

# Mécanismes physiques et approche numérique pour décrire la phase fort courant d'un disjoncteur haute tension : 10 ans de construction d'un modèle

GDR EMILI Octobre 2023

Pierre Freton – Jean – Jacques Gonzalez

[pierre.freton@laplace.univ-tlse.fr](mailto:pierre.freton@laplace.univ-tlse.fr)

Equipe Arc Electrique et Procédés Plasmas Thermiques

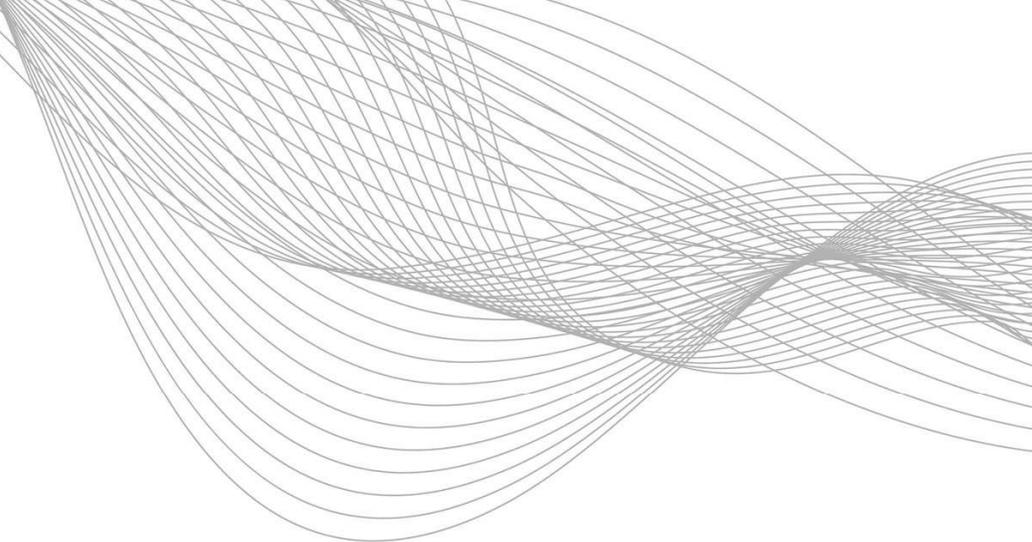


Présentation mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Merci de citer les auteurs en cas d'utilisation

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.fr>

# Sommaire



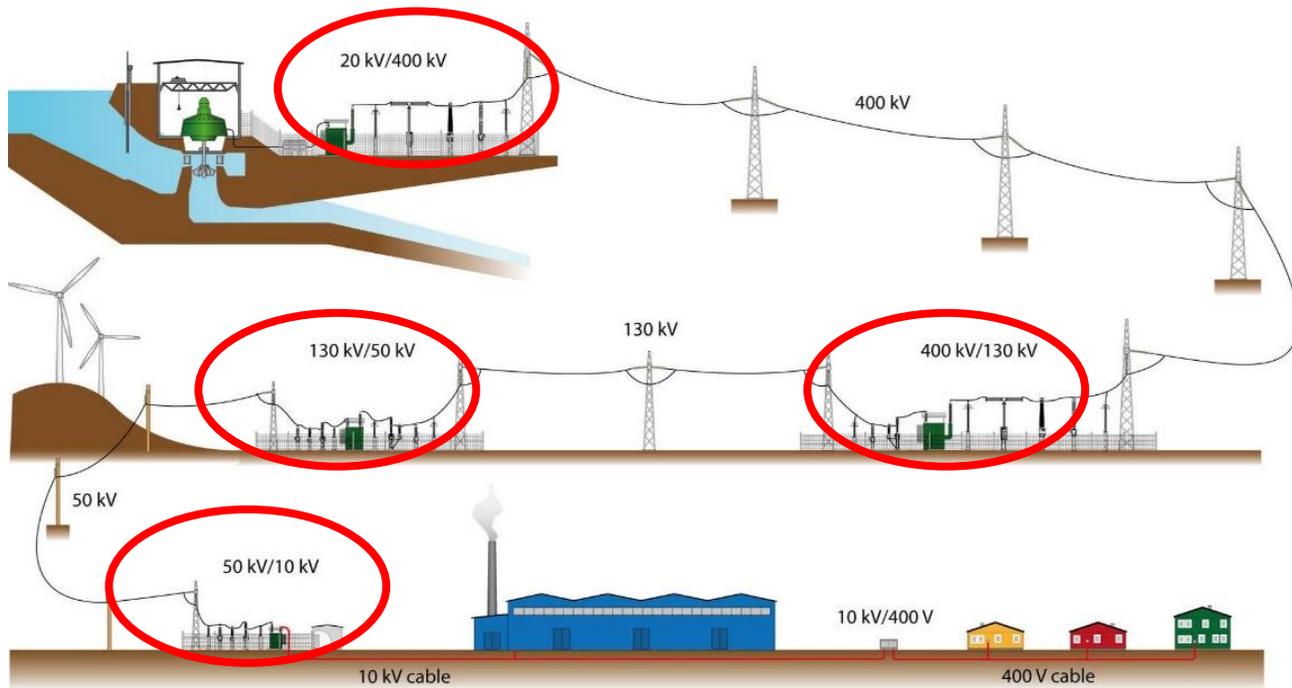
## 1. Introduction

- A. Quelques généralités sur les HVCB
- B. Comment fonctionne un HVCB à l'ouverture

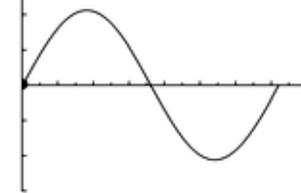
## 2. Les ingrédients d'un modèle physique pour ces dispositifs

- A. Identification des mécanismes présents dans le dispositif
- B. Démarche : à la recherche du phénomène prépondérant
  - Premier modèle, description électromagnétisme
  - Modèle plus élaboré, Ablation du PTFE
- C. Conclusion

# Le disjoncteur HT : Un élément indispensable du réseau Electrique



50Hz AC  
Voltage/current

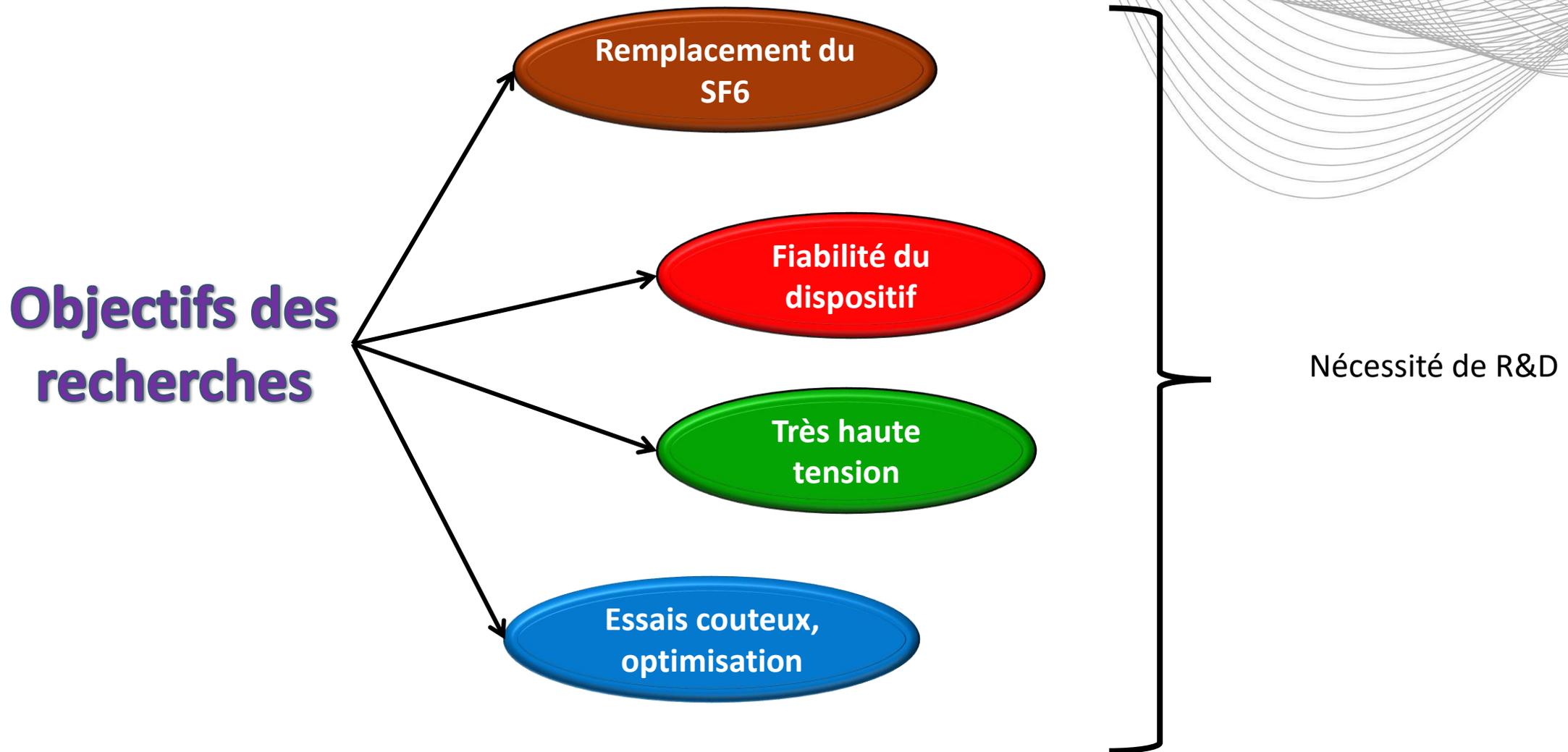


**Propriétés du disjoncteur HT**



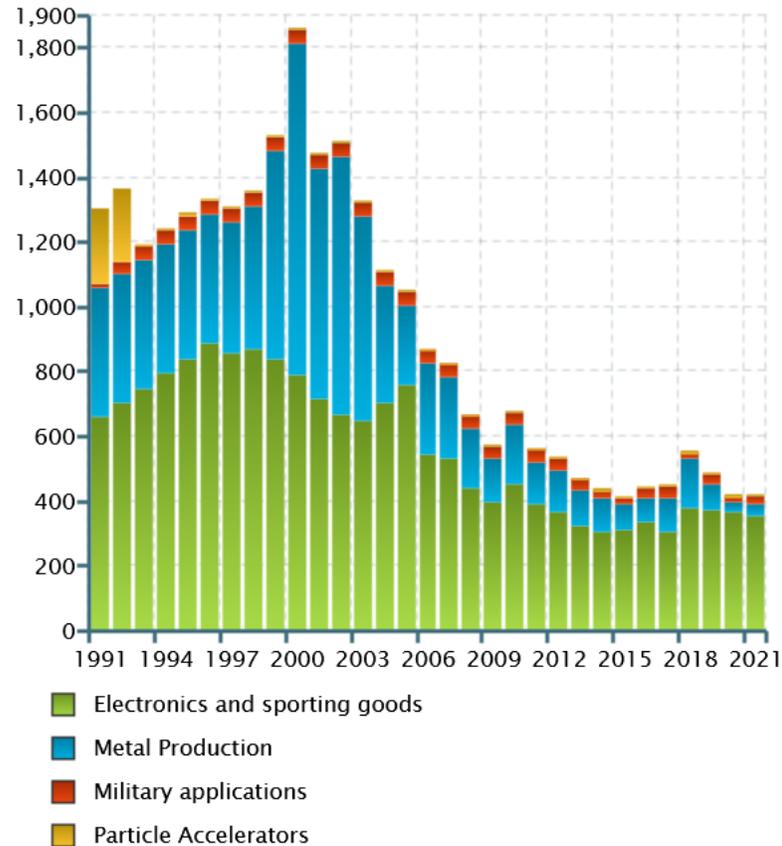
- Conduction et interruption en charge et en cours circuit (1...>100 kA)
- Tenue diélectrique à de fortes tensions (qqz 100 kV)
- Fermeture à fort(e)s courant/tensions
- Interruption fiable et sûre
- Conditions climatiques (-50°C...40°C)

# Les objectifs de recherche



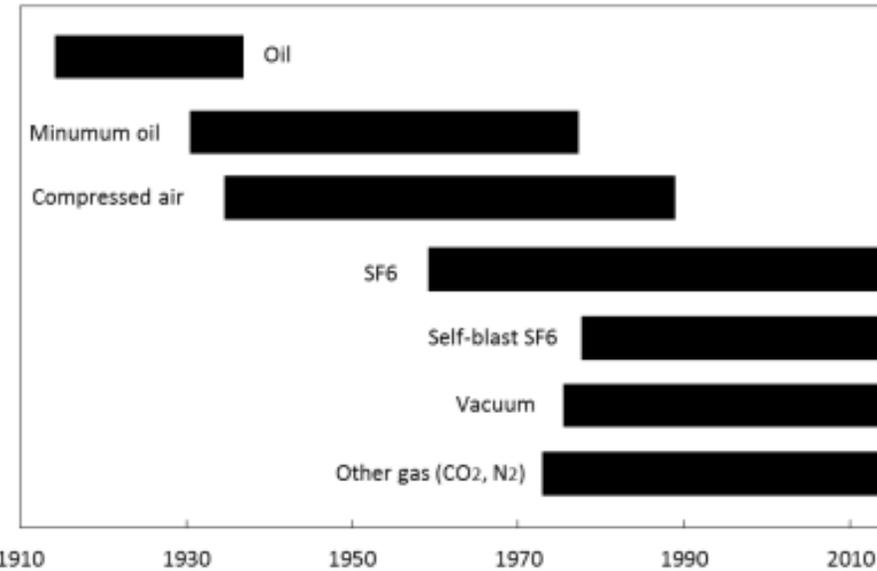
# Focus : Remplacement du SF6

Sulphur hexafluoride (kt CO2 equivalent)



