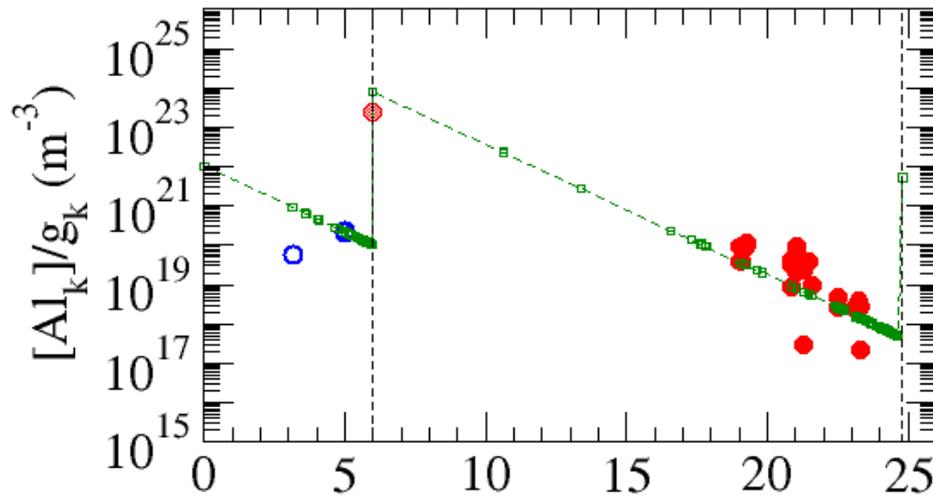


Influence of ambient pressure for $t > 100 \text{ ns}$

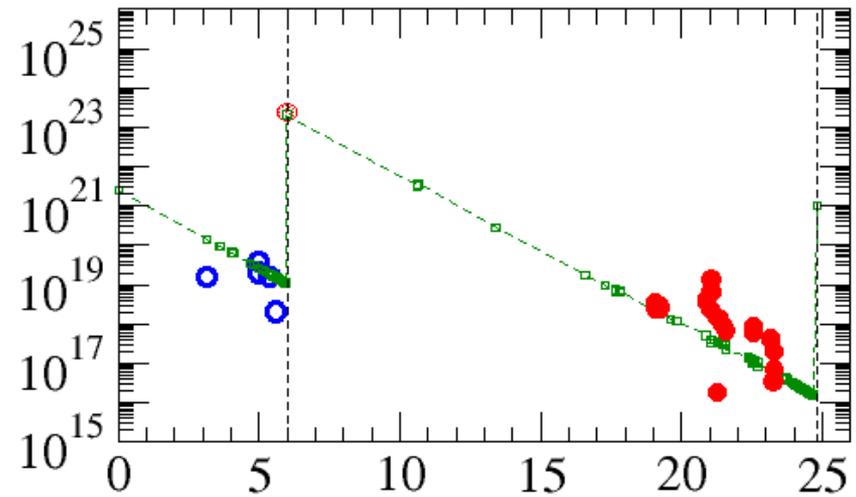
Mod./exp. comparison at low pressure

- Neutrals
- ions
- ⊙ Ne
- ECHREM code

