

# Simulation des Propriétés Radiatives du Plasma Entourant un Véhicule Traversant une Atmosphère Planétaire à Vitesse Hypersonique Application à la Planète Mars

Thèse présentée par M. Lino da Silva

Centre National de Recherche Scientifique, Orléans  
Laboratoire d'Aérothermique

9 déc. 2004



# Plan

- 1 Cadre et Objectifs de l'Étude
- 2 Simulation du Rayonnement d'un Plasma Martien
- 3 Étude Expérimentale du Rayonnement d'un Plasma Martien dans des Moyens d'Essai Complémentaires
- 4 Étude de Plasmas de Type Martien dans le Moyen d'Essai SR5
- 5 Conclusions et Perspectives



# Plan

- 1 Cadre et Objectifs de l'Étude
- 2 Simulation du Rayonnement d'un Plasma Martien
- 3 Étude Expérimentale du Rayonnement d'un Plasma Martien dans des Moyens d'Essai Complémentaires
- 4 Étude de Plasmas de Type Martien dans le Moyen d'Essai SR5
- 5 Conclusions et Perspectives



# Plan

- 1 Cadre et Objectifs de l'Étude
- 2 Simulation du Rayonnement d'un Plasma Martien
- 3 Étude Expérimentale du Rayonnement d'un Plasma Martien dans des Moyens d'Essai Complémentaires
- 4 Étude de Plasmas de Type Martien dans le Moyen d'Essai SR5
- 5 Conclusions et Perspectives



# Plan

- 1 Cadre et Objectifs de l'Étude
- 2 Simulation du Rayonnement d'un Plasma Martien
- 3 Étude Expérimentale du Rayonnement d'un Plasma Martien dans des Moyens d'Essai Complémentaires
- 4 Étude de Plasmas de Type Martien dans le Moyen d'Essai SR5
- 5 Conclusions et Perspectives



# Plan

- 1 Cadre et Objectifs de l'Étude
- 2 Simulation du Rayonnement d'un Plasma Martien
- 3 Étude Expérimentale du Rayonnement d'un Plasma Martien dans des Moyens d'Essai Complémentaires
- 4 Étude de Plasmas de Type Martien dans le Moyen d'Essai SR5
- 5 Conclusions et Perspectives



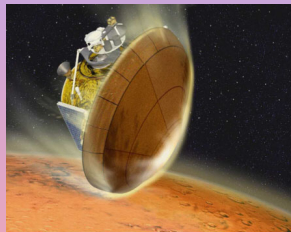
# Plan

- 1 Cadre et Objectifs de l'Étude
- 2 Simulation du Rayonnement d'un Plasma Martien
- 3 Étude Expérimentale du Rayonnement d'un Plasma Martien dans des Moyens d'Essai Complémentaires
- 4 Étude de Plasmas de Type Martien dans le Moyen d'Essai SR5
- 5 Conclusions et Perspectives



## Cadre et Objectifs de l'Étude

- Programmes MARS PREMIER du CNES et AURORA de l'ESA
- Entrée atmosphérique à vitesse hypersonique d'un véhicule spatial
- Formation d'un plasma entourant le véhicule
- Importance des flux de chaleur convectifs et radiatifs
- Flux de chaleur convectifs et radiatifs du même ordre de grandeur pour des entrées superorbitales



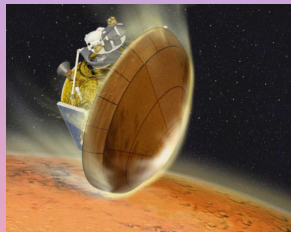
Aérocapture de la sonde Mars Sample Return





## Cadre et Objectifs de l'Étude

- Programmes MARS PREMIER du CNES et AURORA de l'ESA
- Entrée atmosphérique à vitesse hypersonique d'un véhicule spatial
- Formation d'un plasma entourant le véhicule
- Importance des flux de chaleur convectifs et radiatifs
- Flux de chaleur convectifs et radiatifs du même ordre de grandeur pour des entrées superorbitales

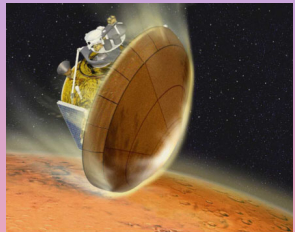


Aérocapture de la sonde Mars Sample Return



## Cadre et Objectifs de l'Étude

- Programmes MARS PREMIER du CNES et AURORA de l'ESA
- Entrée atmosphérique à vitesse hypersonique d'un véhicule spatial
- Formation d'un plasma entourant le véhicule
- Importance des flux de chaleur convectifs et radiatifs
- Flux de chaleur convectifs et radiatifs du même ordre de grandeur pour des entrées superorbitales

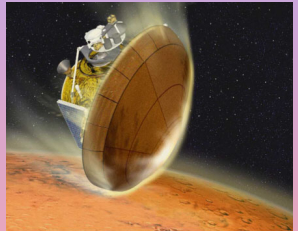


Aérocapture de la sonde Mars Sample Return



## Cadre et Objectifs de l'Étude

- Programmes MARS PREMIER du CNES et AURORA de l'ESA
- Entrée atmosphérique à vitesse hypersonique d'un véhicule spatial
- Formation d'un plasma entourant le véhicule
- Importance des flux de chaleur convectifs et radiatifs
- Flux de chaleur convectifs et radiatifs du même ordre de grandeur pour des entrées superorbitales

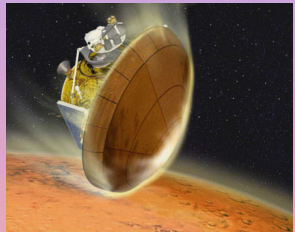


Aérocapture de la sonde Mars Sample Return



## Cadre et Objectifs de l'Étude

- Programmes MARS PREMIER du CNES et AURORA de l'ESA
- Entrée atmosphérique à vitesse hypersonique d'un véhicule spatial
- Formation d'un plasma entourant le véhicule
- Importance des flux de chaleur convectifs et radiatifs
- Flux de chaleur convectifs et radiatifs du même ordre de grandeur pour des entrées superorbitales



Aérocapture de la sonde Mars Sample Return



# Cadre et Objectifs de l'Étude

- Atmosphère de Mars : 97% CO<sub>2</sub>–3% N<sub>2</sub>  
Rayonnement CO<sub>2</sub>, CO, CN, C<sub>2</sub>, C, O
- Derrière l'onde de choc : transfert de l'énergie de translation vers modes internes + processus chimiques
- Hautes températures et basses densités favorisent l'établissement d'un déséquilibre thermodynamique
- Besoin d'étudier les processus de peuplement des niveaux internes des espèces du plasma



## Cadre et Objectifs de l'Étude

- Atmosphère de Mars : 97% CO<sub>2</sub>–3% N<sub>2</sub>  
Rayonnement CO<sub>2</sub>, CO, CN, C<sub>2</sub>, C, O
- Derrière l'onde de choc : transfert de l'énergie de translation vers modes internes + processus chimiques
- Hautes températures et basses densités favorisent l'établissement d'un déséquilibre thermodynamique
- Besoin d'étudier les processus de peuplement des niveaux internes des espèces du plasma



## Cadre et Objectifs de l'Étude

- Atmosphère de Mars : 97% CO<sub>2</sub>–3% N<sub>2</sub>  
Rayonnement CO<sub>2</sub>, CO, CN, C<sub>2</sub>, C, O
- Derrière l'onde de choc : transfert de l'énergie de translation vers modes internes + processus chimiques
- Hautes températures et basses densités favorisent l'établissement d'un déséquilibre thermodynamique
- Besoin d'étudier les processus de peuplement des niveaux internes des espèces du plasma



