

Quelques considerations sur la modélisation des plasmas thermiques

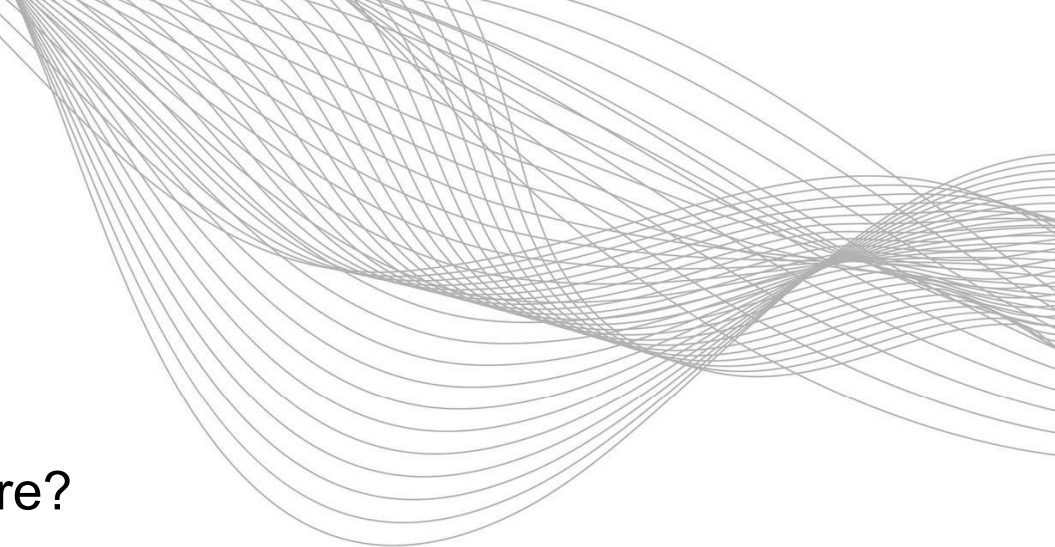
Réseau Plasmas Froids octobre 2022

Pierre Freton – Equipe Arc Electrique et Procédés Plasmas Thermiques
pierre.freton@laplace.univ-tlse.fr



Cette présentation est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Sommaire



1. Introduction - généralités

- A. Qu'est ce qu'un modèle, quels ingrédients y mettre?

2. Les ingrédients d'un modèle plasmas thermiques

- A. Les configurations plasmas thermiques et les phénomènes
- B. Modélisation de la colonne
- C. Modélisation de la cathode
- D. Un exemple plus général : Le disjoncteur haute tension



Partie 1

Introduction

Introduction: Qu'est ce qu'un modèle?

- Représentation **conceptuelle** à un certain niveau d'abstraction. Pour les plasmas différents types de modèles:
 - Fluide: plasma = milieu continu
 - Particulaire: plasma = particules (chargées) en interaction
 - Global: plasma = convertisseur électrique ou chimique
- Représentation **mathématique**: mise en équations des concepts, système d'équations physiques couplées + **données d'entrée**
- Représentation **numérique** & **informatique**: implémentation des équations en algorithme numérique puis code informatique
- Parfois confusion modèle, code, simulation

Introduction : Objectifs et utilité de la modélisation

- **Interpréter** des données expérimentales, **Améliorer** compréhension des mécanismes physiques, **vérifier** le lien expérience-théorie
- **Obtenir des prédictions** pour aider conception/optimisation de dispositifs
- **Mais attention:**
 - Limitations de validité des approximations physiques
 - Incertitudes & inconnues dans les données d'entrée
 - Erreurs numériques



Nécessité systématique de validation expérimentale

Introduction : Les ingrédients généraux des modèles plasmas froids- Quelle physique?

- **Formalisme** pour décrire les phénomènes :
 - **Plasma** : Equations de la mécanique classique (Fluide – statistique) pour le **transport** de différents espèces de particules: électrons, ions, états excités, radicaux, gaz neutre
 - **Environnement du plasma** : Electrodes (Gaines) , matériaux (thermique), gaz froid
- **Interactions**
 - **Entre les particules** Physico-chimie, mécanismes réactionnels, Données de base pour les processus collisionnels, réactifs et radiatifs, coefficients de transport
 - **Entre le plasma et son environnement** : Modèles d'électrode, d'ablation, ensemencement de vapeurs
- **Interactions électromagnétiques**
 - **Entre les particules**: Equations de Maxwell pour les interactions électromagnétiques: couplage électrons-ions et chauffage des électrons
 - **Avec les électrodes** : Phénomènes d'émission, de collections de charge etc..

Physique

Introduction : Les ingrédients généraux des modèles plasmas – 2/2

Physique

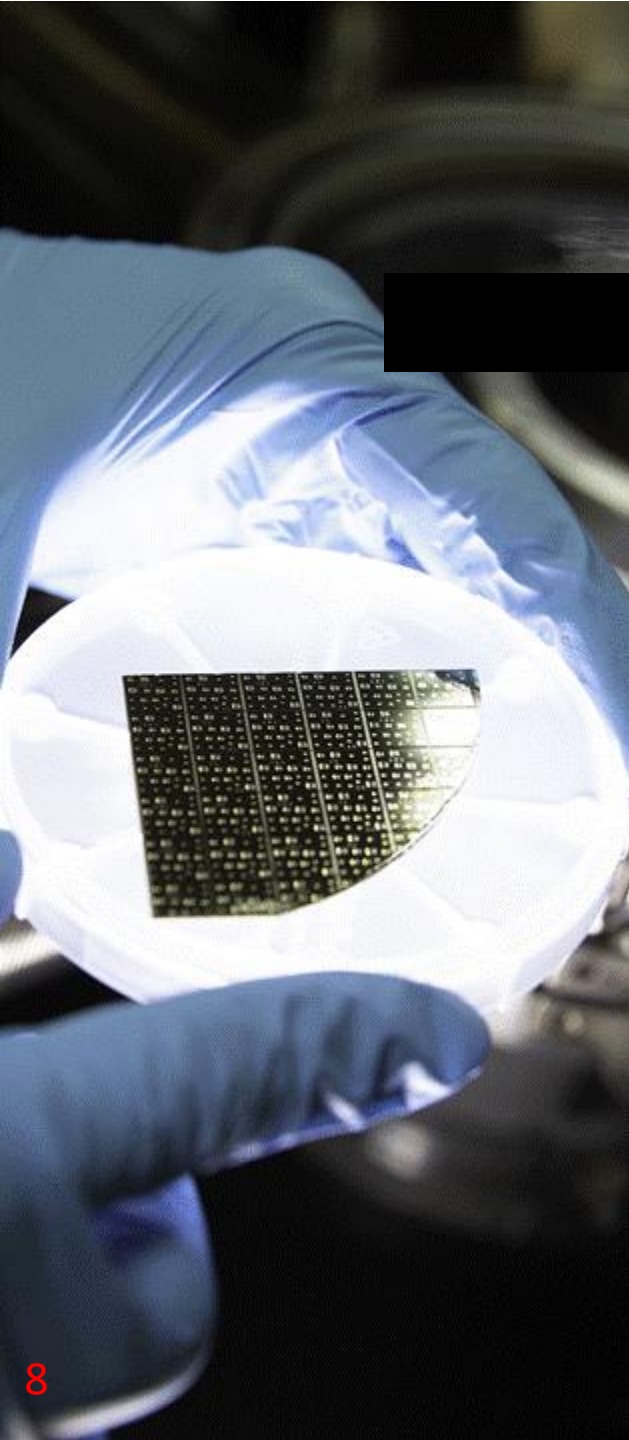
- Formalisme pour décrire les phénomènes
- Interactions plasma/particules et plasma/environnement
- Interactions électromagnétiques

Modèle

- Différents types de modèles associés aux plasmas ou aux interactions (fluide, Monte Carlo, etc..), données de base nécessaires

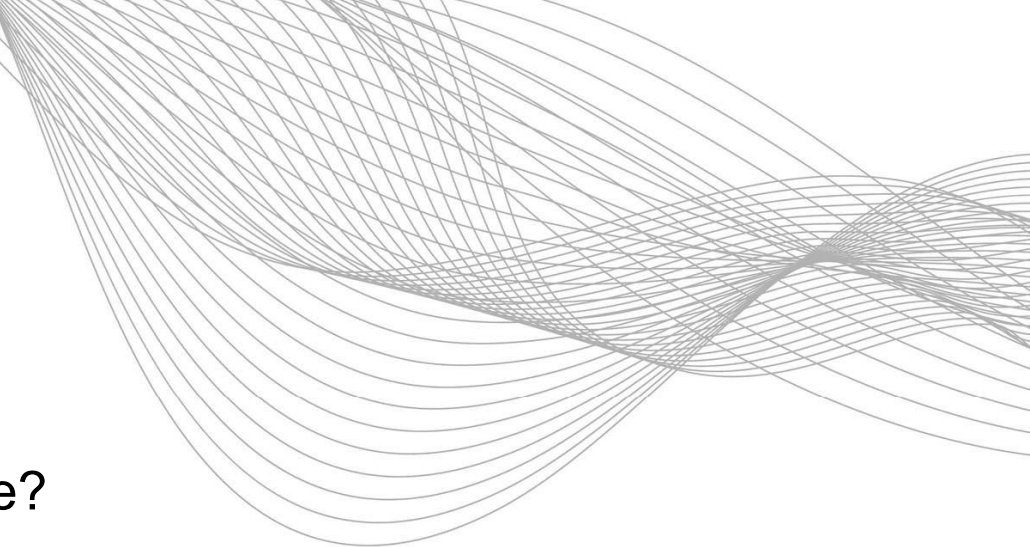
Numérique

- Outils numériques: algorithmes, maillages, solveurs...



Ingrédients d'un modèle plasma thermique

Sommaire



1. Introduction - généralités

- A. Qu'est ce qu'un modèle, quels ingrédients y mettre?

2. Les ingrédients d'un modèle plasmas thermiques

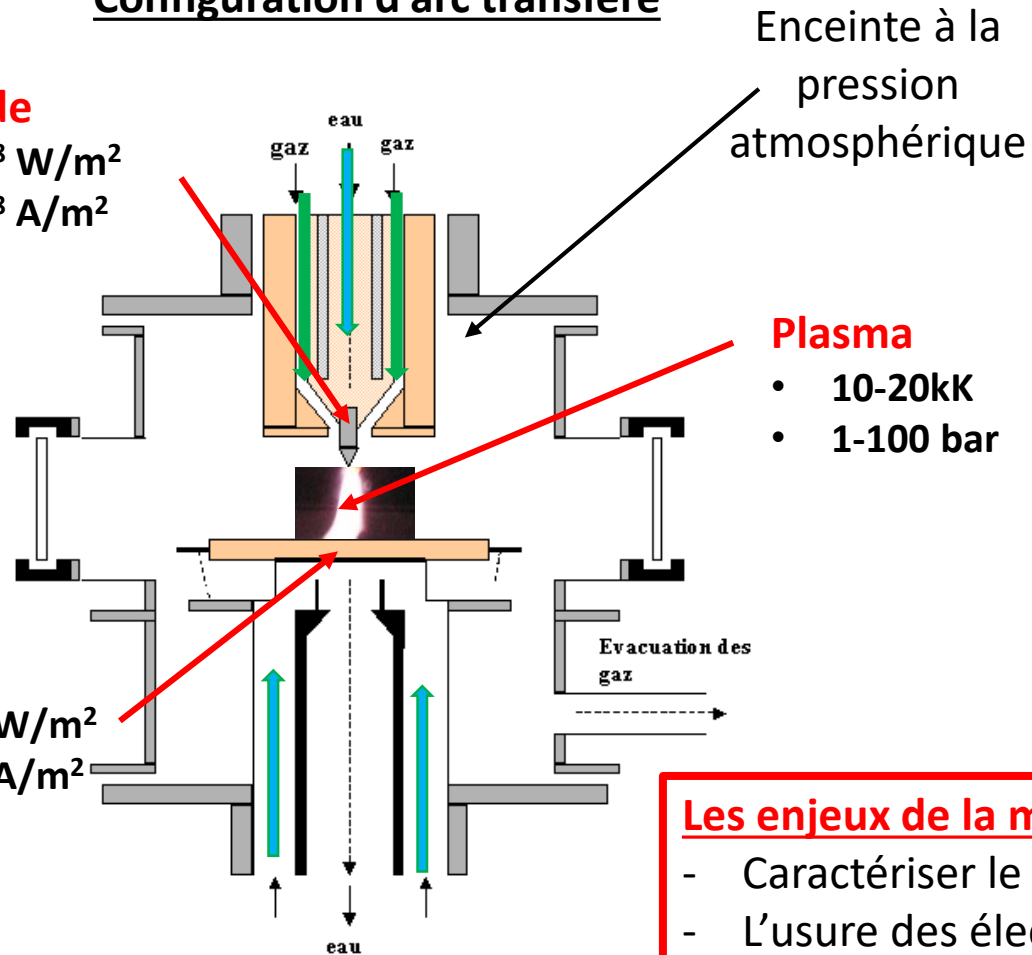
- A. Les configurations plasmas thermiques et les phénomènes
- B. Modélisation de la colonne
- C. Modélisation de la cathode
- D. Un exemple plus général : Le disjoncteur haute tension