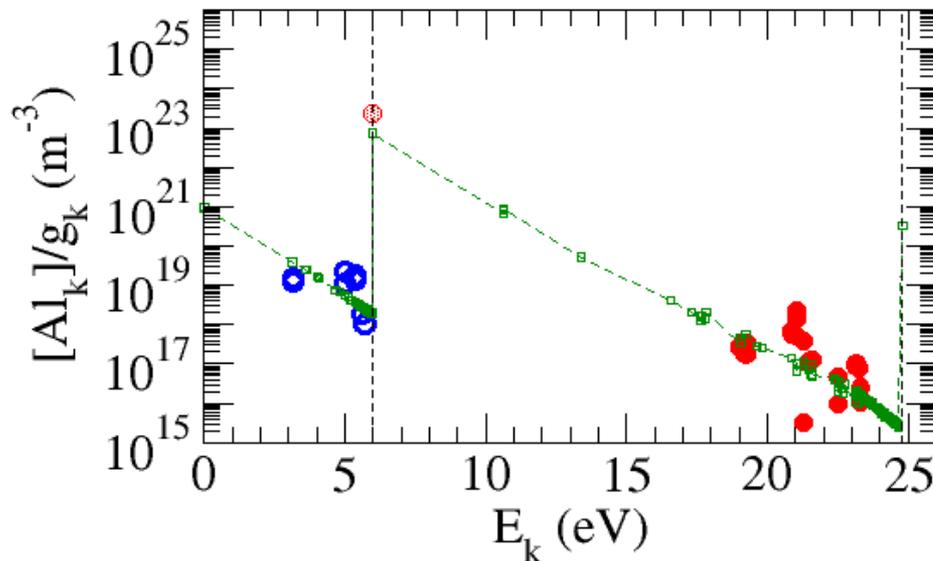
$t = 75$ ns



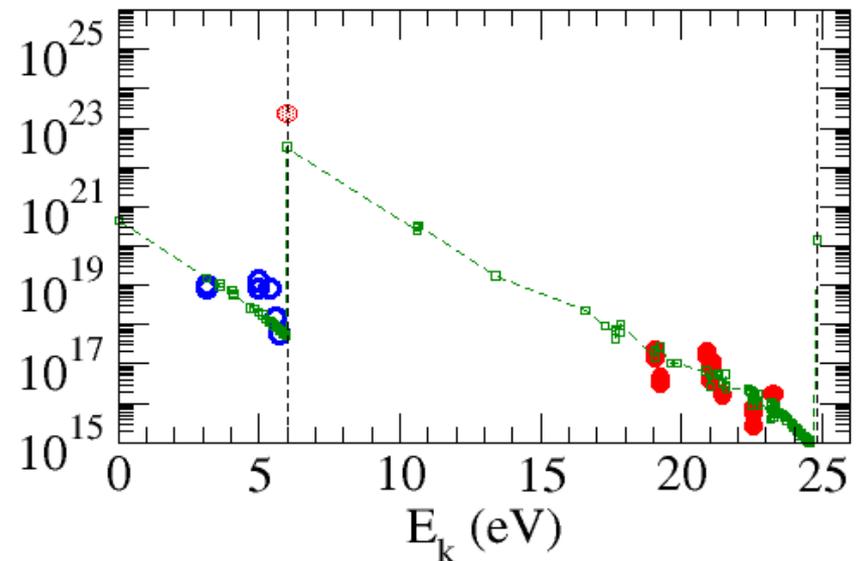
$t = 125$ ns



$t = 175$ ns

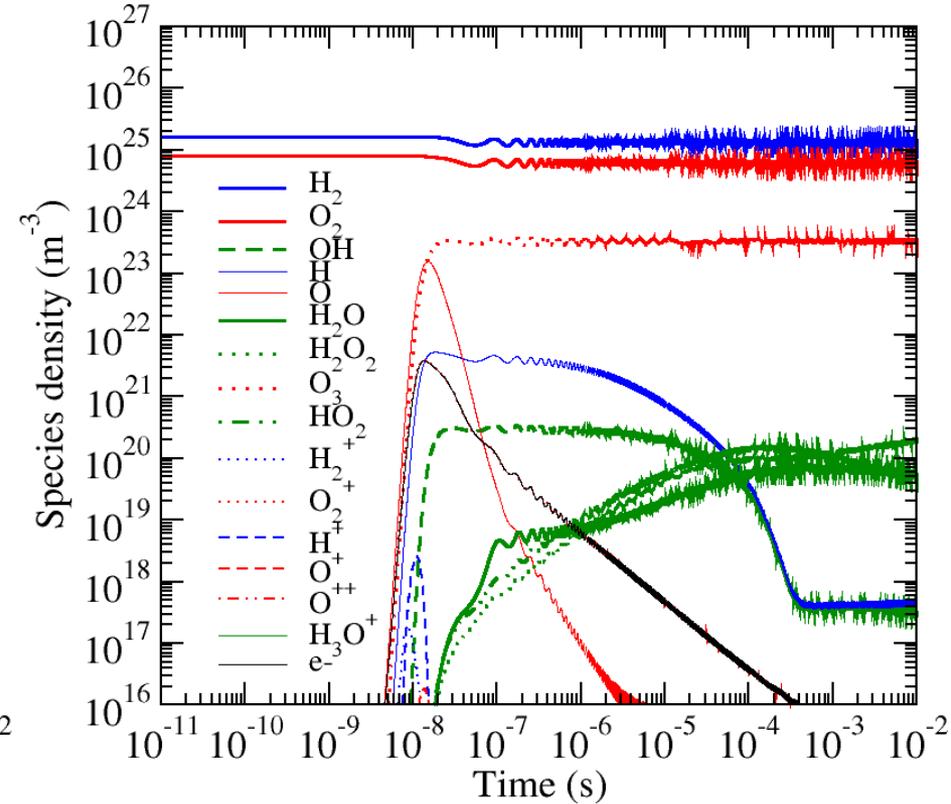
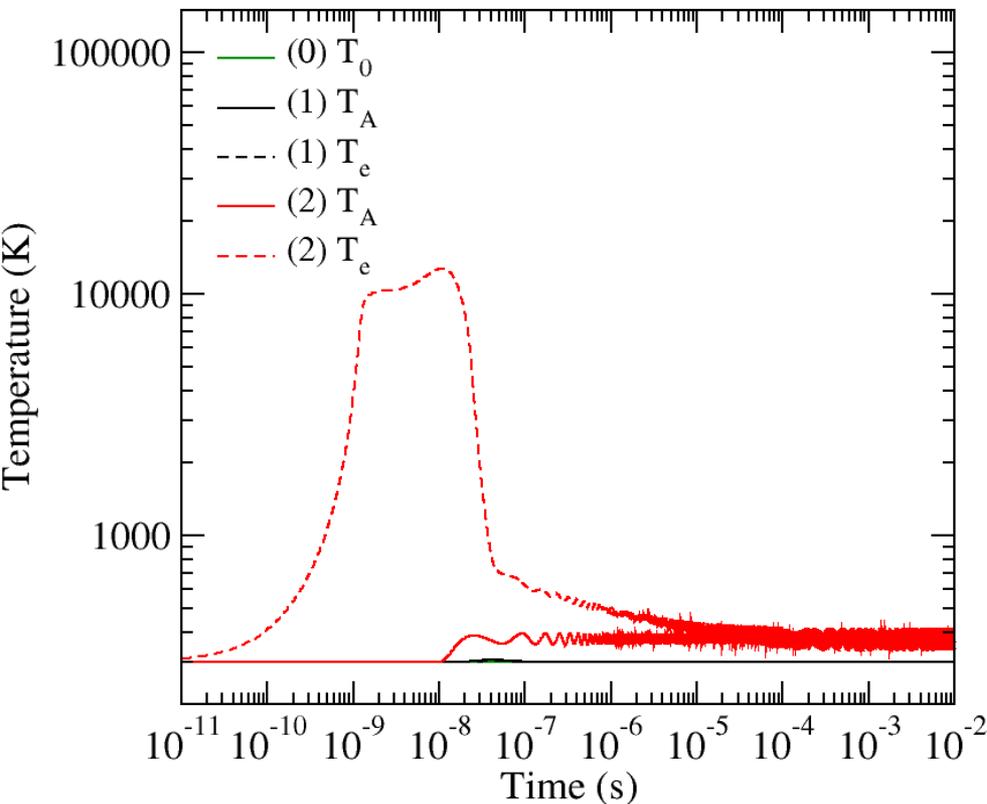


