

Modélisation de l'extinction d'un arc de SF₆ hors d'équilibre thermodynamique local

Jean-Belkheir Belhaouari

Centre de Physique des Plasmas et de leurs Applications de Toulouse

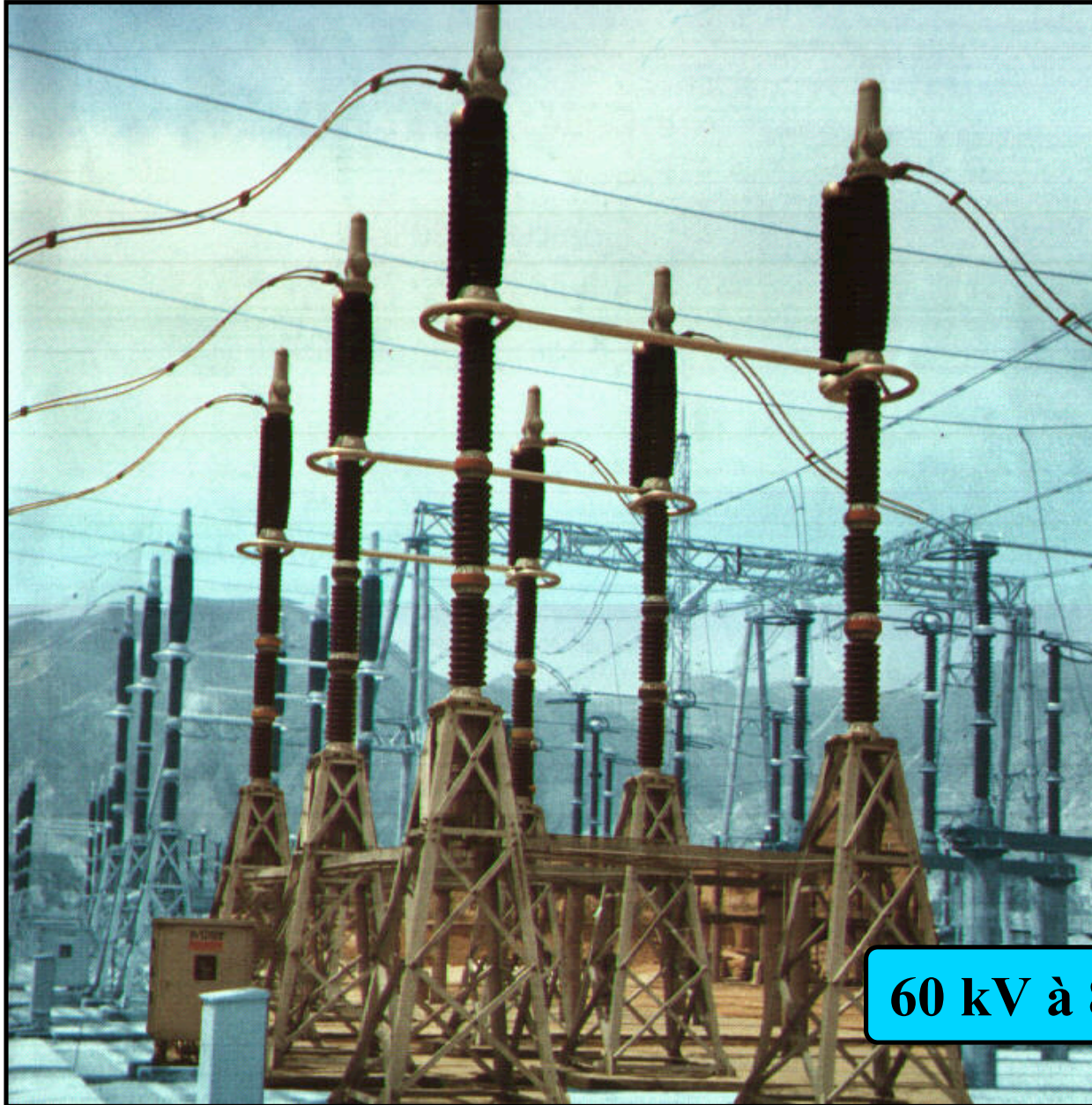
Modélisation de l'extinction d'un arc de SF₆ hors d'équilibre thermodynamique local

Jean-Belkheir Belhaouari

Physico-Chimie des Plasmas d'Arc
Opération n° 8



Introduction : Les disjoncteurs GEC-ALSHTOM

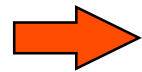


60 kV à 800 kV

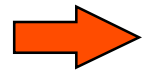


Introduction : pourquoi le SF₆ est utilisé ?

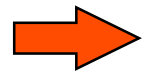
Propriétés du SF₆ pour la coupure :



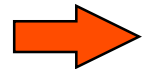
Haute rigidité diélectrique



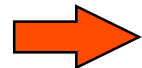
Présente une bonne conductivité thermique



Il est très électro-négatif



Il est chimiquement inerte



Possède une faible toxicité



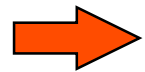
Recombinaison rapide des produits de décomposition lors d'une décharge électrique

Basse
température

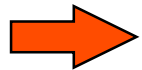


Introduction : la coupure

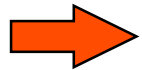
Extinction d'un arc de disjoncteur :



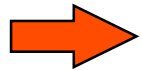
Après le passage par zéro du courant, le réseau a tendance à appliquer aux bornes du disjoncteur une **TTR** ($\times 1 \text{ kV}/\square\text{s}$)



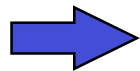
Observation d'une brutale diminution de la conductance



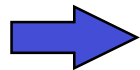
Le plasma est soumis à un fort soufflage



L'application de la **TTR** dans un milieu légèrement conducteur peut entraîner l'apparition d'un **courant post-arc**



Réchauffement du plasma

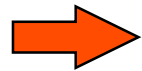


Echec de la coupure



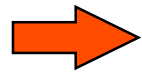
Introduction : les écarts à l'équilibre

Des écarts à l'équilibre peuvent se produire :



Écarts à l'équilibre thermique

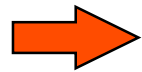
$$T_e \neq T_g$$



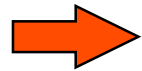
Écarts à l'équilibre chimique

$$n \neq n_{ETL}$$

Modèles basés sur l'ETL :



Existence du **courant post-arc**



Prévoient une diminution de la conductance

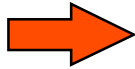
Les expériences :



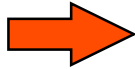
Le **courant post-arc** reste assez souvent indétectable

Introduction : le rôle de la cinétique

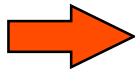
Idée :



Présence de gaz froid dans les parties chaudes du plasma



Les particules froides font disparaître rapidement les électrons

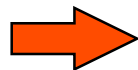


Modification de la résistivité du milieu

Modèles Hors ETL



Déséquilibre chimique



Modèle 'Hydro-cinétique'



Introduction : les objectifs

Les objectifs du modèle H-C

- ➔ Etude des phénomènes physico-chimiques de l'extinction de l'arc
- ➔ Est-ce que les écarts à l'équilibre chimique doivent être pris en compte ?
- ➔ Développement d'un modèle suffisamment proche de la réalité
 - ➔ Résolution à la pression atmosphérique
 - ➔ Simplification de la géométrie du disjoncteur
 - ➔ Pas de turbulence
 - ➔ Pas de passage par zéro du courant
 - ➔ Pas de **TTR**

phase post-arc

PLAN DE L'EXPOSE

- **I. INTRODUCTION**
- **II. CINETIQUE CHIMIQUE DANS LE SF₆**
- **III. MODELE HYDRO-CINETIQUE**
- **IV. RESULTATS [DU MODELE H-C]**
- **V. CONCLUSION - PERSPECTIVES**



PLAN DE L'EXPOSE



- **I. INTRODUCTION**
- **II. CINETIQUE CHIMIQUE DANS LE SF₆**
 - ➔ **II.1. L'équation de continuité**
 - ➔ **II.2. La composition du plasma**
 - ➔ **II.3. Cinétique chimique du SF₆**



II.1 L'équation de continuité

Détermination

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}_r f_i + \vec{a} \cdot \vec{\nabla}_v f_i = \left[\frac{\partial f_i}{\partial t} \right]_{\text{Coll}} \quad \text{équation de Boltzmann}$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \vec{\nabla}_r \cdot (n_i \vec{v}_i) = S_i \quad S_i = \left[\frac{\partial n_i}{\partial t} \right]_{\text{C.R.}} = Ca_i - n_i Da_i$$

Ca_i : nombre de particules 'i' créées par unité de temps et de volume

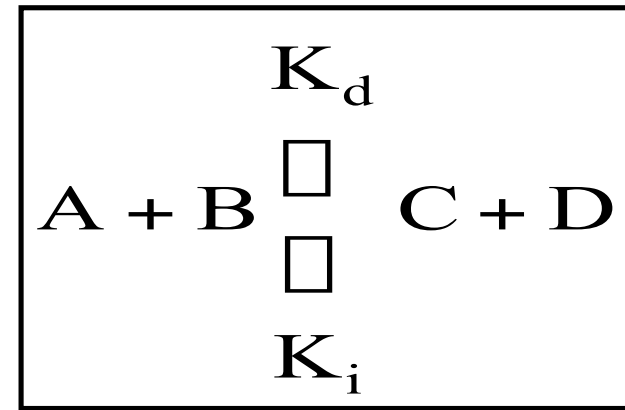
$n_i Da_i$: nombre de particules 'i' disparues par unité de temps et de volume



II.1 L'équation de continuité

Expressions des taux de réactions

Processus
général (p)



K_d : Taux de réaction direct \Rightarrow Etude bibliographique

K_i : Taux de réaction inverse \Rightarrow Calculé en considérant la micro-réversibilité de la réaction p

$$n_A n_B K_d = n_C n_D K_i$$



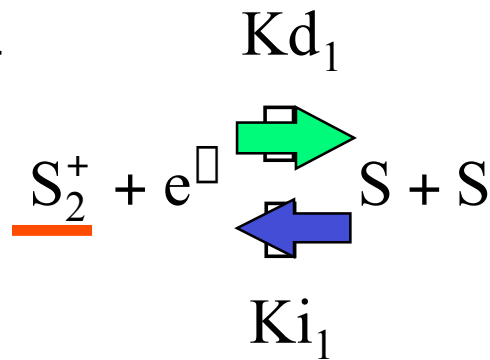
II.1 L'équation de continuité

Expressions des termes Ca et Da

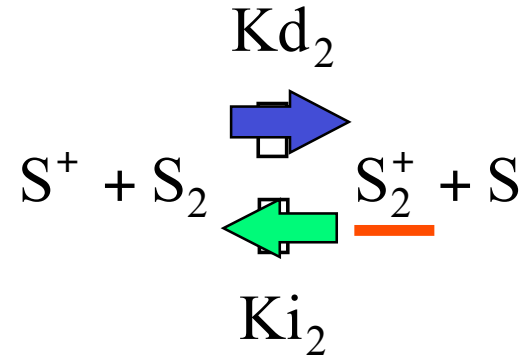
➔

$f(K_d, K_i, n_j)$

1 :



2 :



Ca : Création

Da : Disparition

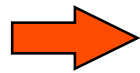
$$\underline{S_{S_2^+}} = \left[\text{Ca} - n_{S_2^+} \text{Da} \right]_{S_2^+} = \overbrace{\left(Ki_1 (n_S)^2 + Kd_2 n_{S^+} n_{S_2} \right)}^{\text{Ca : Création}} - n_{S_2^+} \overbrace{\left(Kd_1 n_{e^-} + Ki_2 n_S \right)}^{\text{Da : Disparition}}$$



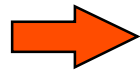
II.2 Composition du plasma

Motivations

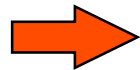
Le calcul de la composition du SF₆ à l'équilibre :