## Cadre et Objectifs de l'Étude

- Atmosphère de Mars : 97% CO<sub>2</sub>–3% N<sub>2</sub>  
Rayonnement CO<sub>2</sub>, CO, CN, C<sub>2</sub>, C, O
- Derrière l'onde de choc : transfert de l'énergie de translation vers modes internes + processus chimiques
- Hautes températures et basses densités favorisent l'établissement d'un déséquilibre thermodynamique
- Besoin d'étudier les processus de peuplement des niveaux internes des espèces du plasma





# Plan

- 1 Cadre et Objectifs de l'Étude
- 2 Simulation du Rayonnement d'un Plasma Martien
  - Rayonnement d'un Gaz en Déséquilibre Thermodynamique
  - Développement du Code Raie-par-Raie SESAM
  - Propriétés Radiatives à l'Équilibre d'un Plasma Martien
- 3 Étude Expérimentale du Rayonnement d'un Plasma Martien dans des Moyens d'Essai Complémentaires
- 4 Étude de Plasmas de Type Martien dans le Moyen d'Essai SR5
- 5 Conclusions et Perspectives



# Simulation du Rayonnement d'un Plasma Martien

L'équation suivante pose les problèmes fondamentaux du calcul de rayonnement :

$$I = N_u A_{ul} \Delta E_{ul}$$

- $N_u$  : Calcul du peuplement des niveaux :  
Distributions de Boltzmann à l'équilibre, modèles "état par état" en déséquilibre
- $A_{ul}$  : Calcul des probabilités de transition entre niveaux:  
D'après calculs "ab-initio" des moments de transition
- $\Delta E_{ul}$  : Calcul des énergies de niveaux:  
D'après données expérimentales, extrapolation problématique pour les hauts niveaux



# Simulation du Rayonnement d'un Plasma Martien

L'équation suivante pose les problèmes fondamentaux du calcul de rayonnement :

$$I = N_u A_{ul} \Delta E_{ul}$$

- $N_u$  : Calcul du peuplement des niveaux :  
Distributions de Boltzmann à l'équilibre, modèles "état par état" en déséquilibre
- $A_{ul}$  : Calcul des probabilités de transition entre niveaux:  
D'après calculs "ab-initio" des moments de transition
- $\Delta E_{ul}$  : Calcul des énergies de niveaux:  
D'après données expérimentales, extrapolation problématique pour les hauts niveaux



# Relations de Rayonnement d'un Gaz en Déséquilibre Thermodynamique

- Transitions lié-lié

$$\frac{\varepsilon_\nu}{\alpha_\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left( \frac{g_l n_u}{g_u n_l} - 1 \right)^{-1}$$

- Transitions lié-libre

$$\frac{\sigma_{bf}(\nu)}{\sigma_{fb}(\nu)} = \frac{1}{2} \left( \frac{m_e v_e c}{h\nu} \right)^2 \frac{g_+ g_e}{g_n}$$

- Transitions libre-libre

$$\frac{\varepsilon_\nu}{\alpha_\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left[ \exp \left( \frac{h\nu}{k_B T_e} \right) - 1 \right]^{-1}$$



# Relations de Rayonnement d'un Gaz en Déséquilibre Thermodynamique

- Transitions lié-lié

$$\frac{\varepsilon_\nu}{\alpha_\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left( \frac{g_l n_u}{g_u n_l} - 1 \right)^{-1}$$

- Transitions lié-libre

$$\frac{\sigma_{bf}(\nu)}{\sigma_{fb}(\nu)} = \frac{1}{2} \left( \frac{m_e v_e c}{h\nu} \right)^2 \frac{g_+ g_e}{g_n}$$

- Transitions libre-libre

$$\frac{\varepsilon_\nu}{\alpha_\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left[ \exp \left( \frac{h\nu}{k_B T_e} \right) - 1 \right]^{-1}$$



# Relations de Rayonnement d'un Gaz en Déséquilibre Thermodynamique

- Transitions lié-lié

$$\frac{\varepsilon_\nu}{\alpha_\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left( \frac{g_l n_u}{g_u n_l} - 1 \right)^{-1}$$

- Transitions lié-libre

$$\frac{\sigma_{bf}(\nu)}{\sigma_{fb}(\nu)} = \frac{1}{2} \left( \frac{m_e v_e c}{h\nu} \right)^2 \frac{g_+ g_e}{g_n}$$

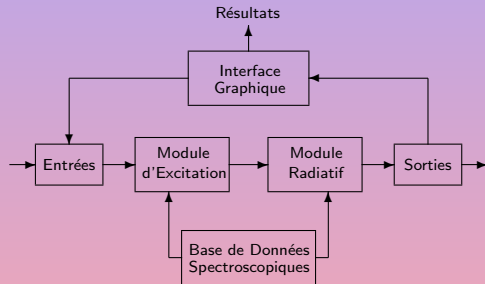
- Transitions libre-libre

$$\frac{\varepsilon_\nu}{\alpha_\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left[ \exp \left( \frac{h\nu}{k_B T_e} \right) - 1 \right]^{-1}$$



# Présentation du Code Raie-par-Raie SESAM

- Module d'excitation et module radiatif
- Module radiatif valable en déséquilibre thermodynamique
- Utilisable seul ou en couplage avec un code de calcul hydrodynamique



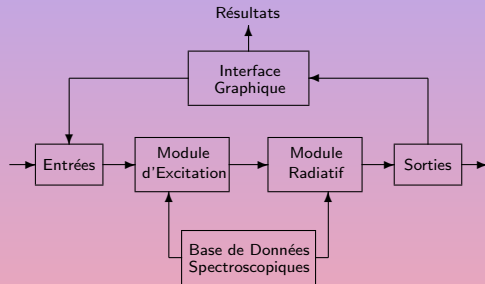
Structure du code SESAM

C, C<sup>+</sup>, N, N<sup>+</sup>, O, O<sup>+</sup>, Ar, Ar<sup>+</sup>, C<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub>, CN, CO, NO, CO<sub>2</sub>



# Présentation du Code Raie-par-Raie SESAM

- Module d'excitation et module radiatif
- Module radiatif valable en déséquilibre thermodynamique
- Utilisable seul ou en couplage avec un code de calcul hydrodynamique



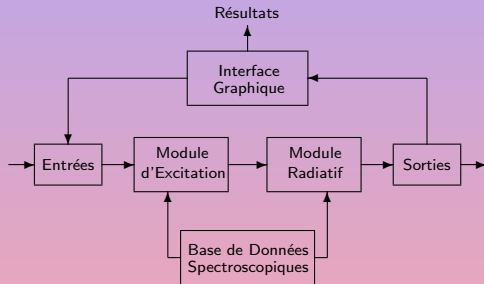
Structure du code SESAM

C, C<sup>+</sup>, N, N<sup>+</sup>, O, O<sup>+</sup>, Ar, Ar<sup>+</sup>, C<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub>, CN, CO, NO, CO<sub>2</sub>



# Présentation du Code Raie-par-Raie SESAM

- Module d'excitation et module radiatif
- Module radiatif valable en déséquilibre thermodynamique
- Utilisable seul ou en couplage avec un code de calcul hydrodynamique