$t = 225$ ns



Laser-induced plasmas in $H_2 - O_2$

20 mJ



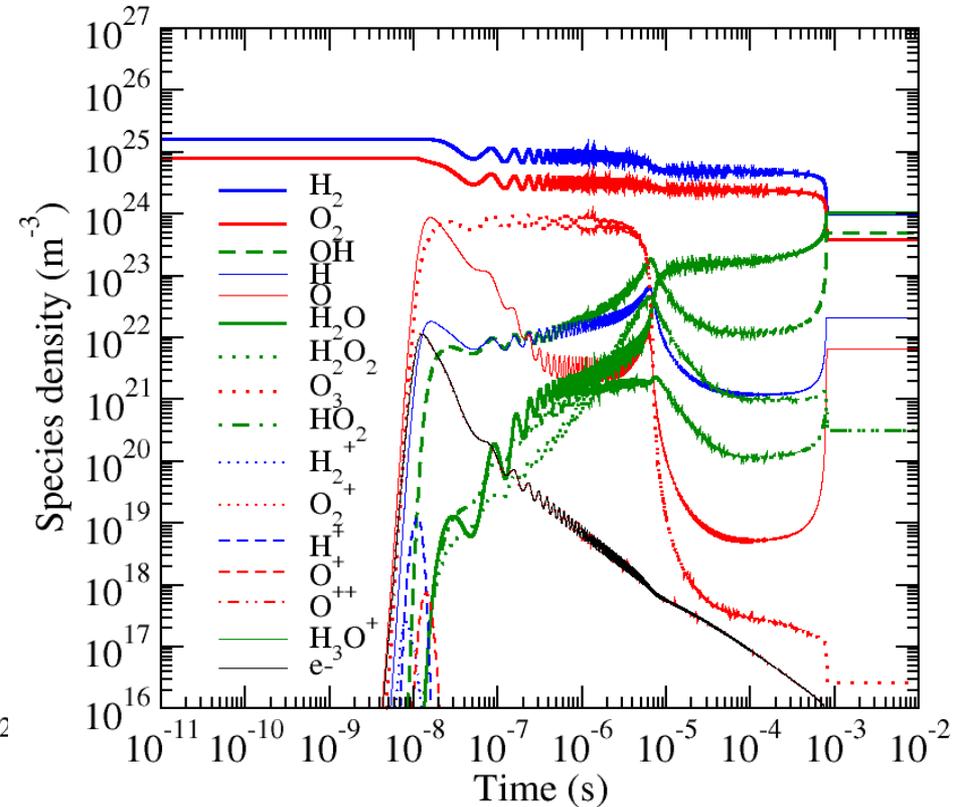
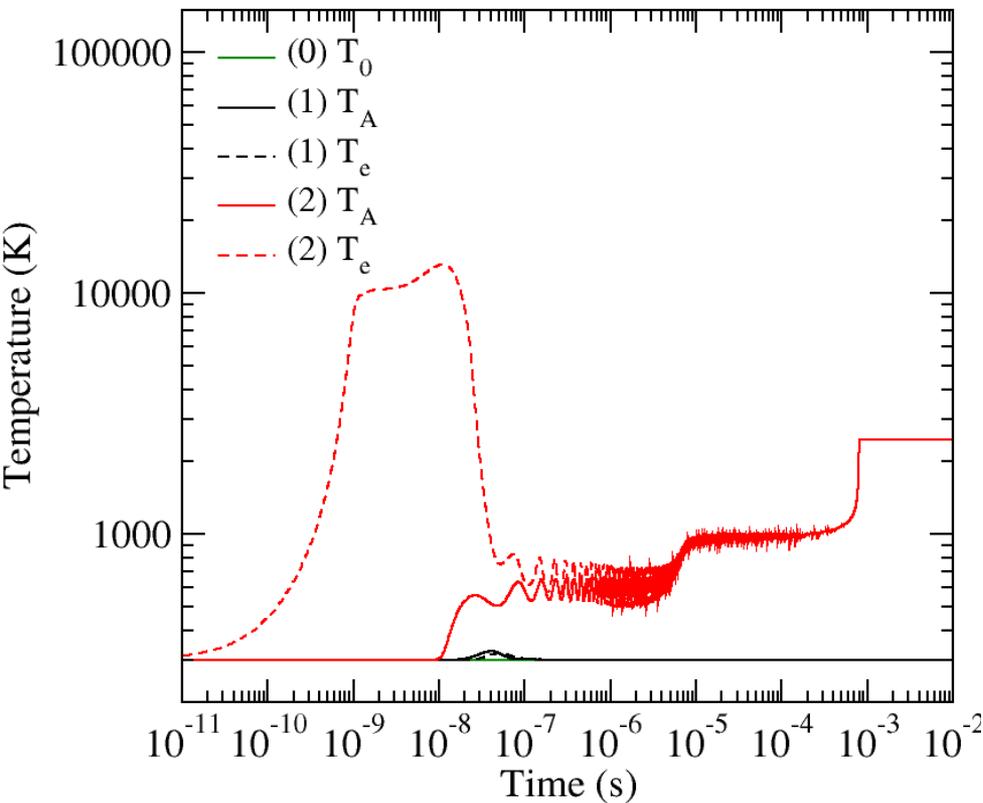
Déséquilibre thermique rapidement relaxé