[https://naei.beis.gov.uk/overview/pollutants?pollutant\\_id=SF6](https://naei.beis.gov.uk/overview/pollutants?pollutant_id=SF6)

*Proposition de l'UE : l'utilisation du gaz fluoré SF<sub>6</sub> (hexafluorure de soufre) pourrait ainsi être interdite dans les nouvelles applications jusqu'à 24 kV à partir du 1er janvier 2026, puis dans les applications jusqu'à 52 kV à partir du 1er janvier 2030.*

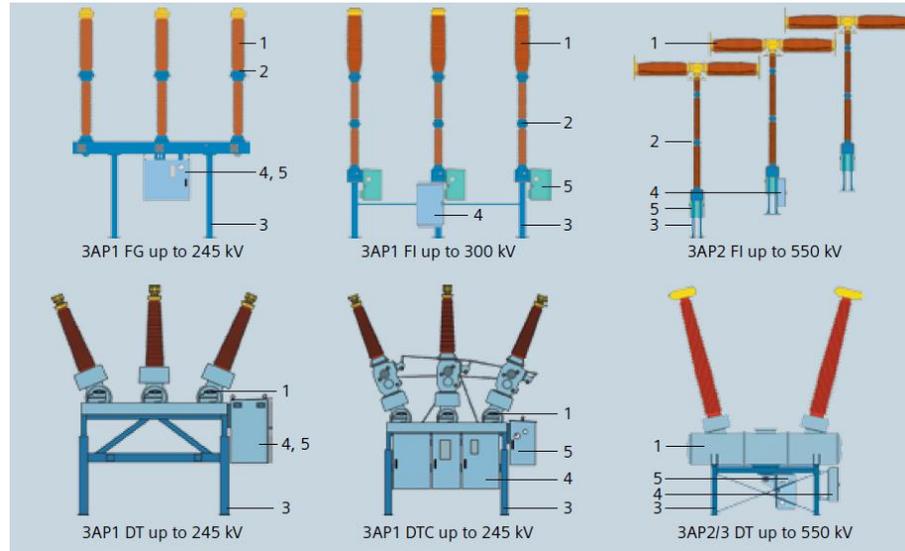


[3]

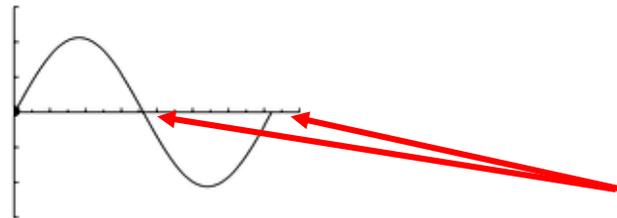
Il faut stopper son utilisation!

SF<sub>6</sub> : 22 800 fois plus puissant que le CO<sub>2</sub>  
Durée de vie atmosphérique : 3200 ans

# Le disjoncteur HT : a quoi ca ressemble??



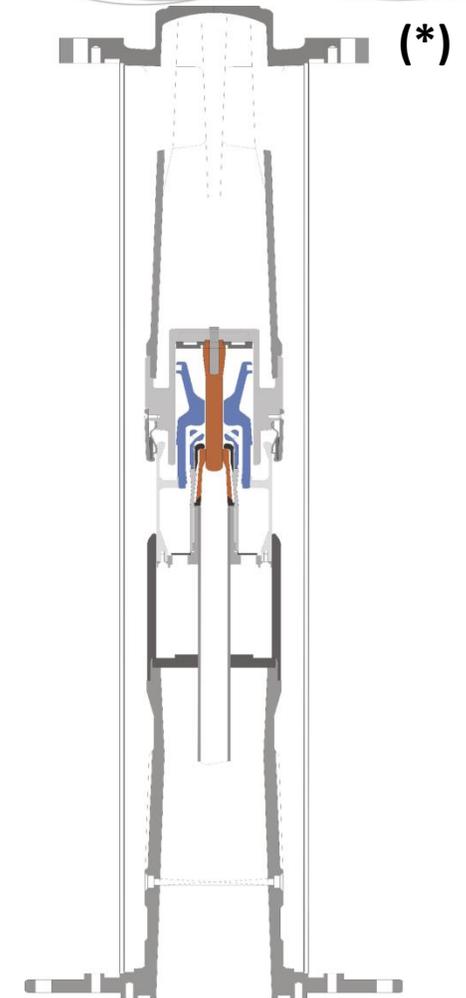
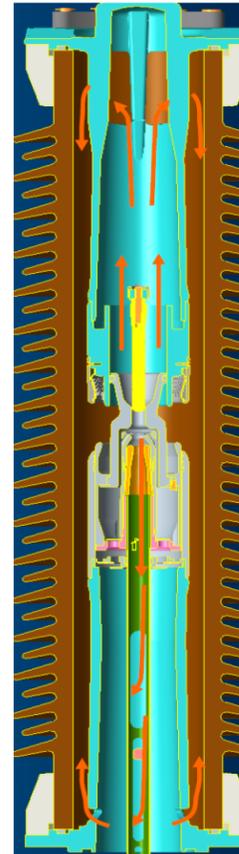
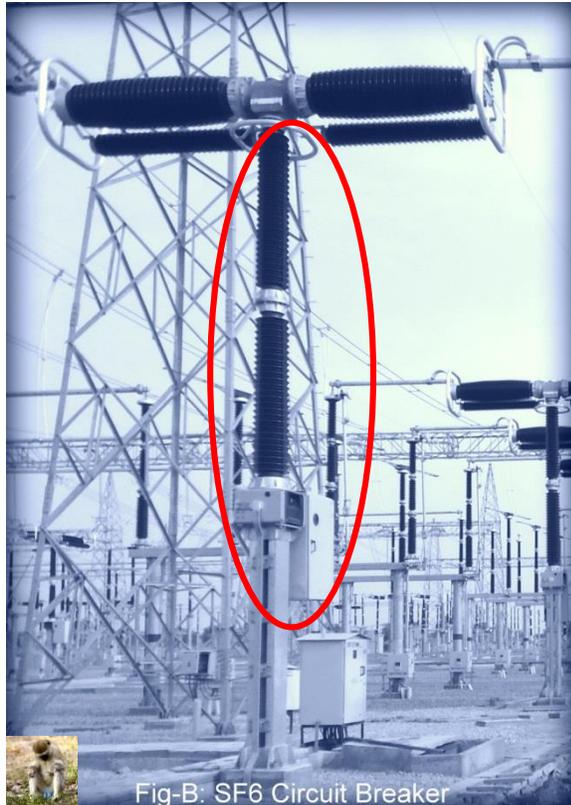
50Hz AC  
Voltage/current



**Principe**

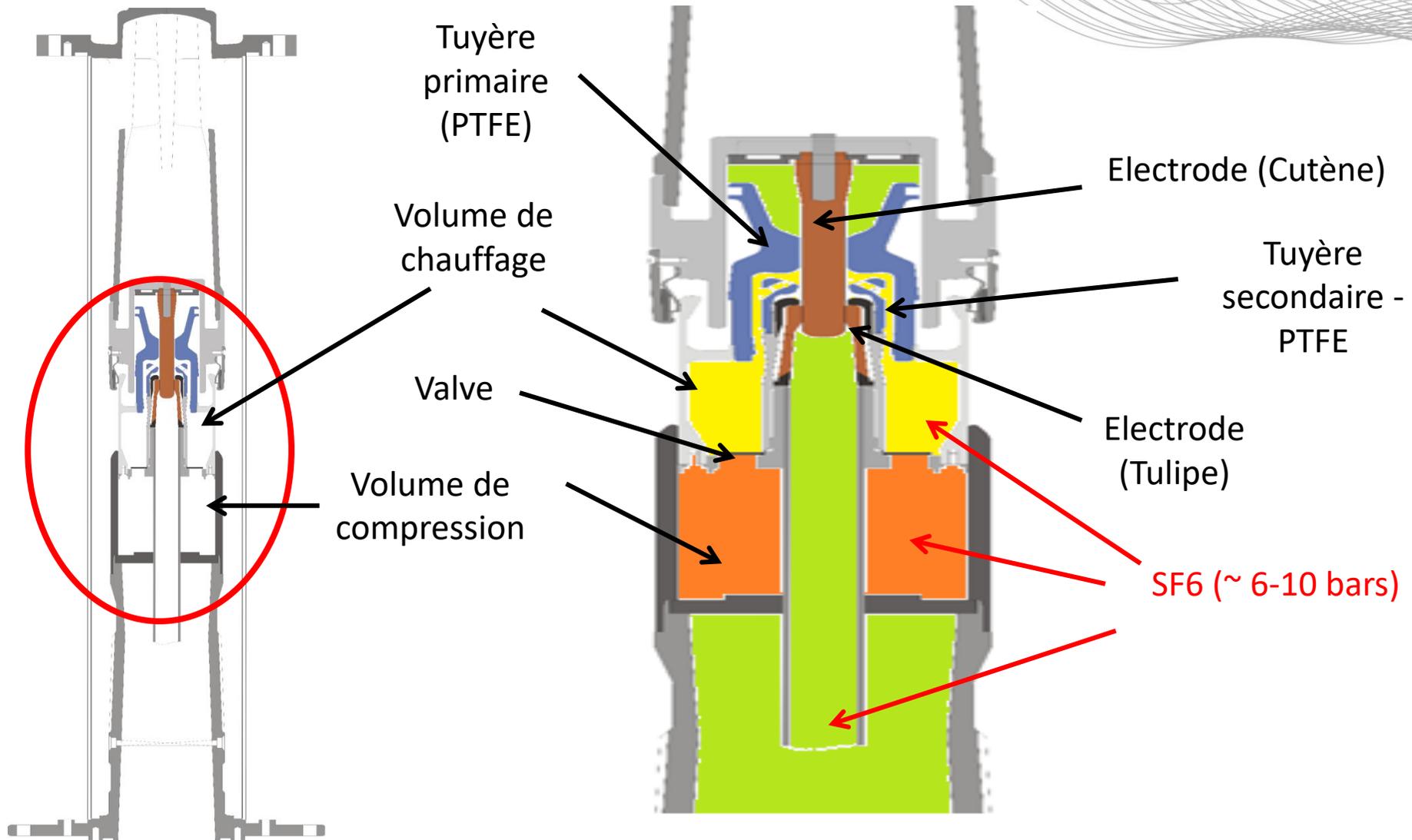
Auto-Soufflage de l'arc au passage par zero du courant

# Le disjoncteur HT : Et à l'intérieur ?

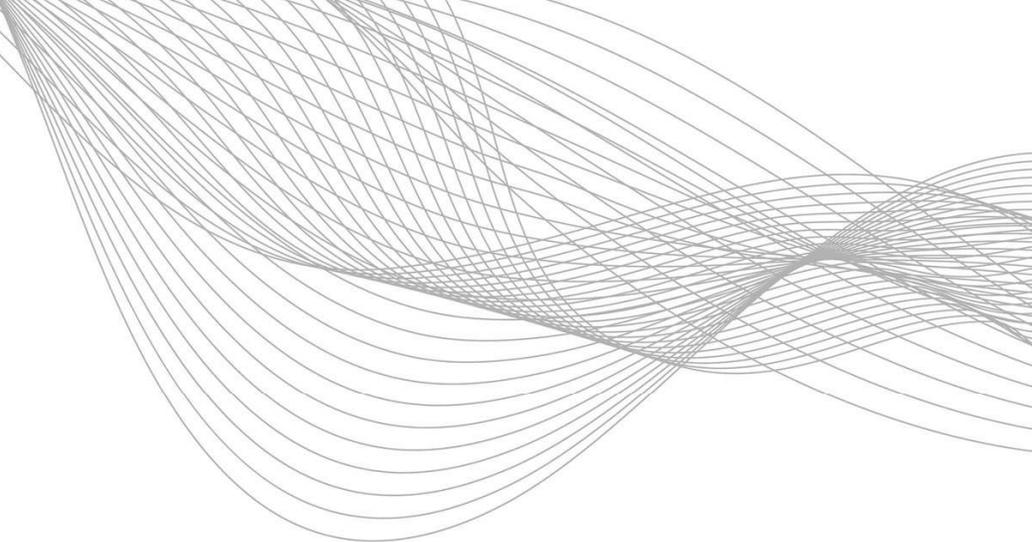


(\* Kornhaas Alexander, Experimentelle Untersuchungen zur Druckentwicklung in einem SF<sub>6</sub>-Selbstblasschalter beim Schalten großer Ströme“, Thesis, Ilmenau University, 2014

# Les éléments internes du Disjoncteur HT



# Sommaire



## 1. Introduction

- A. Quelques généralités sur les HVCB
- B. Comment fonctionne un HVCB à l'ouverture

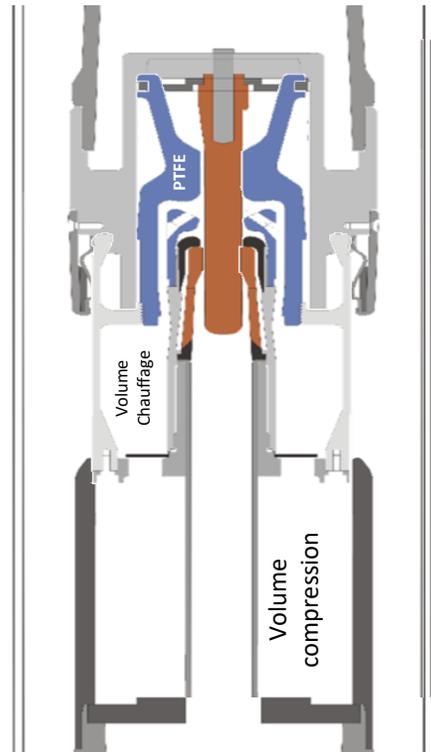
## 2. Les ingrédients d'un modèle physique pour ces dispositifs

