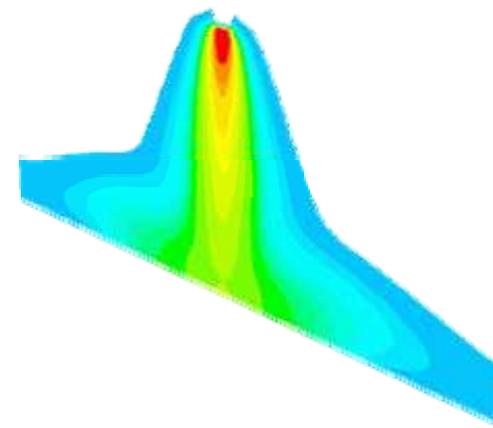
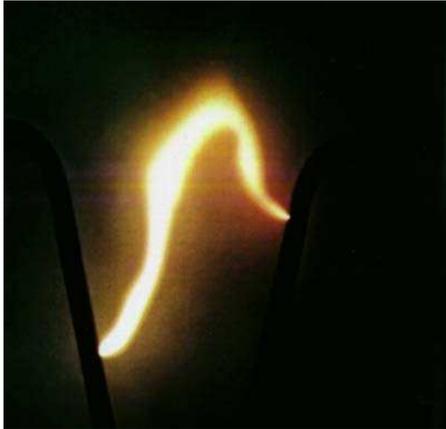


**Simulation numérique d'un arc  
électrique : premier pas vers les  
applications des plasmas  
thermiques**

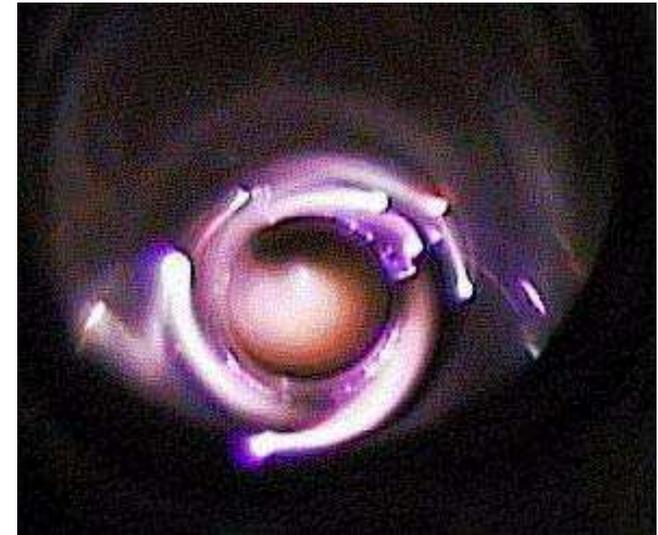


*Jean-Marc Bauchire*

## Les décharges électriques



Il existe plusieurs façons de **chauffer un gaz** : décharge continue, excitation RF, micro-onde, laser...



Lorsque le transfert d'énergie vers le gaz est suffisant, celui se transforme en **plasma** : mélange de molécules et d'atomes neutres, de ions atomiques et moléculaires, d'électrons, le tout étant globalement électriquement neutre.

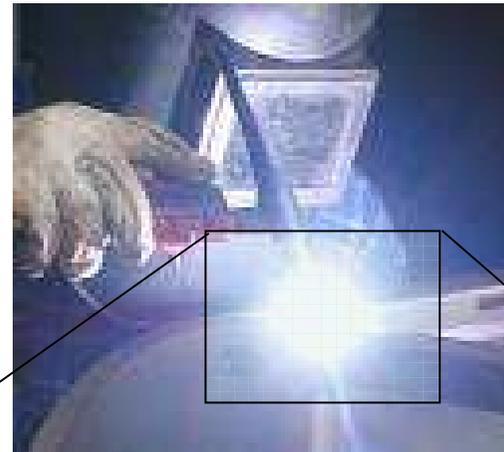
**Milieus très réactifs** dont découlent beaucoup d'applications : dépôt et gravure de matériaux, traitement de surface, propulsion, dépollution...