Les configurations typiques des dispositifs plasmas thermiques

Configuration d'arc transféré

Cathode

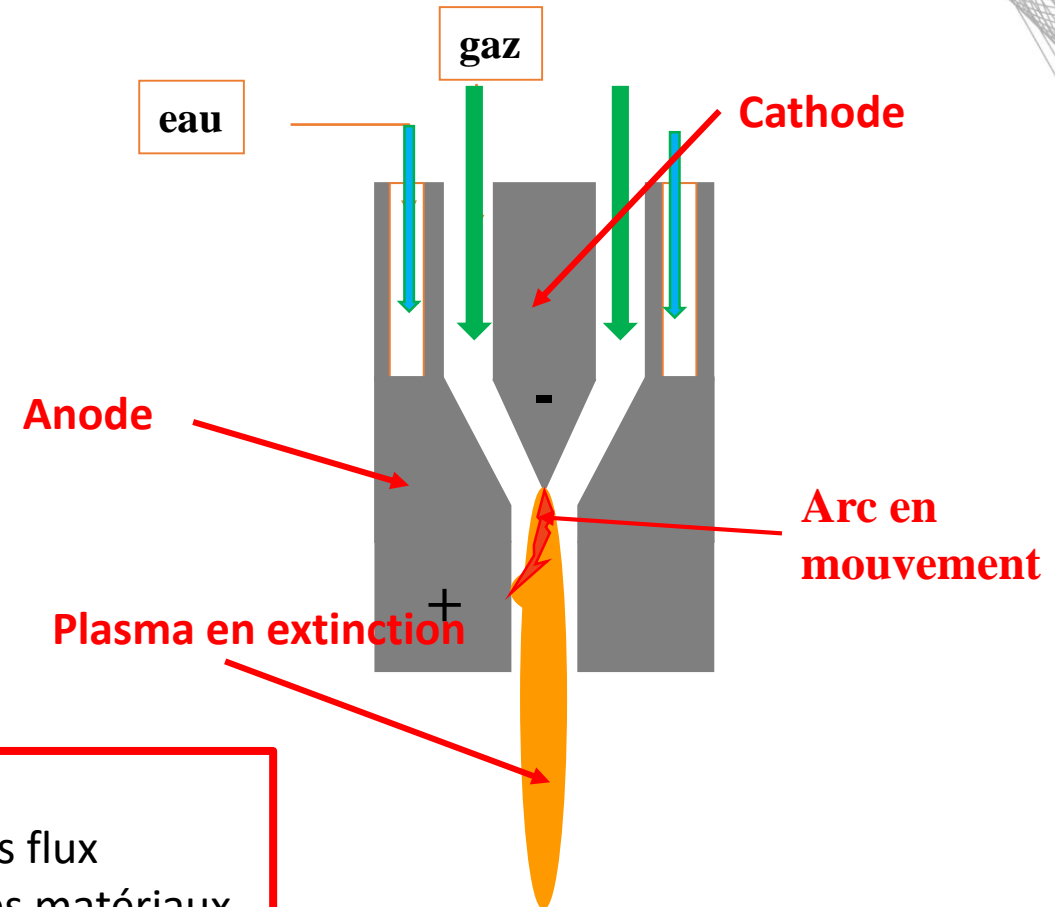
- 10^{7-8} W/m^2
- 10^{7-8} A/m^2



Plasma

- 10-20kK
- 1-100 bar

Configuration de torche

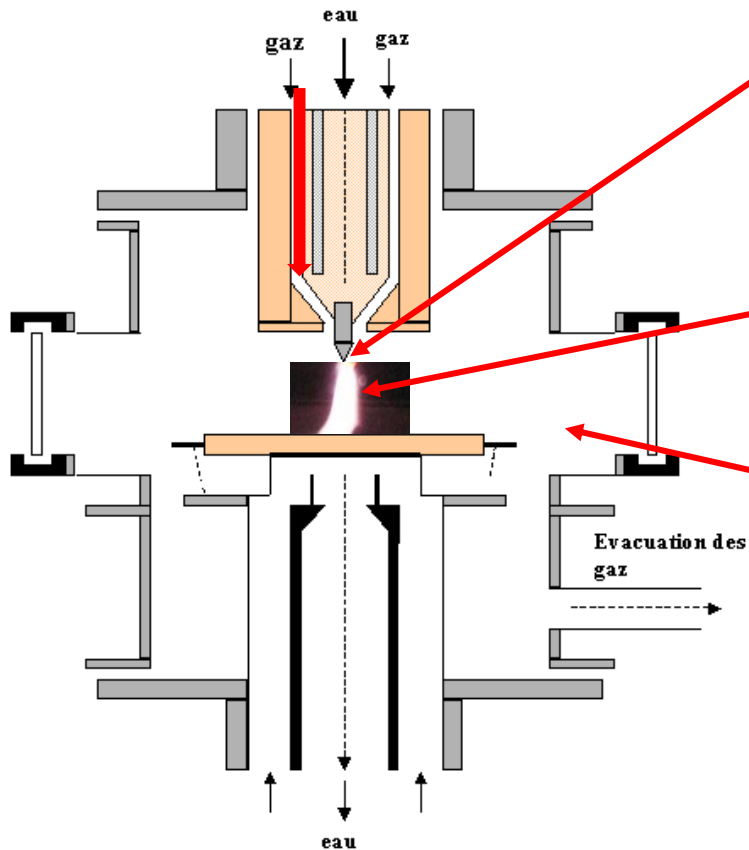


Les enjeux de la modélisation

- Caractériser le plasma et ses flux
- L'usure des électrodes et des matériaux
- Appréhender le fonctionnement d'un dispositif

Dans une configuration plasma thermique, que peut on modéliser?

Description des phénomènes possibles

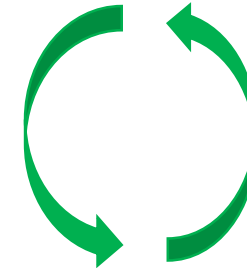


Phénomènes aux électrodes (anode & cathode)

- Interaction plasma/electrode (thermique- Electrique)
- Ablation/Ensemencement
- Phase liquide

Colonne

- Fluide ETL
- Cinétique?
- Déséquilibres?
- Rayonnement



Interactions

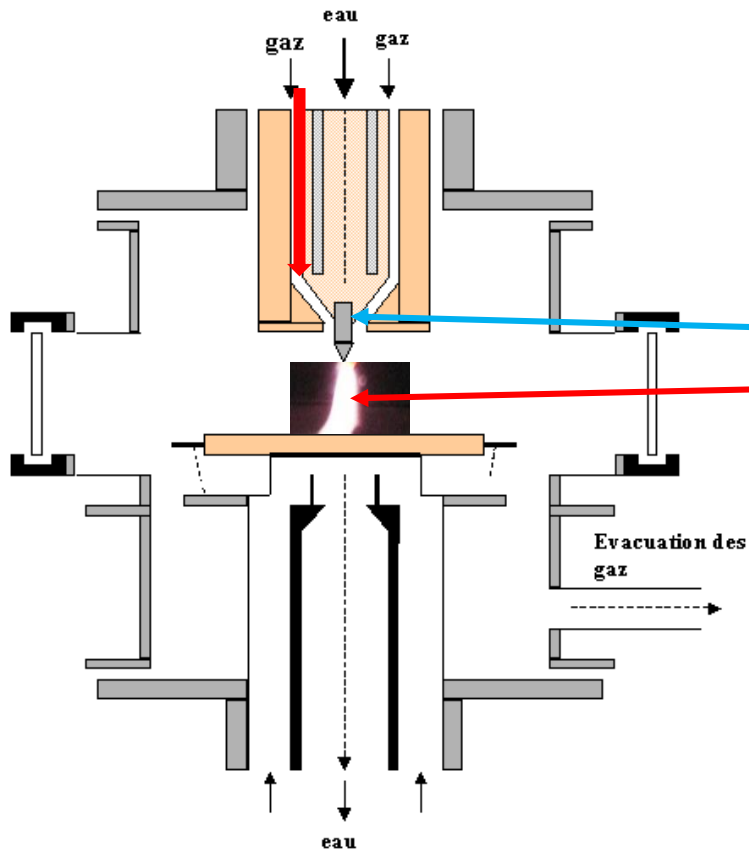
Interaction avec l'environnement

- Ablation de parois
- Turbulence
- Poudres

Que peut on modéliser? Ce qui va être développé dans cette présentation

Description des phénomènes possibles

- Phénomènes aux électrodes
- Plasma thermique
- Interaction avec l'environnement



Dans le cadre de cette présentation on va se focaliser sur :

- Modélisation de la cathode
- Modélisation de la colonne

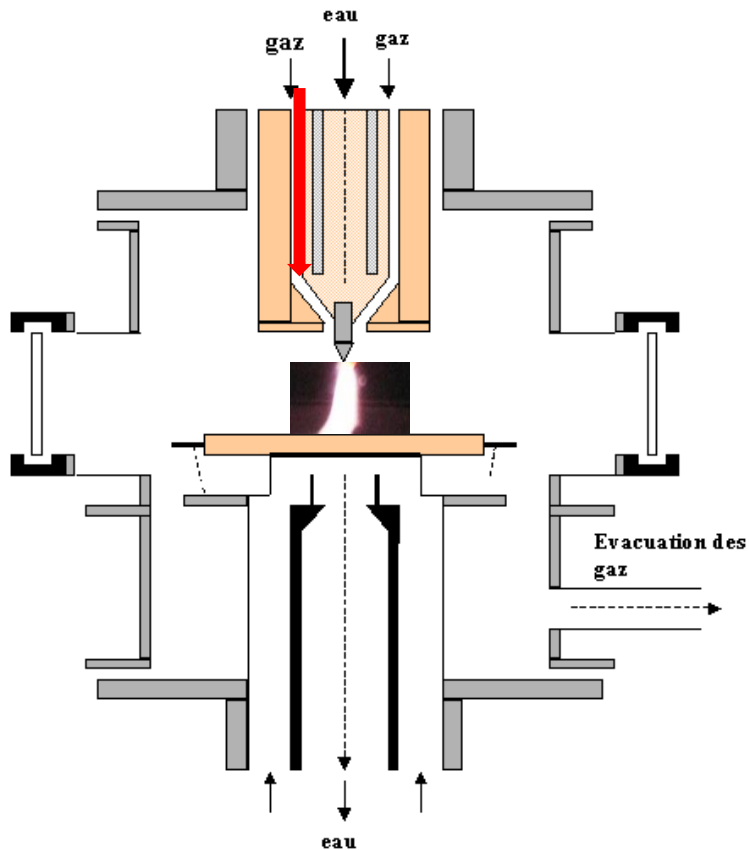


Méthodologie proposée

- Description des « ingrédients » et du formalisme
- Les difficultés liées à la modélisation de ces phénomènes
- Les possibilités de validations expérimentales
- Les challenges

Ingrédients pour la colonne plasma

Cœur du plasma : La colonne



• Formalisme pour le plasma dans la colonne

- Equations de la mécanique classique (Fluide) pour le **transport** de différents espèces de particules: électrons, ions, états excités, radicaux, neutre

• Interactions collisionnelles entre les particules

- Physico-chimie et mécanismes réactionnels (ETL?, déséquilibre thermique, chimique)
- Données de base pour les processus collisionnels, réactifs et radiatifs, coefficients de transport
- Equations pour le rayonnement

• Interactions électromagnétiques

- Equations de Maxwell pour les interactions électromagnétiques: chauffage des électrons (effet joule) – force de Laplace



Modélisations 1D/2D axi/3D

Formalisme et équations pour la colonne plasma

- Equations de Navier Stokes et conservation de l'énergie

- Hypothèse fluide : Le plasma est un fluide newtonien : Utilisation des équations de Navier Stokes

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{v}) = 0$$

Quantité de mouvement :

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho v_i \vec{v}) = \frac{\partial(-p + \tau_{ii})}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ki}}{\partial x_k} + F'_i$$

$$F'_i = j_j B_k - j_k B_j$$

v: la vitesse moyenne du fluide

P : La pression

τ : le tenseur de contraintes visqueuses

F : les forces extérieures

Conservation énergie :