- A. Identification des mécanismes présents dans le dispositif
- B. Démarche : à la recherche du phénomène prépondérant
  - Premier modèle, description électromagnétisme
  - Modèle plus élaboré, Ablation du PTFE
- C. Conclusion

# 3 étapes importantes de fonctionnement du disjoncteur

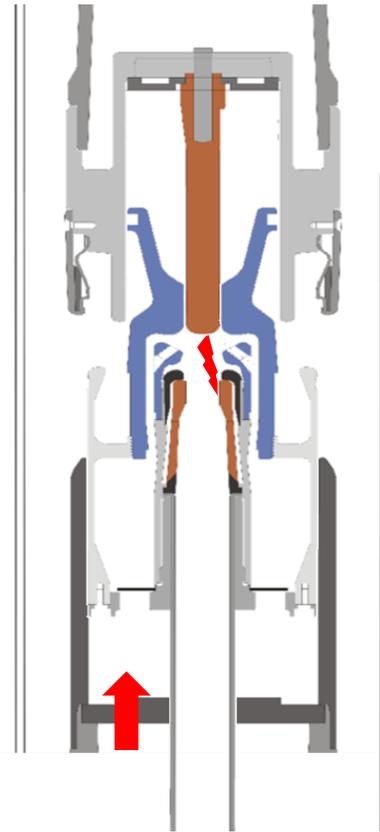
## 1/ Fonctionnement normal

Le dispositif est fermé, le courant circule



## 2/ Ouverture du disjoncteur

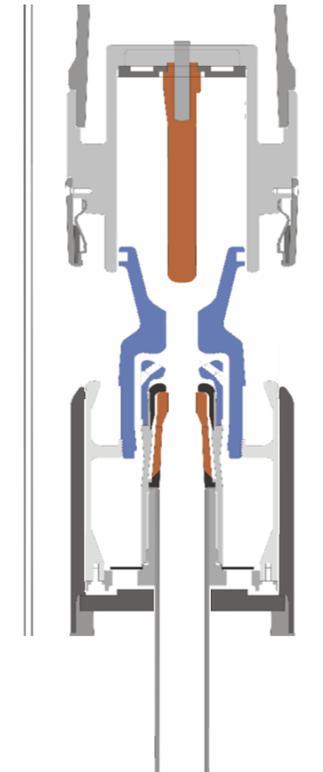
Le courant continue de passer  
Présence d'un arc



Fort courant ( $>10\text{kA}$ ) arc électrique

## 3/ Le disjoncteur est ouvert

Le courant ne doit plus circuler



Post arc => TRV  
Réamorçage thermique ( $\sim 10\mu\text{s}$ )  
ou diélectrique ( $\sim \text{qq ms}$ )

# Phase d'arc: 1- séparation des contacts

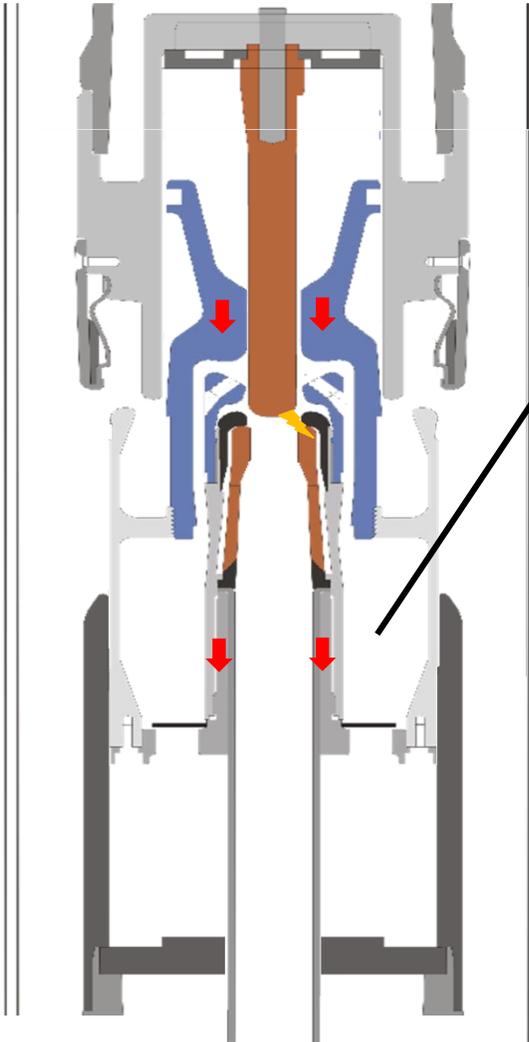
## Mesures

Mesure de la pression dans le volume de chauffage

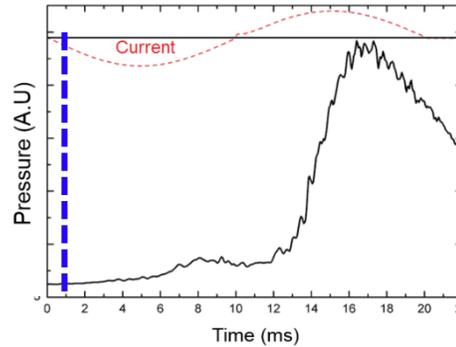
Mesure de l'intensité et de la tension

Ablation PTFE

Déformation parois PTFE



## Mesures



## Phénomènes en jeu

- Création d'un arc électrique dans le SF6
- Chauffage des électrodes
- Rayonnement important

## Thématiques

Mécanique

Mouvement de l'électrode

Mouvement des valves: dépend de la pression dans vol. Chauffage

Arc/plasma

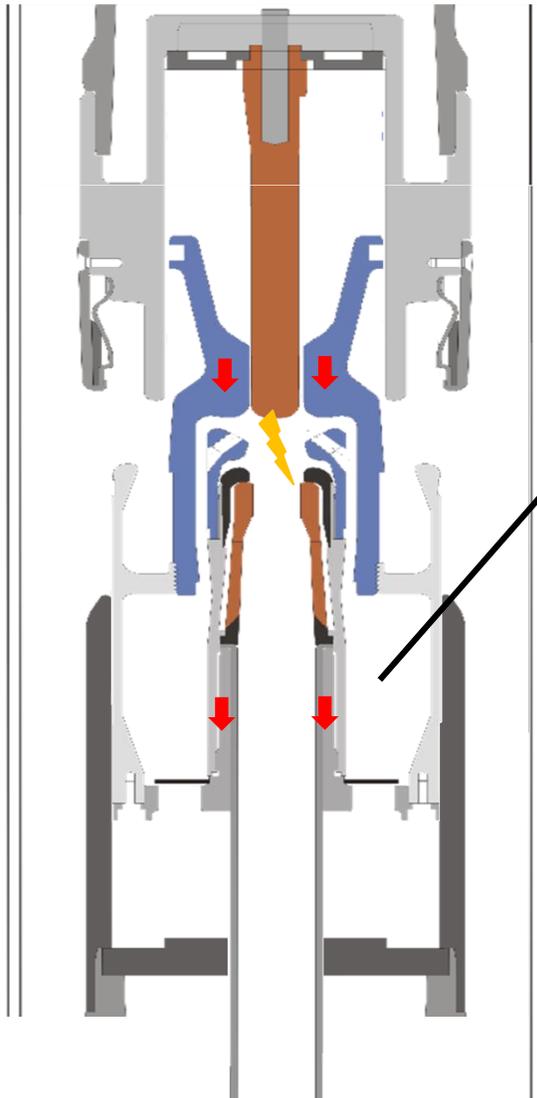
Propriétés plasma: SF6, transport, thermo et rayonnement

Equations fluides et électriques: turbulence, Champ magnétique, couplage

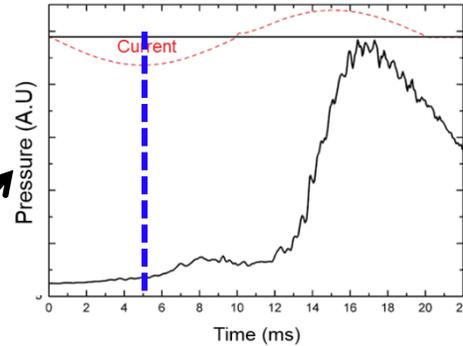
Matériaux

Electrodes: cathode ou anode, passage du courant, ablation?

# Phase d'arc 2: Maximum de l'onde de courant



## Mesures



## Phénomènes en jeu (experimental)

- Ablation des murs PTFE
- Réduction du volume de compression
- Augmentation de la pression dans le volume de chauffage

## Thématiques

Mécanique

Mouvement de l'électrode

Mouvement des valves: dépend de la pression dans vol. Chauffage

Arc/plasma

Propriétés plasma : C2F4

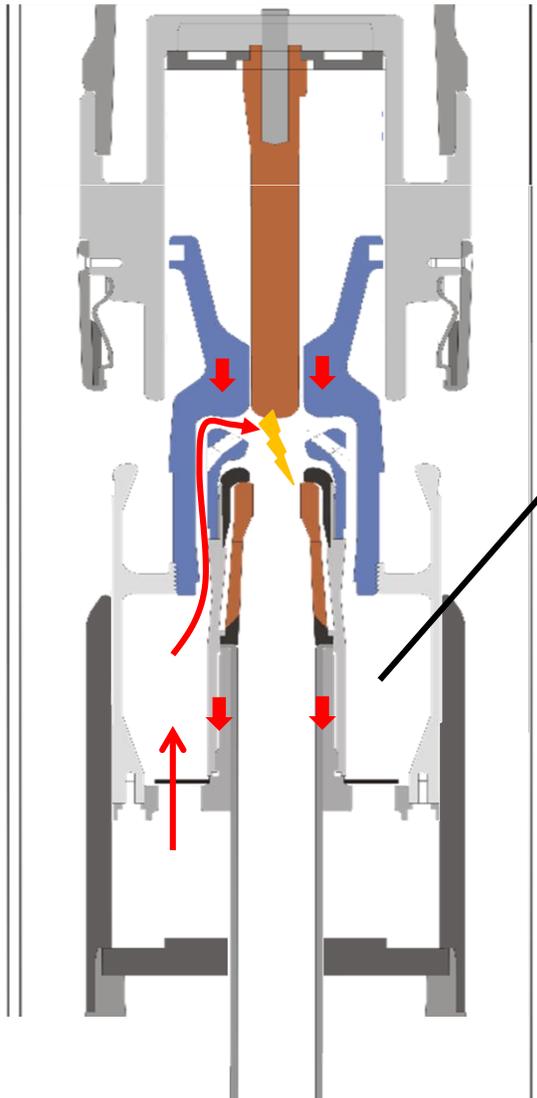
Equations fluides et électriques

Matériaux

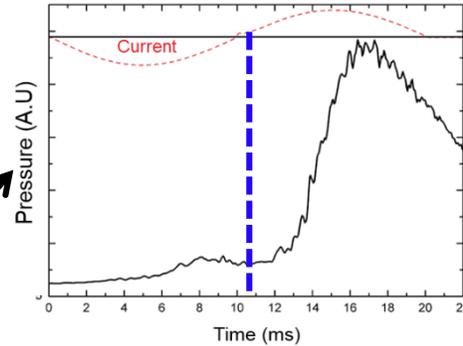
Electrodes

PTFE: Ablation des murs PTFE

# Phase d'arc 3: Premier passage par zero



## Mesures



## Phénomènes en jeu (experimental)

- Ablation des murs PTFE
- Réduction du volume de compression
- Soufflage de l'arc

## Thématiques

Mécanique

Mouvement de l'électrode

Mouvement des valves: dépend de la pression dans vol. Chauffage

Arc/plasma

Propriétés plasma : SF6- C2F4 (PTFE)

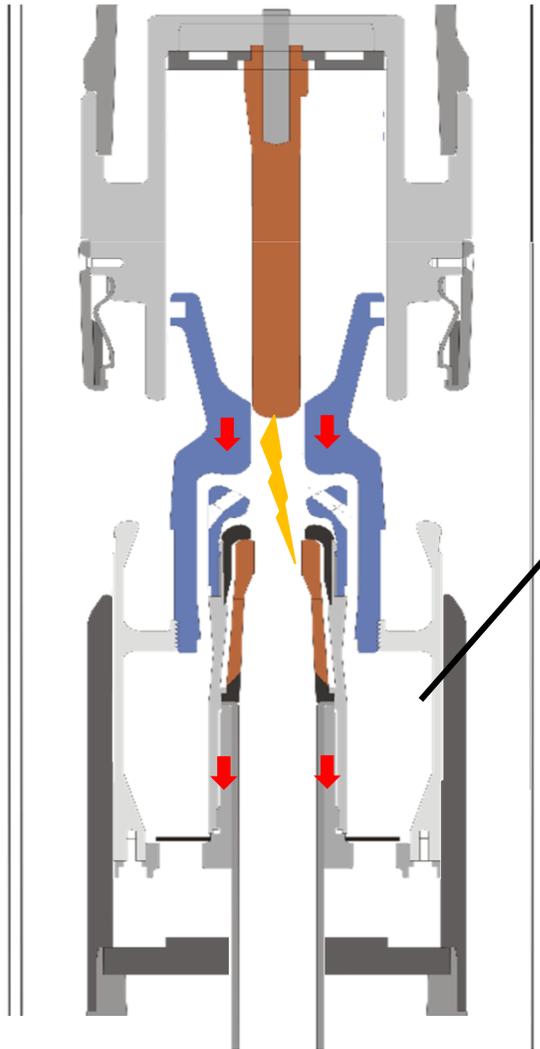
Equations fluides et électriques

Matériaux

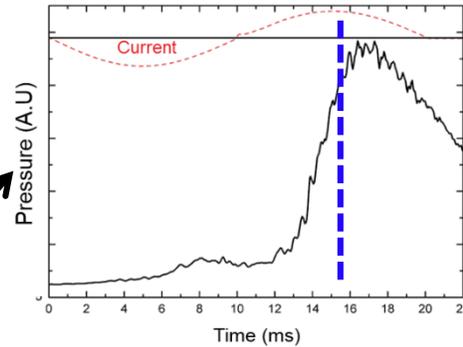
Electrodes

PTFE

# Phase d'arc 4: Second maximum du courant



## Mesures



## Phénomènes en jeu (experimental)

- Ablation des murs PTFE
- Réduction du volume de compression
- Fermeture valve Compression/chauffage
- L'arc est soufflé et s'éteint