## L'arc électrique et les plasmas thermiques

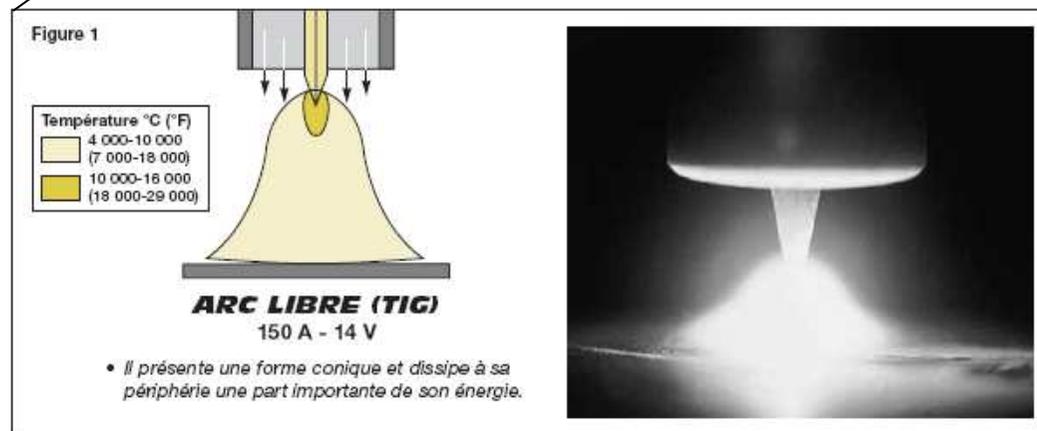
Les **arcs électriques** à pression atmosphérique font parti des **plasmas thermiques** :

- Forte densité d'énergie
- **Température** élevée
- Température identique pour toutes les espèces (chimiques)
- **Rayonnement** important
- **Intensité** de courant **élevée**



Lorsque l'arc électrique n'est pas contraint (tuyère, soufflage...) il est qualifié de "libre".

Dans le cas d'une configuration pointe-plan c'est par exemple "l'arc du soudeur".



# **Simulation numérique d'un arc électrique : premier pas...**

**... vers les applications des  
plasmas thermiques**

## Modèle mathématique de l'arc libre : *Hypothèses générales*

- Plasma à l'Equilibre Thermodynamique Local  $\Rightarrow$  T unique.
- Système à symétrie cylindrique.
- Dispositif en état stationnaire.
- Effet de la gravité négligé.
- Ecoulement laminaire.
- Gaz plasmagène : Air.



## Modèle mathématique de l'arc libre : *Equations générales*

Forme générale (stationnaire) des équations de conservation :

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \Phi) = \vec{\nabla} \cdot (\Gamma_{\Phi} \vec{\nabla} \Phi) + S_{\Phi}$$

	$\Phi$	$\Gamma_{\Phi}$	$S_{\Phi}$
<b>Masse</b>	1	0	0
<b>Quantité de mouvement radiale</b>	$u$	$\mu$	$-\frac{\partial P}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \mu r \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right]$ $- \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) \right) \right] + j_r \cdot B_{\theta}$
<b>Quantité de mouvement axiale</b>	$v$	$\mu$	$-\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right]$ $- \frac{2}{3} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \mu r \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) \right) \right] - \mu \frac{2v}{r^2} - j_z \cdot B_{\theta}$

⇒ Equations de la mécanique des fluides +  $\vec{J} \times \vec{B}$

## Modèle mathématique de l'arc libre : *Equations générales*

Forme générale (stationnaire) des équations de conservation :

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \Phi) = \vec{\nabla} \cdot (\Gamma_{\Phi} \vec{\nabla} \Phi) + S_{\Phi}$$