Oscillations aérodynamiques

Production O_3

Laser-induced plasmas in $H_2 - O_2$

25 mJ



Températures intermédiaires plus fortes

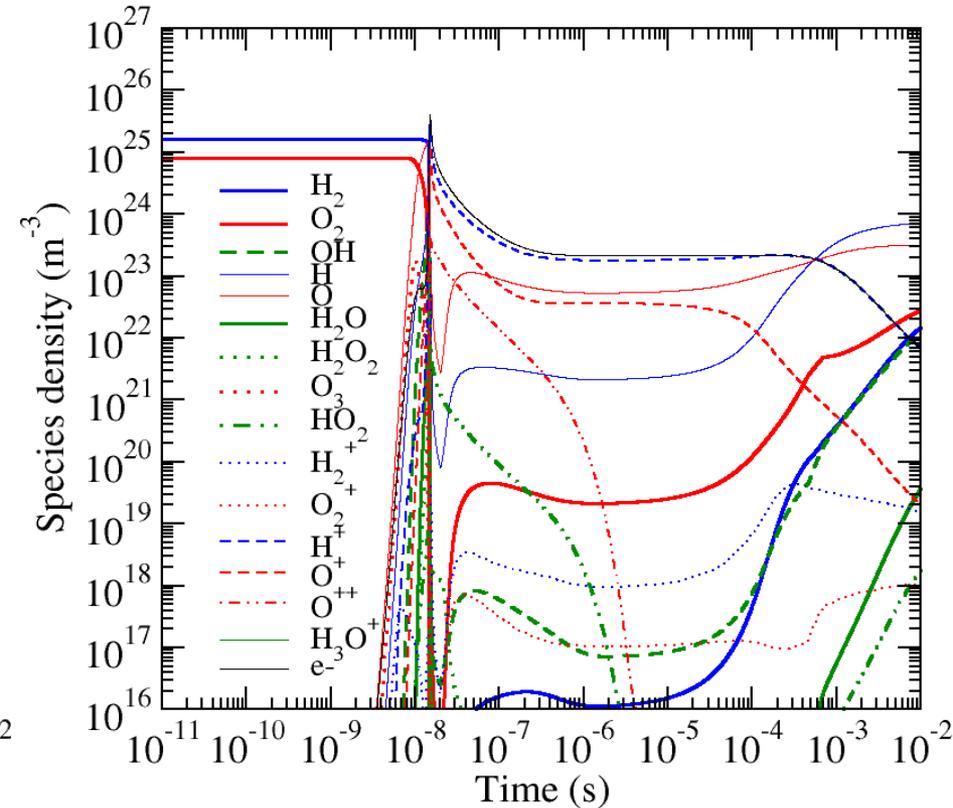
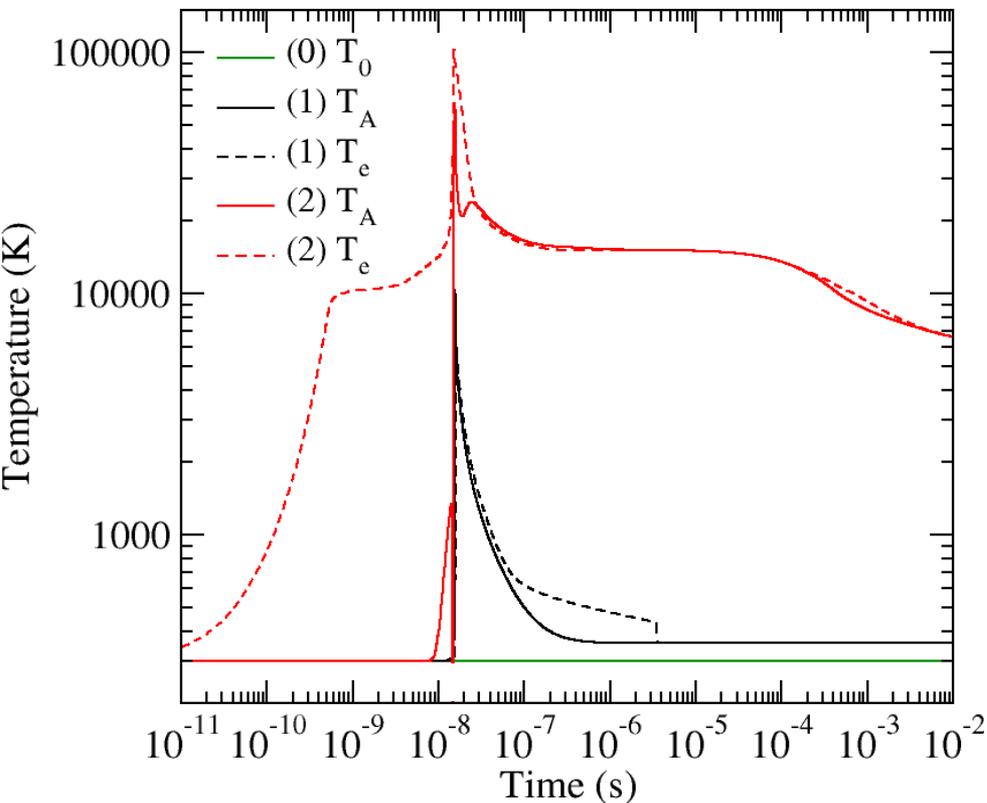
Allumage milieu combustible ~ 1 ms