## Phénomènes

Mécanique

Mouvement de l'électrode

Mouvement des valves: dépend de la pression dans vol. Chauffage

Arc/plasma

Propriétés plasma : SF<sub>6</sub>- C<sub>2</sub>F<sub>4</sub> (PTFE)

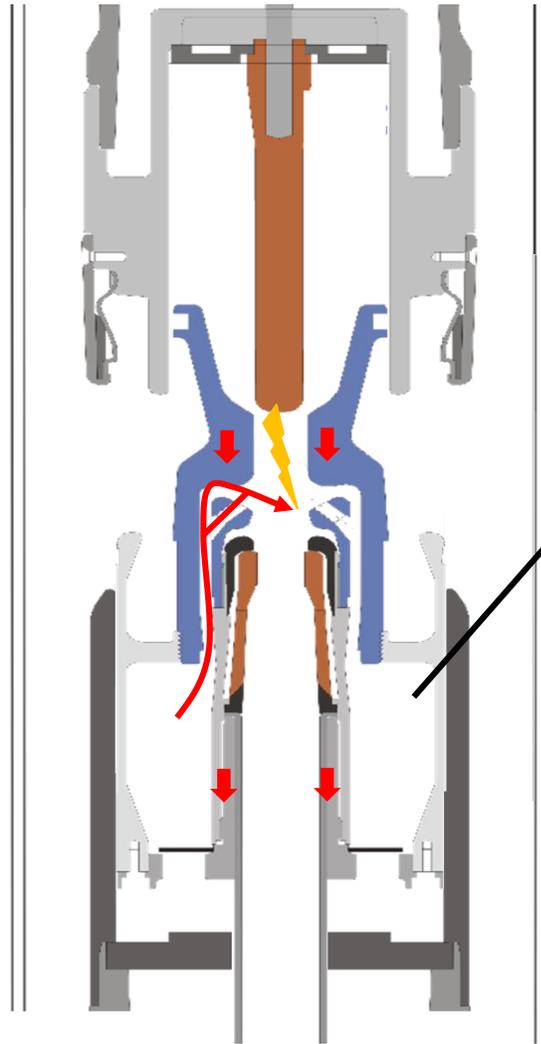
Equations fluides et électriques

Matériaux

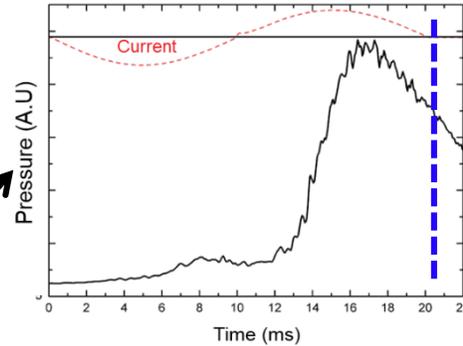
Electrodes

PTFE

# Phase d'arc 5: Second passage par zero



## Mesures



## Phénomènes en jeu (experimental)

- Ablation des murs PTFE
- Réduction du volume de compression
- Fermeture valve Compression/chauffage
- L'arc gonfle et rayonne beaucoup

## Phénomènes

Mécanique

Mouvement de l'électrode

Mouvement des valves: dépend de la pression dans vol. Chauffage

Arc/plasma

Propriétés plasma : SF6- C2F4 (PTFE)

Equations fluides et électriques

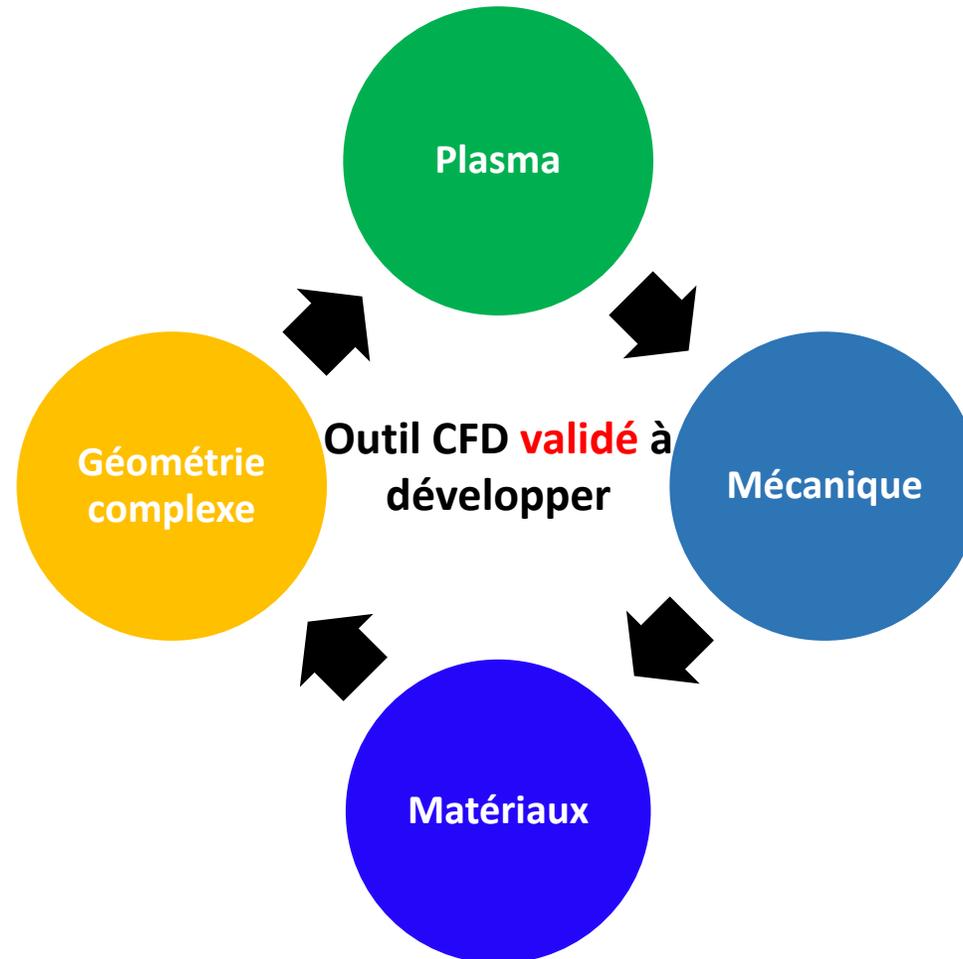
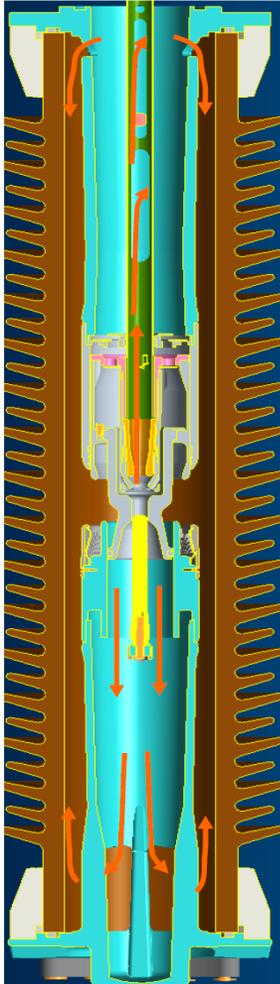
Matériaux

Electrodes

PTFE

# Pour résumer :

Le disjoncteur est un dispositif complexe où interviennent beaucoup de physiques



Mécanisme « central »  
=  
montée en pression  
Dans le heating volume

# Stratégie pour le développement du modèle et la compréhension du dispositif



## Modèle CFD

- Modèle fluide
- Géométrie complexe



**Confrontation**

## Expérimentation

- Données électriques
- Pression
- Matériaux ablatés
- Profil des tuyères



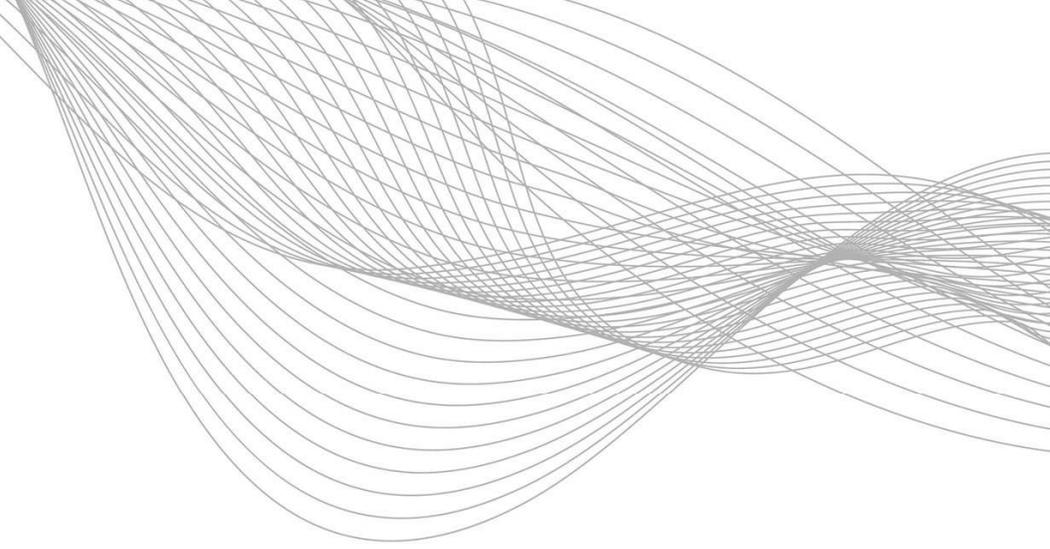
L'outil a été développé en utilisant le logiciel du commerce Fluent et en développant de nombreuses UDF pour l'adapter aux arcs électriques



Solveur Volumes finis: Adapté aux fluides compressibles transsoniques



# Sommaire



## 1. Introduction

- A. Quelques généralités sur les HVCB
- B. Comment fonctionne un HVCB à l'ouverture

## 2. Les ingrédients d'un modèle physique pour ces dispositifs

- A. Identification des mécanismes présents dans le dispositif
- B. Démarche : à la recherche du phénomène prépondérant
  - Premier modèle, description électromagnétisme
  - Modèle plus élaboré, Ablation du PTFE
- C. Conclusion

# Un recensement non exhaustif des phénomènes

## Electrique/Electromag

- Intensité sinusoïdale
- Champ mag

## Electrode

- Mouvement
- Modèles anode/cathode

## Description du milieu plasma

- ETL
- N.ETL
- Cinétique

## Ablation du métal

- Prise en compte des propriétés de mélange
- Ablation

## Ablation du PTFE

- Prise en compte des propriétés de mélange
- Ablation

## Modèle hydrodynamique

- Equations de Navier Stokes
- Couplage électromagnétique
- Coefficients dépendants de la pression
- Turbulence

## Rayonnement

- Coefficient d'émission nette
- Résolution plus complexe du rayonnement?

2D/3D?

## Beaucoup de questions

Doit-on construire un modèle qui prenne en compte tous ces phénomènes?

Sont-ils tous d'égale importance pour comprendre le fonctionnement du dispositif

# Sommaire

## 1. Introduction

- A. Quelques généralités sur les HVCB
- B. Comment fonctionne un HVCB à l'ouverture

## 2. Les ingrédients d'un modèle physique pour ces dispositifs

- A. Identification des mécanismes présents dans le dispositif
- B. Démarche : à la recherche du phénomène prépondérant
  - Premier modèle, description électromagnétisme
  - Modèle plus élaboré, Ablation du PTFE
- C. Conclusion

# Au départ on a simplifié

## Electrique/Electromag

- Intensité sinusoïdale
- Champ mag (quasi statique)

## Electrode

- Mouvement
- ~~Modèles anode/cathode~~

## Description du milieu plasma

- ETL
- N.ETL
- Cinétique

## Ablation du métal

- ~~Prise en compte des~~
- ~~propriétés de mélange~~
- ~~Ablation~~

## Ablation du PTFE

- ~~Prise en compte des~~
- ~~propriétés de mélange~~
- ~~Ablation~~

## Rayonnement

- Coefficient d'émission nette
- ~~Résolution plus complexe~~
- ~~du rayonnement?~~

## Modèle hydrodynamique

- Equations de Navier Stokes
- Couplage électromagnétique
- Coefficients dépendants de la pression
- Turbulence

On ne prend en compte que la colonne d'arc SF6

## Hypothèses :

- Electromag quasi statique
- Plasma = fluide
- ETL
- Turbulent
- Rayonnement = coeff Emission nette

2D/~~3D~~?