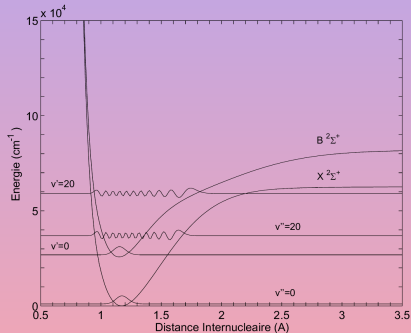
Structure du code SESAM

C, C<sup>+</sup>, N, N<sup>+</sup>, O, O<sup>+</sup>, Ar, Ar<sup>+</sup>, C<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub>, CN,  
CO, NO, CO<sub>2</sub>



# Calcul des Probabilités de Transition

- Calcul systématique des probabilités de transition par une méthode "ab-initio"
- Reconstruction des potentiels moléculaires et résolution de l'équation de Schrödinger



Exemple pour le système CN Violet



# Validation du Code Raie-par-Raie SESAM

- Le code SESAM a été testé dans la gamme spectrale proche-UV–proche-IR sur un spectre d'air à pression atmosphérique et à l'équilibre
- Spectre à l'équilibre thermodynamique mesuré par C. Laux dans la torche ICP de Stanford ( $P=27$  kW,  $\dot{m}=95$  slm)
- Calcul du rayonnement local de chaque tranche du plasma et résolution de l'équation radiale de transfert de rayonnement



# Validation du Code Raie-par-Raie SESAM

- Le code SESAM a été testé dans la gamme spectrale proche-UV–proche-IR sur un spectre d'air à pression atmosphérique et à l'équilibre
- Spectre à l'équilibre thermodynamique mesuré par C. Laux dans la torche ICP de Stanford ( $P=27$  kW,  $\dot{m}=95$  slm)
- Calcul du rayonnement local de chaque tranche du plasma et résolution de l'équation radiale de transfert de rayonnement



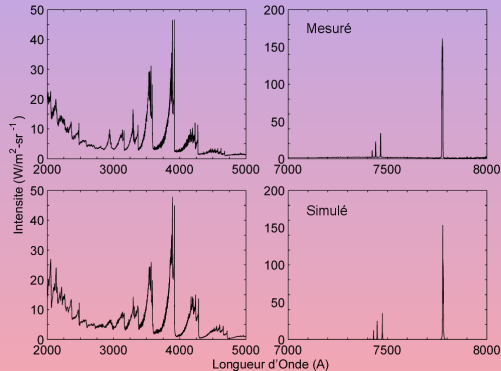
# Validation du Code Raie-par-Raie SESAM

- Le code SESAM a été testé dans la gamme spectrale proche-UV–proche-IR sur un spectre d'air à pression atmosphérique et à l'équilibre
- Spectre à l'équilibre thermodynamique mesuré par C. Laux dans la torche ICP de Stanford ( $P=27$  kW,  $\dot{m}=95$  slm)
- Calcul du rayonnement local de chaque tranche du plasma et résolution de l'équation radiale de transfert de rayonnement



# Validation du Code Raie-par-Raie SESAM

- $P=1$  atm,  $T(r)$  connus, calcul fractions molaires à l'équilibre chimique, peuplements de niveaux d'après distributions de Boltzmann
- Accord entre simulation et expérience permet de valider les routines de calcul du code et une partie de sa base de données spectrale

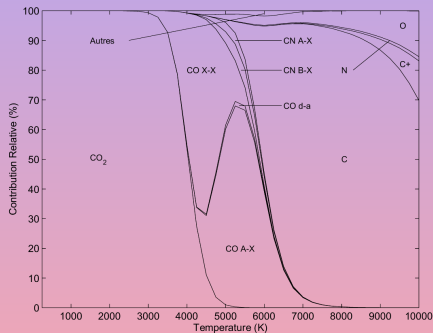


Comparaison simulation/expérience



# Propriétés Radiatives à l'Équilibre d'un Plasma Martien

- Rayonnement  $\text{CO}_2$  dominant  $T < 5000$  K
- Rayonnement CO dominant  $T = [5000 - 6500]$  K
- Rayonnement C dominant  $T > 6500$  K

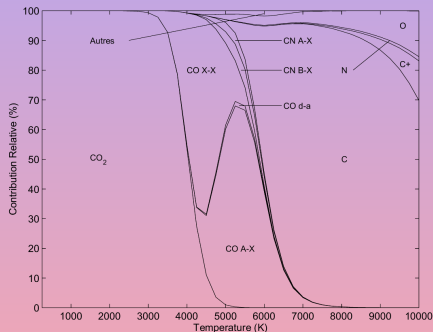


Contribution individuelle de chaque système au rayonnement total



# Propriétés Radiatives à l'Équilibre d'un Plasma Martien

- Rayonnement  $\text{CO}_2$  dominant  $T < 5000$  K
- Rayonnement CO dominant  $T = [5000 - 6500]$  K
- Rayonnement C dominant  $T > 6500$  K



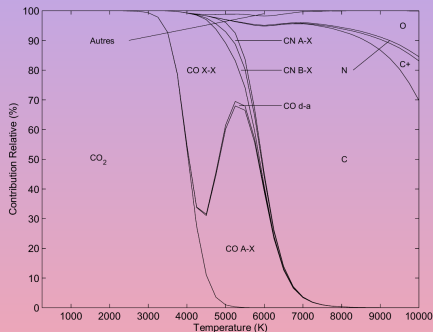
Contribution individuelle de chaque système au rayonnement total





# Propriétés Radiatives à l'Équilibre d'un Plasma Martien

- Rayonnement  $\text{CO}_2$  dominant  $T < 5000$  K
- Rayonnement CO dominant  $T = [5000 - 6500]$  K
- Rayonnement C dominant  $T > 6500$  K

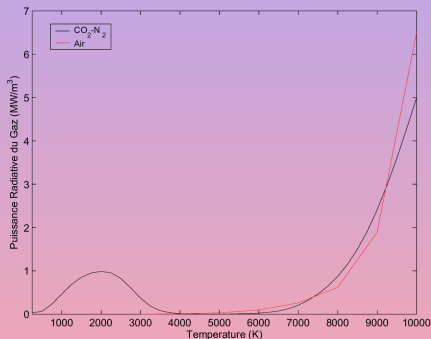


Contribution individuelle de chaque système au rayonnement total



# Propriétés Radiatives à l'Équilibre d'un Plasma Martien

- Puissance radiative émise équivalente à haute température pour un plasma d'air et de  $\text{CO}_2\text{-N}_2$
- Rayonnement de  $\text{CO}_2$  important autour de 2000 K
- Résultats pouvant être comparés avec des mesures expérimentales

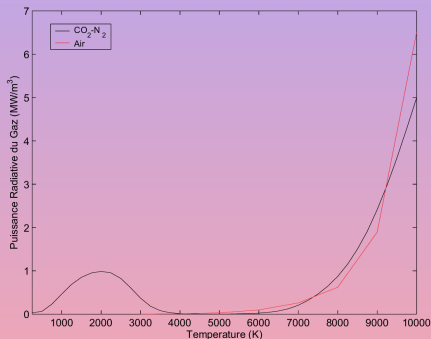


Puissance radiative totale émise par un plasma d'air et de type Martien



# Propriétés Radiatives à l'Équilibre d'un Plasma Martien

- Puissance radiative émise équivalente à haute température pour un plasma d'air et de  $\text{CO}_2\text{-N}_2$
- Rayonnement de  $\text{CO}_2$  important autour de 2000 K
- Résultats pouvant être comparés avec des mesures expérimentales