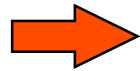
permet de tester le calcul des taux inverses



permet d'initialiser la résolution du régime transitoire



sert de référence pour étudier les écarts à l'équilibre



permet de calculer les fréquences de disparition et le temps de relaxation des diverses réactions chimiques



II.2 Composition du plasma

Caractéristiques du calcul

➔ Gamme de température : $300 \text{ K} < T < 12000 \text{ K}$

➔ 19 espèces : ➔ 66 réactions

e^- , S^- , S^+ , F^- , F^+ Ions


S_2^+ , F_2^+ , SF^- , SF^+ Ions diatomiques

S, F Atomes

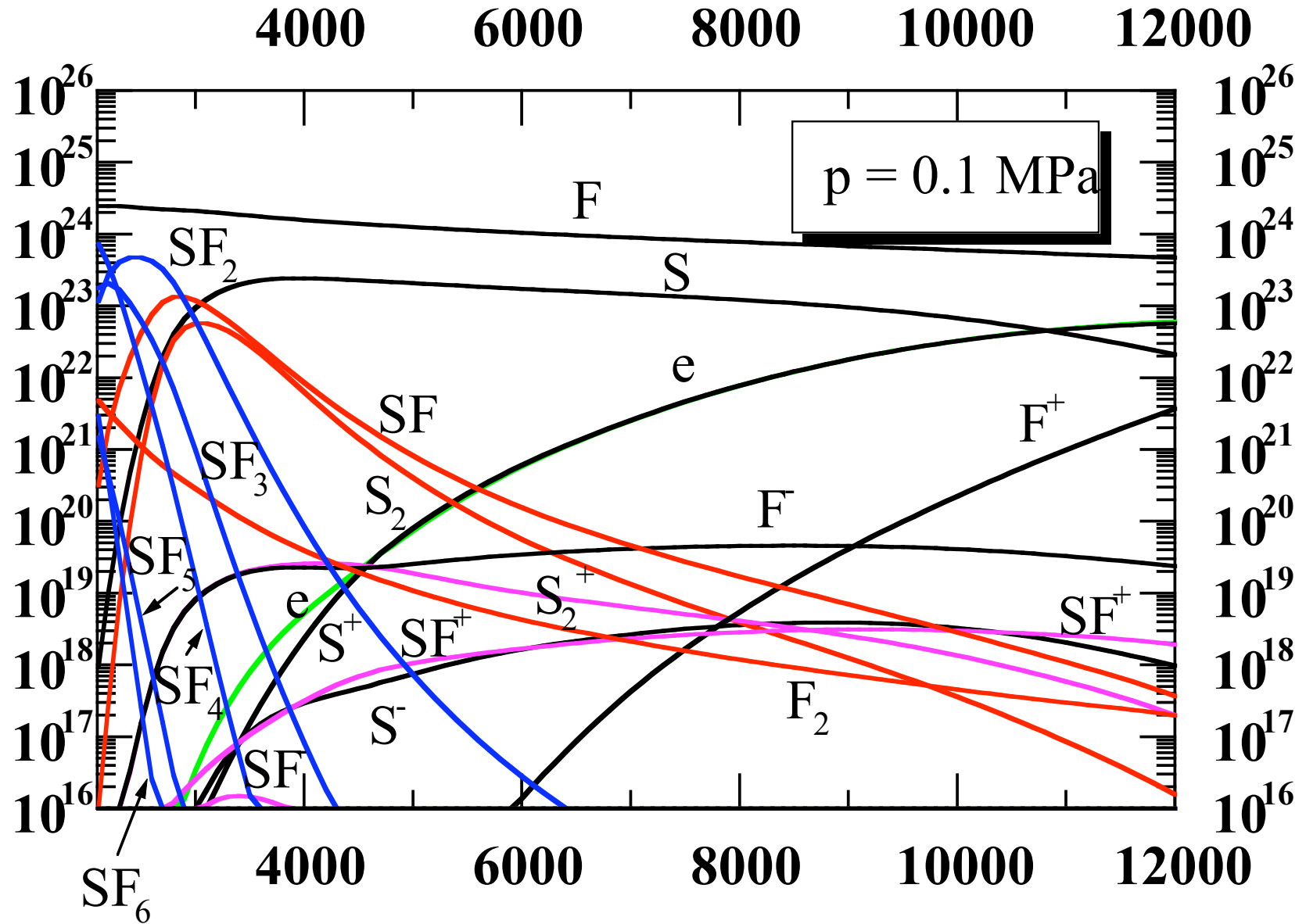
S_2 , F_2 , SF Molécules diatomiques

SF_2 , SF_3 , SF_4 , SF_5 , SF_6 Molécules polyatomiques

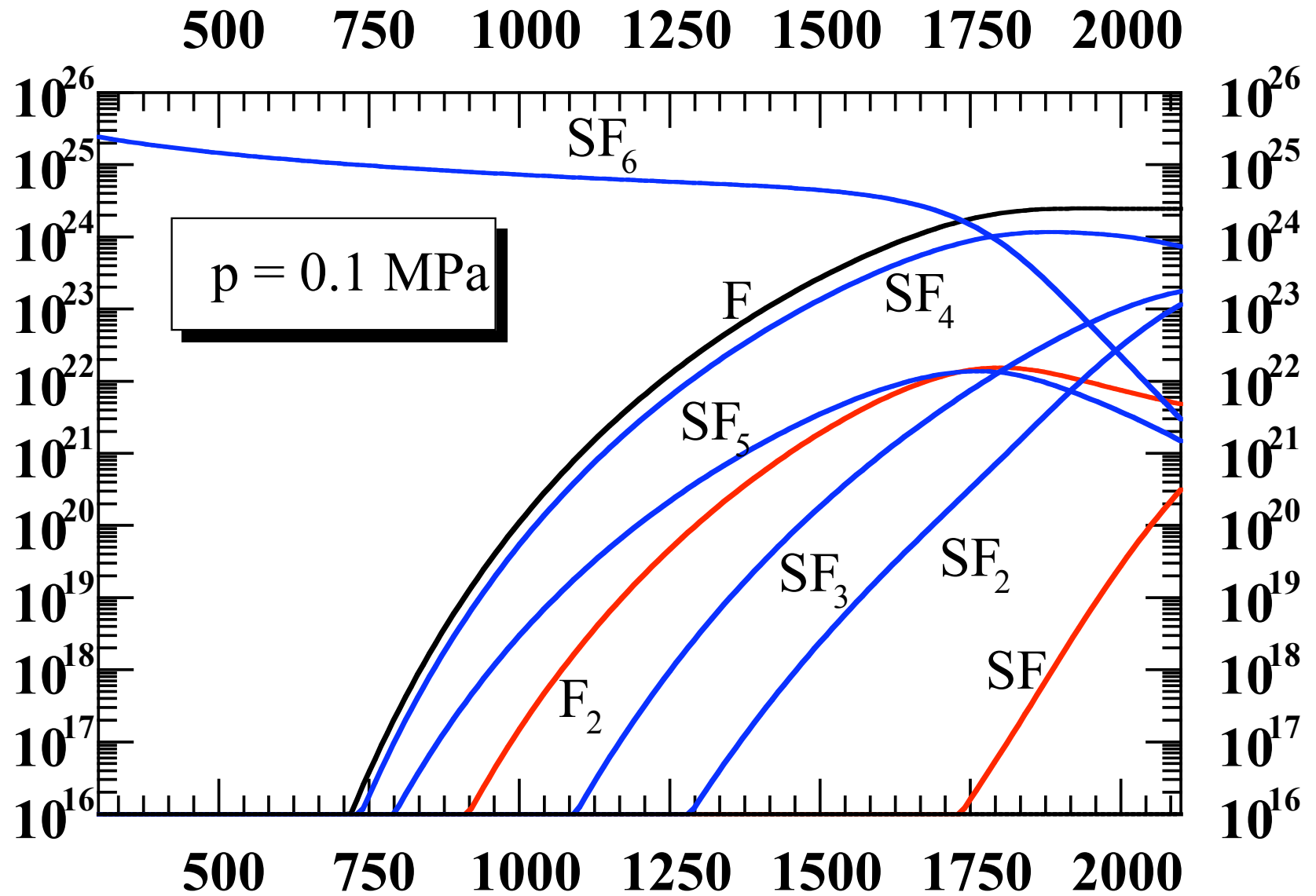
➔ Equation de conservation des espèces :


$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \vec{\nabla}_r \cdot (n_i \vec{v}_i) = Ca_i - n_i Da_i = 0 \quad \Rightarrow \quad n_i = \frac{Ca_i}{Da_i}$$

II.2 Composition du plasma

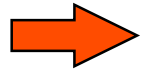


II.2 Composition du plasma

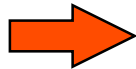


II.3 Cinétique chimique du SF₆

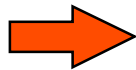
Motivations



Quelles sont les espèces qui sont les plus influencées par la convection ?



Quelles sont les espèces qui favorisent la disparition des électrons ?



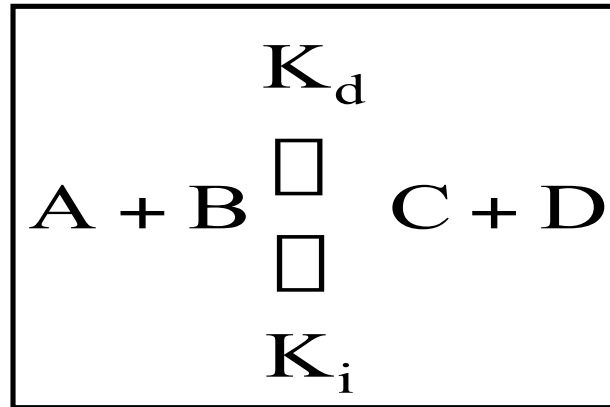
Quelles sont les réactions qui dominent la disparition de chaque espèce ?



II.3 Cinétique chimique du SF₆

Principe

Processus
général (p)



Le temps partiel de relaxation τ_p^A de l'espèce A :

$$\tau_p^A = (K_d n_B)^{-1}$$



II.3 Cinétique chimique du SF₆

Le temps global de relaxation pour N réactions est :