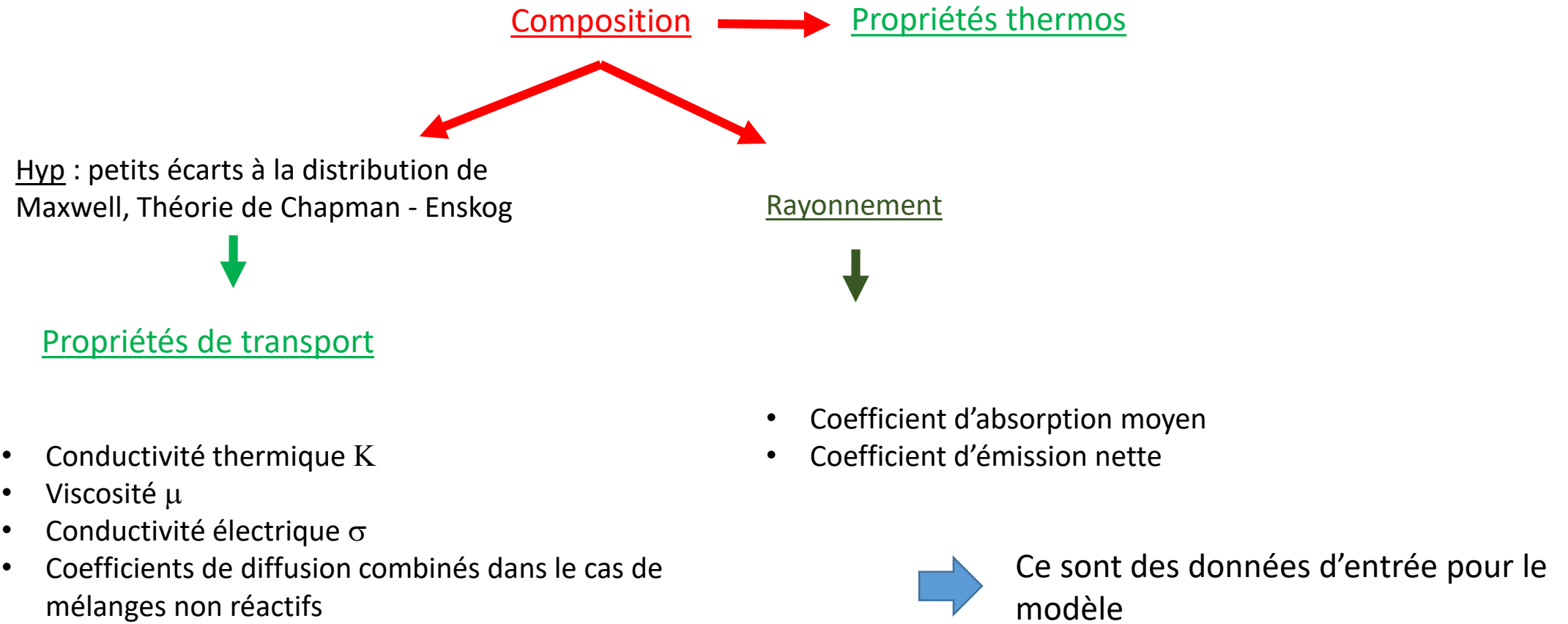
$$\frac{\partial(\rho(E + v^2/2))}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho(E + v^2/2)\vec{v}) = \vec{\nabla}(\kappa \vec{\nabla} T) - \vec{\nabla}(P\vec{v}) + \vec{\nabla}(\vec{\tau} \cdot \vec{v}) + S$$

Même si on a des électrons et des lourds, le plasma est considéré comme un fluide dans son ensemble

$$S = \frac{\vec{j}^2}{\sigma} - \text{div}(\vec{F}_{rad}) + \frac{5}{2} \frac{k}{e} \left(\frac{\vec{j}}{C_p} \cdot \vec{\nabla} h \right)$$

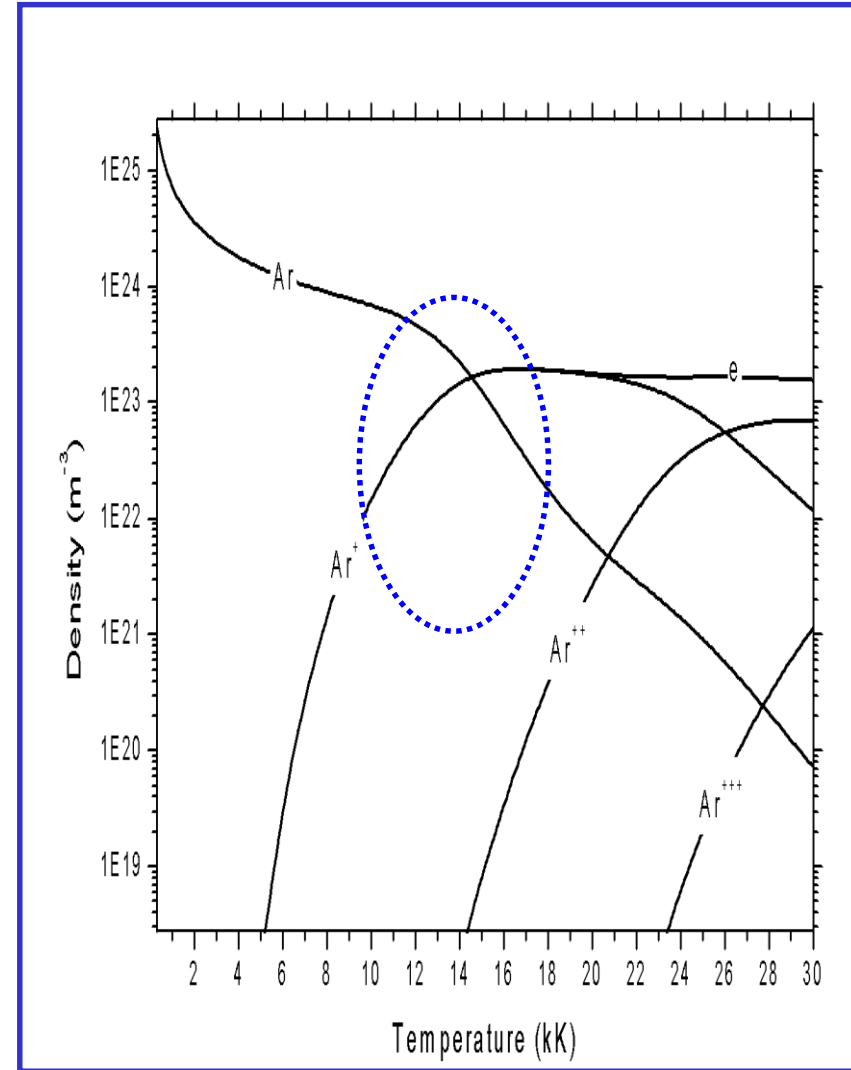
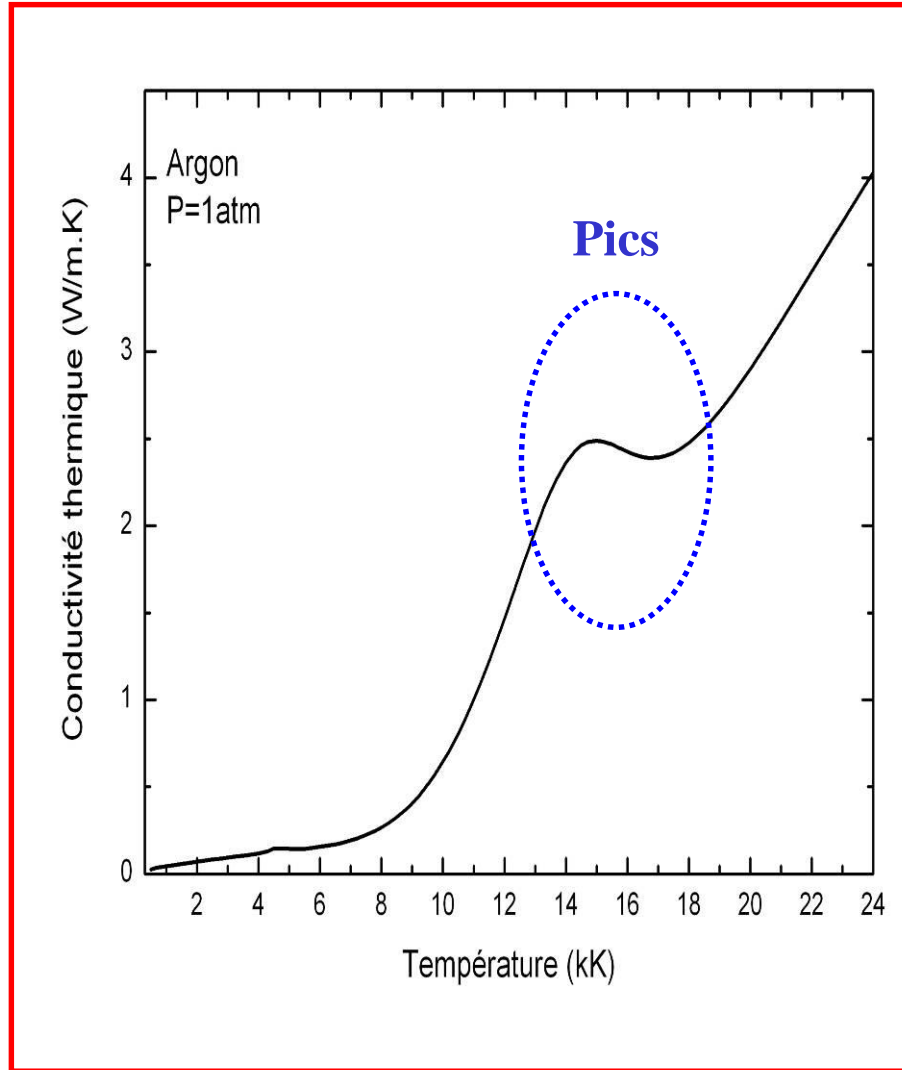
Colonne : interactions collisionnelles ?

- Traitement des collisions et de la chimie dans le plasma thermique



Exemple de propriété : conductivité thermique

- Traitement des collisions et de la chimie dans le plasma thermique



Rayonnement

Pour le rayonnement, il faudrait résoudre l'équation du transfert radiatif pour toutes les fréquences et chacun des points de l'espace

$$\nabla I_\nu(r, \vec{s}) \vec{s} + k_\nu(r) I_\nu(r, \vec{s}) = k_\nu(r) I_b(r) + \frac{\sigma_s(r)}{4\pi} \int_{4\pi} I_\nu(r, \vec{s}') \Phi_\nu(\vec{s}', \vec{s}) d\Omega'$$

| | |
|---------------------|----------------------|
| $I_\nu(r, \vec{s})$ | Luminance radiative |
| $I_b(r, \vec{s})$ | Luminance Corps noir |
| $k_\nu(r)$ | Coeff absorption |

Quelles quantités sont utiles??

- Le Flux radiatif $\vec{q}_\nu = \int_{4\pi} I_\nu(r, \vec{s}) \cdot \vec{s} \cdot d\Omega$
- La divergence du flux radiatif $\vec{\nabla} \cdot \vec{q}_\nu$

Dépendance spectrale (k(r)) et spatiale direction s....

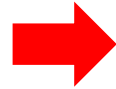
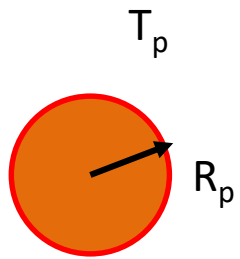
Pour le plasma il faudrait intégrer sur toutes les directions et les fréquences

Rayonnement : Coefficient d'émission nette

1^{ère} situation : on ne s'intéresse qu'à la divergence du flux et au rayonnement au centre du plasma

$$\nabla I(r, \vec{s}) \vec{s} = k(r)(I_b(r) - I(r, \vec{s}))$$

On considère une sphère de plasma de rayon R_p Isotherme et on résout l'ETR sur cette sphère

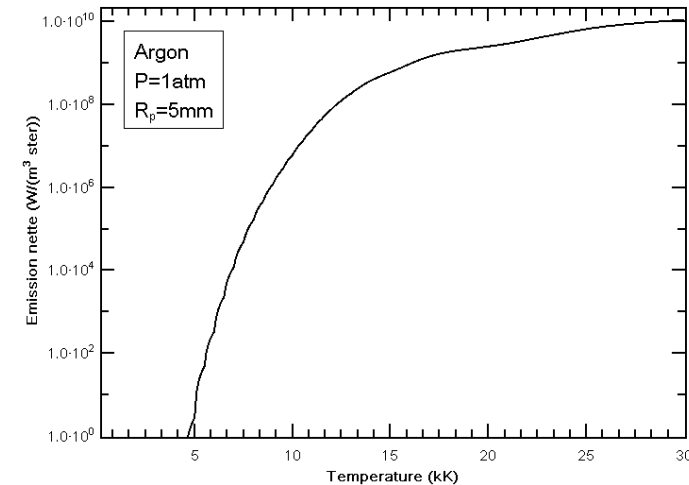


On résout l'ETR pour toutes les fréquences et on intègre.