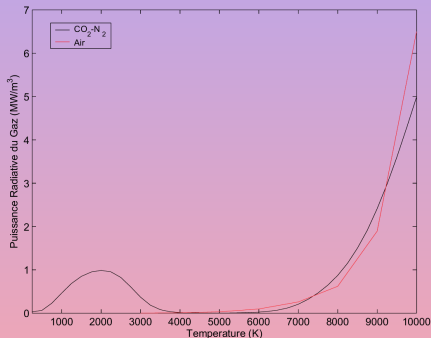


Puissance radiative totale émise par un plasma d'air et de type Martien



# Propriétés Radiatives à l'Équilibre d'un Plasma Martien

- Puissance radiative émise équivalente à haute température pour un plasma d'air et de  $\text{CO}_2\text{-N}_2$
- Rayonnement de  $\text{CO}_2$  important autour de 2000 K
- Résultats pouvant être comparés avec des mesures expérimentales



Puissance radiative totale émise par un plasma d'air et de type Martien



# Plan

- 1 Cadre et Objectifs de l'Étude
- 2 Simulation du Rayonnement d'un Plasma Martien
- 3 Étude Expérimentale du Rayonnement d'un Plasma Martien dans des Moyens d'Essai Complémentaires
  - Mesures dans la Gamme du Proche-UV au Proche-IR
  - Processus d'Excitation des États Moléculaires Radiatifs
- 4 Étude de Plasmas de Type Martien dans le Moyen d'Essai SR5
- 5 Conclusions et Perspectives



# Étude Expérimentale du Rayonnement d'un Plasma Martien dans des Moyens d'Essai Complémentaires

- Torche ICP du LAEPT de Clermont–Ferrand  
( $P=3$  kW,  $\dot{m} \sim 10$  slm,  $h=15$  MJ/kg,  $p=1$  bar, plasma haute pression à l'équilibre)
- Moyen d'essai microondes du LCSR d'Orléans  
( $P=1$  kW,  $\dot{m} \sim 2$  slm,  $h=15\text{--}30$  MJ/kg,  $p=10^3\text{--}10^4$  Pa, plasma basse pression en déséquilibre)
- Moyen d'essai arc-jet SR5 du Laboratoire d'Aérodynamique d'Orléans  
( $P=5\text{--}10$  kW,  $\dot{m} \sim 20$  slm,  $h=5\text{--}35$  MJ/kg,  $p=5\text{--}200$  Pa,  $v \sim 5$  km/s, plasma très basse pression en déséquilibre)
- Tube à choc TCM2 de l'IUSTI de Marseille  
( $h=5\text{--}25$  MJ/kg,  $p=0.1\text{--}0.5$  Pa,  $v=5$  km/s)



# Étude Expérimentale du Rayonnement d'un Plasma Martien dans des Moyens d'Essai Complémentaires

- Torche ICP du LAEPT de Clermont–Ferrand  
( $P=3$  kW,  $\dot{m} \sim 10$  slm,  $h=15$  MJ/kg,  $p=1$  bar, plasma haute pression à l'équilibre)
- Moyen d'essai microondes du LCSR d'Orléans  
( $P=1$  kW,  $\dot{m} \sim 2$  slm,  $h=15\text{--}30$  MJ/kg,  $p=10^3\text{--}10^4$  Pa, plasma basse pression en déséquilibre)
- Moyen d'essai arc-jet SR5 du Laboratoire d'Aérodynamique d'Orléans  
( $P=5\text{--}10$  kW,  $\dot{m} \sim 20$  slm,  $h=5\text{--}35$  MJ/kg,  $p=5\text{--}200$  Pa,  $v \sim 5$  km/s, plasma très basse pression en déséquilibre)
- Tube à choc TCM2 de l'IUSTI de Marseille  
( $h= 5\text{--}25$  MJ/kg,  $p=0.1\text{--}0.5$  Pa,  $v=5$  km/s)



# Étude Expérimentale du Rayonnement d'un Plasma Martien dans des Moyens d'Essai Complémentaires

- Torche ICP du LAEPT de Clermont-Ferrand  
( $P=3$  kW,  $\dot{m} \sim 10$  slm,  $h=15$  MJ/kg,  $p=1$  bar, plasma haute pression à l'équilibre)
- Moyen d'essai microondes du LCSR d'Orléans  
( $P=1$  kW,  $\dot{m} \sim 2$  slm,  $h=15-30$  MJ/kg,  $p=10^3-10^4$  Pa, plasma basse pression en déséquilibre)
- Moyen d'essai arc-jet SR5 du Laboratoire d'Aérodynamique d'Orléans  
( $P=5-10$  kW,  $\dot{m} \sim 20$  slm,  $h=5-35$  MJ/kg,  $p=5-200$  Pa,  $v \sim 5$  km/s, plasma très basse pression en déséquilibre)
- Tube à choc TCM2 de l'IUSTI de Marseille  
( $h= 5-25$  MJ/kg,  $p=0.1-0.5$  Pa,  $v=5$  km/s)



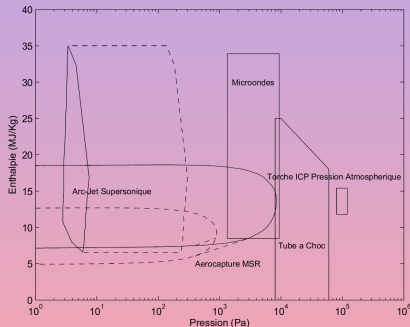


# Étude Expérimentale du Rayonnement d'un Plasma Martien dans des Moyens d'Essai Complémentaires

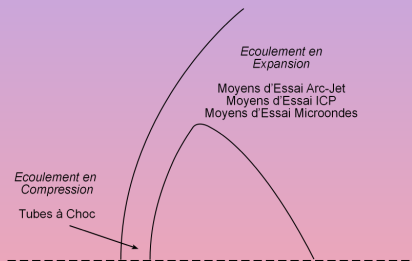
- Torche ICP du LAEPT de Clermont-Ferrand  
( $P=3$  kW,  $\dot{m} \sim 10$  slm,  $h=15$  MJ/kg,  $p=1$  bar, plasma haute pression à l'équilibre)
- Moyen d'essai microondes du LCSR d'Orléans  
( $P=1$  kW,  $\dot{m} \sim 2$  slm,  $h=15-30$  MJ/kg,  $p=10^3-10^4$  Pa, plasma basse pression en déséquilibre)
- Moyen d'essai arc-jet SR5 du Laboratoire d'Aérodynamique d'Orléans  
( $P=5-10$  kW,  $\dot{m} \sim 20$  slm,  $h=5-35$  MJ/kg,  $p=5-200$  Pa,  $v \sim 5$  km/s, plasma très basse pression en déséquilibre)
- Tube à choc TCM2 de l'IUSTI de Marseille  
( $h= 5-25$  MJ/kg,  $p=0.1-0.5$  Pa,  $v=5$  km/s)



# Classement des Différents Moyens d'Essai par Rapport à une Trajectoire d'Aérocapture



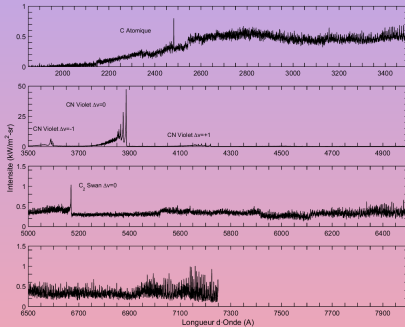
Domaine de fonctionnement des moyens d'essai étudiés et comparaison avec une trajectoire d'aérocapture sur Mars