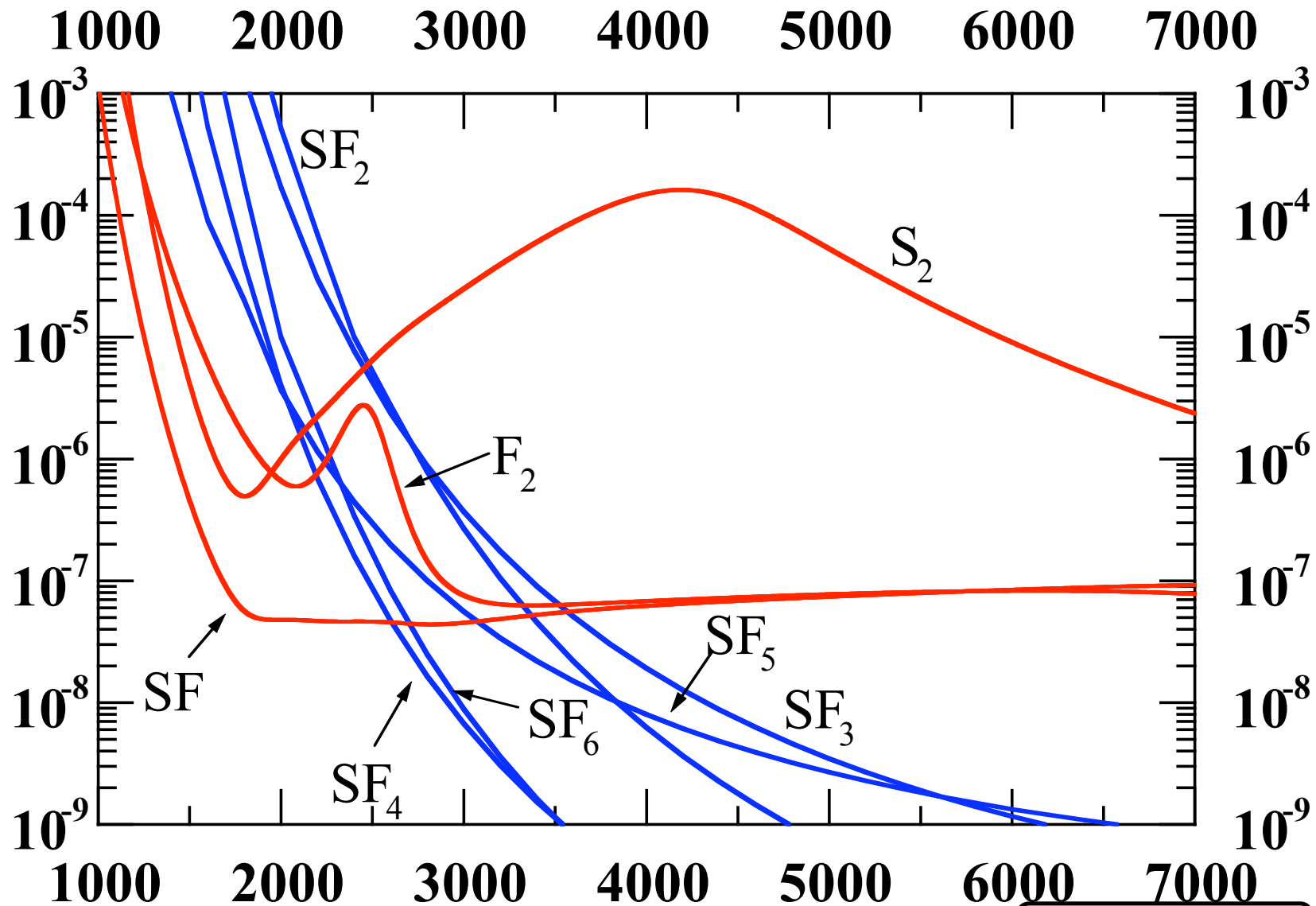
$$\frac{1}{\tau^A} = \sum_{p=1}^N \frac{1}{\tau_p^A} = \tau_A$$

En se donnant une vitesse des particules 'v', il est possible de remonter à une distance caractéristique 'd' de l'espèce A :

$$d = v \tau^A$$



II.3 Cinétique chimique du SF₆



PLAN DE L'EXPOSE



● **II. CINETIQUE CHIMIQUE DANS LE SF₆**

● **III. MODELE HYDRO-CINETIQUE**

●➔ **III.1. Géométrie et conditions aux limites**

●➔ **III.2. Hypothèses**

●➔ **III.3. Le modèle 2D stationnaire**

●➔ **III.4. Le modèle 2D transitoire**

●➔ **III.5. Estimation du pas d'avancement Δt**



III.1 Géométrie et conditions aux limites



u: vitesse axiale
v: vitesse radiale

X = 3 cm
R = 0.5 cm

$u = 0$
 $v = 0$
 $T = T_n$
 $\frac{\partial n}{\partial r} = 0$

$u = 0$
 $v = 0$
 $T = T_P$
 n_{ETL}

$u(r,t)$
 $v = 0$
 $T = T_P$
 n_{ETL}

$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$
 $v = 0$
 $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$
 $n = n_{ETL}$

3/4 R
Sortie
R/2

Entrée

Paroi

Paroi interne

Electrode

Electrode poreuse

axe de symétrie

$u = 0$
 $v(1D)$
 $T(1D)$
 n_{ETL}

$\frac{\partial u}{\partial r} = 0$ $v = 0$ $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ $\frac{\partial n}{\partial r} = 0$

$u = 0$
 $v = 0$
 $T = T_P$
 n_{ETL}

2/3 X

X

r
R

x

III.2 Hypothèses

Hypothèses communes

- Le plasma est à symétrie cylindrique
- Le terme de radiation est calculé à partir du coefficient d'émission net
- L'écoulement est laminaire

Hypothèses supplémentaires en régime **stationnaire**

- Equilibre thermodynamique local
- Coefficients de transport $\Rightarrow f(P,T)$
- Le champ électrique est constant et uniforme radialement



III.2 Hypothèses

Hypothèses communes

- Le plasma est à symétrie cylindrique
- Le terme de radiation est calculé à partir du coefficient d'émission net
- L'écoulement est laminaire

Hypothèses supplémentaires en régime **transitoire**

- Le champ électrique est nul
- La diffusion des particules est négligeable



$$\vec{v}_i = \vec{V}$$

III.3 Le modèle 2D stationnaire

→ Equation de la masse $\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0$

→ Conservation de la quantité de mouvement

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho \vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{\tau} \vec{V})$$

→ Conservation de l'énergie

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} h) = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\rho}{C_p} \vec{V} h \right) + \rho E^2 - 4 \rho \mu_N + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} P$$

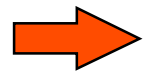
→ Loi d'Ohm

$$G = 2 \int_0^R \sigma r dr$$

$$E_x = \frac{I}{G}$$

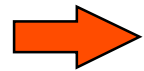


III.4 Le modèle 2D transitoire



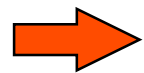
Conservation des espèces

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \vec{\rho} \cdot (n_i \vec{V}) = Ca_i - Da_i$$



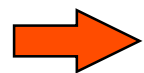
Conservation de la quantité de mouvement

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{\rho} \cdot (\vec{V} \vec{V}) = \rho \vec{P} + \vec{\rho} \cdot (\vec{\rho} \vec{V})$$



Conservation de la quantité de l'énergie

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \vec{\rho} \cdot (\vec{V} h) = \vec{\rho} \cdot \left(\frac{\rho}{C_p} h \vec{V} \right) + \vec{V} \cdot \vec{\rho} P$$



Relations de couplage

$$P = \sum_i n_i k_b T$$

$$\rho = \sum_i m_i n_i$$



III.5 Estimation du pas d'avancement sur le temps Δt

Hypothèses

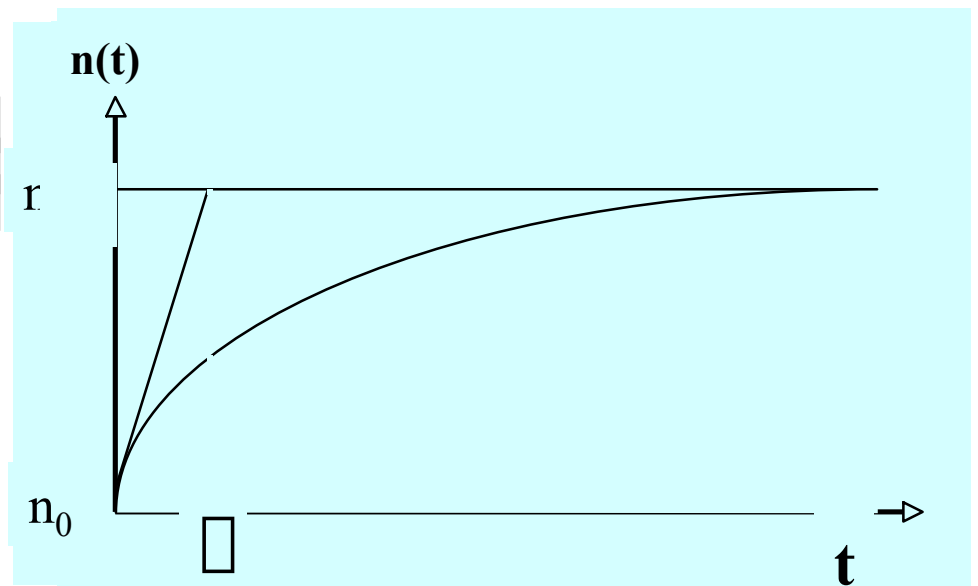
➔ le terme de convection est négligeable

➔ les termes Ca et Da du terme source sont constants

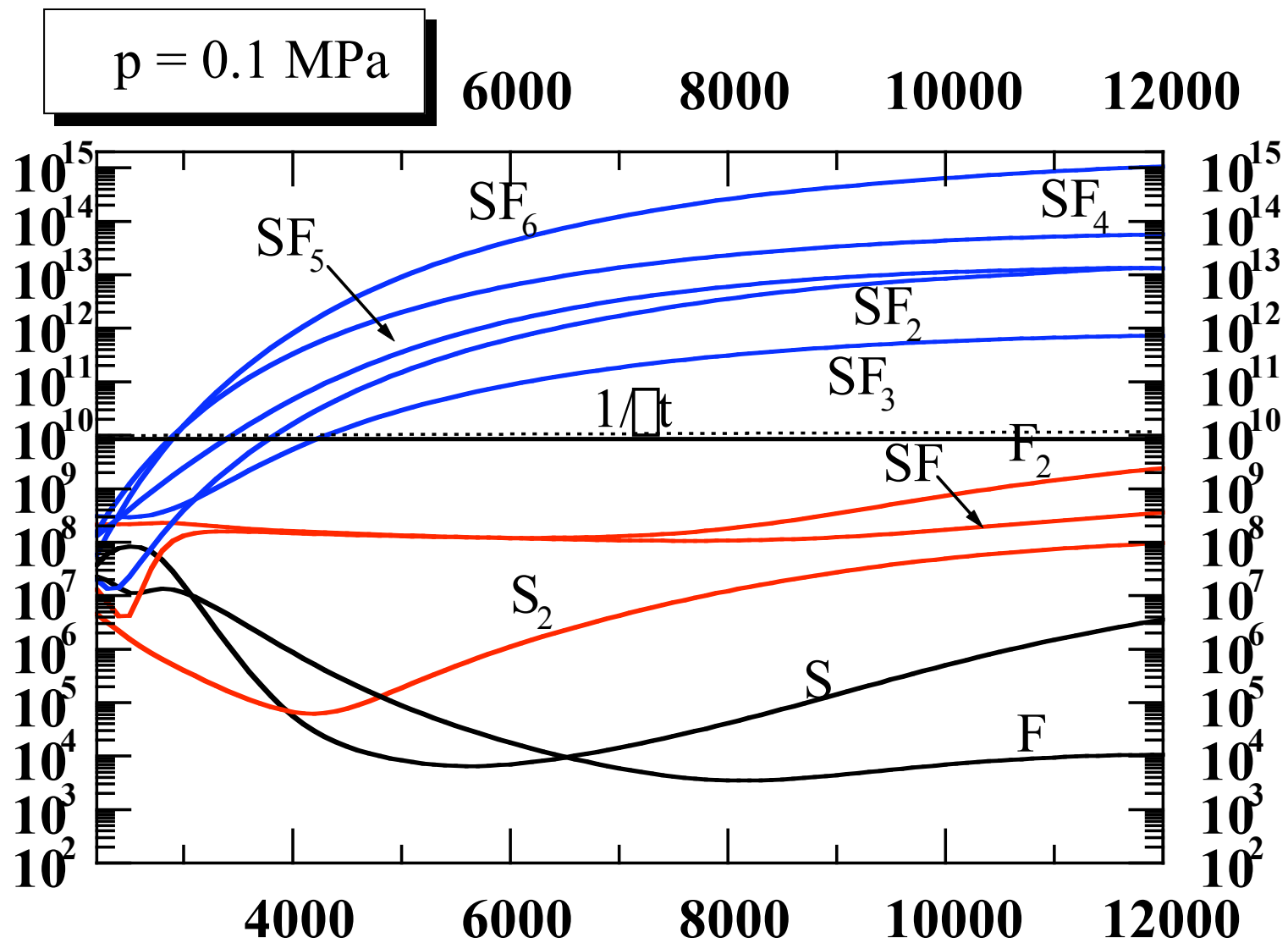
$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \vec{\square} \cdot (n_i \vec{V}) = Ca_i \square n_i Da_i \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial n_i}{\partial t} = Ca_i \square n_i Da_i$$