On obtient la divergence du flux par stéradian, c'est le coefficient d'émission nette ε_n

Le terme source de l'équation de l'énergie est alors

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{q}_v = 4\pi\varepsilon_N$$



Rayonnement : autres modèles

2^{ème} situation : on s'intéresse à la divergence du flux et au flux

$$\nabla I(r, \vec{s}) \vec{s} = k(r)(I_b(r) - I(r, \vec{s}))$$

➔ **Simplification spectrale** : On calcule des coefficients moyens par bande spectrale (Compo + sections efficaces et données rayonnement) – généralement une dizaine de bandes spectrales

➔ **On doit résoudre l'ETR** ➔ Deux grandes familles de résolution utilisées

- **Discrete Ordinates Method**

permet de faire la résolution de l'ETR sur des directions

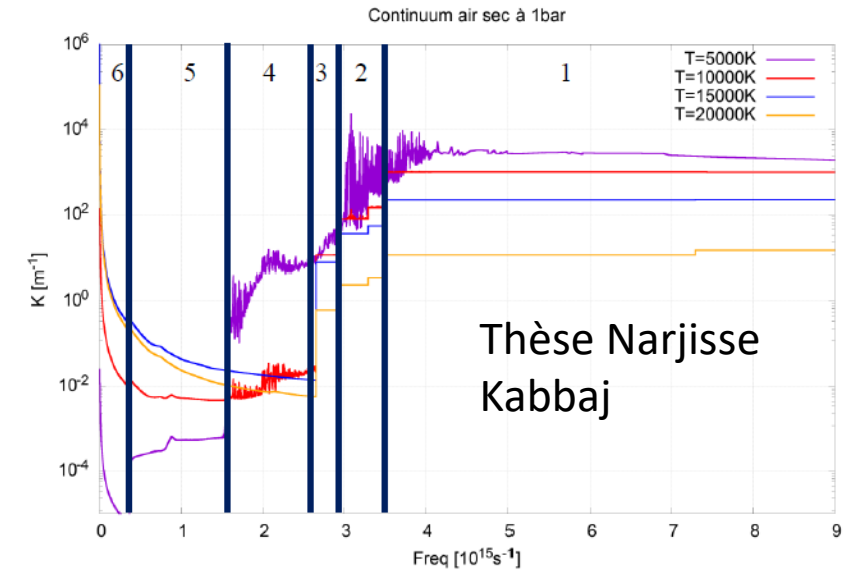
Autant d'équations que de directions et de bandes

- **P1**

Si les bandes sont épaisses, on fait l'hypothèse d'isotropie

Le principe est de développer sur des harmoniques sphériques

- On peut mixer les deux



Autant d'équations que de bandes

Colonne : interactions électromagnétiques

- Champ électrique – lois d'Ohm généralisée

$$\begin{array}{c}
 \text{Champ électrique} \quad \text{Champ électromoteur} \quad \text{Terme de Hall} \quad \text{Inertie des électrons} \\
 \swarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \\
 \vec{E} + \cancel{\vec{v}_e \wedge \vec{B}} = \frac{\vec{j}}{\sigma} - \cancel{\frac{1}{en_e} \vec{j} \wedge \vec{B}} - \cancel{\frac{1}{en_e} \vec{\nabla} P_e} + \cancel{\frac{m_e}{e^2 n_e} \frac{\partial \vec{j}}{\partial t}} \quad \rightarrow \quad \vec{E} = \frac{\vec{j}}{\sigma} \quad \left. \vphantom{\frac{\vec{j}}{\sigma}} \right\} \text{Arc principalement résistif} \\
 \text{Terme résistif} \quad \uparrow
 \end{array}$$

Prenons un plasma thermique, de rayon 3mm, I=500A

$$|\vec{j}| \sim 2 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$$

$$n_e \sim 10^{23} \text{ part/m}^3$$

$$\sigma \sim 10^4 \text{ S/m}$$

$$T \sim 10^4 \text{ K}$$

$$B_\theta(r) \sim 4 \cdot 10^{-2} \text{ T}$$

$$\vec{v}_e \wedge \vec{B} \sim 50 \text{ V/m}$$

$$\text{Terme résistif : } \frac{\vec{j}}{\sigma} \sim 2000 \text{ V/m}$$

$$\text{Terme de Hall } \frac{1}{en_e} \vec{j} \wedge \vec{B} \sim 50 \text{ V/m}$$

$$\text{Pression elec } \vec{\nabla} P_e \rightarrow \text{peu de variation suivant } z$$

$$\text{Inertie } \frac{m_e}{e^2 n_e} \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} = 3.5 \cdot 10^{-16} \frac{\partial \vec{j}}{\partial t}$$

$$\text{Négligeable si } < 10\% \text{ de résistif } \quad \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} < 5 \cdot 10^{17} \text{ A/sm}^2$$

Colonne : Simplification des Equations de Maxwell

- Equations de Maxwell

Ampère



$$\vec{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{j}$$

Faraday



$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{rot}(\vec{E}) = 0$$

Ohm



$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

Conservation



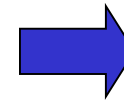
$$\text{div}(\vec{J}) = \frac{\rho_e}{\epsilon_0} = 0$$

Pas de monopole magnétique



$$\text{div}(\vec{B}) = 0$$

Avec σ la conductivité électrique et V le potentiel électrique



$$\sigma(T, P)$$

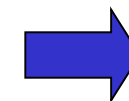
$$\text{div}(\sigma \cdot \vec{grad}(V)) = 0$$

Données sorties :

$$\vec{j} = \cancel{\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}} - \sigma \cdot \vec{grad}(V)$$

$$\vec{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{j}$$

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A})$$



$$\Delta \vec{A} = -\mu_0 \vec{j}$$

Données sorties :

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A})$$

Colonne : Les difficultés de modélisation (1)

- Le couplage Electro - thermique

Conservation énergie :
$$S = \frac{\vec{j}^2}{\sigma(T, P)} - \text{div}(\vec{F}_{rad}) + \frac{5}{2} \frac{k}{e} \left(\frac{\vec{j}}{C_p} \cdot \vec{\nabla} h \right)$$

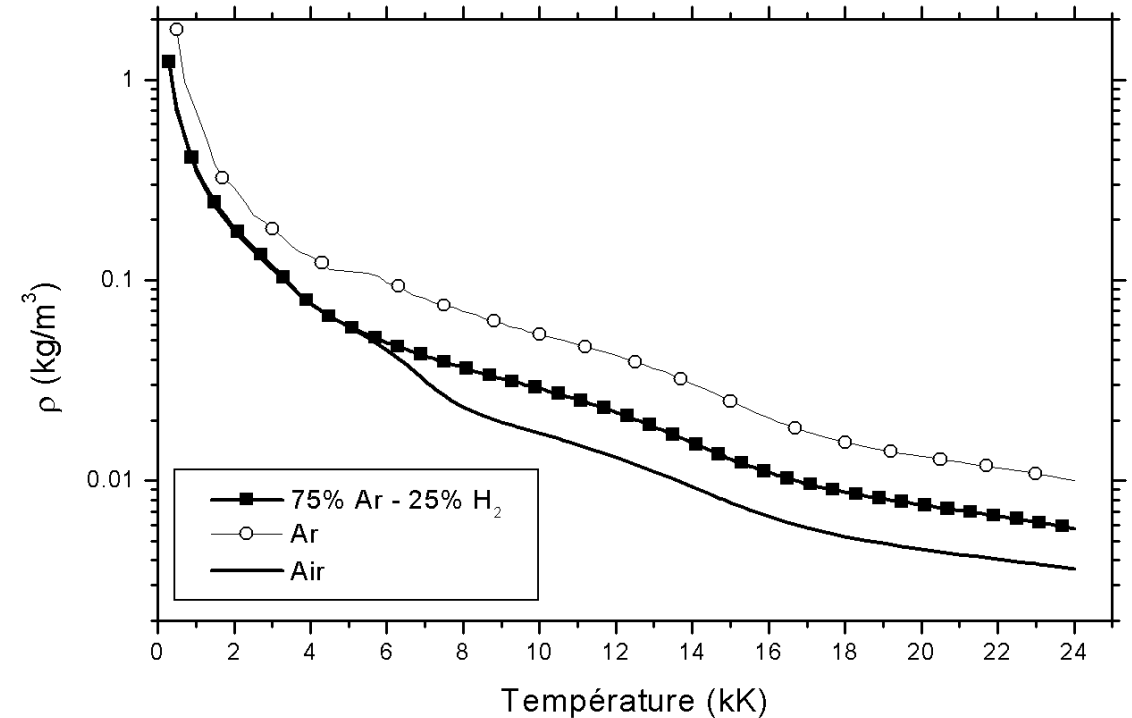
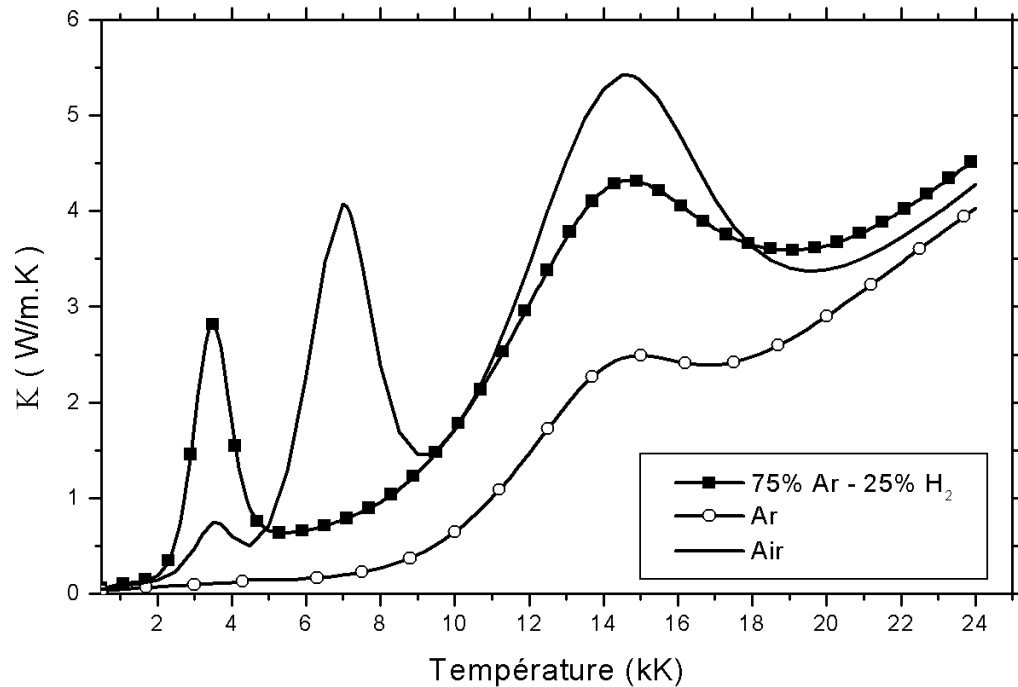
Potentiel électrique
$$\text{div}(\sigma(T, P) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(V)) = 0 \quad \vec{j} = -\sigma \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(V)$$

Difficulté  $T \searrow \rightarrow \sigma \searrow \rightarrow V \nearrow \rightarrow \vec{j} \nearrow \rightarrow S \nearrow \rightarrow T \nearrow$  Peut conduire à Divergence du code

- Nécessité d'une résolution équation après équation avec **relaxation** (on laisse varier plus rapidement le potentiel que la température et les vitesses)
- Utilisation préférentielle de méthodes « **segregated** »

Colonne : Les difficultés de modélisation (2)

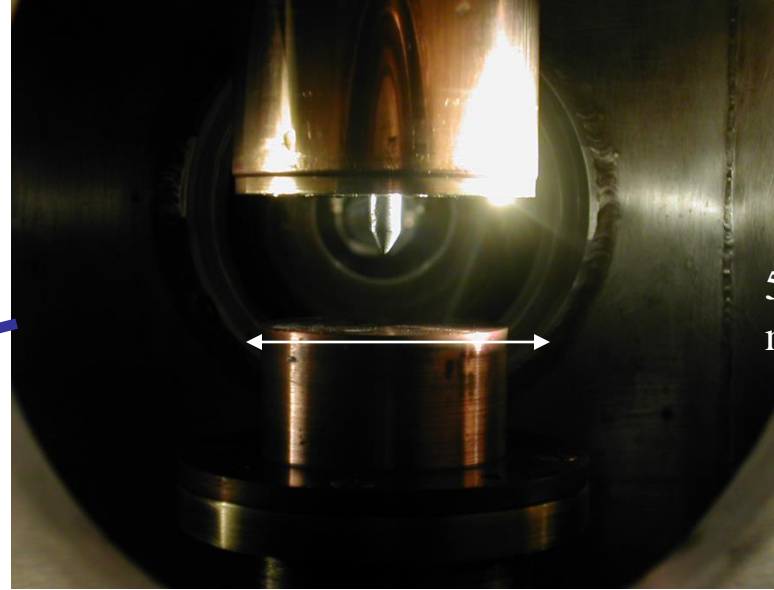
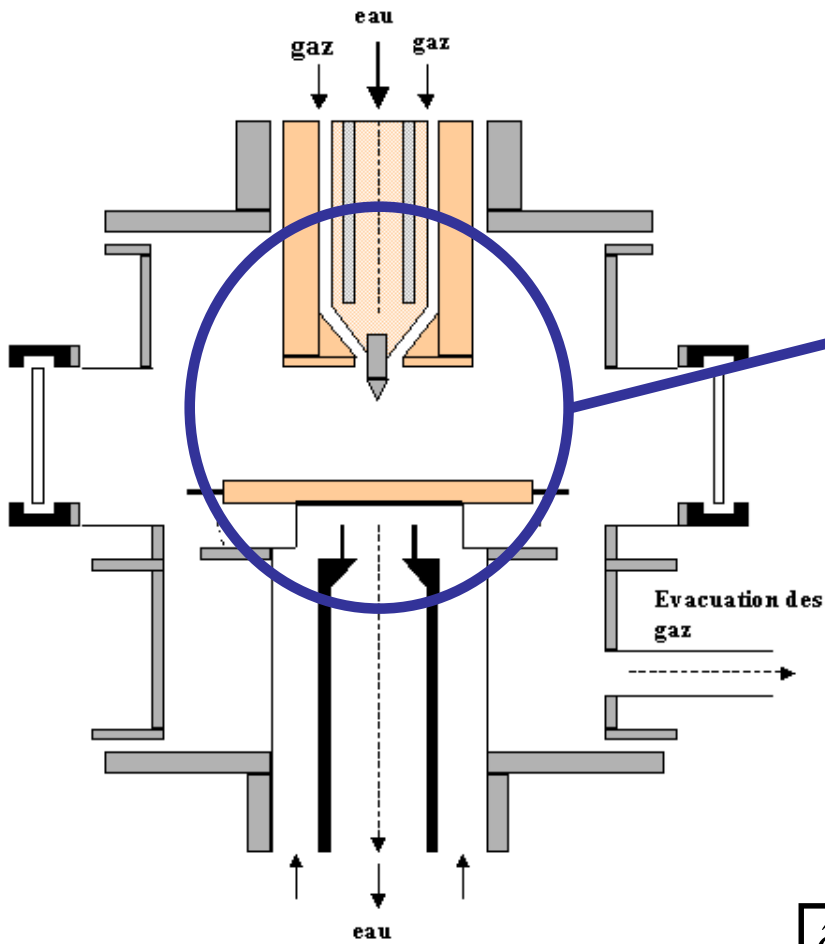
- La variation des coefficients de transport et de la densité de masse