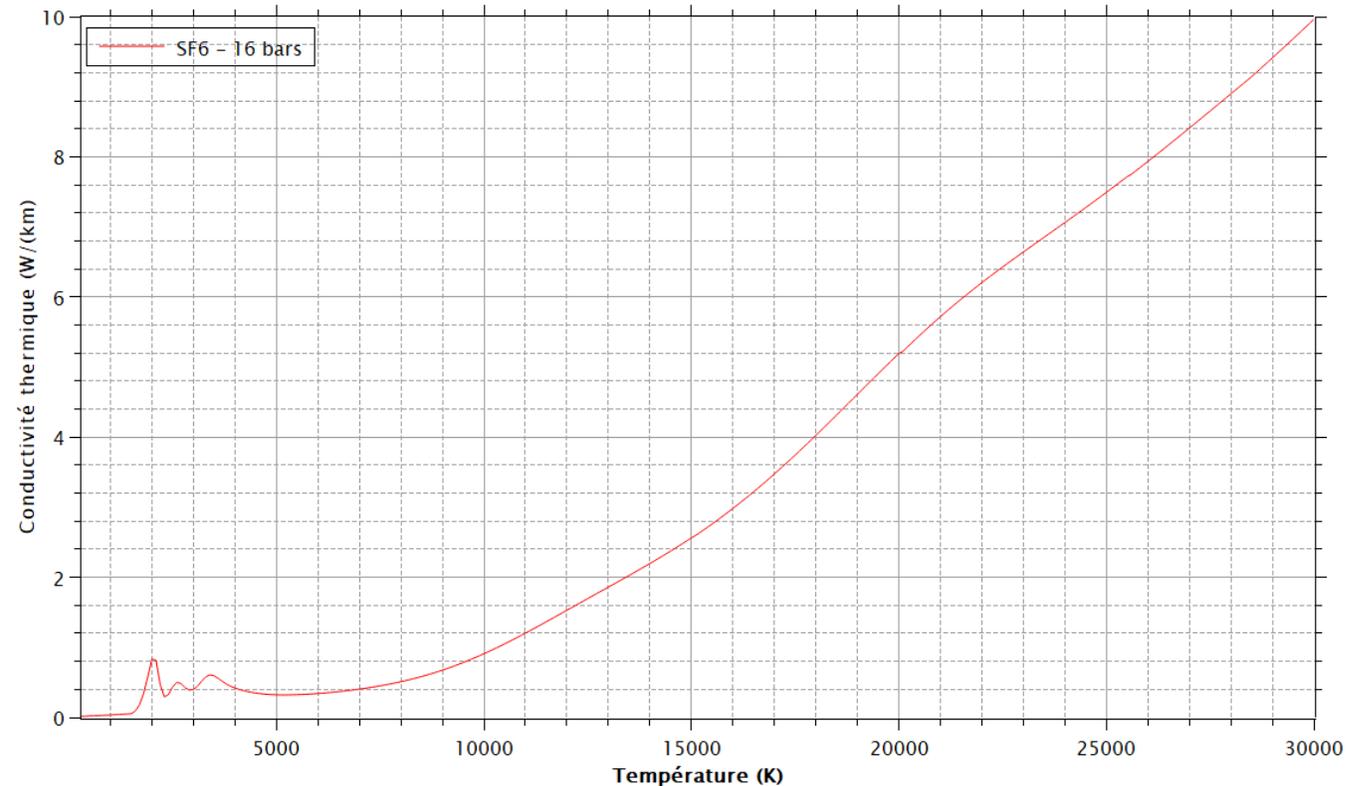
# C'est simplifié mais.....

- Il faut quand même les **propriétés** du SF6 (thermo, transport, rayonnement) fonction de la **température** et de la **pression**
- Il faut un **modèle** qui résolve les équations fluides et la partie **électromag**, c'est turbulent
- Il faut prendre en compte le **mouvement** des pièces

## Exemple propriété SF6

A obtenir pour une grande gamme de pressions et de température

- Densité de masse
- Enthalpie
- Vitesse du son
- Chaleurs spécifiques
- Conductivité thermique
- Conductivité électrique
- Viscosité
- Propriétés radiatives



# Formalisme et équations pour la colonne plasma

- Equations de Navier Stokes et conservation de l'énergie



Solveur FVM Ansys Fluent

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

Conservation de la masse :

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

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

Quantité de mouvement :

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

v: la vitesse moyenne du fluide

P : La pression

$\tau$  : le tenseur de contraintes visqueuses

F : les forces extérieures

Conservation énergie :

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

Potentiel électrique

$$\text{div}(\sigma(T, P) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(V)) = 0$$

$$\vec{j} = -\sigma \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(V)$$

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

# Revisite de la partie électromagnétique

➔ On en profite pour revisiter quelques conditions admises dans la littératures

## ➔ Détails sur la partie électromagnétique

- Utilisation Biot & Savart :  $\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_{\text{volume}} \frac{\vec{j}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV$  ➔ Trop cher en temps de calcul
- En 2D Equation d'Ampere  $\frac{dB_\theta}{dr} \approx -\mu_0 \cdot j_z$  ➔ N'est valable que si on peut négliger la composante radiale
- Resolution des équation potentiel vecteur ➔ La plus utilisée mais Pb de conditions limite
- FEM ➔ Nécessite de coupler deux solveurs (FVM/FEM)
- T- $\Phi$  formulation (au lieu de A-V) ➔ Quelques essais pour les disj basse tension mais très compliqué à utiliser

# Résolution du potentiel vecteur

Equations du potentiel vecteur

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} = \mu_0 \cdot j_z \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial A_r}{\partial r} \right) = -\mu_0 \cdot j_r + \frac{A_r}{r} \end{array} \right.$$



$$B_\theta = \frac{\partial A_z}{\partial r} - \frac{\partial A_r}{\partial z}$$

- Bonne forme pour un solveur FVM
- Pas d'hypothèses particulières
- Beaucoup plus rapide Biot & Savart

Cette méthode est la plus utilisée dans la littérature

## Quelques Conditions limites utilisées à l'époque dans la littérature (et encore aujourd'hui)

- Flux nul  $A_z$  et  $A_r$  (le plus utilisé)
- Valeur nulle loin de l'arc (il faut faire de grandes géométries pour pouvoir résoudre)

## Autre possibilité

- Utiliser Biot & Savart sur les CLs :

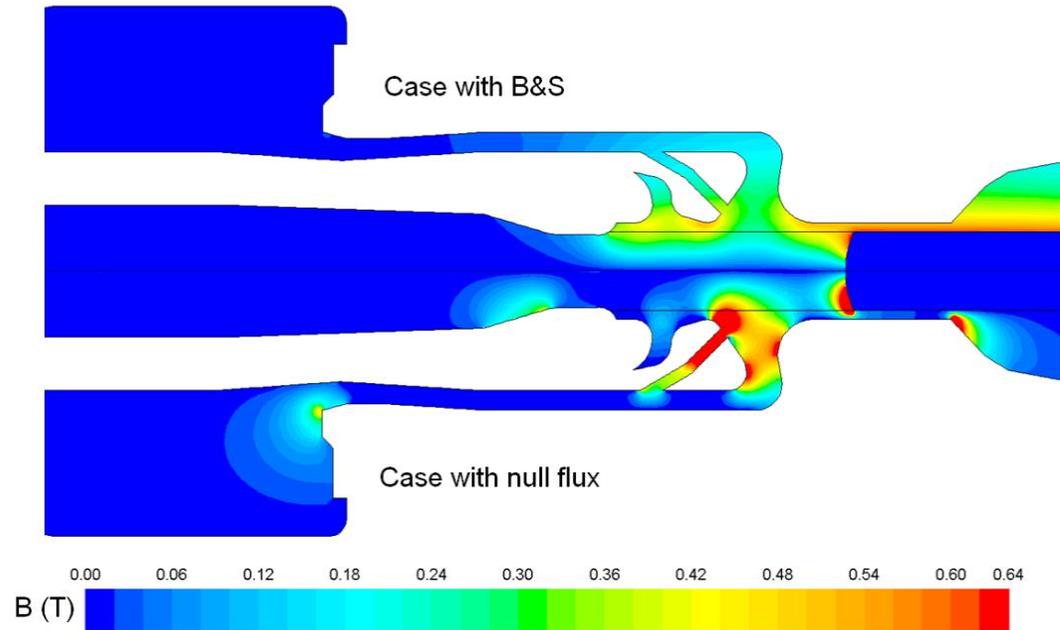
= "hybrid magnetic field solution"

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_{\text{volume}} \frac{\vec{j}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV$$

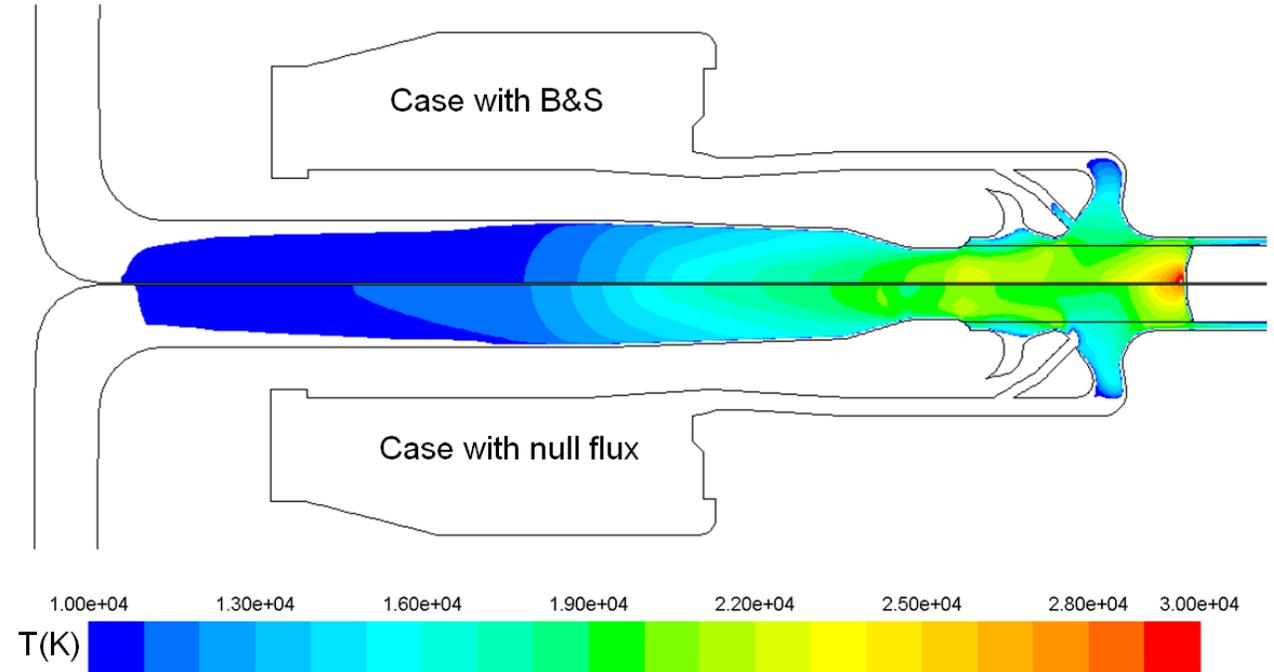
# Influence des conditions limites « magnétiques »

t=4.78ms  
I=30kA

## Champ magnétique



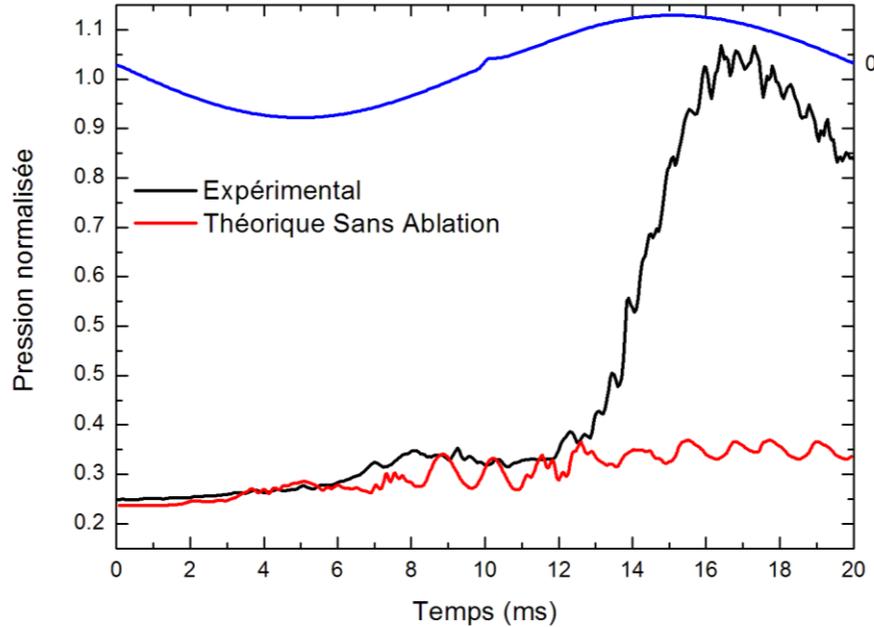
## Température



~50000 mailles  
~ 5 jours de calcul

Les conditions en flux nul conduisent à des résultats complètement éronnés sur la champ magnétique et cela influence la température

# Quoiqu'il en soit ca ne marche pas.....



Que manque t'il?

Ablation PTFE?