Destruction O_3 , H_2 et O_2

Production $H_2O \sim 1$ ms

Laser-induced plasmas in $H_2 - O_2$

40 mJ



Températures nettement plus fortes

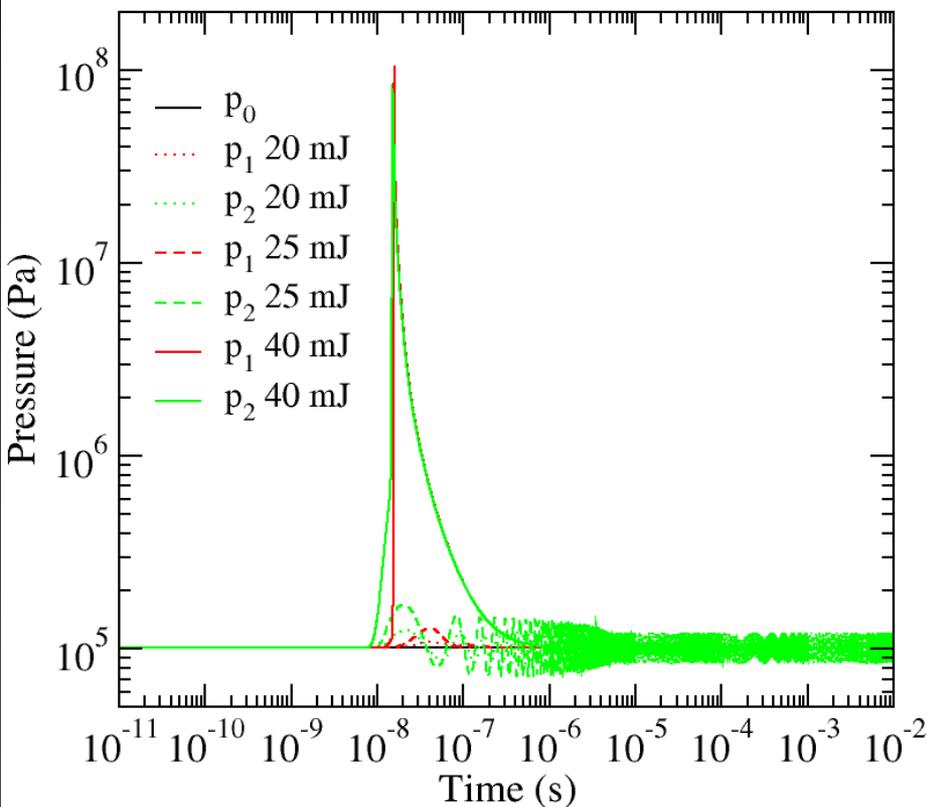
Couche de choc davantage chauffée

Production électrons ($\alpha_i = 0.8$ à $\sim 10 \mu s$)

Dissociation intégrale

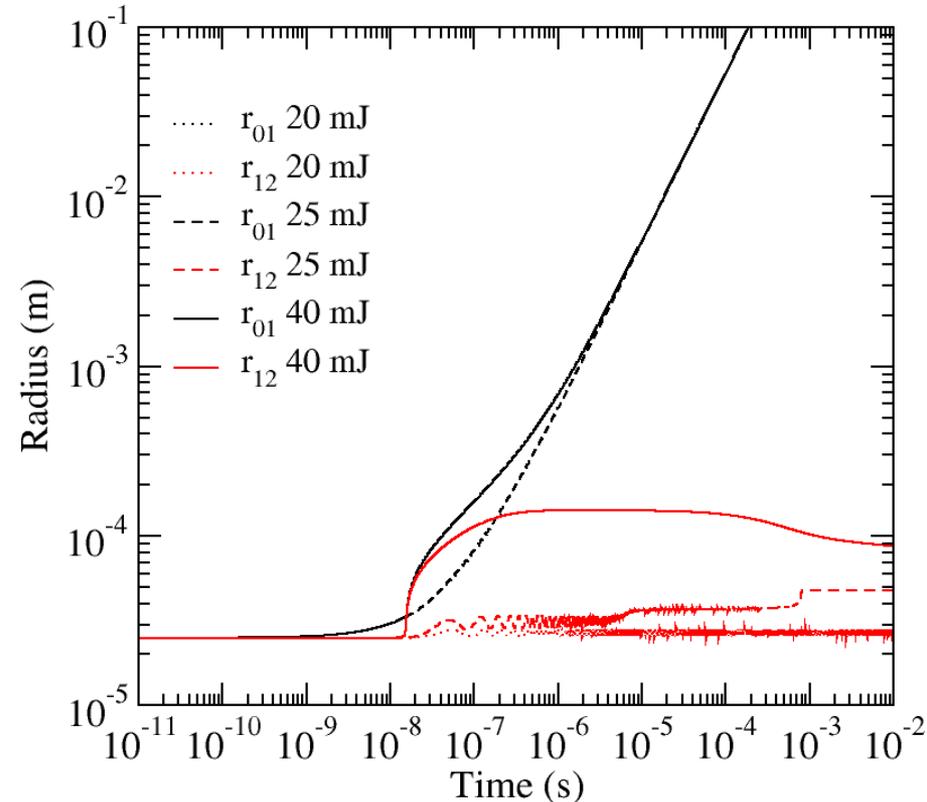
Laser-induced plasmas in $H_2 - O_2$

20 – 25 – 40 mJ



Oscillations de pression à basse fluence

Pression très élevée à haute fluence



Oscillations du rayon du plasma

Nette influence de la température

Sommaire

1. Activités sur les plasmas d'entrée atmosphérique
2. Activités sur les plasmas induits par laser
3. Activités sur les plasmas d'arcs électriques
4. Appel...