$$n(t) = n_r + (n_0 - n_r) \exp\left(-\frac{t}{\square}\right)$$

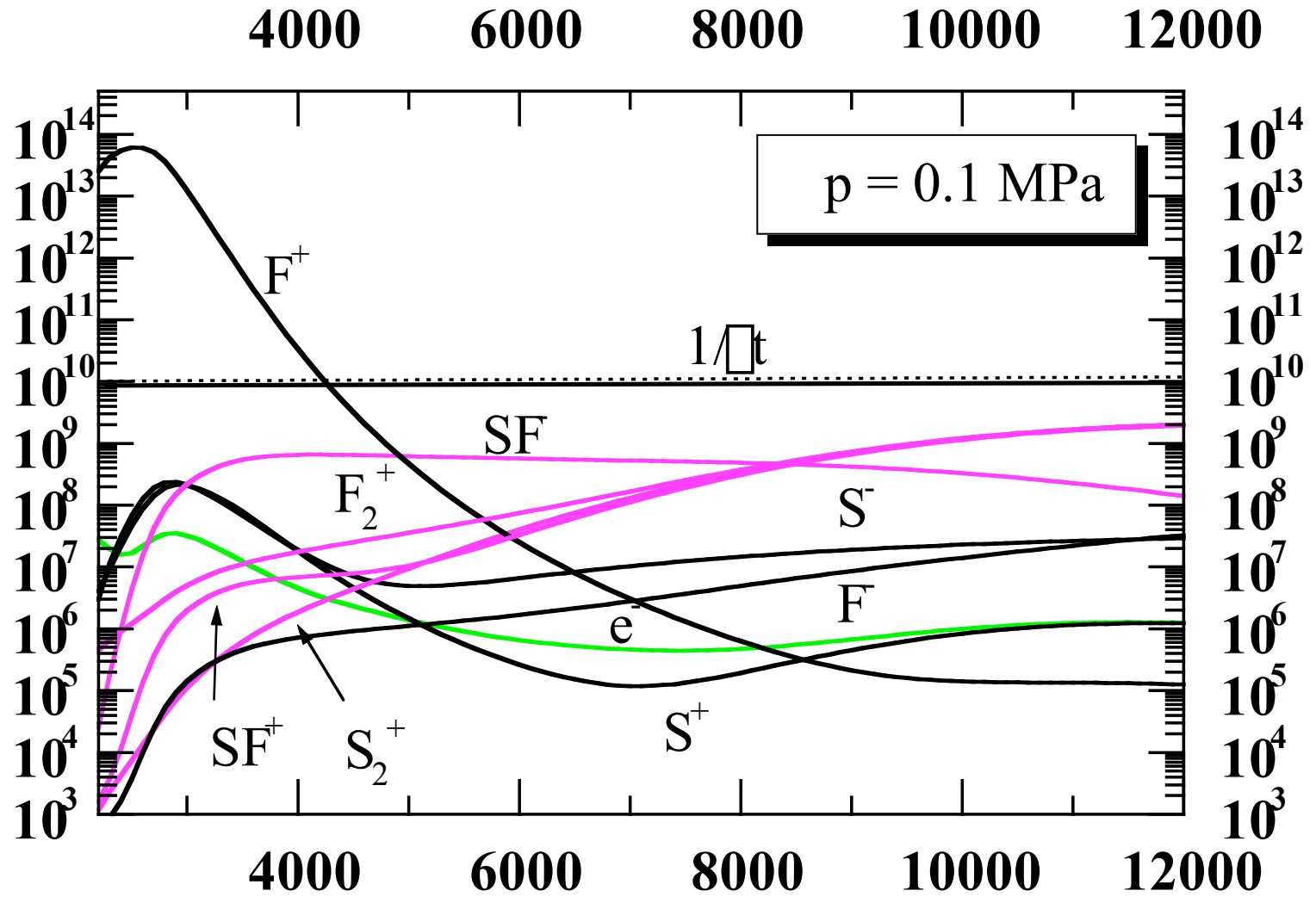
$$\square = \frac{1}{Da} \quad n_r = \frac{Ca}{Da} = Ca \square$$



III.5 Estimation du pas d'avancement sur le temps Δt



III.5 Estimation du pas d'avancement sur le temps Δt

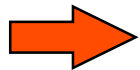


III.5 Estimation du pas d'avancement sur le temps Δt

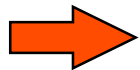
Estimation

$$\Delta t = 10^{-10} \text{ s}$$

Conséquences



Les espèces polyatomiques SF_X ($X = 2$ à 6) sont calculées à l'équilibre pour $T > 5000 \text{ K}$.



L'espèce F^+ est calculée à l'équilibre pour $T < 5000 \text{ K}$.