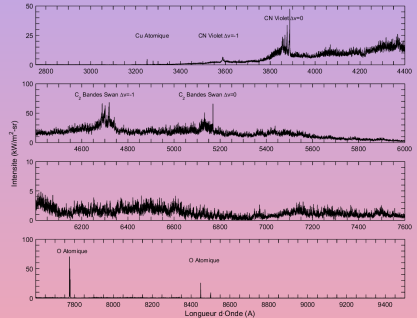
Représentativité des différents moyens d'essai par rapport à un écoulement d'entrée atmosphérique



# Mesures dans la Gamme du Proche-UV au Proche-IR

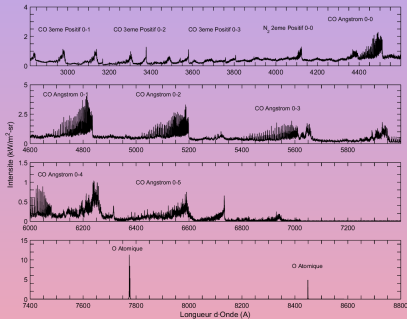


Spectre d'émission du plasma obtenu dans la torche ICP du LAEPT

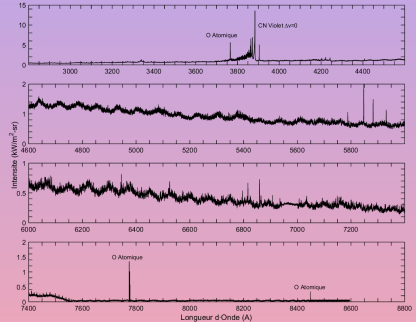


Spectre d'émission du plasma obtenu dans le moyen d'essai arc-jet SR5

# Mesures dans la Gamme du Proche-UV au Proche-IR



Spectre d'émission du plasma obtenu dans le moyen  
 d'essai microondes du LCSR  
 Basse puissance (800 W, 13 MJ/kg)



Spectre d'émission du plasma obtenu dans le moyen  
 d'essai microondes du LCSR  
 Haute puissance (1300 W, 20 MJ/kg)



# Identification des principaux systèmes moléculaires émissifs

- Émission du système CN Violet détectée et dominante dans tous les moyens d'essai
- Émission des Bandes de Swan de  $C_2$  observée uniquement dans le plasma arc-jet de SR5
- Deux modes de comportement du plasma microondes :  
Haute enthalpie, émission du système CN Violet  
Basse enthalpie, émission des systèmes Angström et 3ième Positif de CO
- Émission du système Angström de CO observée dans le tube à choc TCM2



# Identification des principaux systèmes moléculaires émissifs

- Émission du système CN Violet détectée et dominante dans tous les moyens d'essai
- Émission des Bandes de Swan de  $C_2$  observée uniquement dans le plasma arc-jet de SR5
- Deux modes de comportement du plasma microondes :  
Haute enthalpie, émission du système CN Violet  
Basse enthalpie, émission des systèmes Angström et 3ième Positif de CO
- Émission du système Angström de CO observée dans le tube à choc TCM2



# Identification des principaux systèmes moléculaires émissifs

- Émission du système CN Violet détectée et dominante dans tous les moyens d'essai
- Émission des Bandes de Swan de  $C_2$  observée uniquement dans le plasma arc-jet de SR5
- Deux modes de comportement du plasma microondes :  
Haute enthalpie, émission du système CN Violet  
Basse enthalpie, émission des systèmes Angström et 3<sup>ème</sup> Positif de CO
- Émission du système Angström de CO observée dans le tube à choc TCM2



# Identification des principaux systèmes moléculaires émissifs

- Émission du système CN Violet détectée et dominante dans tous les moyens d'essai
- Émission des Bandes de Swan de  $C_2$  observée uniquement dans le plasma arc-jet de SR5
- Deux modes de comportement du plasma microondes :  
Haute enthalpie, émission du système CN Violet  
Basse enthalpie, émission des systèmes Angström et 3<sup>ème</sup> Positif de CO
- Émission du système Angström de CO observée dans le tube à choc TCM2





# Processus d'Excitation des États Moléculaires Radiatifs

Une étude bibliographique a permis de proposer des modèles cinétiques de peuplement des états (électroniquement) excités de CO, et d'une partie des états excités de C<sub>2</sub> et CN

- Les états excités de CO et de CN sont peuplés par des réactions de collision électronique
- Les électrons jouent un rôle de réservoir d'énergie
- Les états excités de C<sub>2</sub> sont peuplés par des réactions de recombinaison de C ⇒ présence de déséquilibres



# Processus d'Excitation des États Moléculaires Radiatifs

Une étude bibliographique a permis de proposer des modèles cinétiques de peuplement des états (électroniquement) excités de CO, et d'une partie des états excités de C<sub>2</sub> et CN

- Les états excités de CO et de CN sont peuplés par des réactions de collision électroniques
- Les électrons jouent un rôle de réservoir d'énergie
- Les états excités de C<sub>2</sub> sont peuplés par des réactions de recombinaison de C ⇒ présence de déséquilibres



# Processus d'Excitation des États Moléculaires Radiatifs

Une étude bibliographique a permis de proposer des modèles cinétiques de peuplement des états (électroniquement) excités de CO, et d'une partie des états excités de C<sub>2</sub> et CN

- Les états excités de CO et de CN sont peuplés par des réactions de collision électroniques
- Les électrons jouent un rôle de réservoir d'énergie
- Les états excités de C<sub>2</sub> sont peuplés par des réactions de recombinaison de C ⇒ présence de déséquilibres



# Processus d'Excitation des États Moléculaires Radiatifs

Une étude bibliographique a permis de proposer des modèles cinétiques de peuplement des états (électroniquement) excités de CO, et d'une partie des états excités de C<sub>2</sub> et CN

- Les états excités de CO et de CN sont peuplés par des réactions de collision électronique
- Les électrons jouent un rôle de réservoir d'énergie
- Les états excités de C<sub>2</sub> sont peuplés par des réactions de recombinaison de C ⇒ présence de déséquilibres



# Plan

- ① Cadre et Objectifs de l'Étude
- ② Simulation du Rayonnement d'un Plasma Martien
- ③ Étude Expérimentale du Rayonnement d'un Plasma Martien dans des Moyens d'Essai Complémentaires
- ④ Étude de Plasmas de Type Martien dans le Moyen d'Essai SR5
  - Étude Numérique de l'Écoulement dans le Générateur
  - Étude Expérimentale du Jet Libre de Plasma
- ⑤ Conclusions et Perspectives



# Étude de Plasmas de Type Martien dans le Moyen d'Essai SR5

- Quantification du degré de déséquilibre thermodynamique d'un plasma important pour le calcul de son rayonnement
- Application au moyen d'essai arc-jet SR5 où des forts degrés de déséquilibres thermodynamiques sont observés

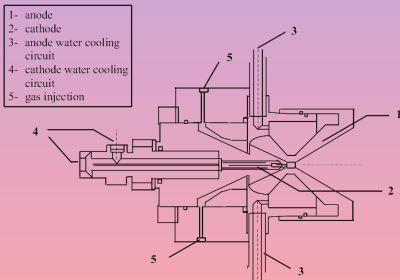


# Étude de Plasmas de Type Martien dans le Moyen d'Essai SR5

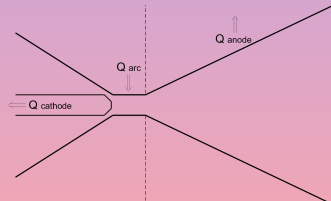
- Quantification du degré de déséquilibre thermodynamique d'un plasma important pour le calcul de son rayonnement
- Application au moyen d'essai arc-jet SR5 où des forts degrés de déséquilibres thermodynamiques sont observés