Electrique/Electromag

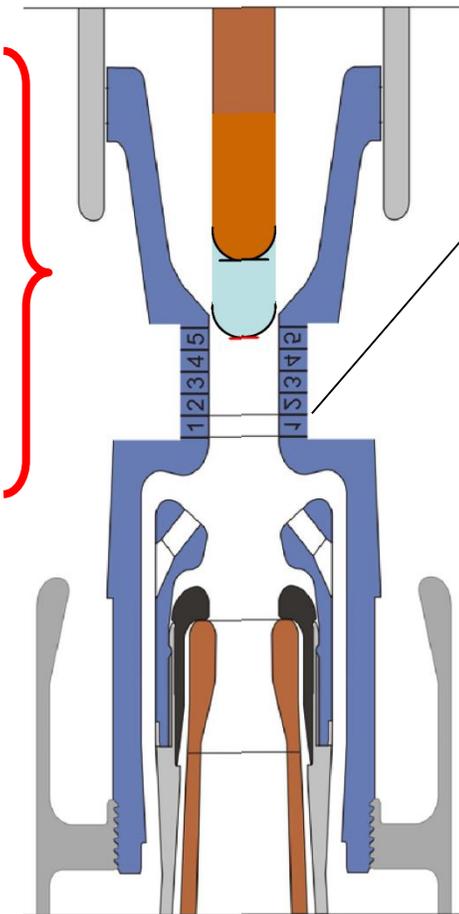
Modèle hydrodynamique

Rayonnement

+

Ablation du PTFE

- Prise en compte des propriétés de mélange
- Ablation



Ablation du PTFE  
Mesurée  
expérimentalement

4.8 g



Masse ablatée  
répartie spatialement  
et dans le temps

# Ablation du PTFE ??

Electrique/Electromag

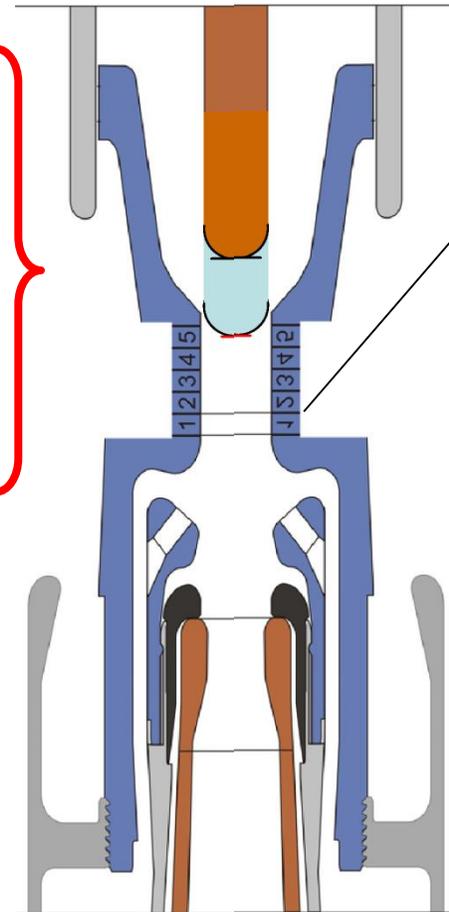
Modèle hydrodynamique

Rayonnement

+

Ablation du PTFE

- Prise en compte des propriétés de mélange
- Ablation

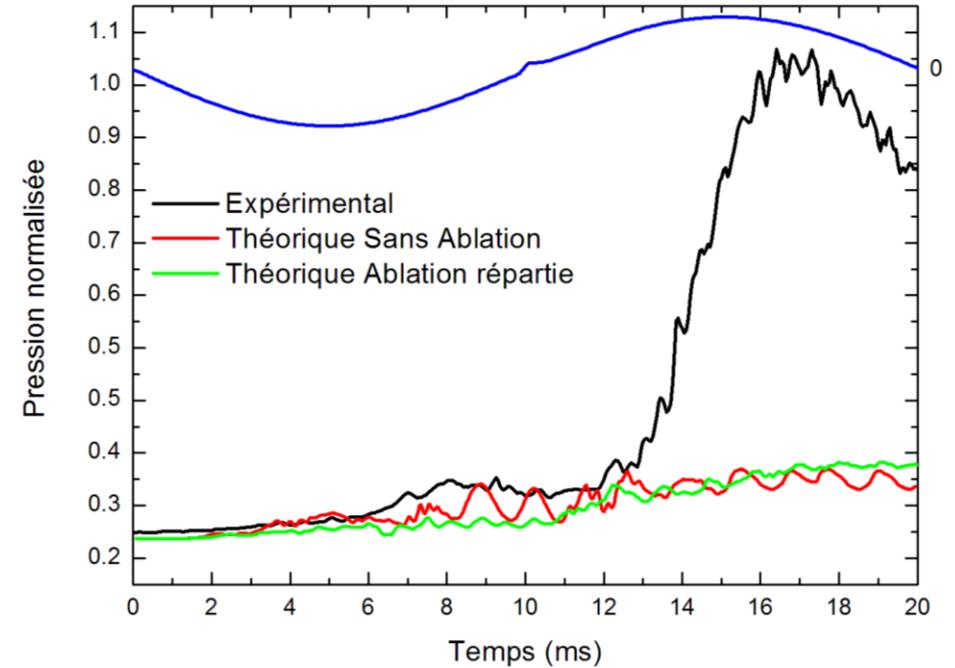


Ablation du PTFE  
Mesurée  
expérimentalement

4.8 g



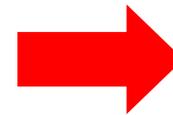
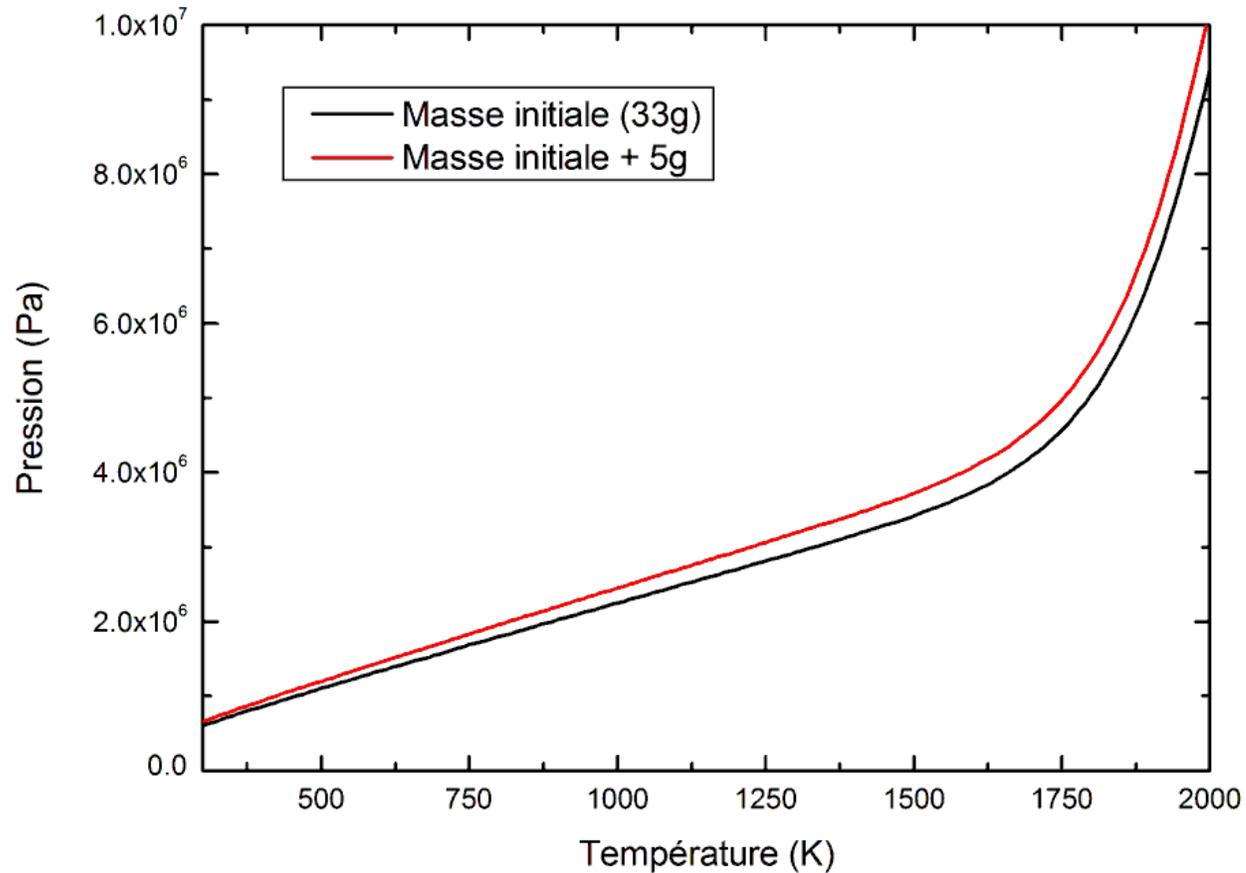
Masse ablatée  
répartie spatialement  
et dans le temps



**Encore loupé...**  
**C'est plus complexe**

# Un petit calcul nous aurait permis d'y voir plus clair

Masse dans le heating volume = 33g

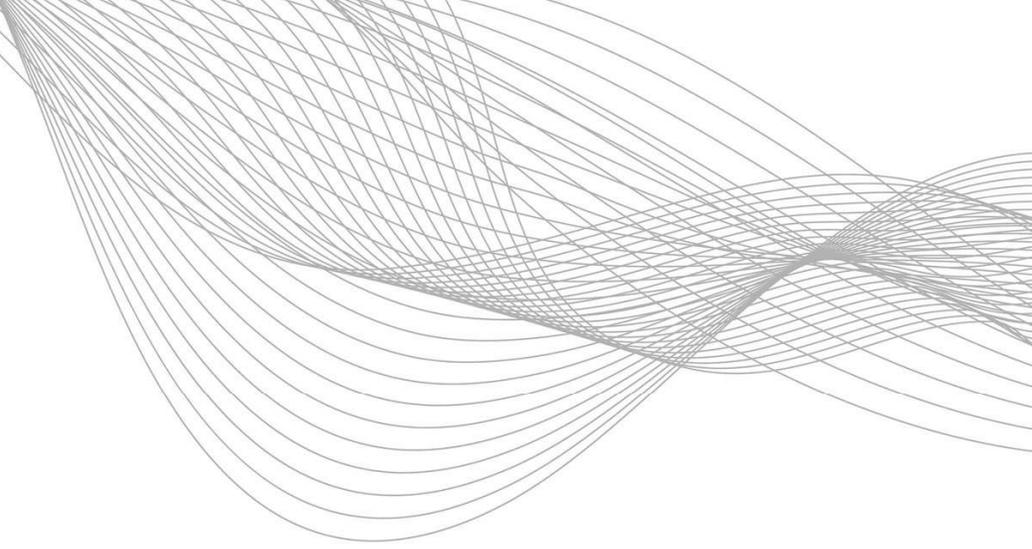


La montée en pression est probablement due à du gaz chaud amené par convection beaucoup plus que par l'apport de masse lui-même



Il est nécessaire de bien décrire l'ablation du PTFE **spatialement** et **temporellement**

# Sommaire



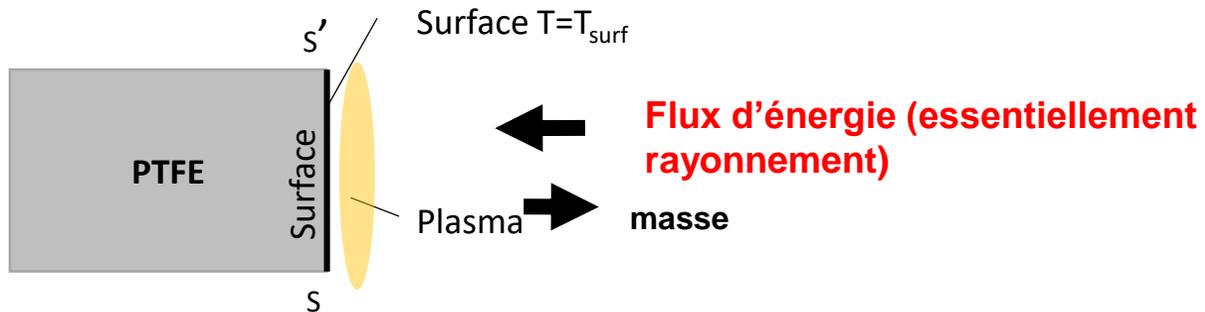
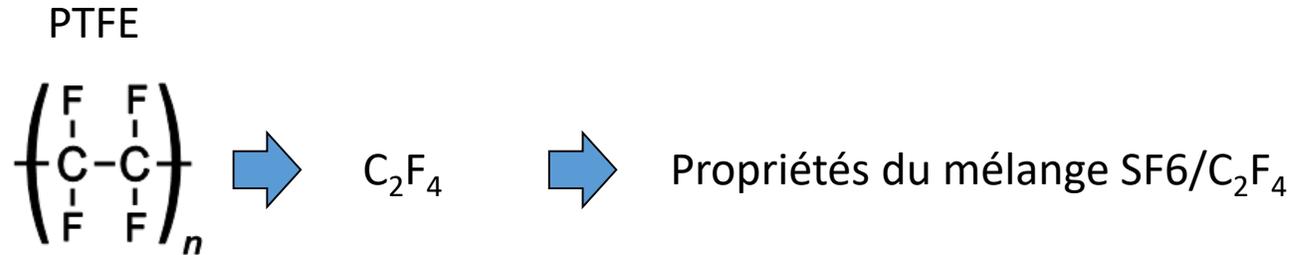
## 1. Introduction

- A. Quelques généralités sur les HVCB
- B. Comment fonctionne un HVCB à l'ouverture