PLAN DE L'EXPOSE

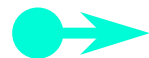


- **III. MODELE HYDRO-CINETIQUE**

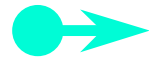
- **IV. RESULTATS**



IV.1. Le modèle 1D transitoire



IV.2. Le modèle 2D hydro-cinétique

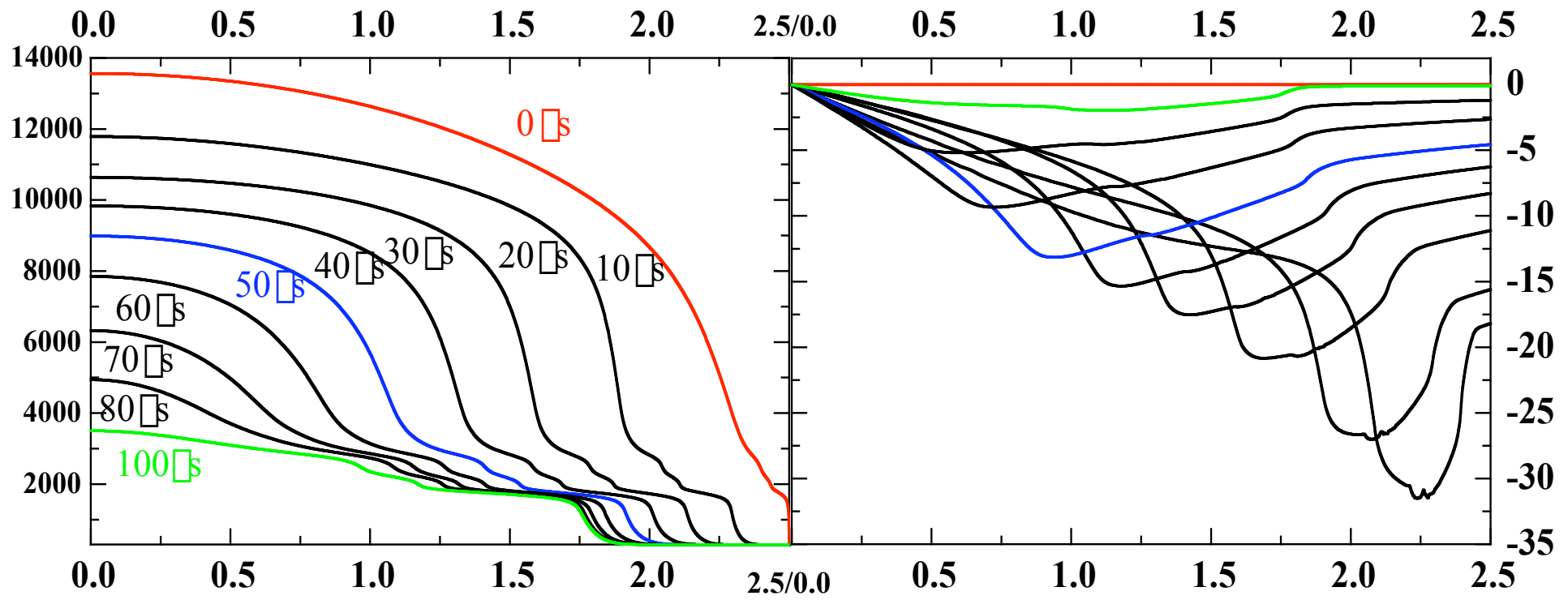


IV.3. Interprétations des écarts à l'équilibre



IV-1. Le modèle 1D transitoire

Profils de température et de vitesse radiale

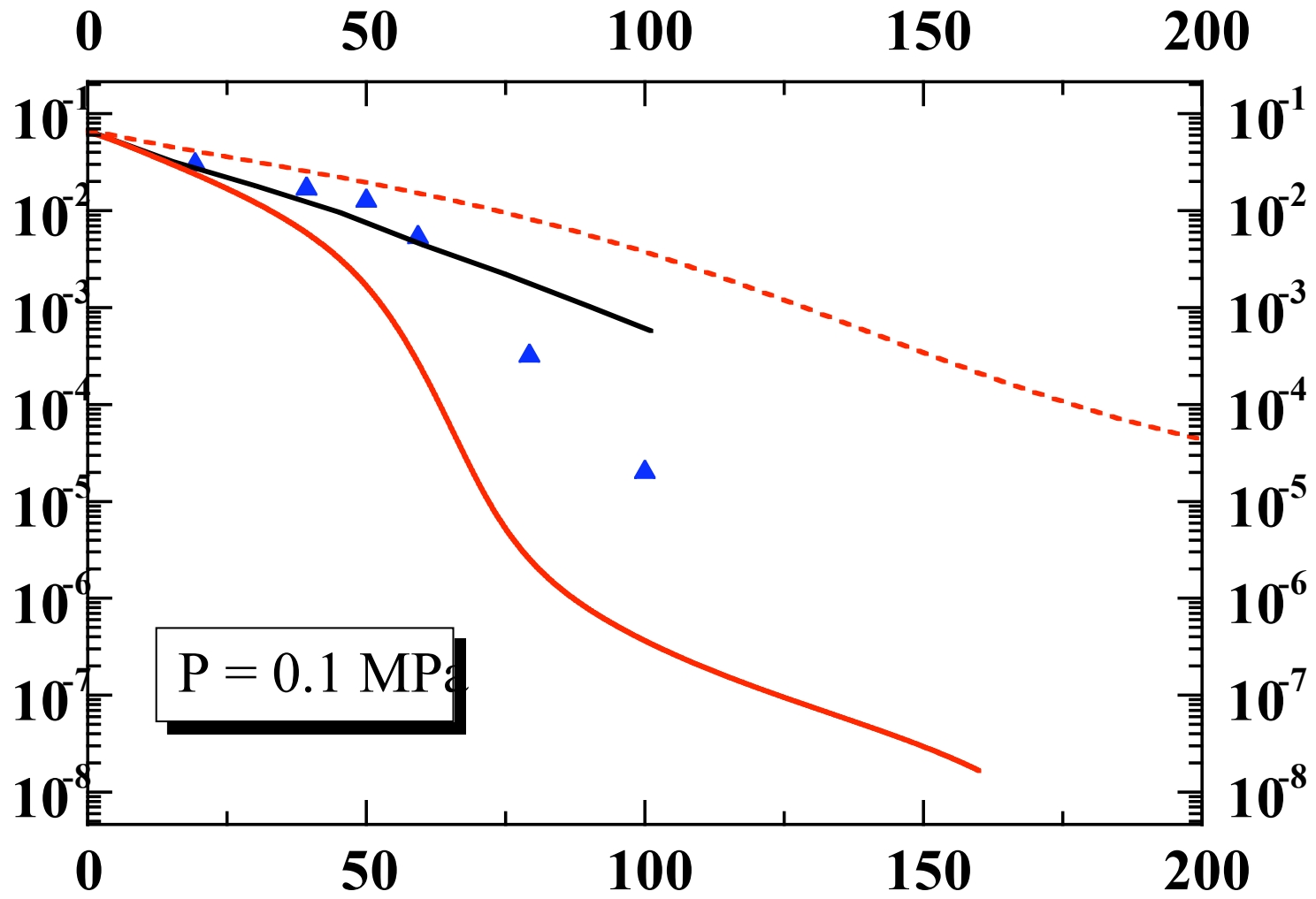


$T_p = 300 \text{ K}$



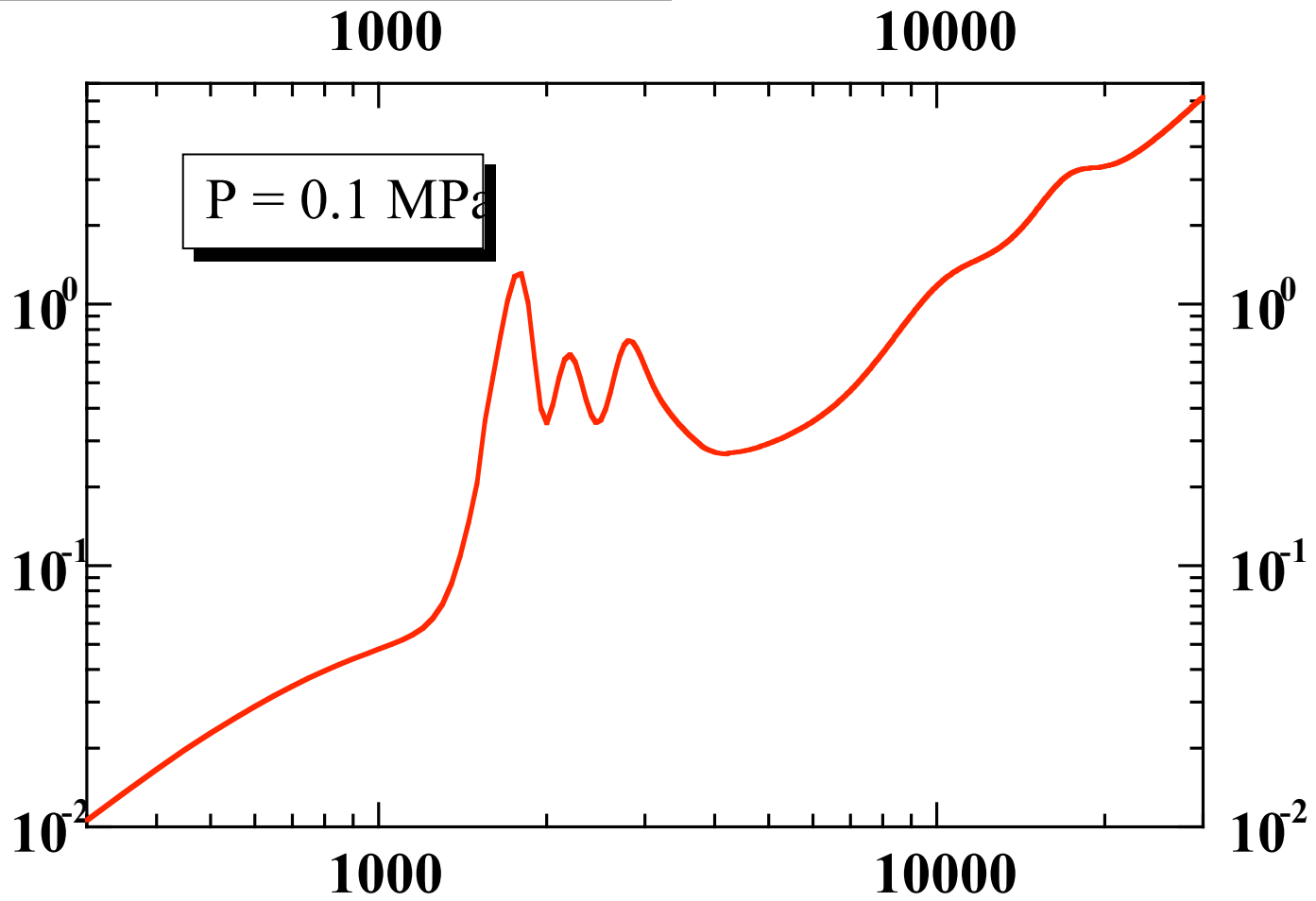
IV-1. Le modèle 1D transitoire

Conductance



IV-1. Le modèle 1D transitoire

Conductivité thermique du SF₆ pur



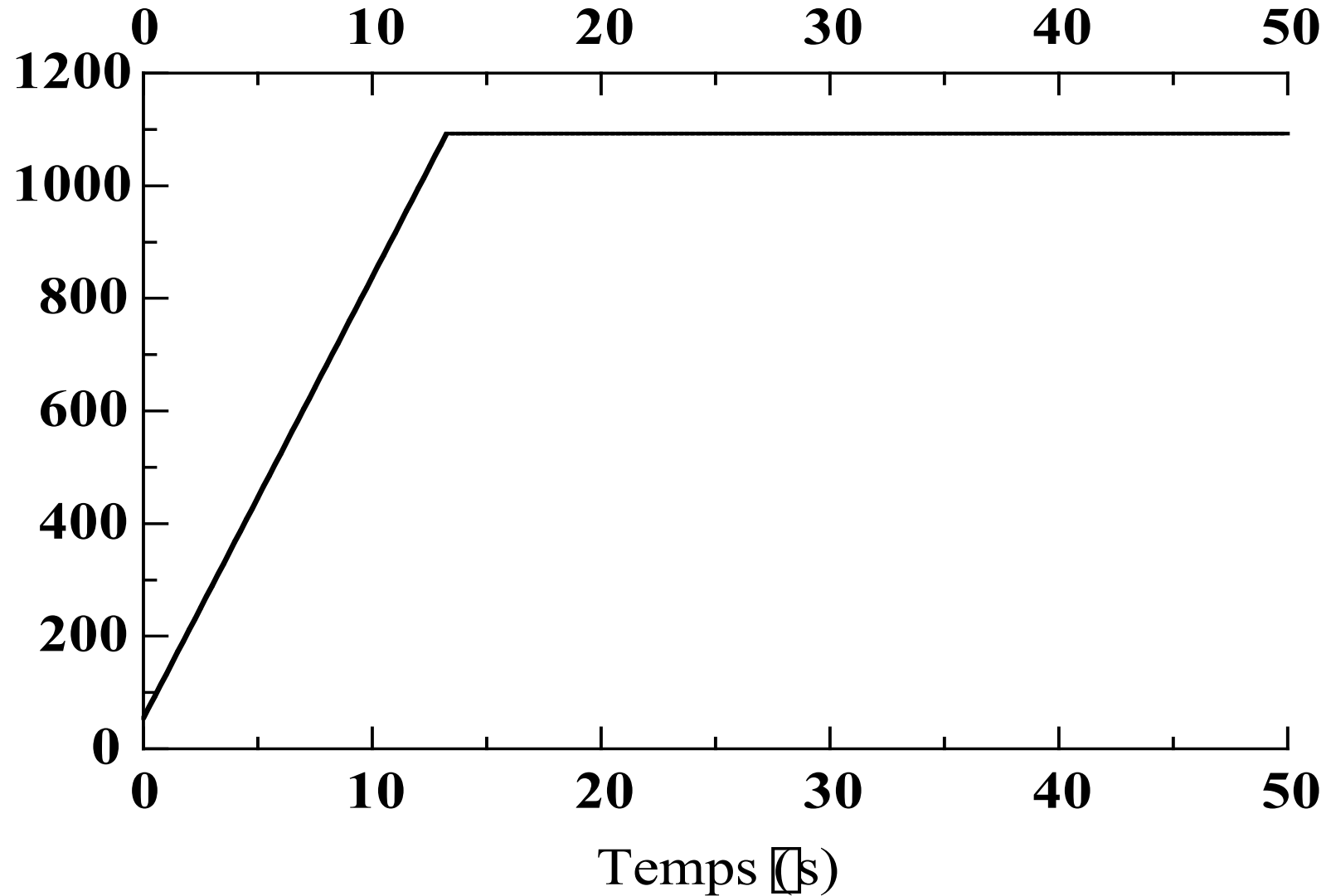
IV-2. Le modèle 2D Hydro-cinétique

Caractéristiques du calcul

- ➔ Intensité : 50 A
- ➔ Pression : 0.1 MPa
- ➔ Température des parois : 3000 K
- ➔ Vitesse à l'entrée : 54 m.s⁻¹
- ➔ $D_0 = 0.2 \text{ g.s}^{-1}$ pour 0.1 Mpa
- ➔ Convection forcée

$$U = U_0 \left[\begin{array}{c} \square \\ \square \\ \square \end{array} \right] + \frac{29}{20.10^{\square 6}} t \left[\begin{array}{c} \square \\ \square \\ \square \end{array} \right] \quad D = D_0 \left[\begin{array}{c} \square \\ \square \\ \square \end{array} \right] + \frac{29}{20.10^{\square 6}} t \left[\begin{array}{c} \square \\ \square \\ \square \end{array} \right]$$

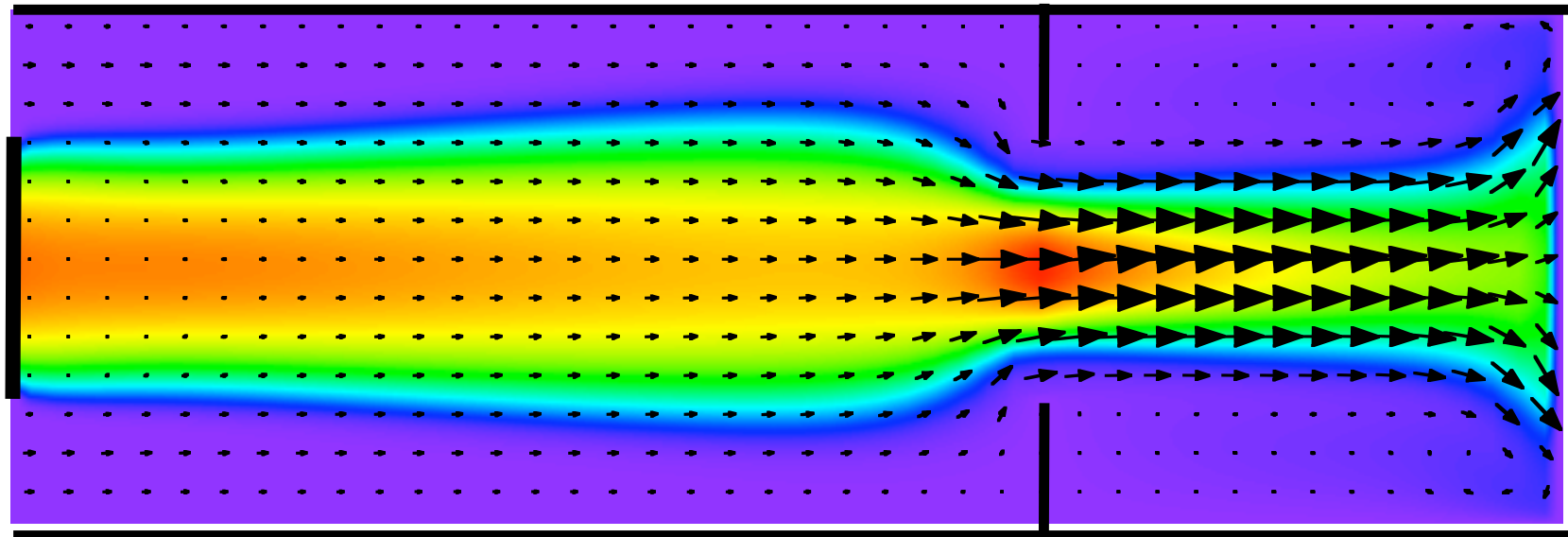
IV-2. Le modèle 2D Hydro-cinétique



$$U = U_0 \left[1 + \frac{29}{20 \cdot 10^6} t \right] \quad D = D_0 \left[1 + \frac{29}{20 \cdot 10^6} t \right]$$

IV-2. Le modèle 2D Hydro-cinétique

Champs de température et du vecteur vitesse $t = 0$



5000 7500 10000

(K)