	$\Phi$	$\Gamma_{\Phi}$	$S_{\Phi}$
<b>Energie</b>	$T$	$\kappa$	$\frac{j_r^2 + j_z^2}{\sigma} - U$
<b>Potentiel électrique</b>	$V$	$\sigma$	0
<b>Potentiel vecteur magnétique</b>	$A_z$	1	$\mu_0 j_z$
	$A_r$	1	$\mu_0 j_r - \frac{A_r}{r^2}$

⇒ Equation de la thermique +  $\vec{J} \times \vec{E}$

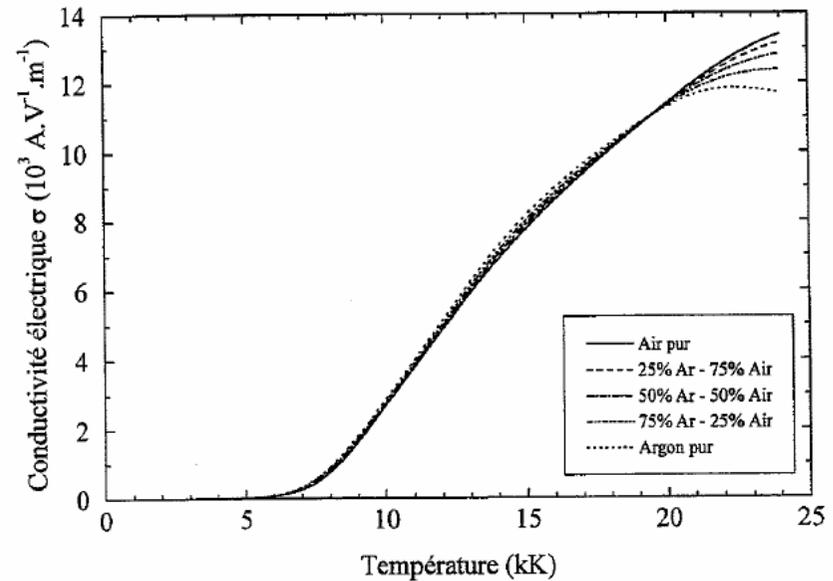
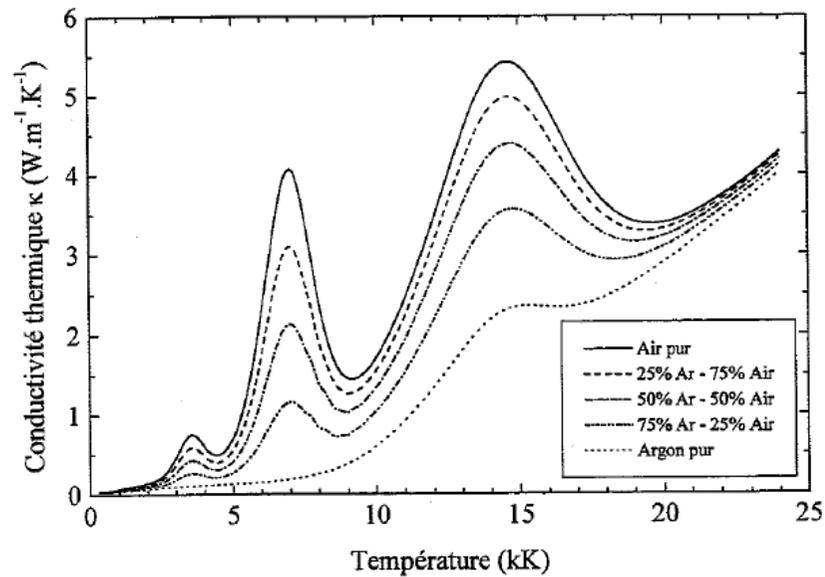
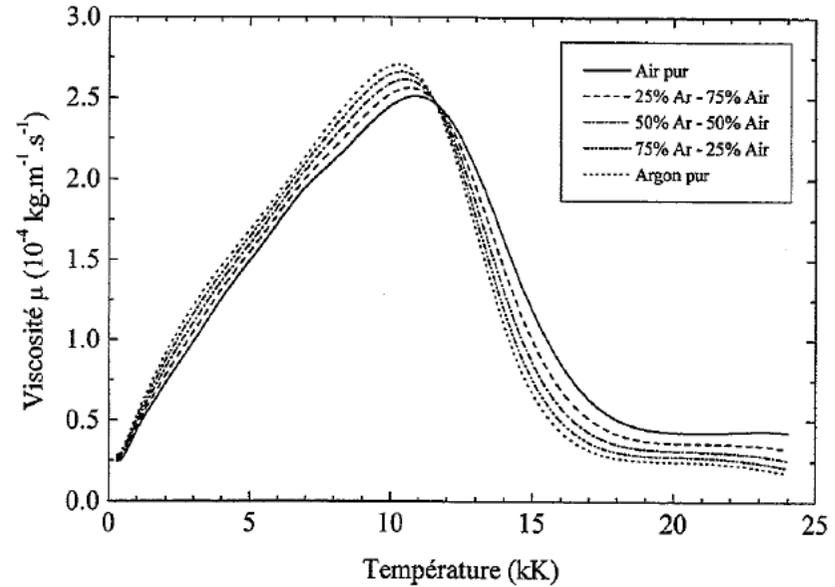
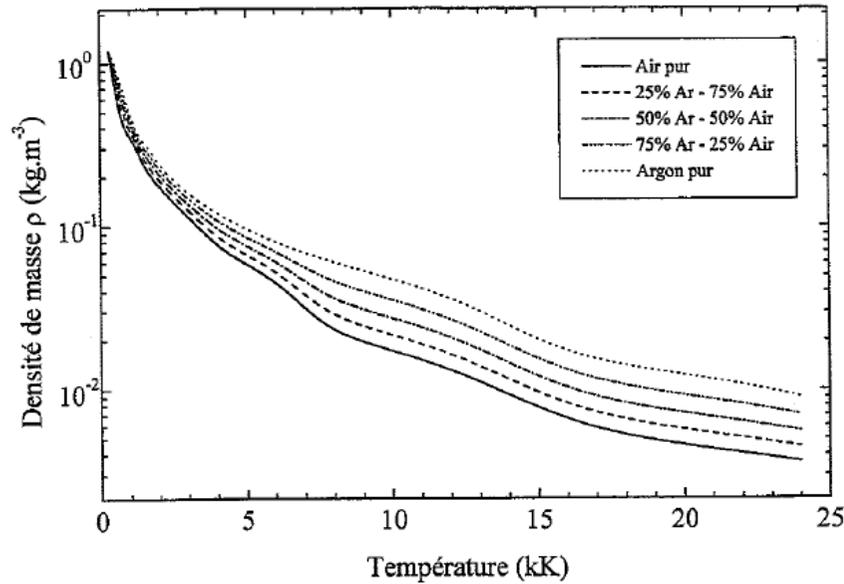
⇒ Equations de l'électromagnétisme +