## 2. Les ingrédients d'un modèle physique pour ces dispositifs

- A. Identification des mécanismes présents dans le dispositif
- B. Démarche : à la recherche du phénomène prépondérant
  - Premier modèle, description électromagnétisme
  - Modèle plus élaboré, Ablation du PTFE
- C. Conclusion

# Modèle d'ablation du PTFE?



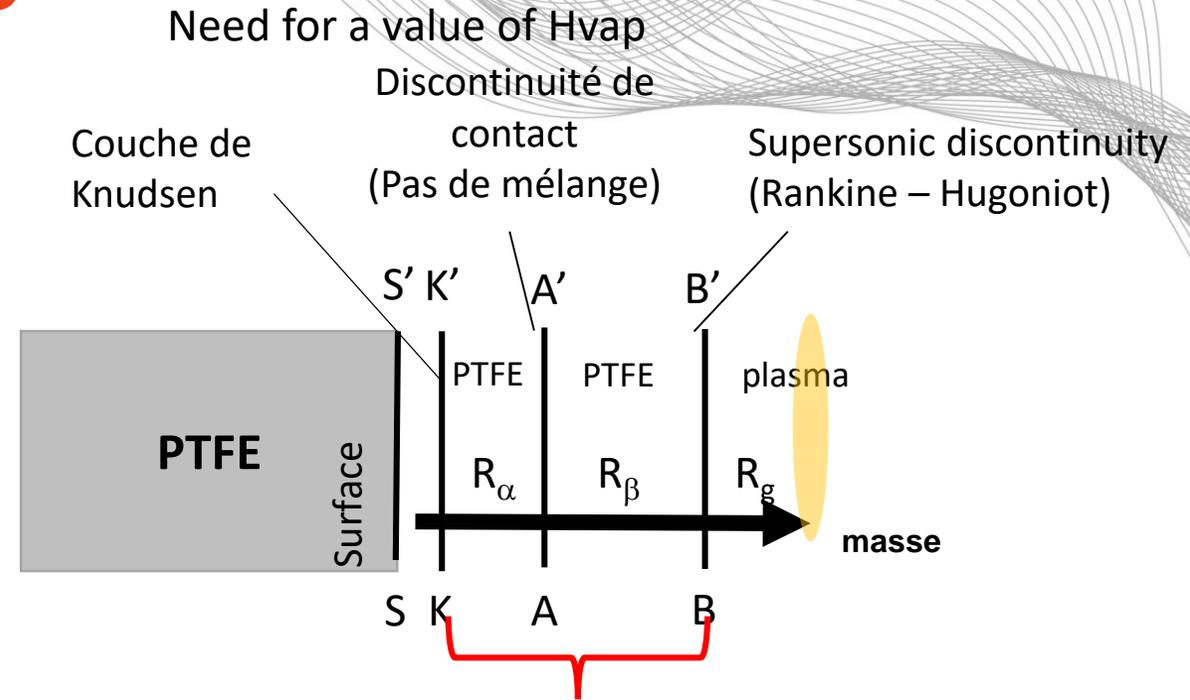
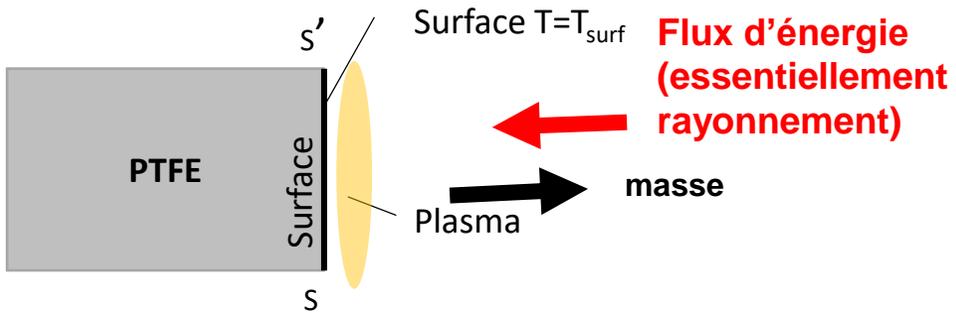
Deux régimes qui dependent de la pression de vapeur saturante

$P/P_0 < 1$   
Régime diffusif  
Equilibre

$P/P_0 > 1$   
Régime d'ablation  
Couche de Knudsen hors équilibre

Compliqué à décrire

# Détails du modèle simplifié



$$dm = \frac{Q_{vap}}{H_{vap}} * dt$$

$$\Delta h_{eff} = 12MJ / kg$$

$$T_{vap} = 3200K$$

Dans quelques travaux une valeur semi-empirique de l'enthalpie transportée par le PTFE lors de son ablation (données par Ruchti [1]) est utilisée

Indépendant de la pression?

[1] Ruchti C., Niemeyer L., IEEE Trans. Plasma Sc., vol. PS-14, NO. 4, 1986

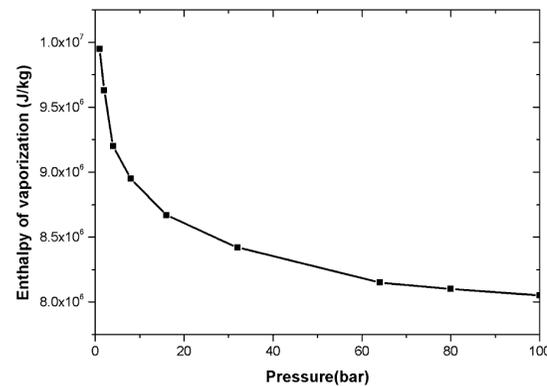
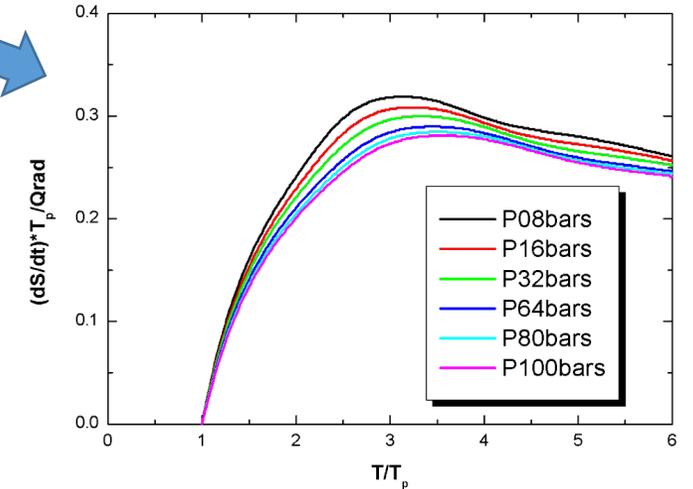
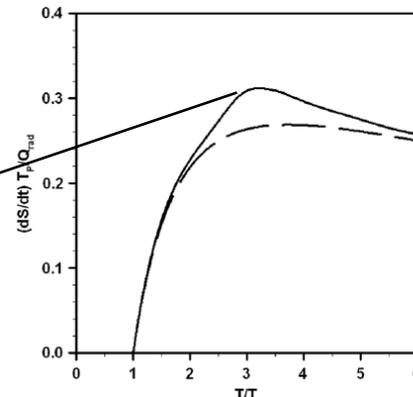
# Amélioration de la valeur d'enthalpie

- ➔ D'autres auteurs proposent de calculer  $\Delta h_{eff}$  en utilisant la maximisation de l'entropie[2].  
L'hypothèse sous jacente est que le système hors équilibre (la couche de Knudsen hors équilibre cherche à atteindre l'équilibre en maximisant son entropie

$$\frac{dS}{dt} = \left(\frac{dm}{dt}\right) \cdot (S(T_{ETL}) - S(T_{pyr})) = \frac{Q \cdot (S(T_{vap}) - S(T_{pyr}))}{(\Delta h_{eff})}$$

De ce max, Christen déduit

$T_{vap}=3700K$   
 $\Delta h_{eff}=10MJ/kg$   
 For pressure  $p = 10 \text{ bar}$



On peut obtenir plusieurs valeurs dépendant de la pression



# On complexifie le modèle

## Electrique/Electromag

- Intensité sinusoidale
- Champ mag (quasi statique)

## Electrode

- Mouvement
- Modèles anode/cathode

## Description du milieu plasma

- ETL
- N.ETL
- Cinétique

## Ablation du métal

- Prise en compte des propriétés de mélange
- Ablation

## Ablation du PTFE

- Prise en compte des propriétés de mélange
- Ablation

## Rayonnement

- Coefficient d'émission nette
- Résolution plus complexe du rayonnement

## Modèle hydrodynamique

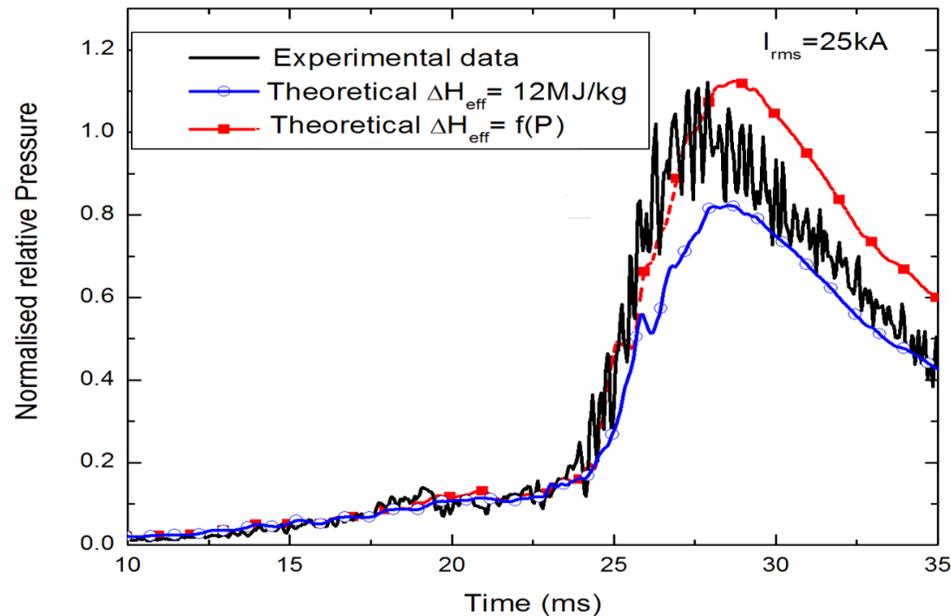
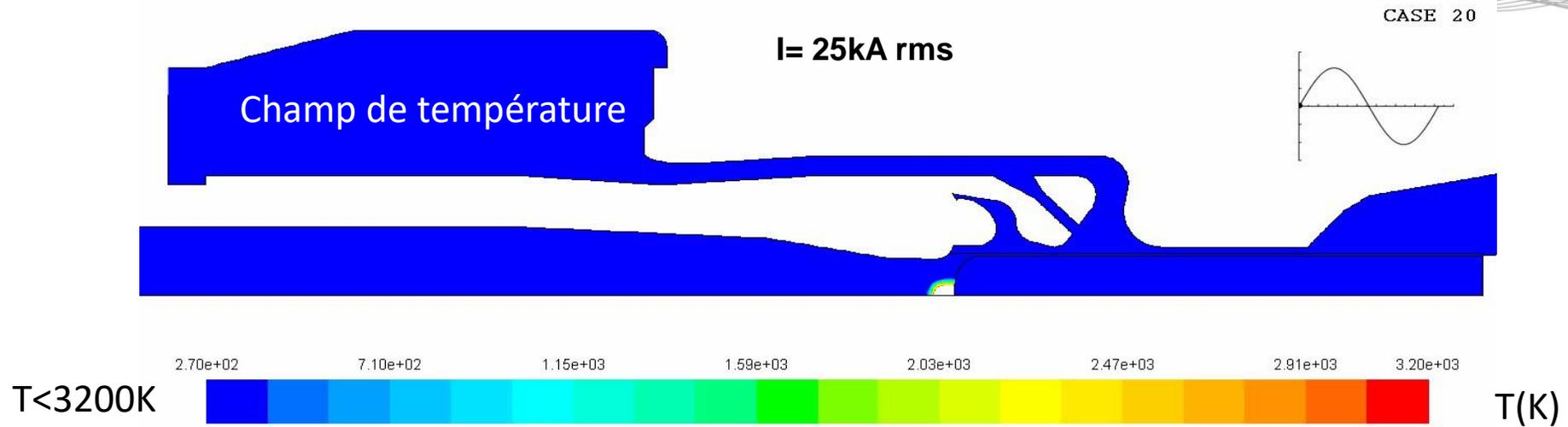
- Equations de Navier Stokes
- Couplage electromagnétique
- Coefficients dépendants de la pression
- Turbulence

## Hypothèses :

- Electromag quasi statique
- Plasma = fluide
- ETL
- Turbulent
- Rayonnement = P1/DOM
- Ablation du PTFE

2D/3D?