# Étude Numérique de l'Écoulement dans le Générateur

- Modèle quasi-1D multitempérature tenant compte des déséquilibres thermodynamiques
- Modèle Navier–Stokes tenant compte des effets dissipatifs



Générateur plasma du moyen d'essai SR5

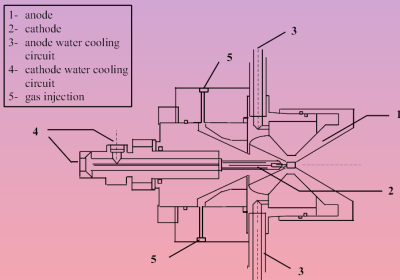


Modèle numérique du générateur plasma

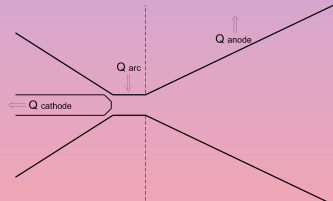


# Étude Numérique de l'Écoulement dans le Générateur

- Modèle quasi-1D multitempérature tenant compte des déséquilibres thermodynamiques
- Modèle Navier–Stokes tenant compte des effets dissipatifs



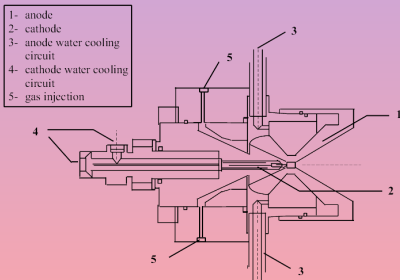
Générateur plasma du moyen d'essai SR5



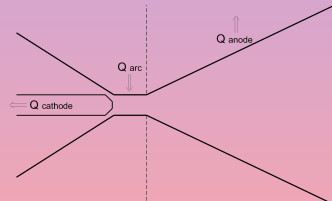
Modèle numérique du générateur plasma

# Étude Numérique de l'Écoulement dans le Générateur

- Modèle quasi-1D multitempérature tenant compte des déséquilibres thermodynamiques
- Modèle Navier–Stokes tenant compte des effets dissipatifs



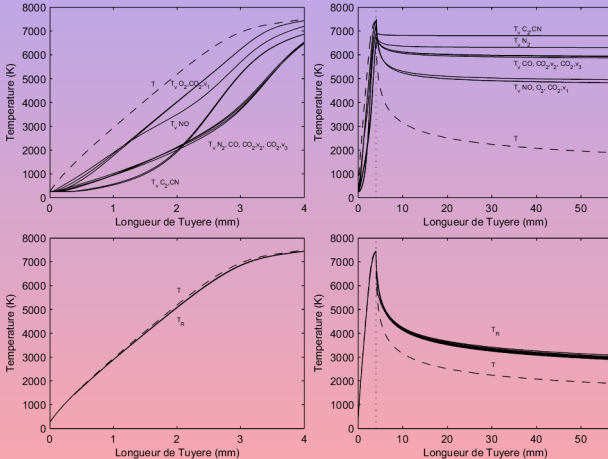
Générateur plasma du moyen d'essai SR5



Modèle numérique du générateur plasma

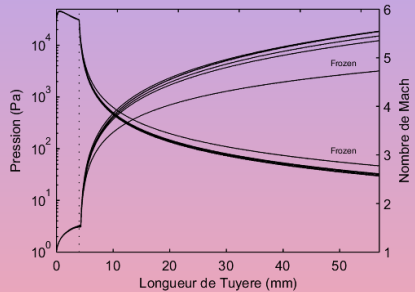
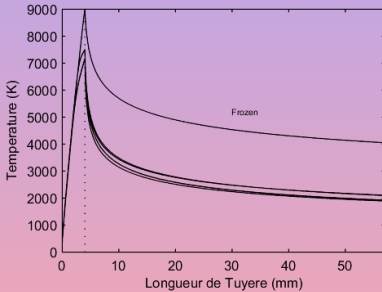
# Modèle Multi-Température

chimie  
 V-T  
 V-V  
 V-D  
 R-T



Températures de vibration (haut) et de rotation (bas) dans le col (gauche) et le divergent (droite) de la tuyère

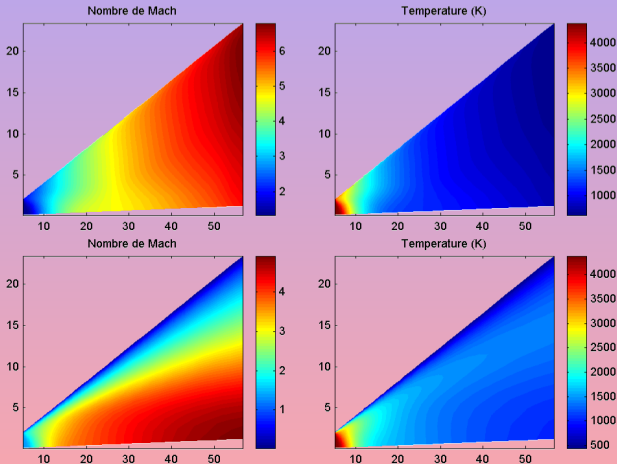
# Modèle Multi-Température



Influence des différents processus thermodynamiques sur les paramètres macroscopiques de l'écoulement

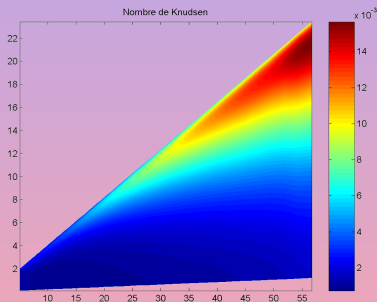


# Modèle Navier-Stokes

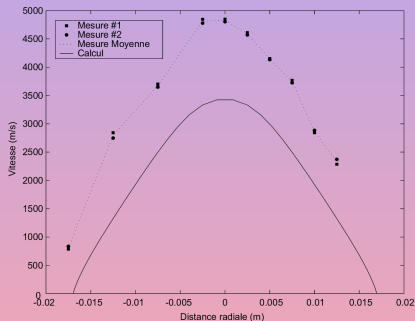


Écoulement 1D axisymétrique sans (haut) et avec (bas) prise en compte des effets dissipatifs

# Étude Numérique de l'Écoulement dans le Générateur



Nombre de Knudsen d'un écoulement Ar-N<sub>2</sub>



Comparaison entre les profils radiaux de vitesse mesurés et calculés en sortie de tuyère



# Propriétés de l'écoulement interne dans le générateur

- Forts déséquilibres des modes internes, mais seuls les processus chimiques influencent les paramètres macroscopiques de l'écoulement. Figeage des processus dans la section divergente de la tuyère
- Effets visqueux dominants dans la section divergente de la tuyère
- Plasma dans le régime transitionnel près de la sortie de la tuyère. Effet de glissement à la paroi



## Propriétés de l'écoulement interne dans le générateur

- Forts déséquilibres des modes internes, mais seuls les processus chimiques influencent les paramètres macroscopiques de l'écoulement. Figeage des processus dans la section divergente de la tuyère
- Effets visqueux dominants dans la section divergente de la tuyère
- Plasma dans le régime transitionnel près de la sortie de la tuyère. Effet de glissement à la paroi