Enseignement : torche de découpe par arc

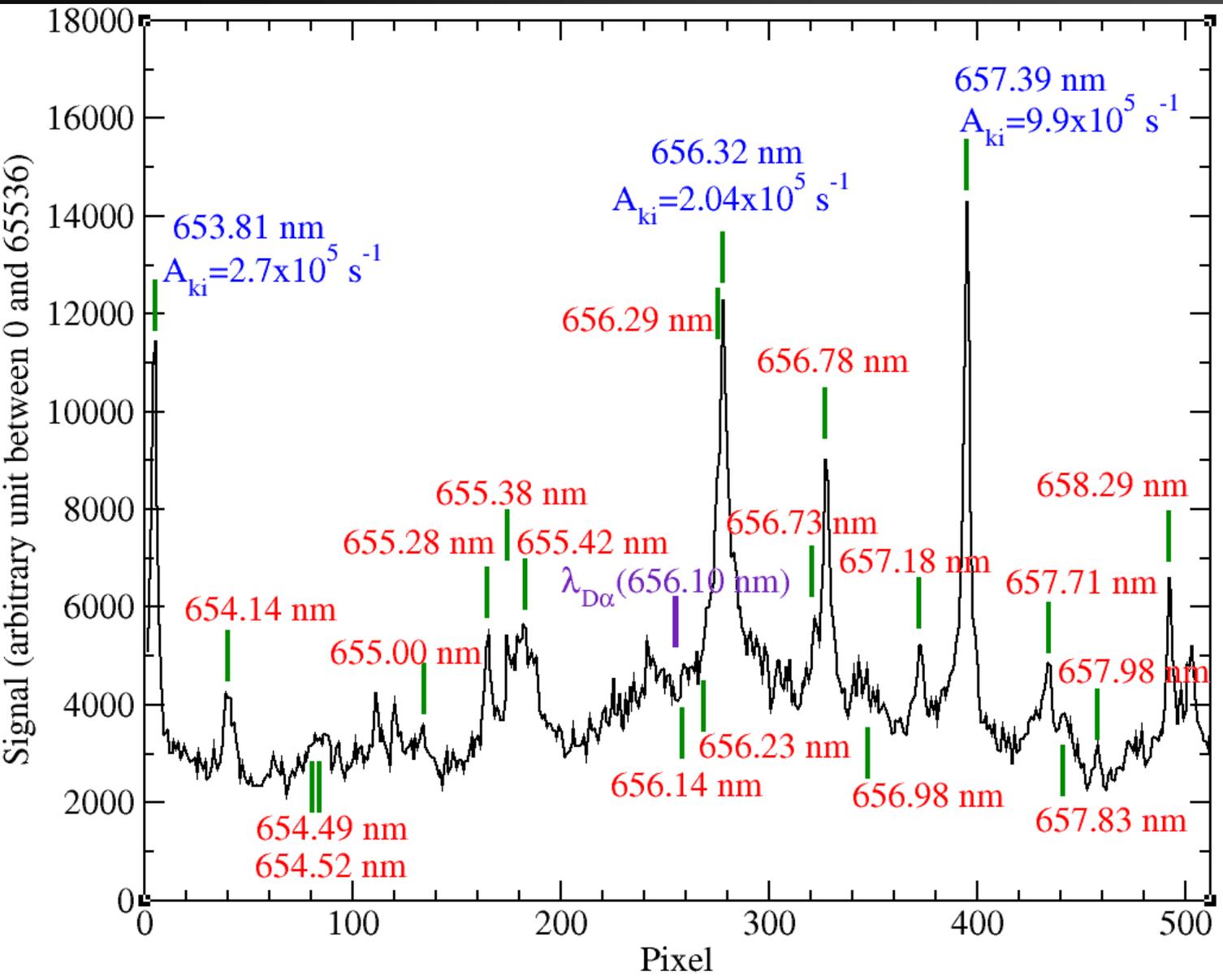
Dans le cadre du Master Maîtrise de l'énergie, les étudiants ont l'occasion d'utiliser une plate-forme électrothermique de découpe par plasma.

Après un bref cours de physique des plasmas, les étudiants doivent comprendre comment l'énergie électrique est convertie pour découper des matériaux métalliques. A cette fin, ils étudient l'alimentation en courant continu Nertajet 120, le pilotage de l'installation par automate programmable et les paramètres de la découpe (intensité du courant, nature des gaz, débit des gaz et distance de la pièce à découper).

Le travail sur une installation semi-industrielle est aussi l'occasion de les faire réfléchir sur les conditions de sécurité à respecter (protection des yeux, des oreilles, de la peau, inhalation des gaz, etc).