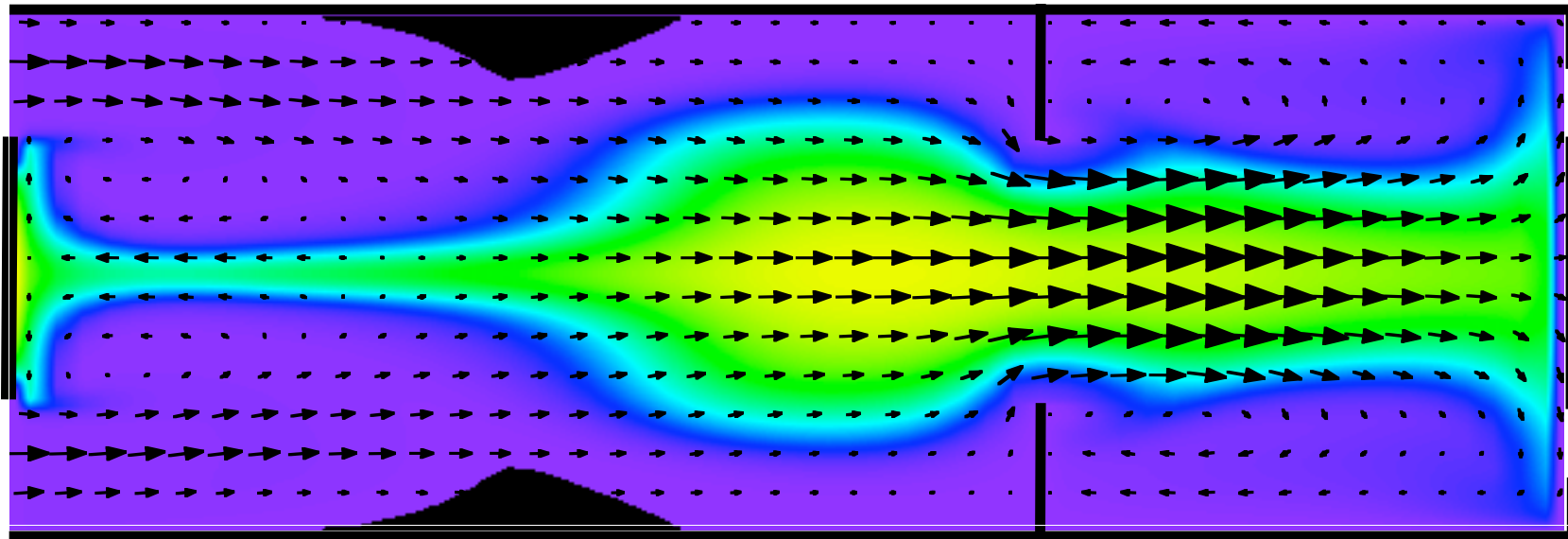
→ = 416.55 m.s⁻¹



$p = 0.1 \text{ Mpa}$
 $D_0 = 0.2 \text{ g.s}^{-1}$

IV-2. Le modèle 2D Hydro-cinétique

Champs de température et du vecteur vitesse $t = 20 \text{ } \square \text{s}$



5000 7500 10000

(K)

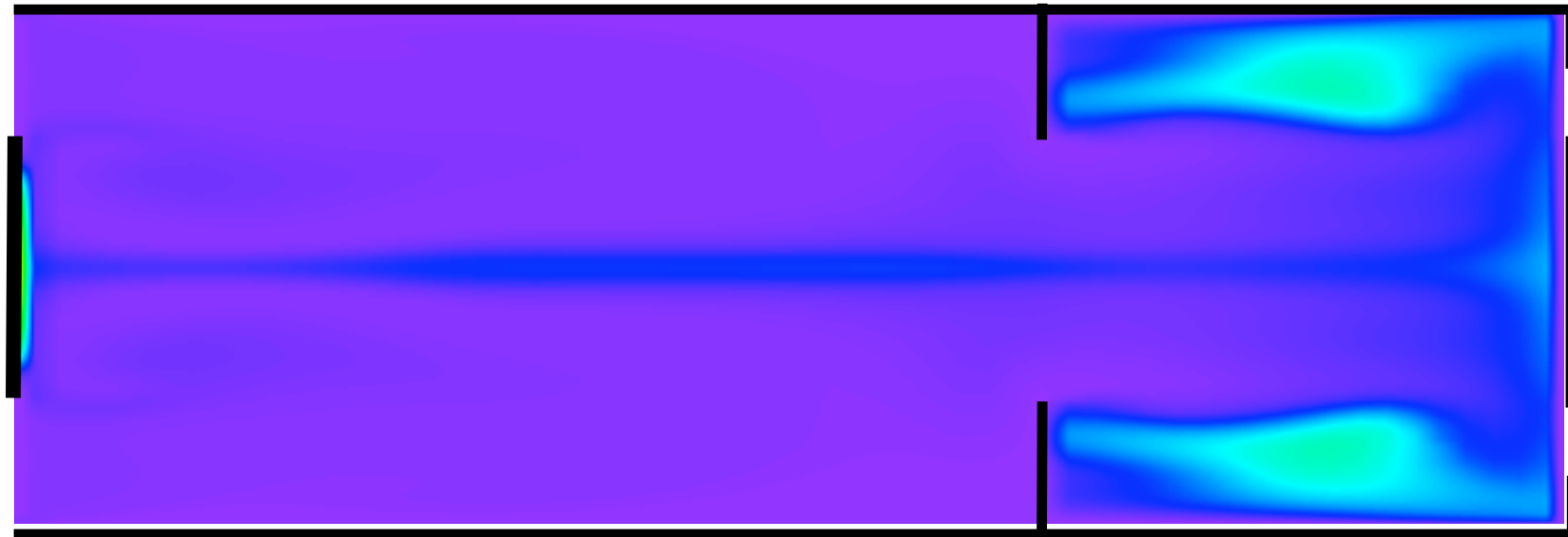
$\rightarrow = 2249.89 \text{ m.s}^{-1}$

$D(20 \square \text{s}) = 4 \text{ g.s}^{-1}$



IV-2. Le modèle 2D Hydro-cinétique

Champ de température : $t = 40 \text{ } \mu\text{s}$



5000

7500

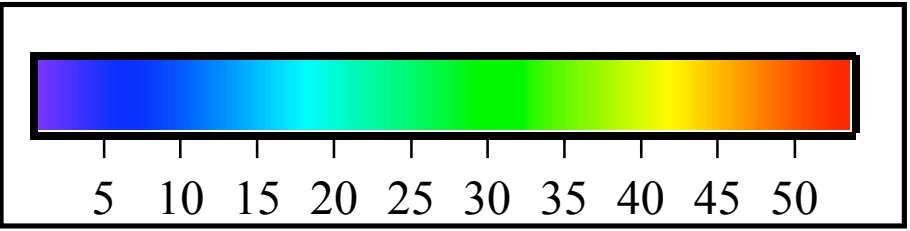
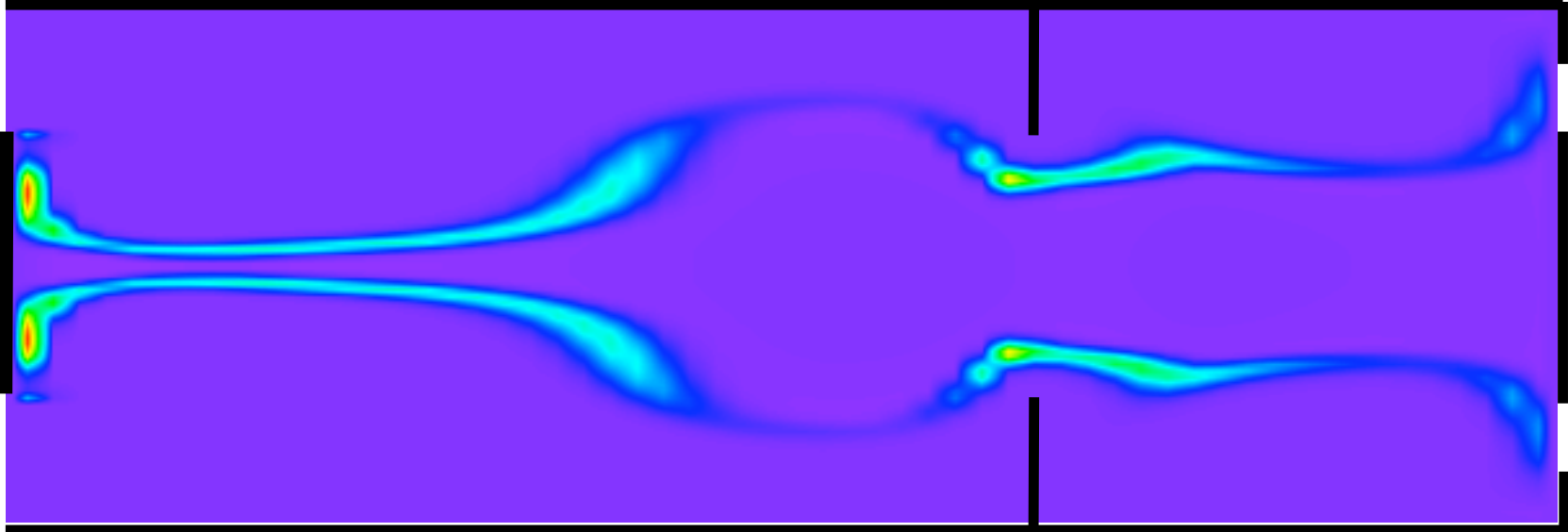
10000

(K)



IV-2. Le modèle 2D Hydro-cinétique

Champ de densité relative de S_2 : $t = 20 \mu\text{s}$

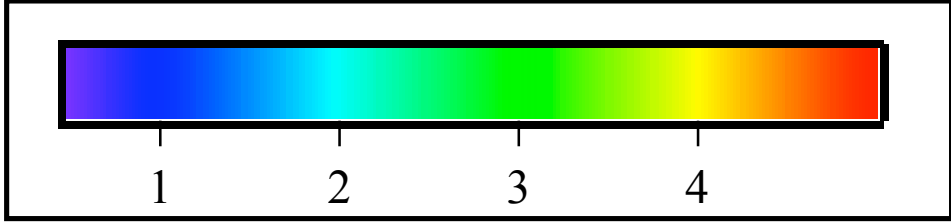
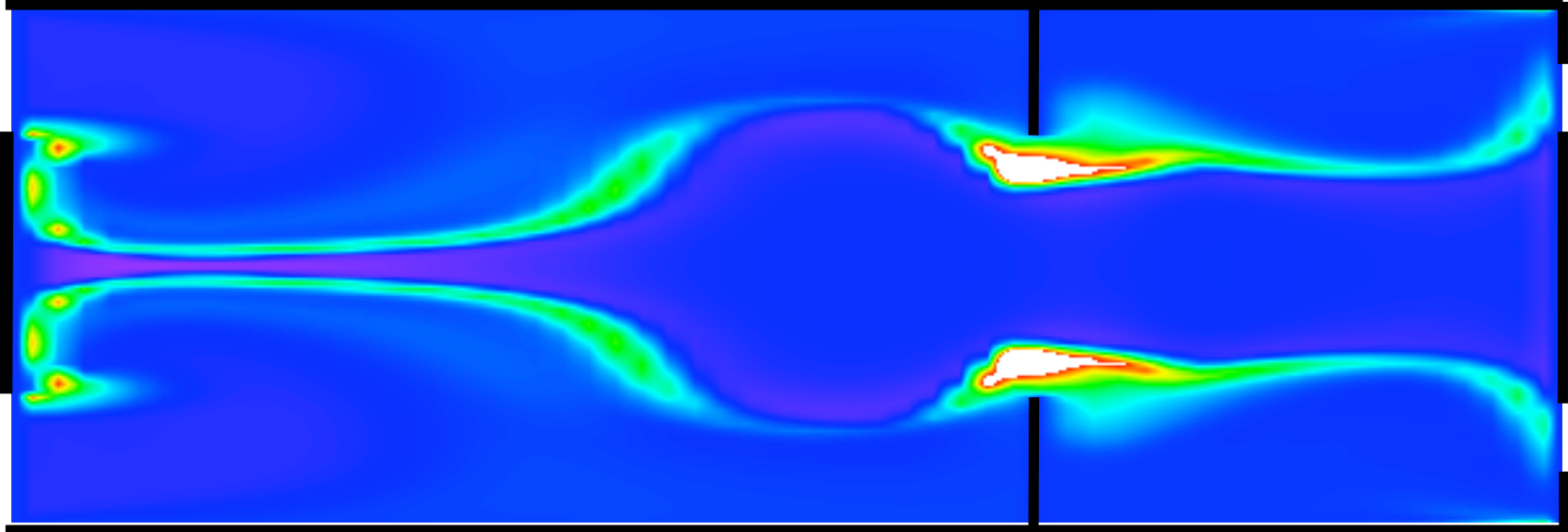