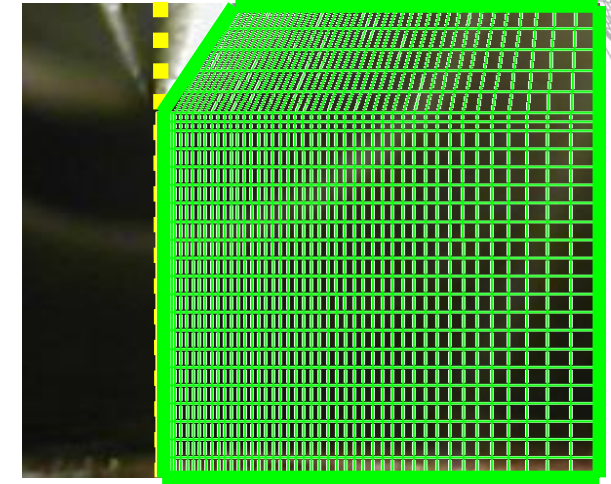
La méthode de résolution doit être capable « d'encaisser » :

- Les fortes variations des propriétés de transport -> volumes fins avec schéma pour les coefficients
- La forte dilatabilité

Colonne : Résolution CFD des équations



On réduit l'espace que l'on veut modéliser



- Maillage + linéarisation des équations
- 1D/2D/3D
- Méthodes de résolutions FVM-FEM-FDM

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{v}\phi) = \text{div}(\Gamma_\phi \overrightarrow{\text{grad}}(\phi)) + S_\phi$$

Les méthodes de résolution et les écueils

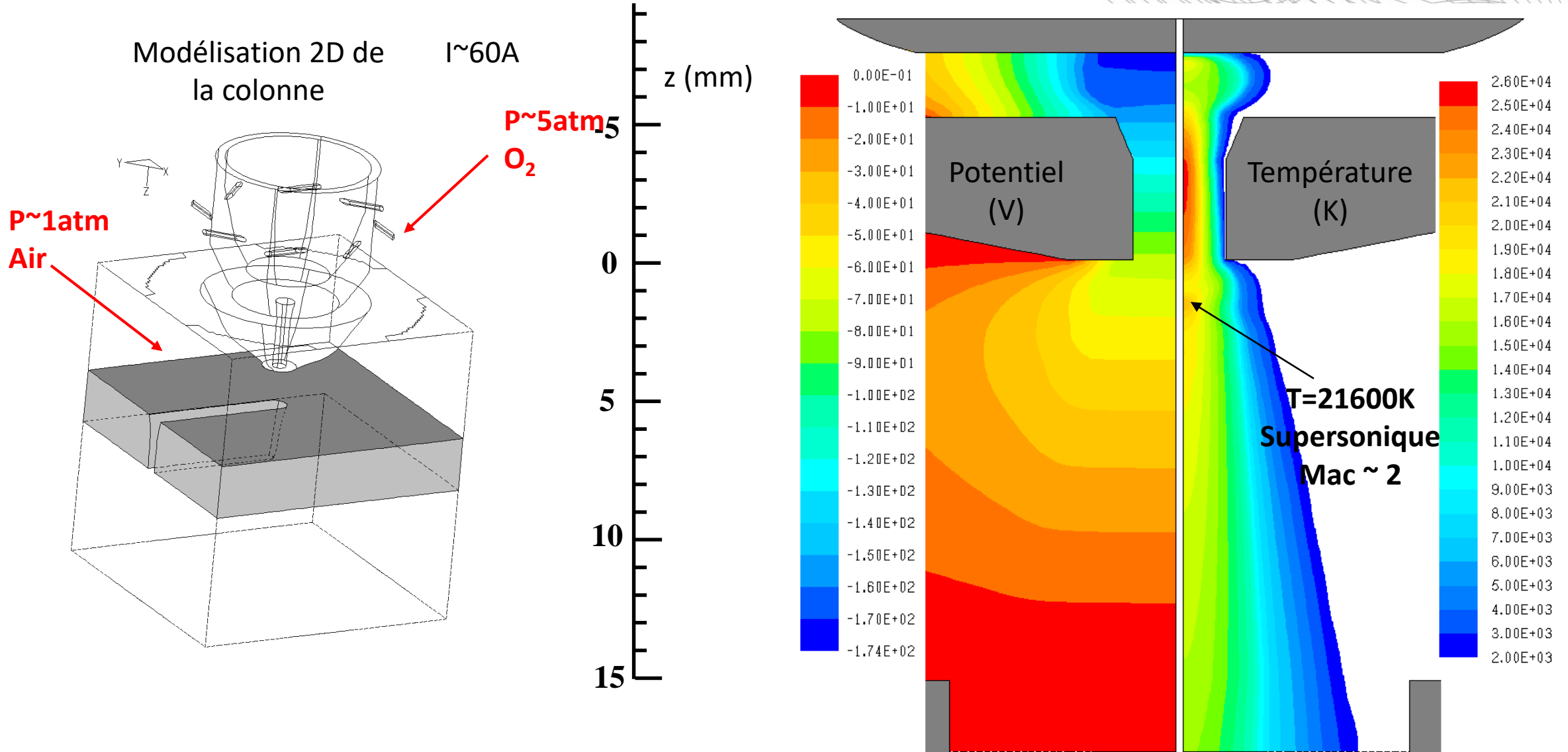
- La méthode Volume Finis

- **Pourquoi ?** conservative, basée sur la conservation des flux
- **Permet** la capture du supersonique (moyennant les bon schémas numériques)
- **Coupled/segregated ?** \Rightarrow Problématique du couplage électro-thermique
- **Outil classique** : Ansys Fluent (boire noire fluide VF + UDF) , Open Foam (Open Source), Saturne (Open Source), Code maison

- La méthode éléments finis

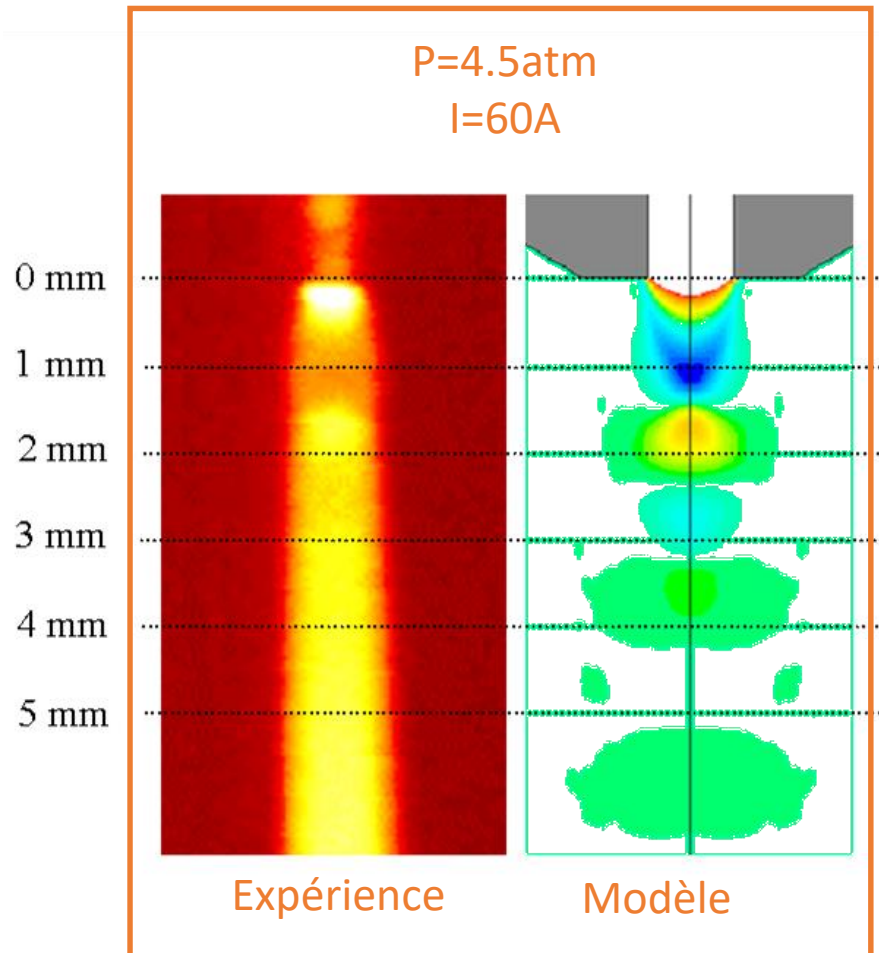
- **Pourquoi plutôt non** \Rightarrow non conservative « naturellement »
- **Ne permet** pas vraiment le supersonique
- **Outil classique** : COMSOL

Exemple de résultat : configuration de découpe



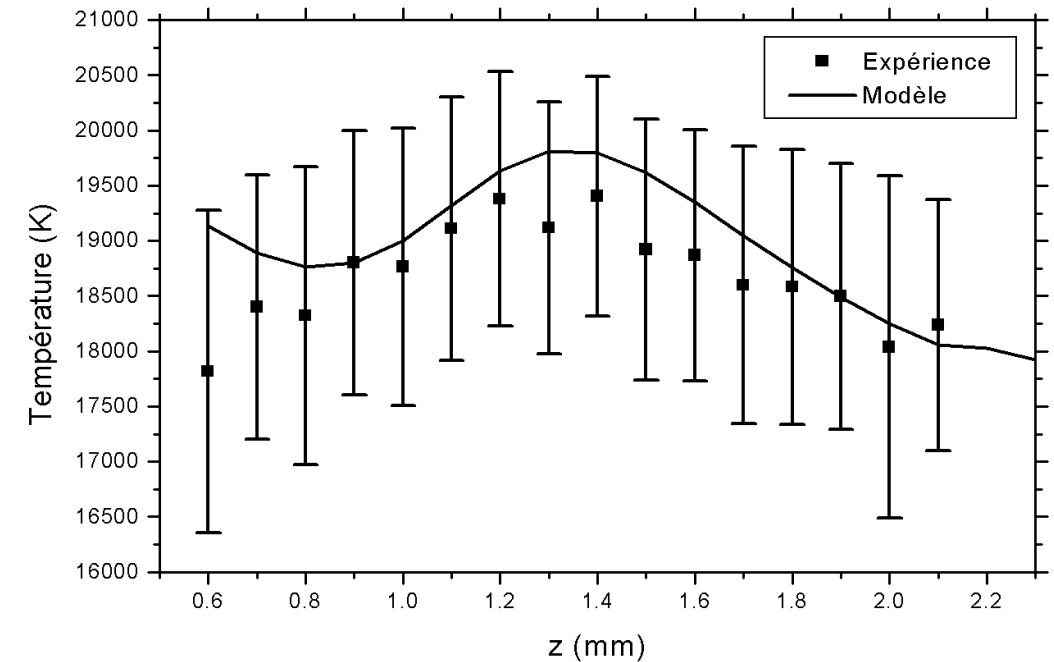
Découpe/colonne: Quelle validation expérimentale?

- Valiation par imagerie



- Validation par spectro atomique

- Mesure d'intensité absolue ou relative + ETL



Quelques challenges à venir

• Taille des maillages et de la complexité :

- Avec l'augmentation de la puissance des ordinateurs, les maillages deviennent 3D de plusieurs millions de cellules
- Configurations de plus en plus réalistes avec mouvement de pièces, déformation, mouvement d'arc
- Il faut trouver des méthodes bien parallélisée, des architectures de serveurs de calculs adaptées

• Solveurs supersoniques :

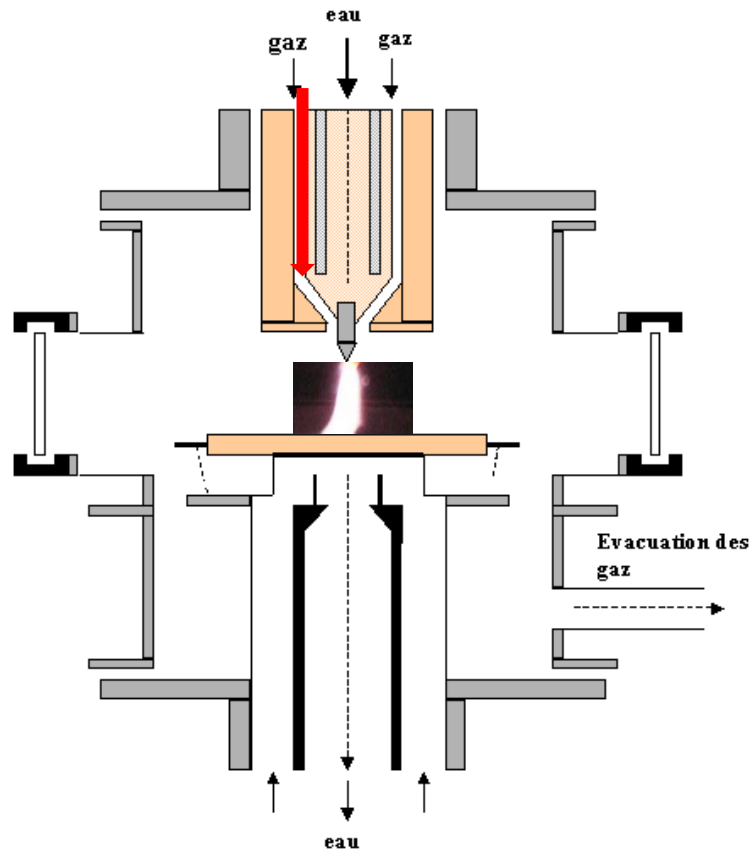
- Des applications fortement supersonique commencent à apparaitre (nouvelle découpe par exemple avec Mach 5-6)
- De nouvelles méthodes doivent être adaptées aux plasmas thermiques comme par exemple des méthodes explicite et des solveurs de Riemann HLLC – (Harten Lax van Leer Contact) qui contiennent des schémas pour capturer naturellement et proprement les aspects supersoniques

• Description fine des couches limites, turbulence – phases solides?