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V$$

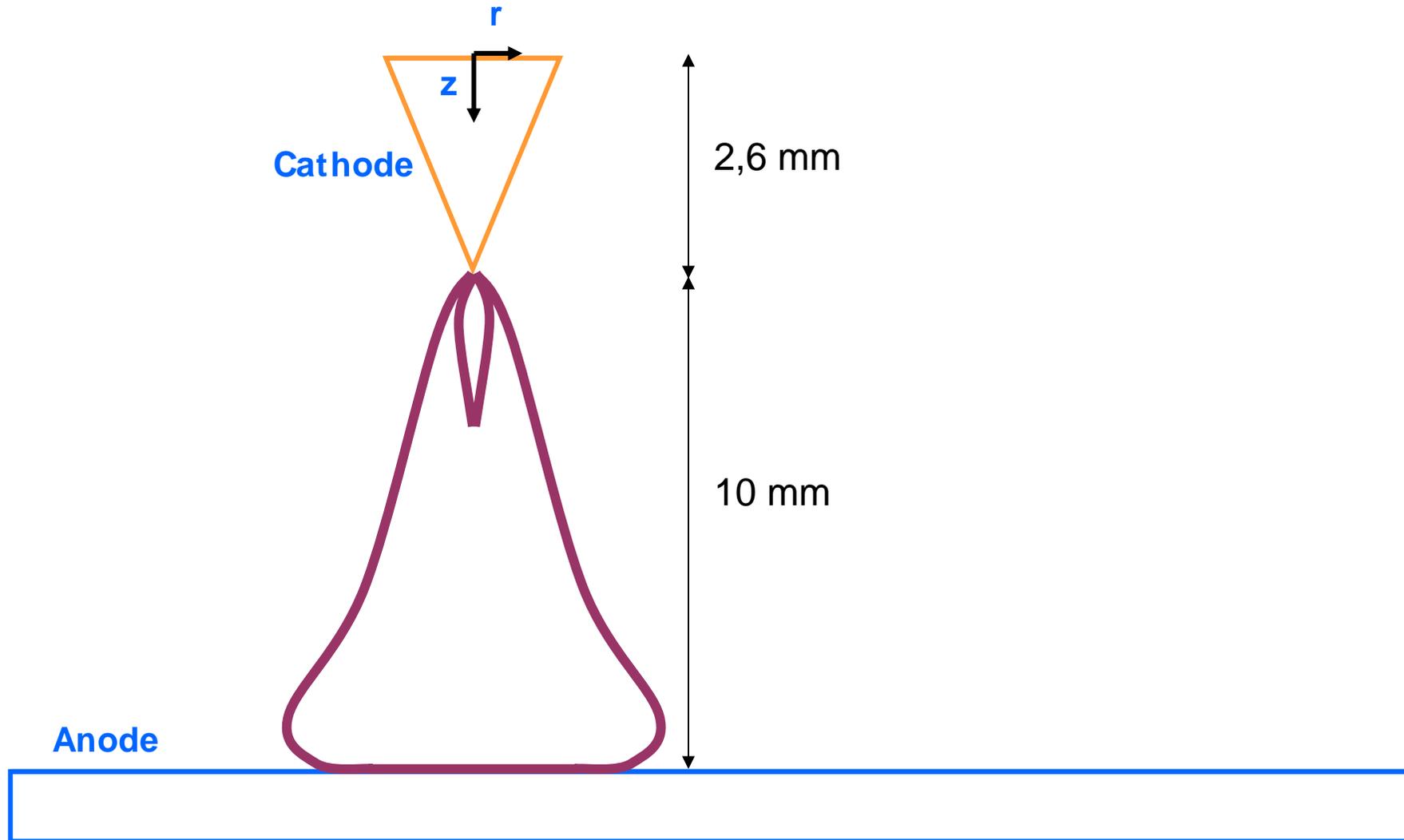
$$\vec{J} = \sigma \vec{\nabla} V$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$$