## Propriétés de l'écoulement interne dans le générateur

- Forts déséquilibres des modes internes, mais seuls les processus chimiques influencent les paramètres macroscopiques de l'écoulement. Figeage des processus dans la section divergente de la tuyère
- Effets visqueux dominants dans la section divergente de la tuyère
- Plasma dans le régime transitionnel près de la sortie de la tuyère. Effet de glissement à la paroi



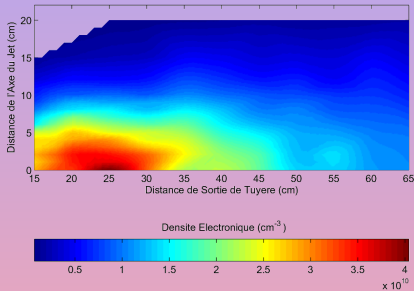
# Étude Expérimentale du Jet Libre de Plasma

- Etude des propriétés électroniques du plasma par sondes électrostatiques
- Etude locale du rayonnement du système CN Violet

# Étude Expérimentale du Jet Libre de Plasma

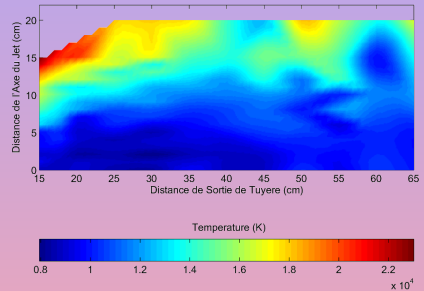
- Etude des propriétés électroniques du plasma par sondes électrostatiques
- Etude locale du rayonnement du système CN Violet

# Propriétés Électriques de la Plume de Plasma $\text{CO}_2\text{-N}_2$



Densités électroniques du jet

- Mise en évidence la présence de phénomènes de réflexion de chocs



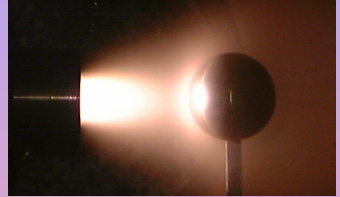
Températures électroniques du jet

- Présence d'électrons à haute énergie en bordure du jet

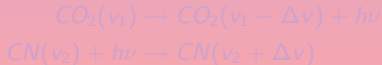


# Etude Locale du Rayonnement du Système CN Violet

- Mesures locales de l'émission du Système CN Violet  $\Delta\nu = 0$  par inversion d'Abel
- Insertion d'un obstacle sphérique pour l'étude de l'interaction plume/choc droit
- Étude d'un plasma  $\text{CO}_2\text{-N}_2$  et  $\text{N}_2\text{-CH}_4$
- Reconstruction des peuplements des états excités avec le code SESAM
- Mise en évidence d'un phénomène de pompage optique sur le CN pour le plasma  $\text{CO}_2\text{-N}_2$

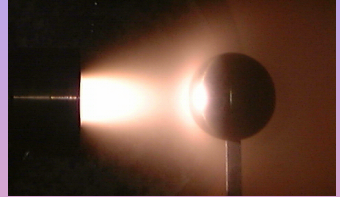


Interaction de la plume de plasma avec un obstacle sphérique

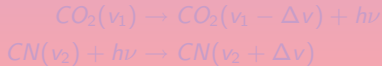


# Etude Locale du Rayonnement du Système CN Violet

- Mesures locales de l'émission du Système CN Violet  $\Delta v = 0$  par inversion d'Abel
- Insertion d'un obstacle sphérique pour l'étude de l'interaction plume/choc droit
- Étude d'un plasma  $\text{CO}_2\text{-N}_2$  et  $\text{N}_2\text{-CH}_4$
- Reconstruction des peuplements des états excités avec le code SESAM
- Mise en évidence d'un phénomène de pompage optique sur le CN pour le plasma  $\text{CO}_2\text{-N}_2$

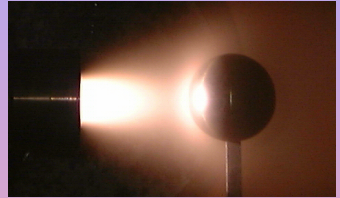


Interaction de la plume de plasma avec un obstacle sphérique



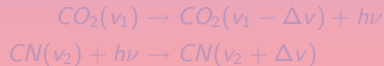
# Etude Locale du Rayonnement du Système CN Violet

- Mesures locales de l'émission du Système CN Violet  $\Delta v = 0$  par inversion d'Abel
- Insertion d'un obstacle sphérique pour l'étude de l'interaction plume/choc droit
- Étude d'un plasma  $\text{CO}_2\text{-N}_2$  et  $\text{N}_2\text{-CH}_4$



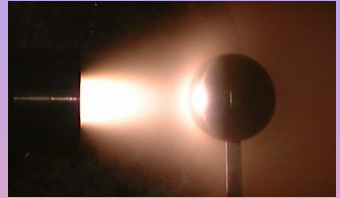
Interaction de la plume de plasma avec un obstacle sphérique

- Reconstruction des peuplements des états excités avec le code SESAM
- Mise en évidence d'un phénomène de pompage optique sur le CN pour le plasma  $\text{CO}_2\text{-N}_2$

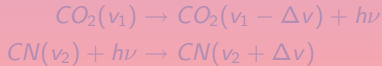


# Etude Locale du Rayonnement du Système CN Violet

- Mesures locales de l'émission du Système CN Violet  $\Delta v = 0$  par inversion d'Abel
- Insertion d'un obstacle sphérique pour l'étude de l'interaction plume/choc droit
- Étude d'un plasma  $\text{CO}_2\text{-N}_2$  et  $\text{N}_2\text{-CH}_4$
- Reconstruction des peuplements des états excités avec le code SESAM
- Mise en évidence d'un phénomène de pompage optique sur le CN pour le plasma  $\text{CO}_2\text{-N}_2$



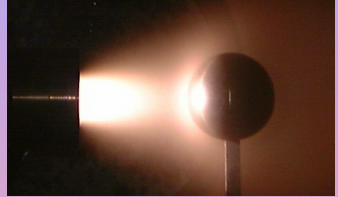
Interaction de la plume de plasma avec un obstacle sphérique



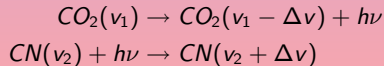


# Etude Locale du Rayonnement du Système CN Violet

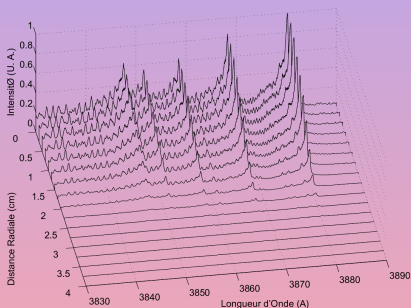
- Mesures locales de l'émission du Système CN Violet  $\Delta\nu = 0$  par inversion d'Abel
- Insertion d'un obstacle sphérique pour l'étude de l'interaction plume/choc droit
- Étude d'un plasma  $\text{CO}_2\text{-N}_2$  et  $\text{N}_2\text{-CH}_4$
- Reconstruction des peuplements des états excités avec le code SESAM
- Mise en évidence d'un phénomène de pompage optique sur le CN pour le plasma  $\text{CO}_2\text{-N}_2$