- Proche des parois le gradient de densité entre le plasma tiède et les parois froides est très important. Peu de travaux portent sur cet aspect pourtant primordial
- Les plasmas sont-ils turbulents? – difficulté à calculer un Reynolds avec des propriétés qui varient – parfois il y a confusion de la turbulence et des fluctuations
- Prise en compte de phases solides par exemple carbonnées.

Ingrédients pour la cathode

Les interactions: La cathode



- Formalisme pour l'interaction plasma/cathode

- Equations de conservations de flux de particules aux interfaces (gaine-prégaine)
- Description de l'émission des électrons
- Modèle électrique (Lindmayer/Lowke)

- Interactions plasma/cathode

- Couplage thermique?
- Couplage Électrique, passage du courant?

- Interactions électromagnétiques

- Couplage électrique
- Champ magnétique créé par la cathode

Cathode : Formalisme hors équilibre

• Approche flux (travaux Benilov)

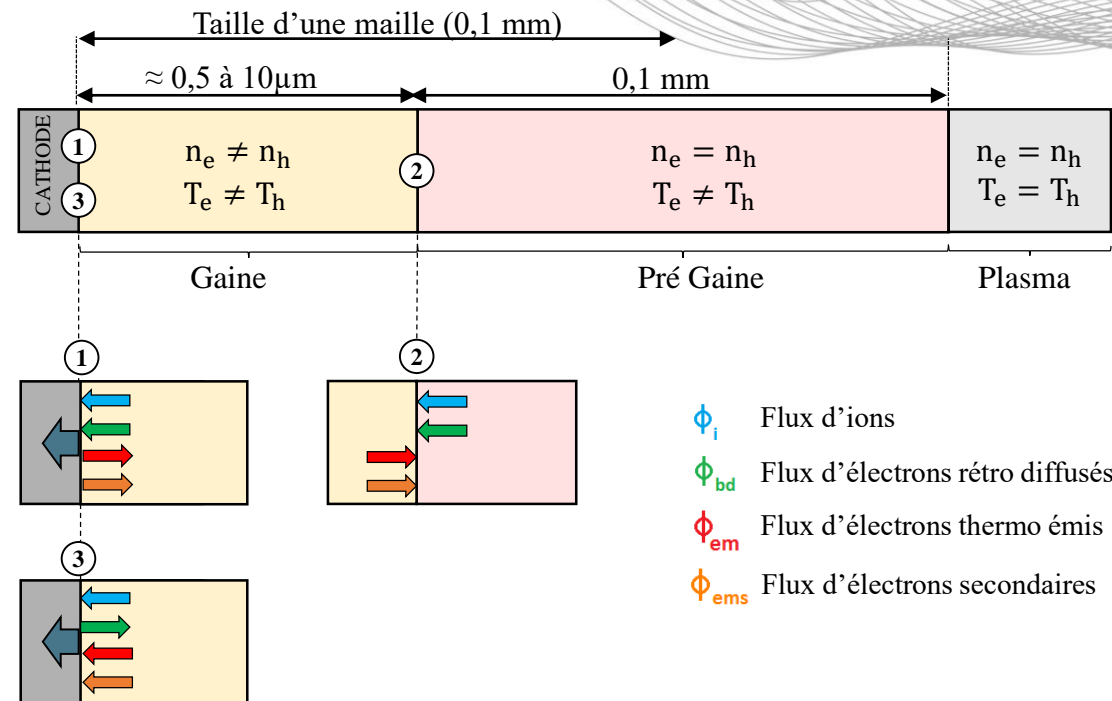
CATHODE

- Emet des électrons
- Non-ETL
- Modèle à 2T
- Calcul de composition à 2T

① Balance d'énergie à l'interface cathode/gaine

② Balance d'énergie à l'interface gaine/pré-gaine

③ Conservation de la densité de courant



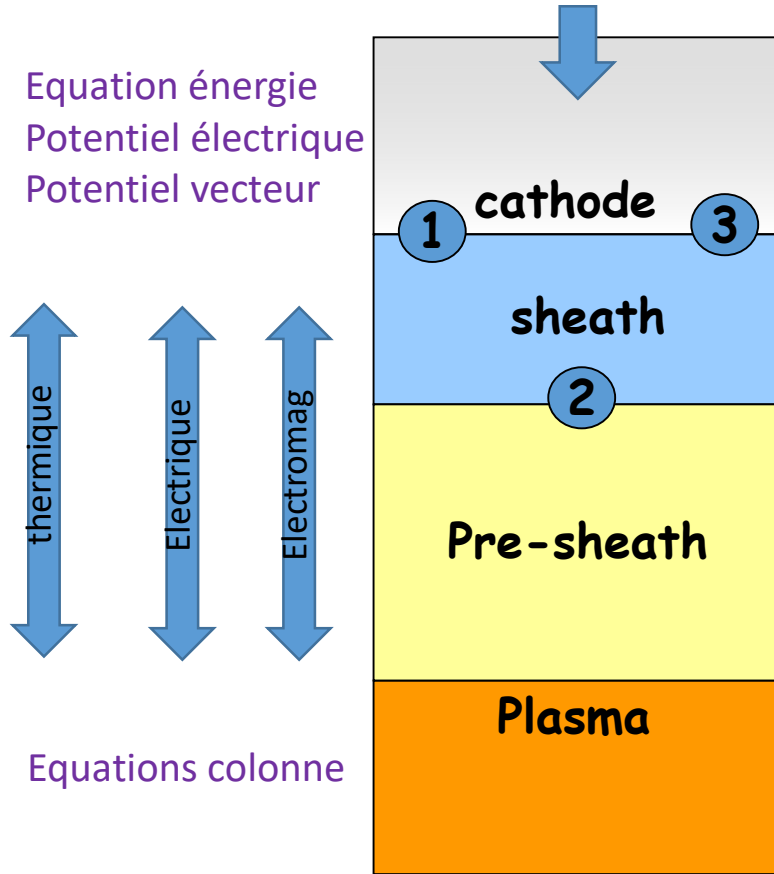
+ couplage thermique, couplage électrique

[1] Benilov M. S. and Naidis G. V., Ionization layer at the edge of a fully ionized plasma, *Phys. Rev. E, Stat. Phys. Plasma Fluids Relat. Interdiscip. Top.*, 1998

• Approche « Electrique » : Lindmayer/Lowke

Cathode : interactions plasmas/cathode

Courant



- Equation énergie
- Potentiel électrique
- Potentiel vecteur

- Equations colonne

Continuité électrique
entre électrode et
plasma

1 Balance d'énergie à la surface de la cathode

Un flux d'énergie est appliqué à la surface de la cathode au travers de la balance gaine/pré-gaine ce qui conduit à la température de surface (T_w)

2 Balance d'énergie gaine pré-gaine

3 Conservation de la densité de courant

Ces deux équations permettent d'obtenir T_e et U_s

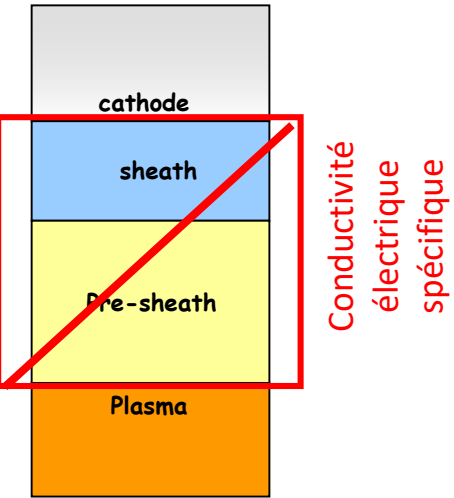
Conductivité
électrique de la pré-
gaine à 2T

Flux vers la cathode

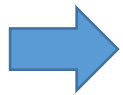
Cathode : Approche électrique

• Approche Lowke/Lindmayer

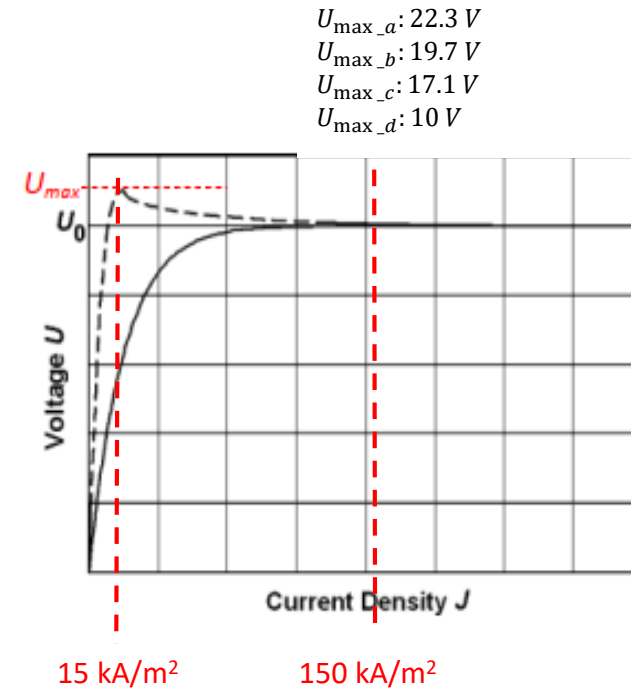
- Il s'agit de voir la gaine/prégaine comme une zone de conductivité thermique particulière – sans bilan d'énergie
- Très utilisé dans la modélisation des disjoncteurs basse tension



- Relation $U(J)$ dans la gaine
- Prise en compte des chutes de tension
- Description du passage du courant
- Pas de bilan d'énergie spécifique aux gaines



Pas de bilan d'énergie en général dans ce type de modèle



[2] Lindmayer M, Marzahn E, Mutzke A, Ruther T & Springstubbe M, The process of arc splitting between metal plates in low voltage arc chutes, *IEEE*, 2006

Cathode : Les difficultés de modélisation

- Les couplages entre les électrodes et le fluide

- Les couplages entre la cathode et le fluide sont **complexes** à mettre en œuvre car ils nécessitent plusieurs « physiques » (hors équilibre, ETL, matériau) – Les méthodes de résolution consommatrice de temps
- Calcul de la continuité de courant peut – être délicate => nécessité de développer des schémas particuliers prenant en compte les différences de conductivité électrique

- La problématique des cathodes froides

- Le formalisme pour les cathodes chaudes est (à peu près) bien établi => Loi de Richardson
- Pour les cathodes froides la situation est moins claire=> Loi de Murphy good mais problématique de champ électrique de surface (présence d'oxydes et d'aspérités qui peuvent multiplier le champ par 100 et donc l'émission de champ
- Peu d'études sur le sujet

Cathode : Quelle validation expérimentale?

• Mesure des tensions de gaine

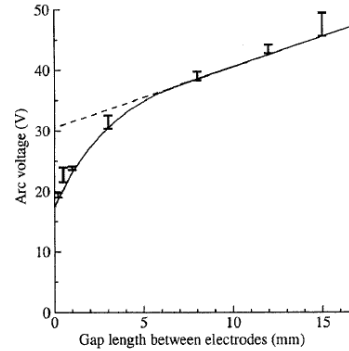
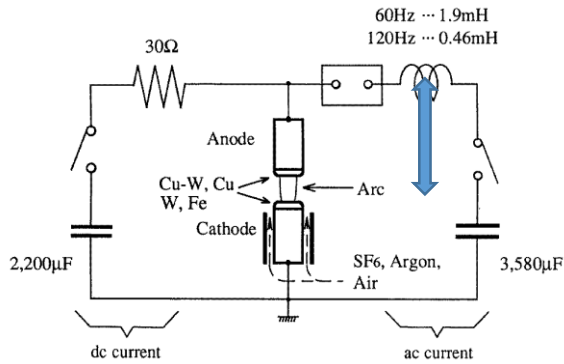


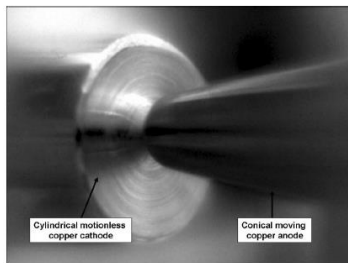
Figure 8. Arc voltage of SF₆ arc as a function of gap length between Cu-W electrodes in the range 0.2 to 15 mm for ac current with peak value of 1000 A and frequency of 60 Hz.