Spectres W



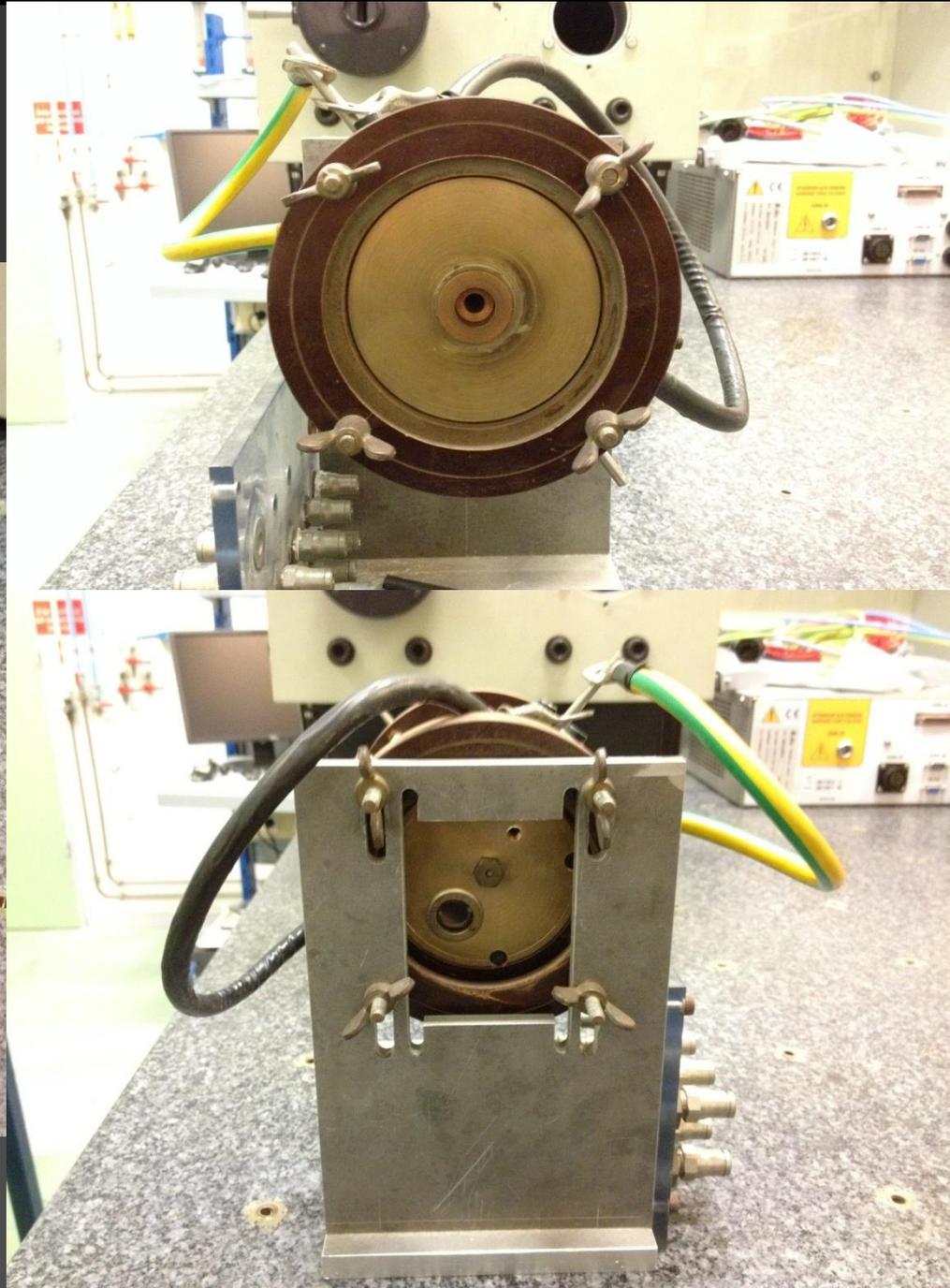
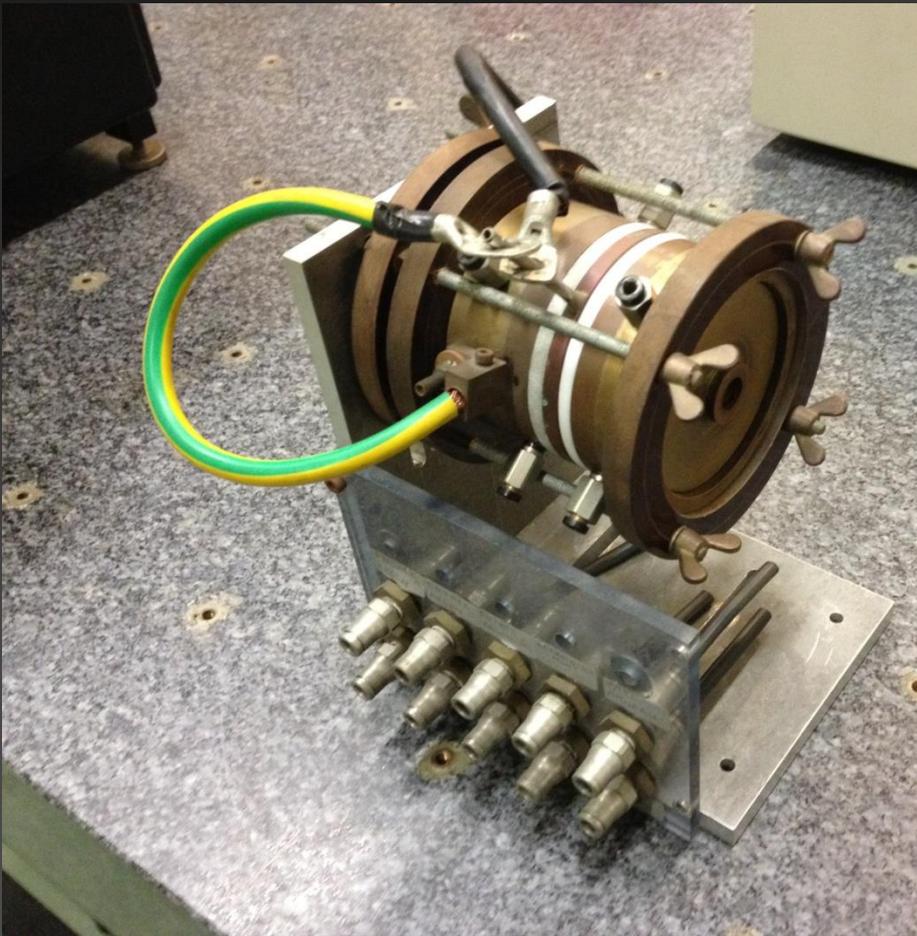
Raies répertoriées NIST
653.80 nm – 658.5 nm