# A priori on tient notre responsable de la montée en pression



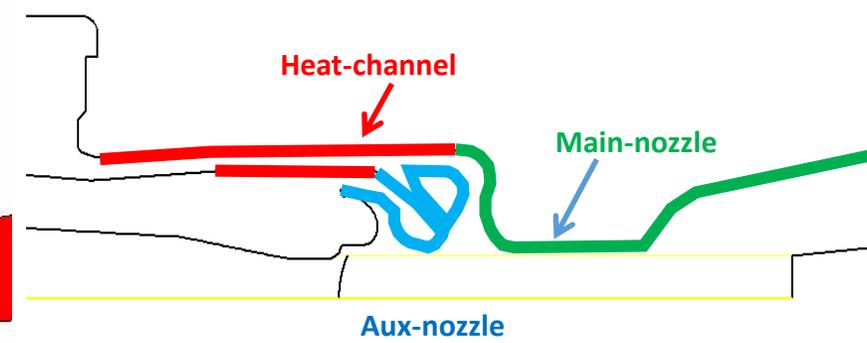
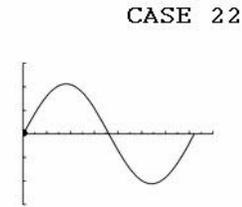
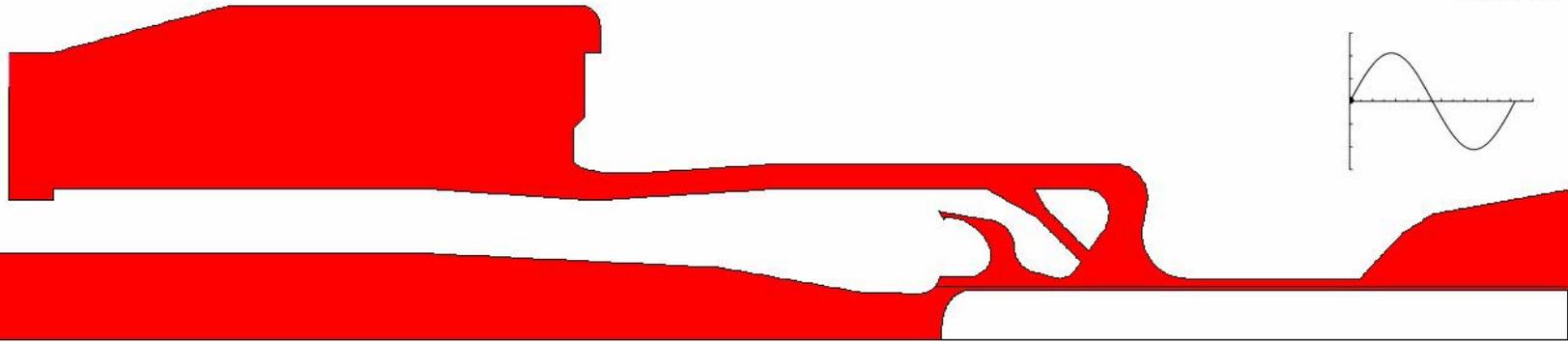
## Mécanisme analysé

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

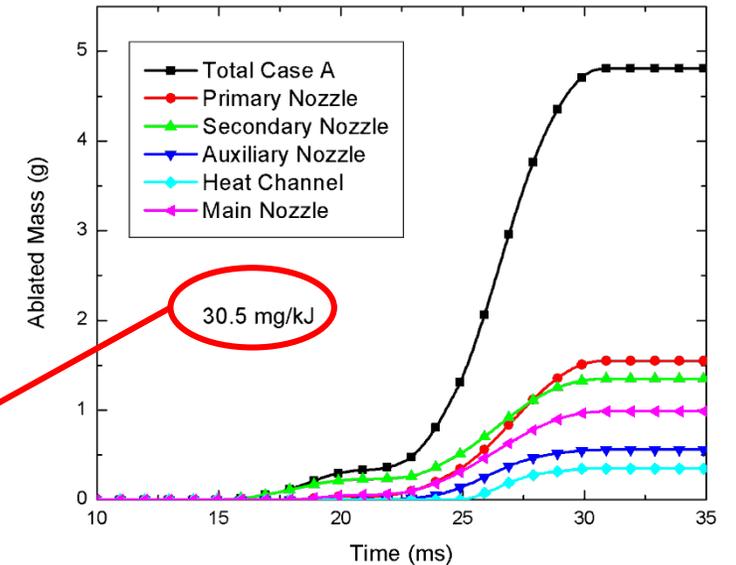
Prédictif !

# Evolution des vapeurs SF6 dans le dispositif

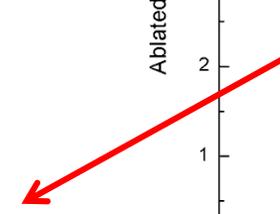
$I = 25\text{kA rms}$



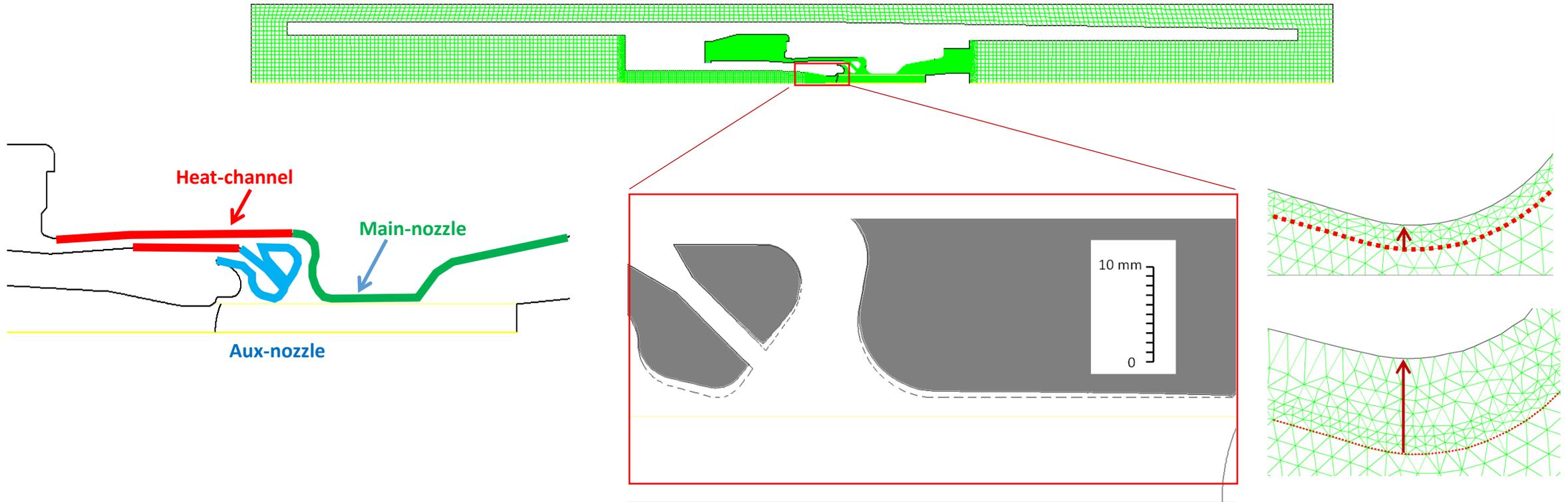
SF6 mass fraction



Bon accord avec l'expérience mais en plus on a l'"histoire de l'ablation"

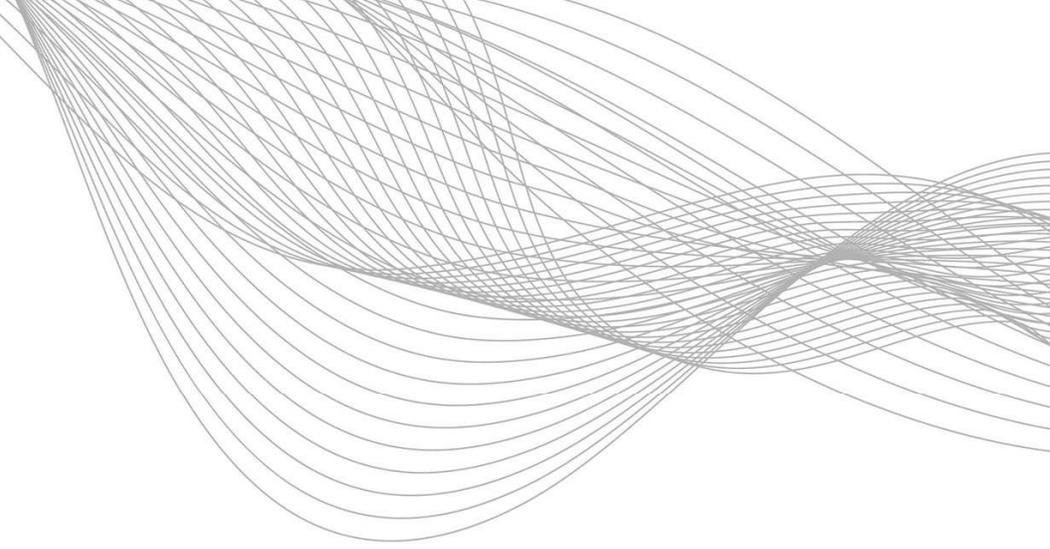


# Déformation des parois



Une estimation dans le cas d'un courant à 57kA conduit à une ablation de 1mm d'après le taux d'ablation. C'est en accord avec l'expérimental et on peut prendre en compte la déformation des murs suivant l'ablation. Cela va changer la convection dans le dispositif et le comportement de l'arc

# Sommaire



## 1. Introduction

- A. Quelques généralités sur les HVCB
- B. Comment fonctionne un HVCB à l'ouverture

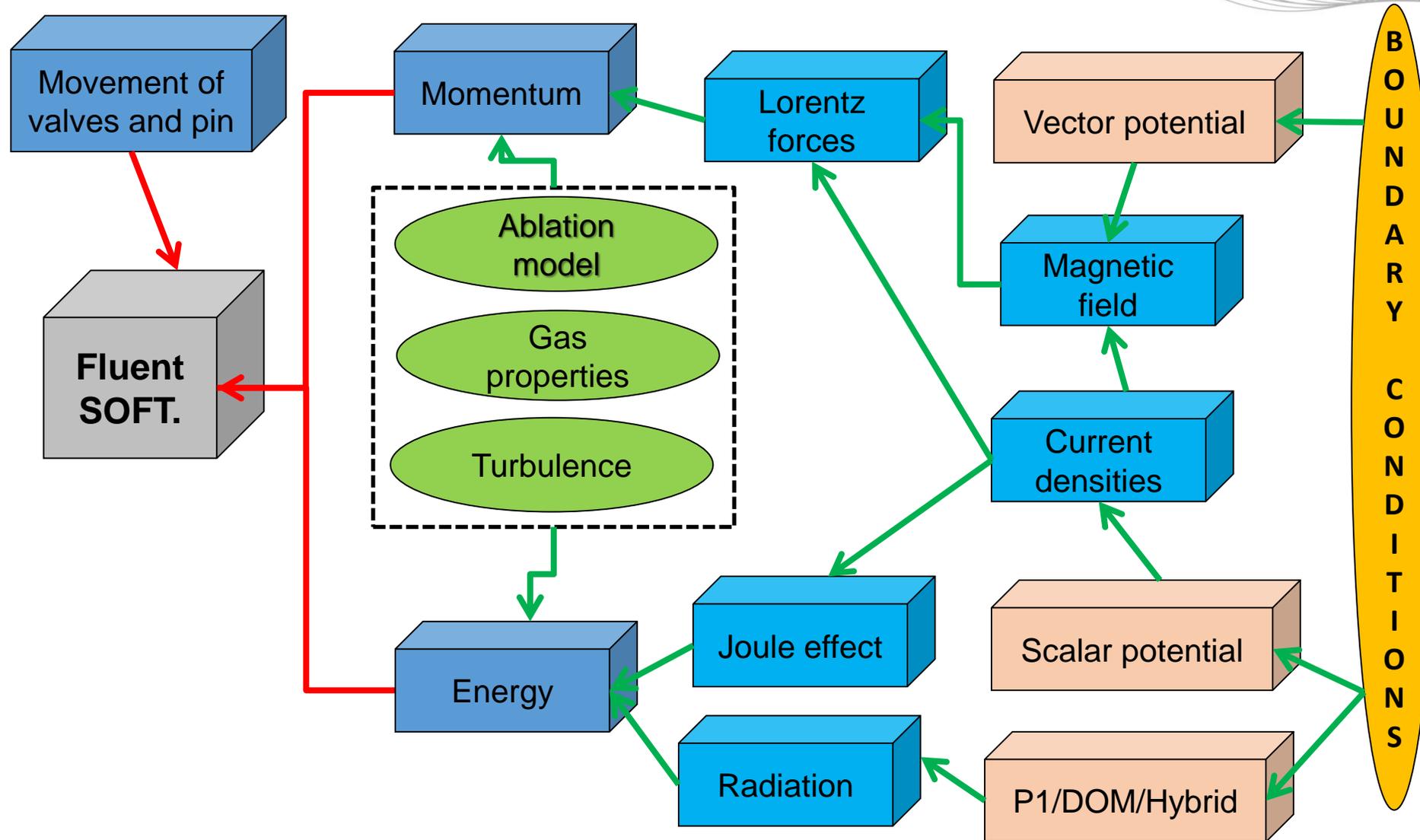
## 2. Les ingrédients d'un modèle physique pour ces dispositifs

- A. Identification des mécanismes présents dans le dispositif
- B. Démarche : à la recherche du phénomène prépondérant
  - Premier modèle, description électromagnétisme
  - Modèle plus élaboré, Ablation du PTFE

### C. Conclusion

# Le modèle au global

Un modèle prédictif a été développé et aujourd'hui plus de 30/40 essais numériques avant un essai expérimental



# Ce dont je n'ai pas parlé, les challenges

- ➔ Choix du modèle de turbulence
- ➔ Choix du modèle de Rayonnement
- ➔ La phase proche du courant zero ➔ **Modèle 2T (quel formalisme, quel rayonnement...)**
- ➔ Des modèles d'électrode ➔ **Modèle cathode froide (quel formalisme, couplage avec le plasma...)**
- ➔ De l'ablation du cuivre qui peut changer le comportement post Arc ➔ **Modèle d'ablation (quel formalisme, propriétés SF6/C2F4/Cu...)**
- ➔ De la phase post arc ➔ **Hors équilibre chimique, modèles de claquage**
- ➔ Passage au 3D

**Merci de votre attention !**