Pour le SF₆ Chute cathode+anode ~20V

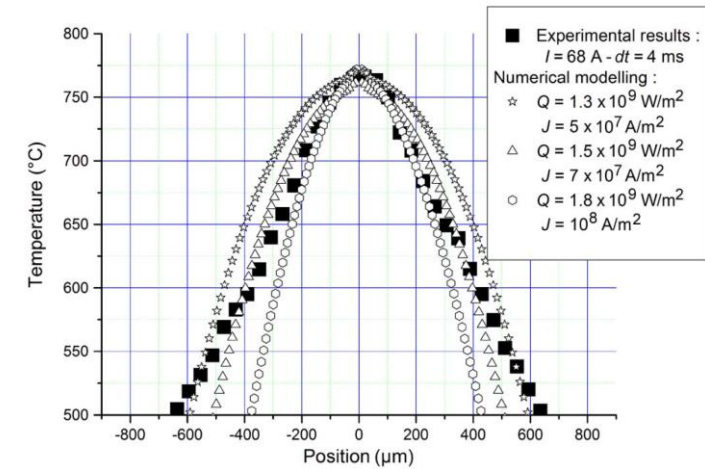
Yolomizu Y., "Total voltage drops in electrode fall regions of SF₆, argon and air arcs in current range from 10 to 20 000 A", J. Phys. D: Appl. Phys. 29 (1996) 1260–1267

• Le chauffage de l'électrode



Arc transitoire dans l'air, **70A**, pendant 3 à 4ms, puis analyse infrarouge et méthode « inverse » pour obtenir la température de surface et un ordre de grandeur du flux

T_{max} ~ 1050K
Q ~ 1 à 2 10⁹ W/m²
J ~ 5 10⁷ à 10⁸ A/m²

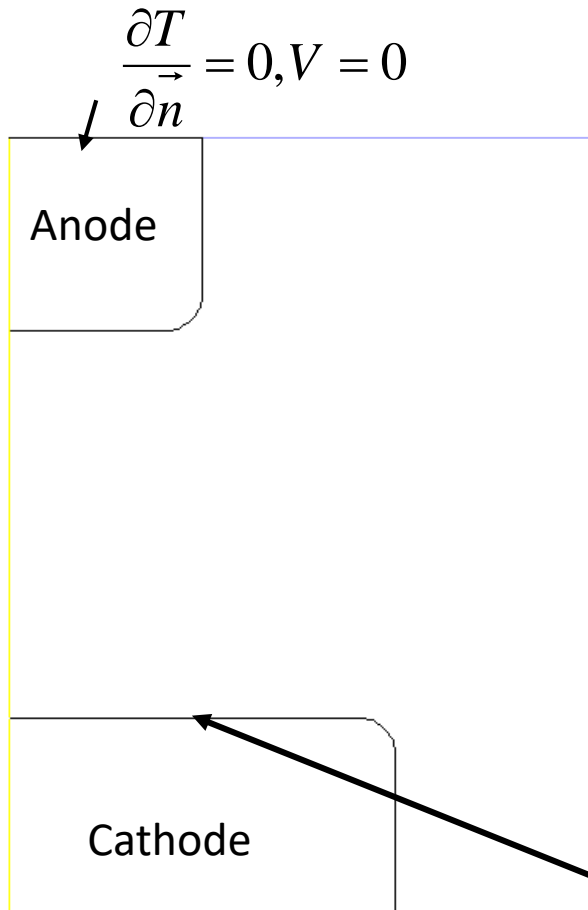


Landfried, R.; Leblanc, T.; Kirkpatrick, M. & Teste, P., "Assessment of the Power Balance at a Copper Cathode Submitted to an Electric Arc by Surface Temperature Measurements and Numerical Modelling"

IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, IEEE-INST ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERS INC, 2012, 40, 1205-1216

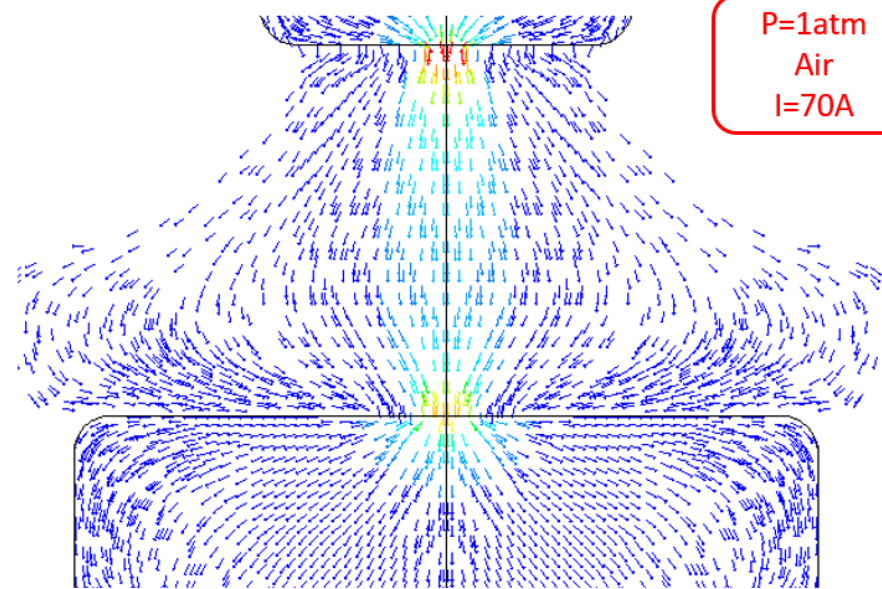
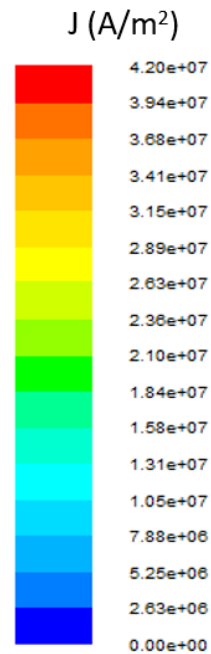


Exemple de résultat Cathode froide



$T = 300K,$
 $P = 1atm$
Biot & Sa var t

Murphy good



P=1atm
 Air
 I=70A

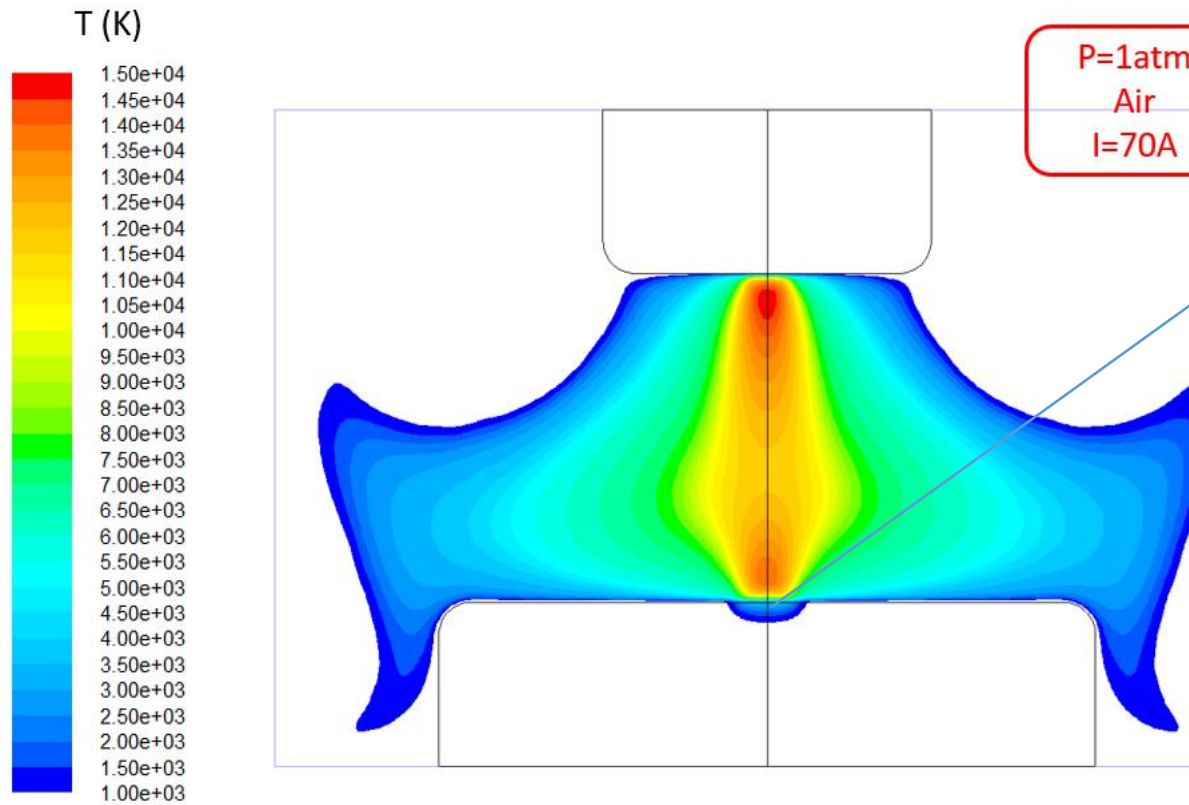
Accrochage

$$j_{em}(T_w, E_w, \phi) = e \int_{-\infty}^{+\infty} N(T_w, W, \phi) \cdot D(E_w, W) \cdot dW$$

Thermo ionique + Effet de champ

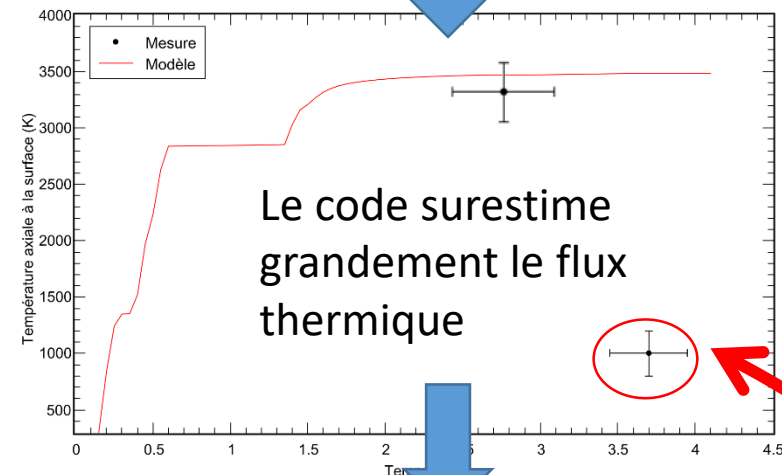
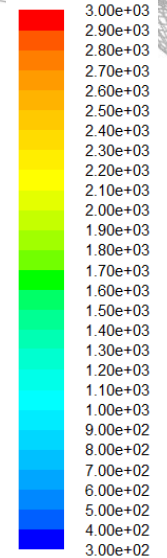
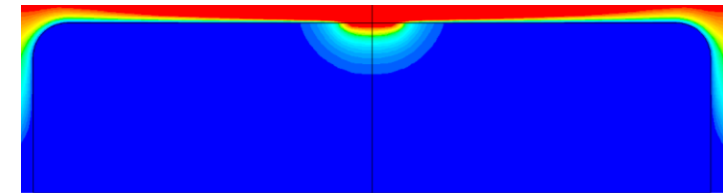
T_w : Température cathode
 E_w : Champ électrique
 W : Travail de sortie

Résultat Cathode froide - Validation



P=1atm
Air
I=70A

Températures très élevées > 3kK



Le code surestime grandement le flux thermique

Adaptation du champ électrique
Au travers d'un coefficient



Cathode : Les challenges à venir

- **Bonne description des cathodes froides**

- Quel champ électrique? Quel Formalisme?
- Décrire l'usure des électrodes
- Les phases liquides

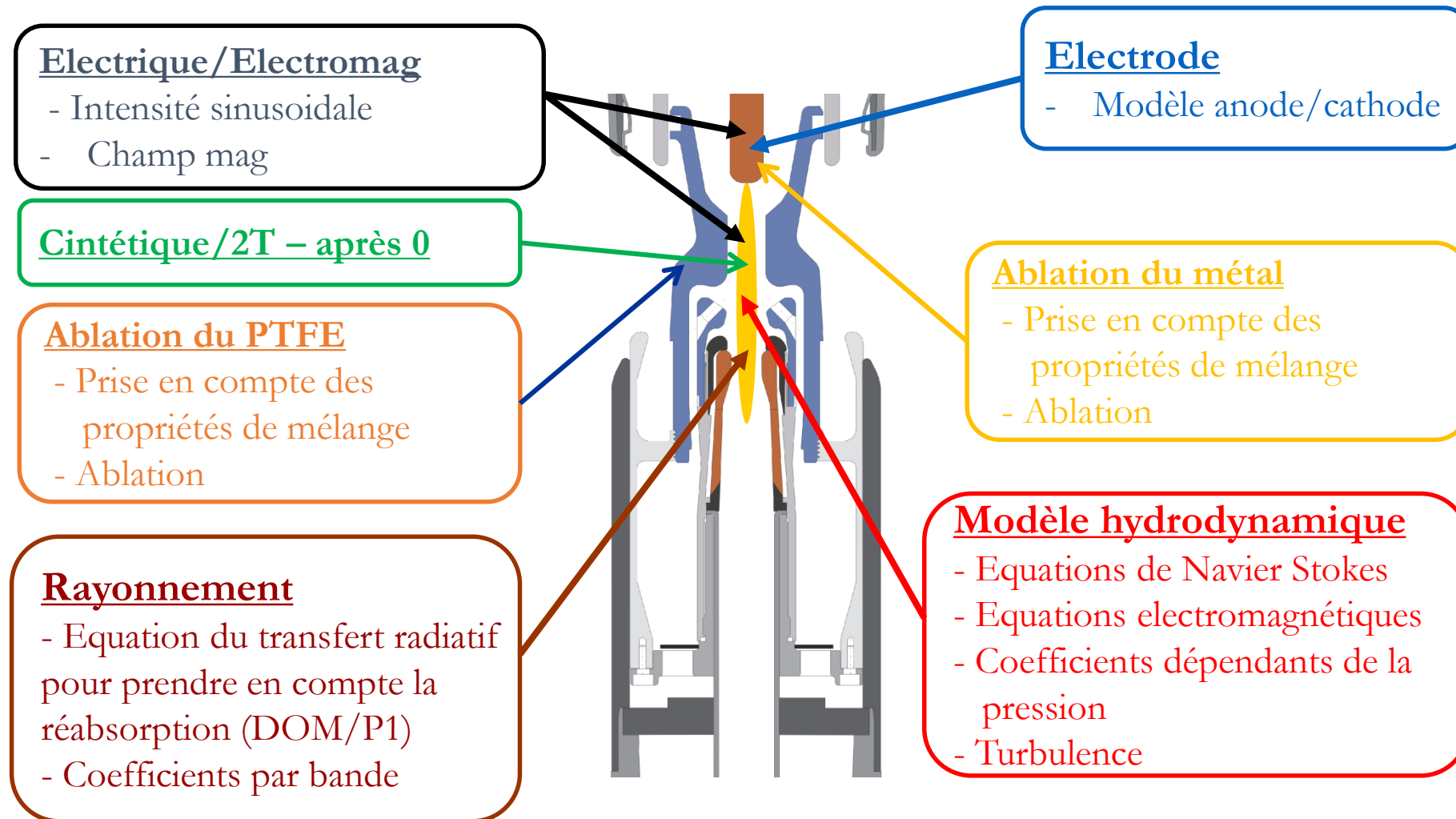
- **Possibilité de prendre en compte plus finement les déséquilibres et les détériorations**

- Ablation? Quels modèles?
- Description plus fines... Monte Carlo?