$$\frac{n}{n_{\text{ETL}}(T, P)}$$



IV-2. Le modèle 2D Hydro-cinétique

Champ de densité relative de S_2^+ : $t = 20 \mu\text{s}$

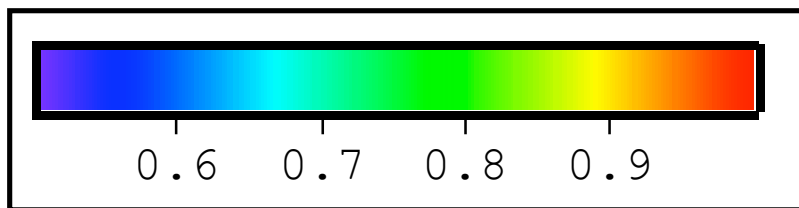
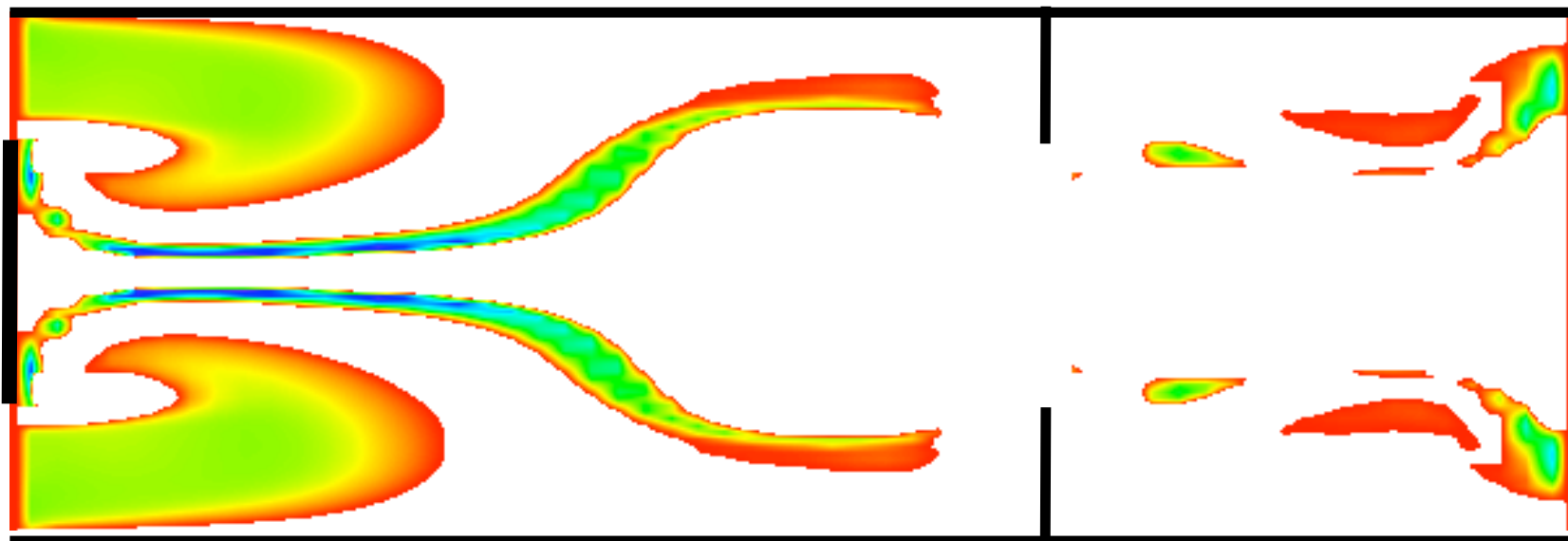


$$\frac{n}{n_{ETL}}(T, P)$$



IV-2. Le modèle 2D Hydro-cinétique

Champ de densité relative des électrons : $t = 20 \text{ ns}$



$$\frac{n}{n_{\text{ETL}}}(T, P)$$



IV-3. Interprétations des écarts à l'équilibre

Origine de la sous-population électronique entre 4000 K et 6000 K

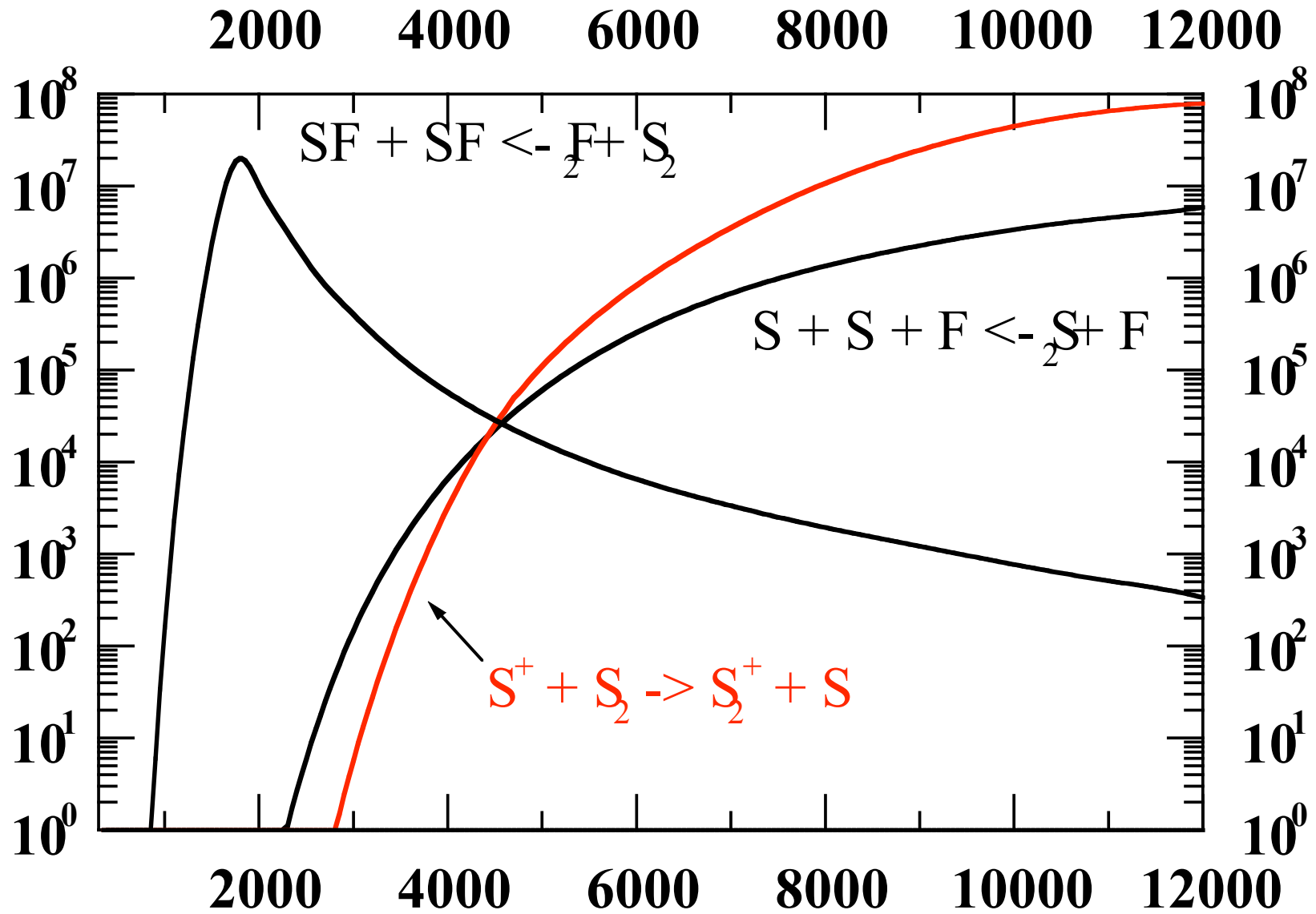
Convection

Surpopulation des
molécules S_2



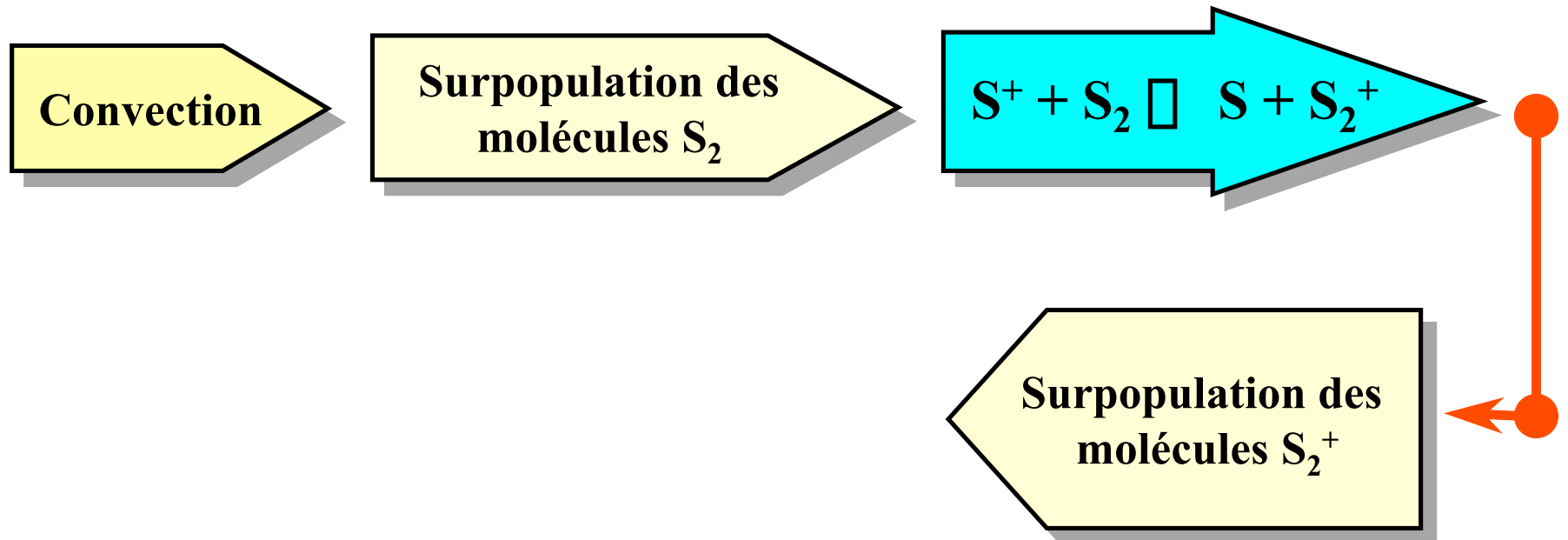
IV-3. Interprétations des écarts à l'équilibre