En **bleu** : A_{ki} connu

En **rouge** : A_{ki} inconnu

$\lambda_{D\alpha} = 656.10 \text{ nm}$

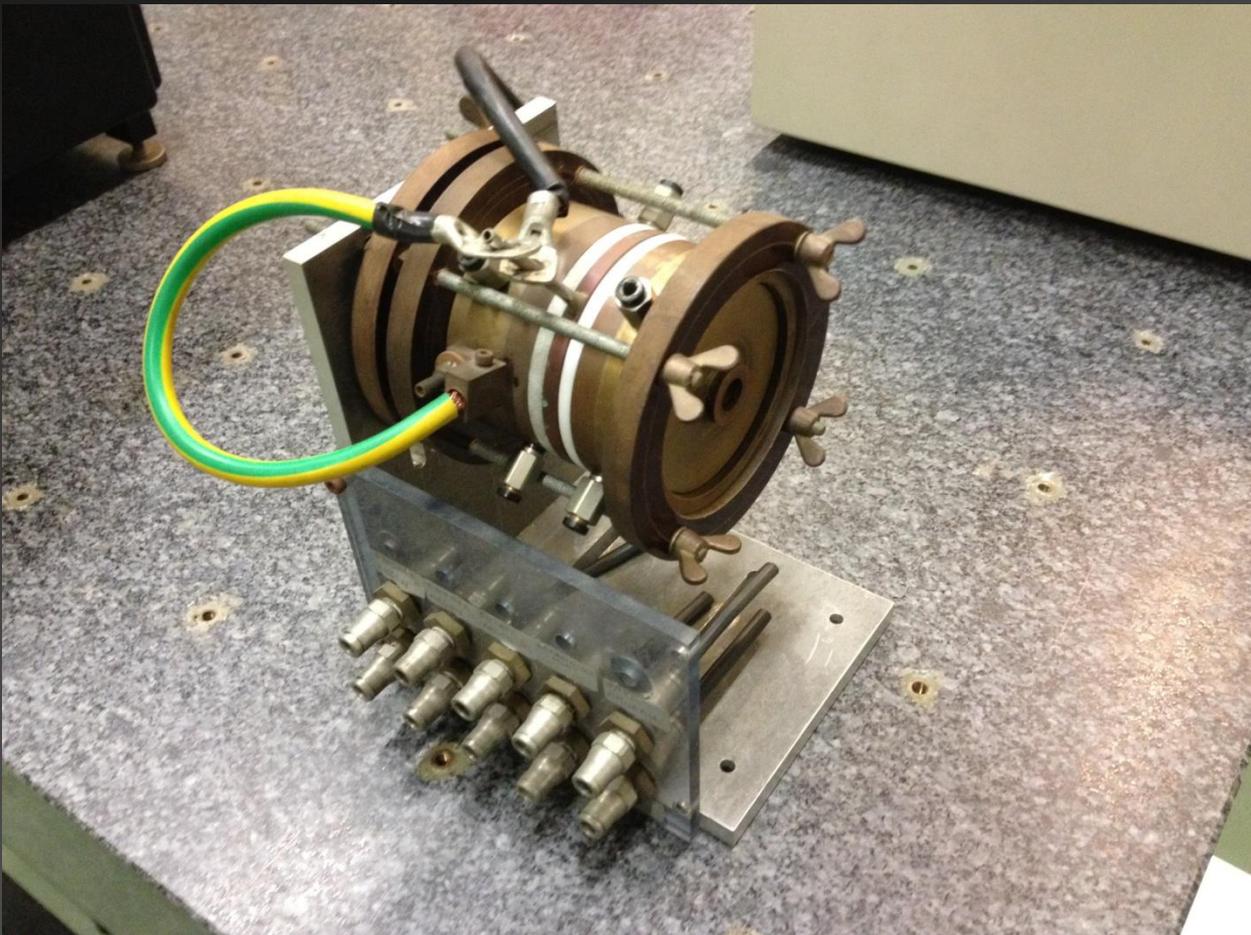
Wall-stabilized arc



Sommaire

1. Activités sur les plasmas d'entrée atmosphérique
2. Activités sur les plasmas induits par laser
3. Activités sur les plasmas d'arcs électriques
4. Appel...

Wall-stabilized arc



Besoin d'une alimentation

- Électrique,
- Continue,
- 30 à 50 V,
- 75 à 120 A,
- Compacte.