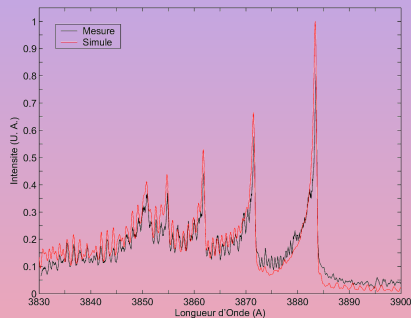
Interaction de la plume de plasma avec un obstacle sphérique



# Etude Locale du Rayonnement du Système CN Violet



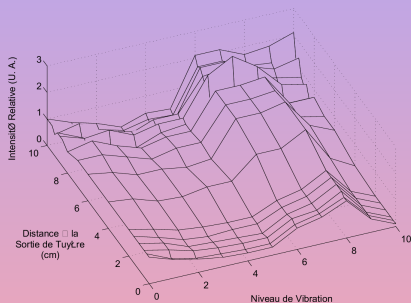
Exemple de transformée d'Abel en sortie de tuyère



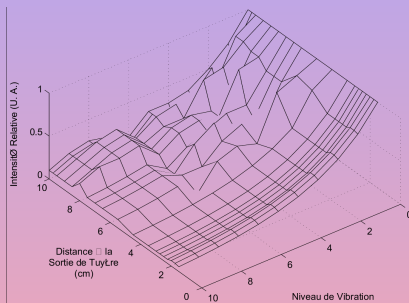
Exemple de simulation du rayonnement mesuré avec le code SESAM



# Etude Locale du Rayonnement du Système CN Violet



Peuplements relatifs des niveaux vibrationnels le long de la ligne d'arrêt (plasma  $\text{CO}_2\text{-N}_2$ )



Peuplements relatifs des niveaux vibrationnels le long de la ligne d'arrêt (plasma  $\text{N}_2\text{-CH}_4$ )

- Le jet est suffisamment raréfié pour qu'aucun processus collisionnel soit apparent



# Plan

- 1 Cadre et Objectifs de l'Étude
- 2 Simulation du Rayonnement d'un Plasma Martien
- 3 Étude Expérimentale du Rayonnement d'un Plasma Martien dans des Moyens d'Essai Complémentaires
- 4 Étude de Plasmas de Type Martien dans le Moyen d'Essai SR5
- 5 Conclusions et Perspectives



# Conclusions

- Le code SESAM a été développé pour la simulation de l'émission radiative de plasmas d'entrée atmosphérique. Possibilité d'utilisation couplée à un code hydrodynamique
- Une base de données spectrale a été mise au point pour permettre de simuler des rentrées terrestres et Martiennes. Extension possible pour d'autres atmosphères (Jupiter, Saturne – H<sub>2</sub>–He, Titan – N<sub>2</sub>–CH<sub>4</sub>)
- Validation du code par des mesures expérimentales sur des moyens d'essai complémentaires dans la gamme spectrale proche du visible pour des plasmas d'air et de type Martien
- Identification des principaux systèmes moléculaires émissifs et analyse théorique des processus de peuplement mis en jeu



# Conclusions

- Le code SESAM a été développé pour la simulation de l'émission radiative de plasmas d'entrée atmosphérique. Possibilité d'utilisation couplée à un code hydrodynamique
- Une base de données spectrale a été mise au point pour permettre de simuler des rentrées terrestres et Martiennes. Extension possible pour d'autres atmosphères (Jupiter, Saturne – H<sub>2</sub>–He, Titan – N<sub>2</sub>–CH<sub>4</sub>)
- Validation du code par des mesures expérimentales sur des moyens d'essai complémentaires dans la gamme spectrale proche du visible pour des plasmas d'air et de type Martien
- Identification des principaux systèmes moléculaires émissifs et analyse théorique des processus de peuplement mis en jeu



# Conclusions

- Le code SESAM a été développé pour la simulation de l'émission radiative de plasmas d'entrée atmosphérique. Possibilité d'utilisation couplée à un code hydrodynamique
- Une base de données spectrale a été mise au point pour permettre de simuler des rentrées terrestres et Martiennes. Extension possible pour d'autres atmosphères (Jupiter, Saturne – H<sub>2</sub>–He, Titan – N<sub>2</sub>–CH<sub>4</sub>)
- Validation du code par des mesures expérimentales sur des moyens d'essai complémentaires dans la gamme spectrale proche du visible pour des plasmas d'air et de type Martien
- Identification des principaux systèmes moléculaires émissifs et analyse théorique des processus de peuplement mis en jeu



# Conclusions

- Le code SESAM a été développé pour la simulation de l'émission radiative de plasmas d'entrée atmosphérique. Possibilité d'utilisation couplée à un code hydrodynamique
- Une base de données spectrale a été mise au point pour permettre de simuler des rentrées terrestres et Martiennes. Extension possible pour d'autres atmosphères (Jupiter, Saturne – H<sub>2</sub>–He, Titan – N<sub>2</sub>–CH<sub>4</sub>)
- Validation du code par des mesures expérimentales sur des moyens d'essai complémentaires dans la gamme spectrale proche du visible pour des plasmas d'air et de type Martien
- Identification des principaux systèmes moléculaires émissifs et analyse théorique des processus de peuplement mis en jeu





# Conclusions

- Mise en évidence des processus physico-chimiques rencontrés dans le moyen d'essai arc-jet SR5
- Étude à poursuivre par la mise au point de codes prédictifs prenant en compte ces différents processus
- Efforts à porter prioritairement sur la mise au point d'une description adéquate du transfert d'énergie par l'arc, et par la mise au point d'un modèle state-to-state couplé à une description de type Navier-Stokes (cf. Izrar, RGD24 2004)



# Conclusions

- Mise en évidence des processus physico-chimiques rencontrés dans le moyen d'essai arc-jet SR5
- Étude à poursuivre par la mise au point de codes prédictifs prenant en compte ces différents processus
- Efforts à porter prioritairement sur la mise au point d'une description adéquate du transfert d'énergie par l'arc, et par la mise au point d'un modèle state-to-state couplé à une description de type Navier-Stokes (cf. Izrar, RGD24 2004)



# Conclusions

- Mise en évidence des processus physico-chimiques rencontrés dans le moyen d'essai arc-jet SR5
- Étude à poursuivre par la mise au point de codes prédictifs prenant en compte ces différents processus
- Efforts à porter prioritairement sur la mise au point d'une description adéquate du transfert d'énergie par l'arc, et par la mise au point d'un modèle state-to-state couplé à une description de type Navier-Stokes (cf. Izrar, RGD24 2004)



# Perspectives

- Mise au point de modèles collisionnels-radiatifs (déséquilibre thermodynamique)
- Compléter la campagne expérimentale par des mesures dans la région UV et IR
- Mise au point de codes predictifs pour la simulation de plasmas dans des différents moyens d'essai, puis pour la simulation d'écoulements d'entrée atmosphérique



# Perspectives

- Mise au point de modèles collisionnels-radiatifs (déséquilibre thermodynamique)
- Compléter la campagne expérimentale par des mesures dans la région UV et IR
- Mise au point de codes predictifs pour la simulation de plasmas dans des différents moyens d'essai, puis pour la simulation d'écoulements d'entrée atmosphérique



# Perspectives

- Mise au point de modèles collisionnels-radiatifs (déséquilibre thermodynamique)
- Compléter la campagne expérimentale par des mesures dans la région UV et IR
- Mise au point de codes predictifs pour la simulation de plasmas dans des différents moyens d'essai, puis pour la simulation d'écoulements d'entrée atmosphérique