S_2



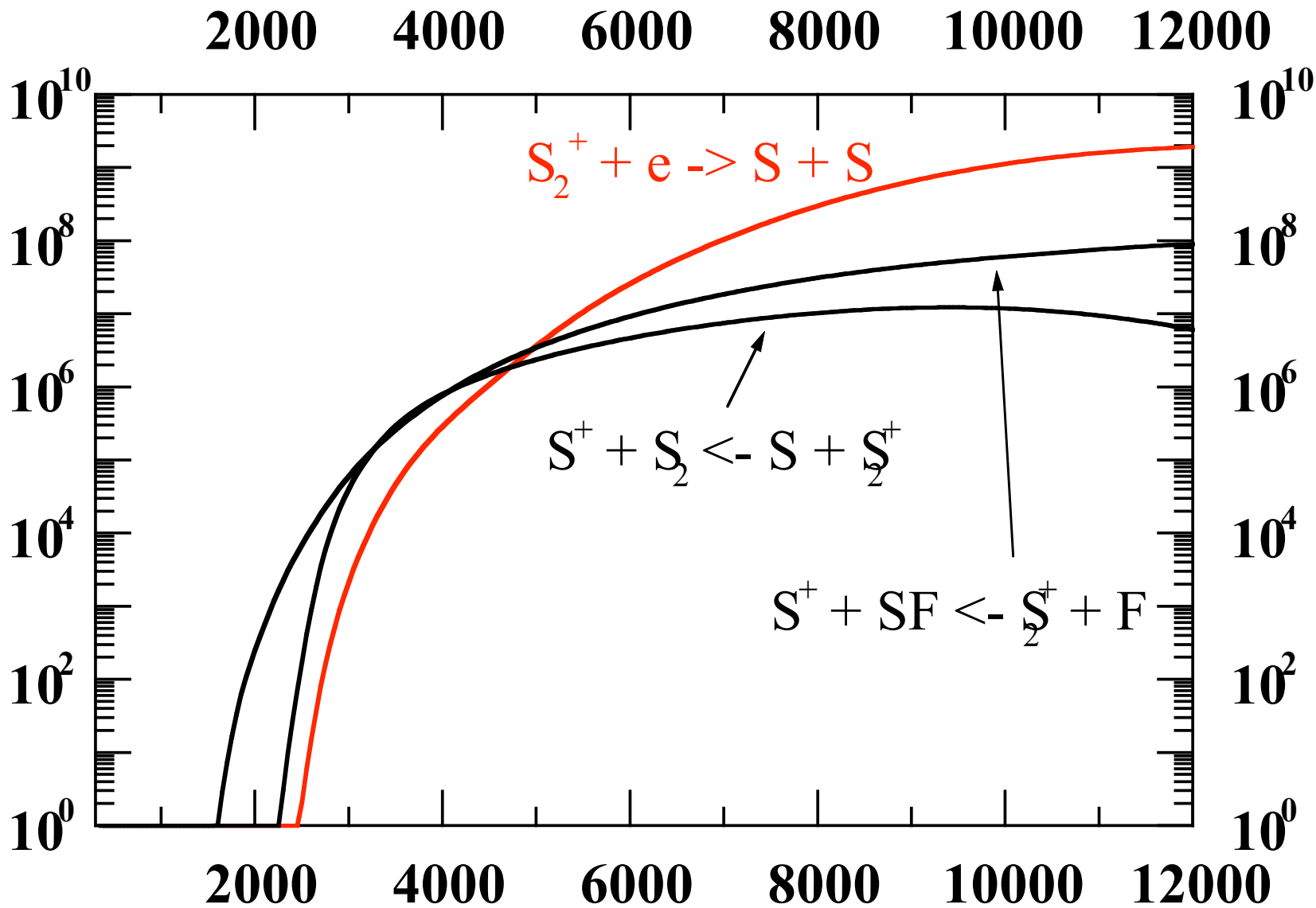
IV-3. Interprétations des écarts à l'équilibre

Origine de la sous-population électronique entre 4000 K et 6000 K



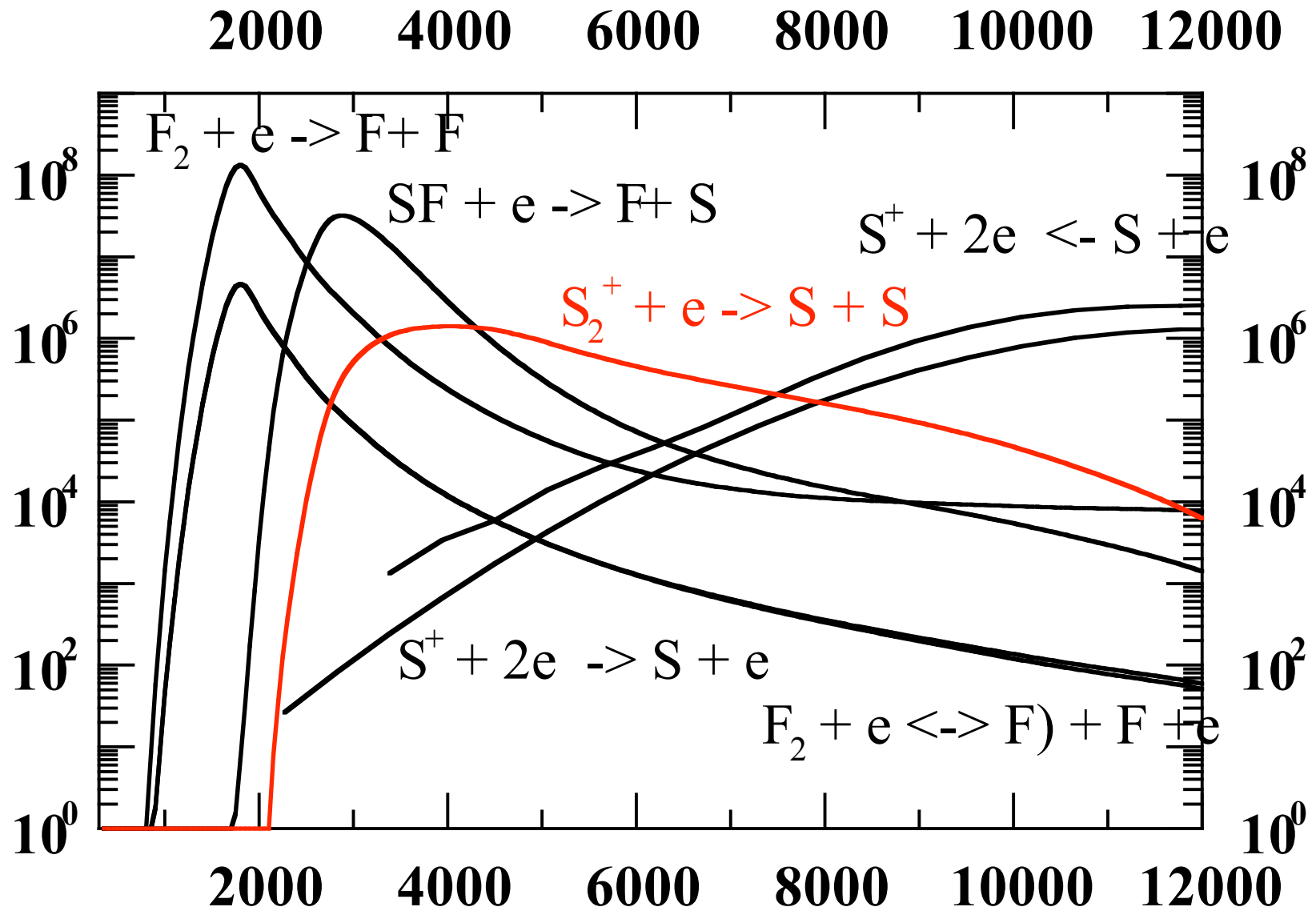
IV-3. Interprétations des écarts à l'équilibre

S_2^+



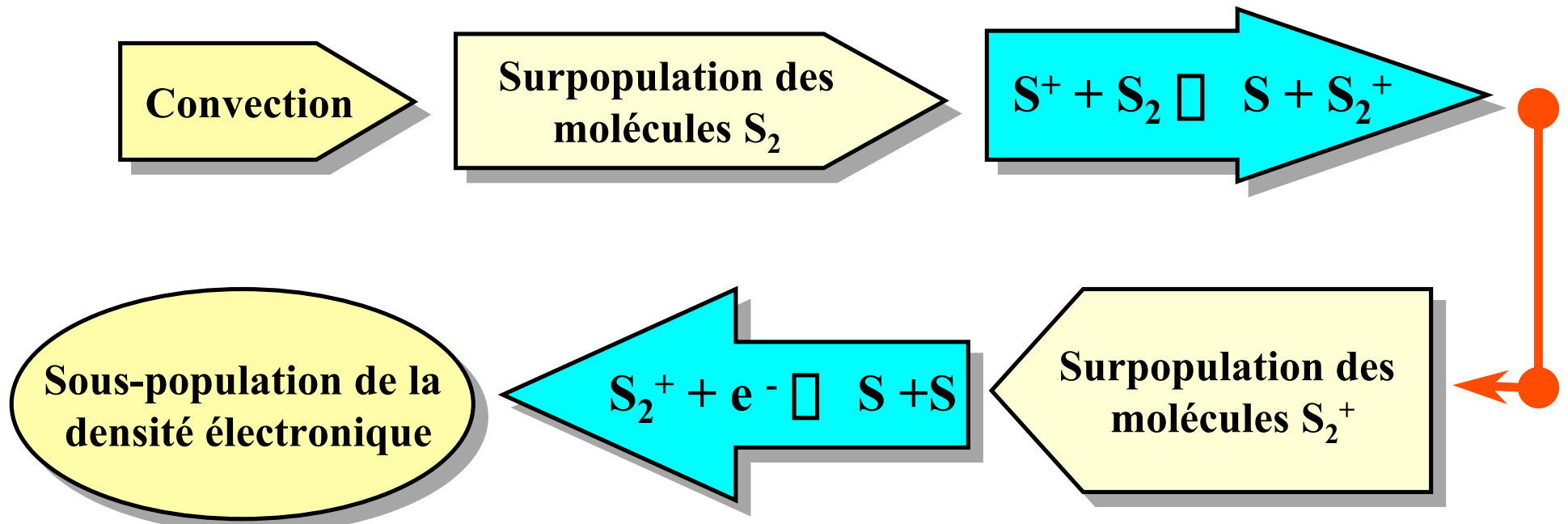
IV-3. Interprétations des écarts à l'équilibre

e⁻



IV-3. Interprétations des écarts à l'équilibre

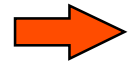
Origine de la sous-population électronique entre 4000 K et 6000 K



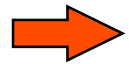
L'entrée du gaz froid dans les parties chaudes du plasma est donc à l'origine de la disparition des électrons.



Conclusion



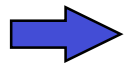
La résolution des équations de conservation des espèces en régime stationnaire a permis de calculer la composition d'équilibre par la mise au point d'un modèle collisionnel radiatif.



Nous avons estimé la distance moyenne caractéristique que pouvait parcourir une espèce avant d'être totalement dissociée.



Nous avons simulé l'extinction de l'arc pour une intensité initiale de 50 A et pour une pression fixée à 0.1 MPa.

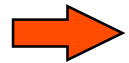


La convection agit indirectement sur les électrons qui se retrouvent, au bord de la décharge et pour des températures comprises entre 4000 K et 6000 K, en sous population par rapport à l'équilibre.

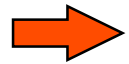


Perspectives

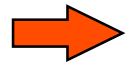
Amélioration du code



Augmenter la gamme de température



Prendre en compte le caractère turbulent de l'écoulement lors de l'extinction au travers d'un modèle k- ϵ standard.



Augmenter la pression initiale (4 atm - 8 atm).

Autre perspective



L'étude du déséquilibre thermique dans un arc de disjoncteur.



Centre de Physique des Plasmas et de leurs Applications de Toulouse

Modélisation de l'extinction d'un arc de SF₆ hors d'équilibre thermodynamique local

Jean-Belkheir Belhaouari

Physico-Chimie des Plasmas d'Arc
Opération n° 8