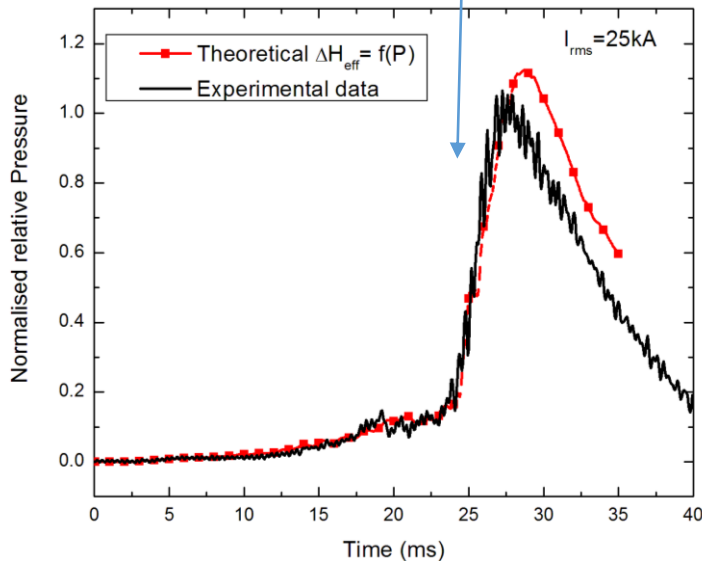
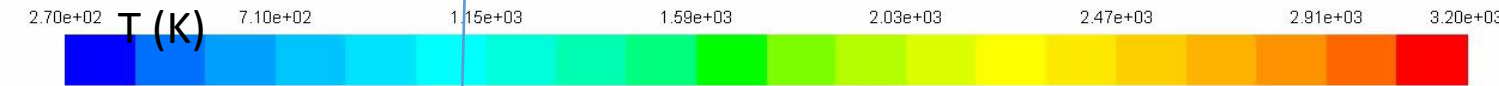
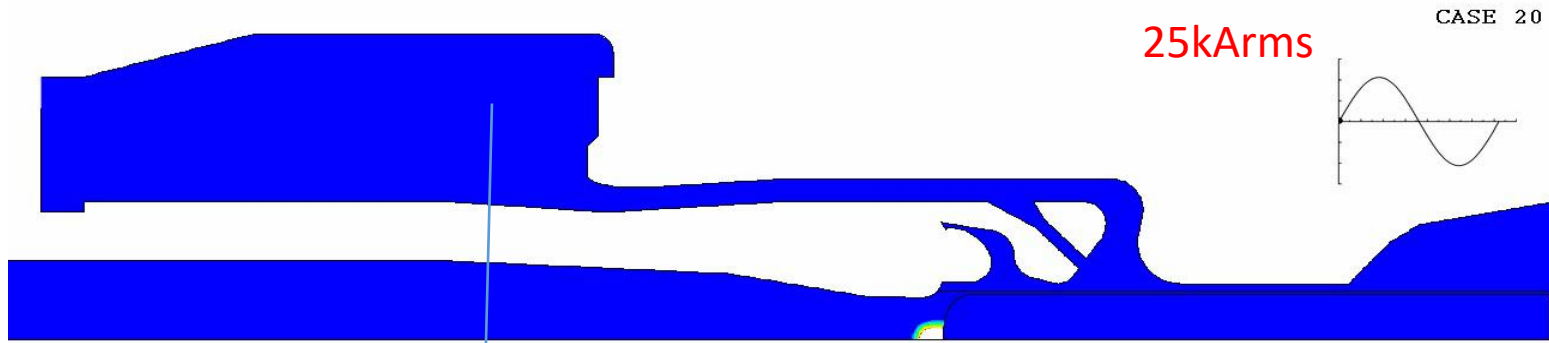
- **Le couplage « complet » avec le plasma et dans des configurations 3D**

- En 3D peu d'études complètes existent
- Modèle complet avec mouvement du pied d'arc?

Exemple complet d'un modèle avec beaucoup de phénomènes – Disjoncteur haute tension

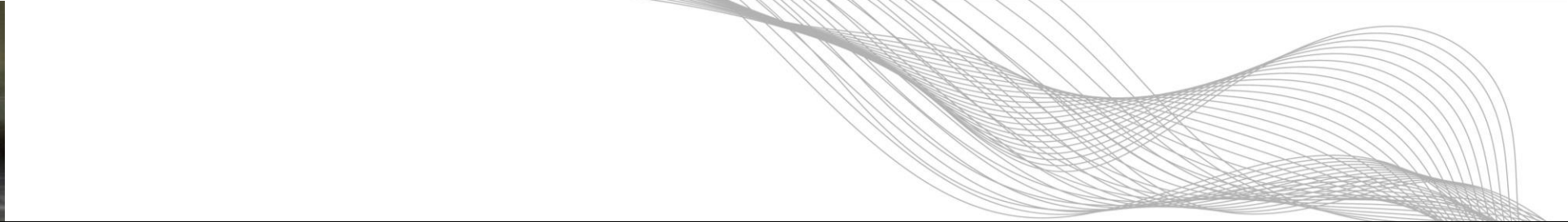
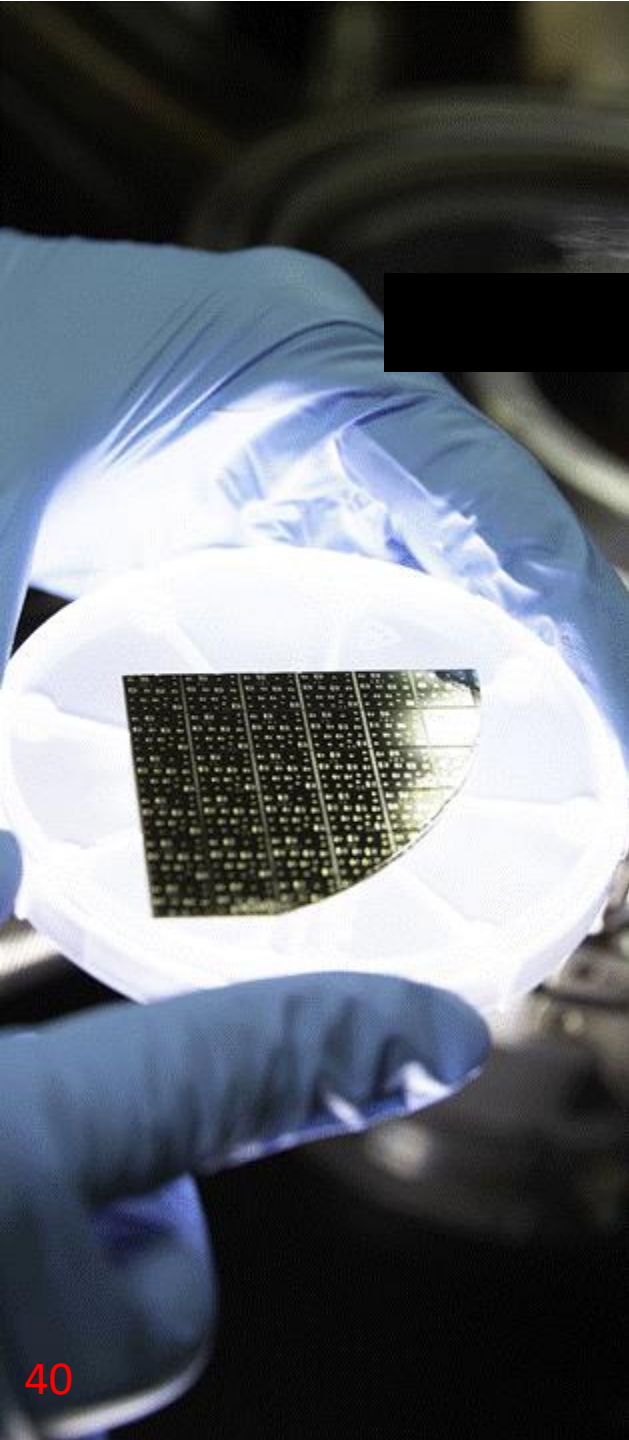


Exemple complet d'un modèle avec beaucoup de phénomènes – Disjoncteur haute tension



Mécanisme analysé

L'histoire de l'ablation des deux tuyères joue un rôle prépondérant dans l'amenée de gaz chaud dans le volume de chauffage



Conclusion

Les plasmas thermiques

- **Thématique « ancienne » mais reste beaucoup de challenges – aide précieuse et demandée par le milieu industriel**
- **Encore beaucoup de choses à comprendre/décrire**
 - Turbulence?
 - Mouvement des pieds d'arcs
 - Spark/ transition à l'arc
- **D'autres points non traités dans la présentation**
 - Les déséquilibres chimiques
 - Les déséquilibres thermiques
 - Les plasmas dans des milieux liquides
 - L'acoustique dans les plasmas thermiques
 - La problématique des reclaquages dans les torches
 - La turbulence...

<http://www.laplace.univ-tlse.fr>



TOULOUSE
INP N7



UNIVERSITÉ PAUL SABATIER
Bât. 3R3, 118 route de Narbonne
31062 Toulouse Cedex 9

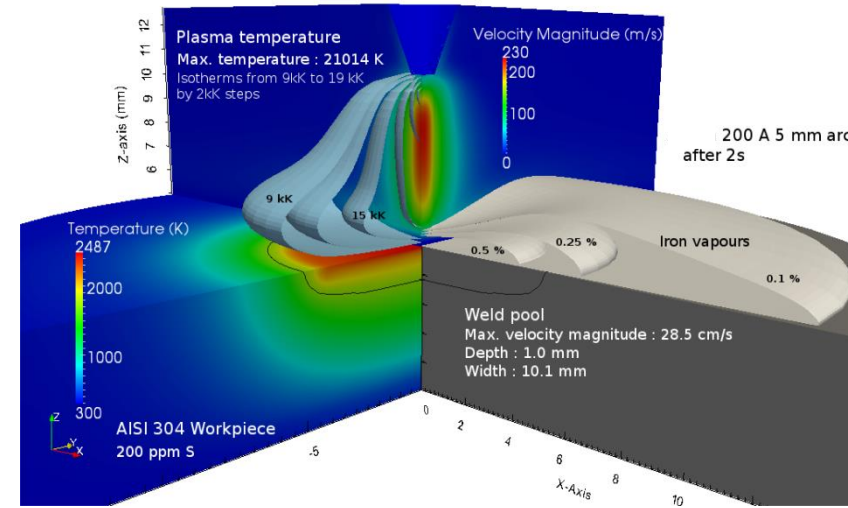
+33 (0)5 61 55 67 97
sec-ups@laplace.univ-tlse.fr

ENSEEIH
2 Rue Camichel,
31071 Toulouse Cedex 7

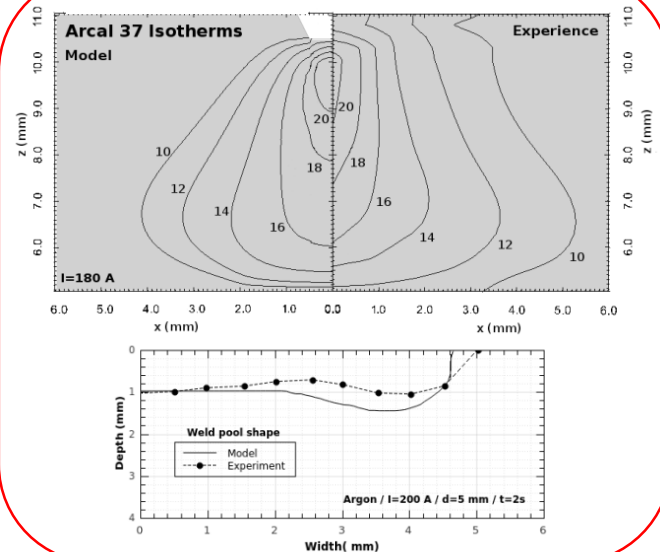
+33 (0)5 34 32 23 91
sec-n7@laplace.univ-tlse.fr



Exemple: Arc de soudure – interaction arc / anode



Validation



Compréhension