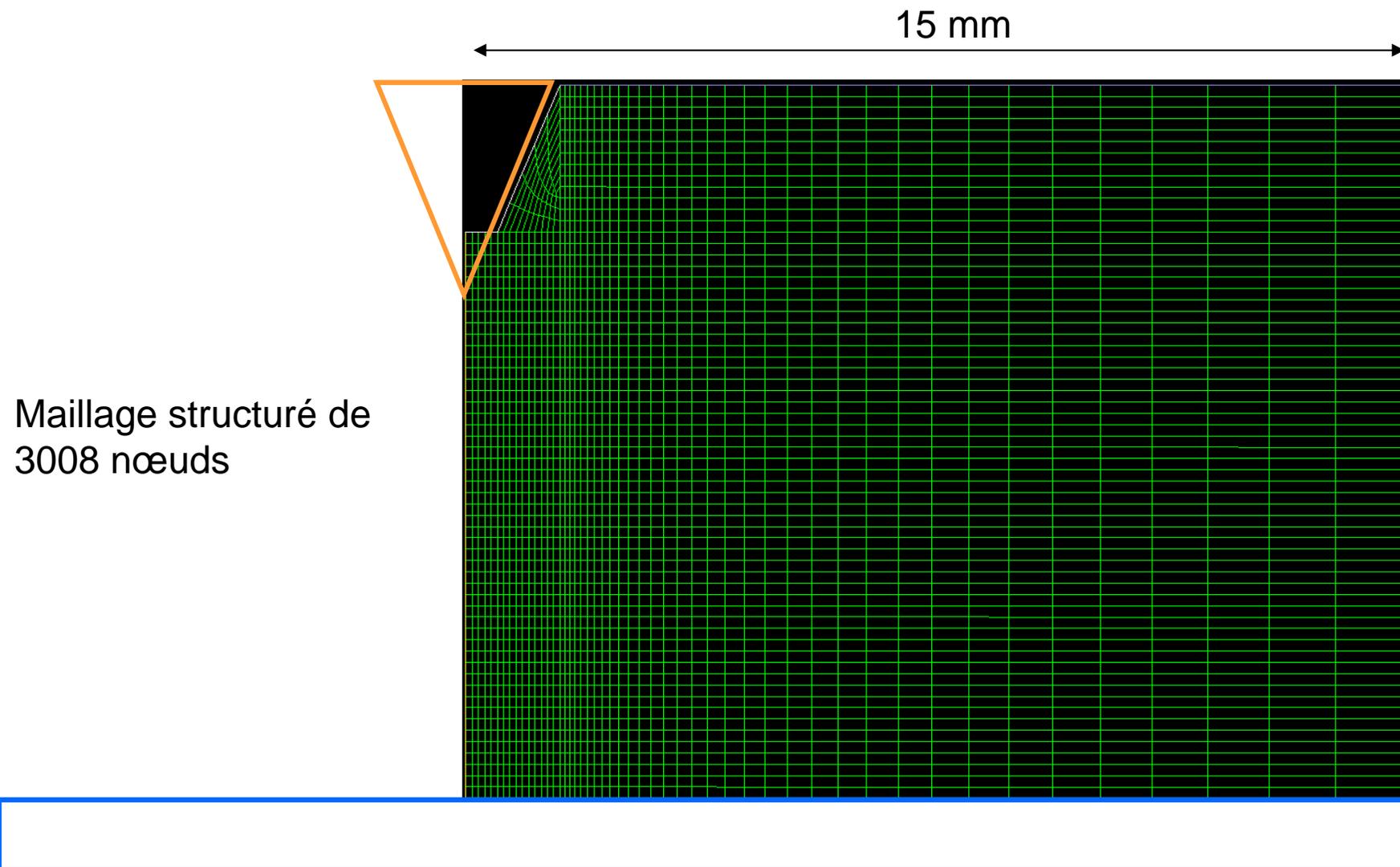
## Modèle mathématique de l'arc libre : *Les coefficients de transport...*



## Simulation arc libre : Schéma du dispositif



## Simulation arc libre : *Domaine de calcul*



## Simulation arc libre : *Conditions limites*

$$D=2 \text{ g/s (normal)}, T=310 \text{ K}, \frac{dV}{dz} = 0$$

Non glissement,  
 $T=1 \text{ kK}$

Non glissement,  
 $T=3 \text{ kK}$ ,  
 $I=200 \text{ A}$

Axe de symétrie

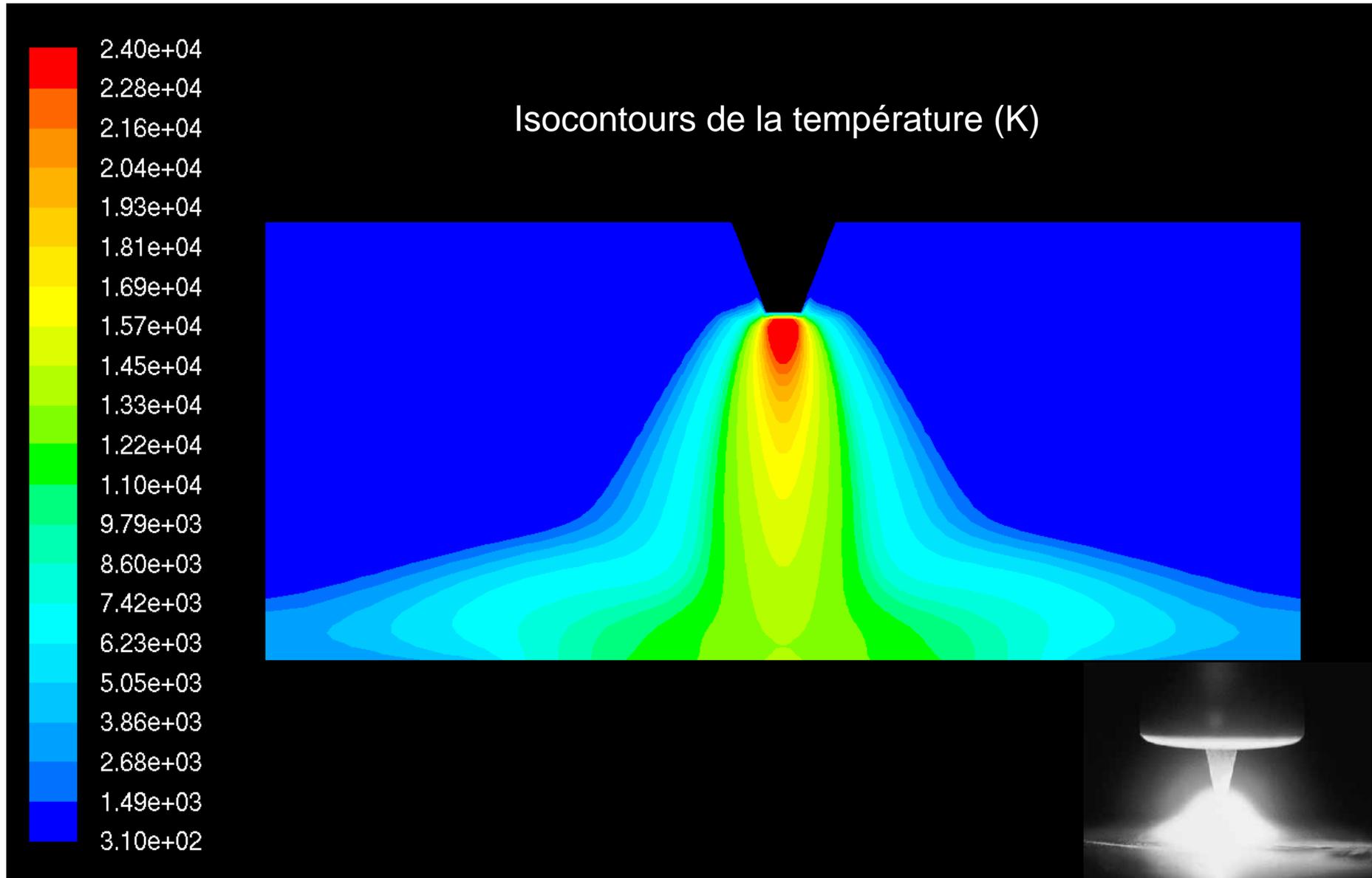
$P = 1 \text{ bar}$ ,  
 $T = 310 \text{ K}$

Non glissement,  $T(r)$ ,  $V=0$

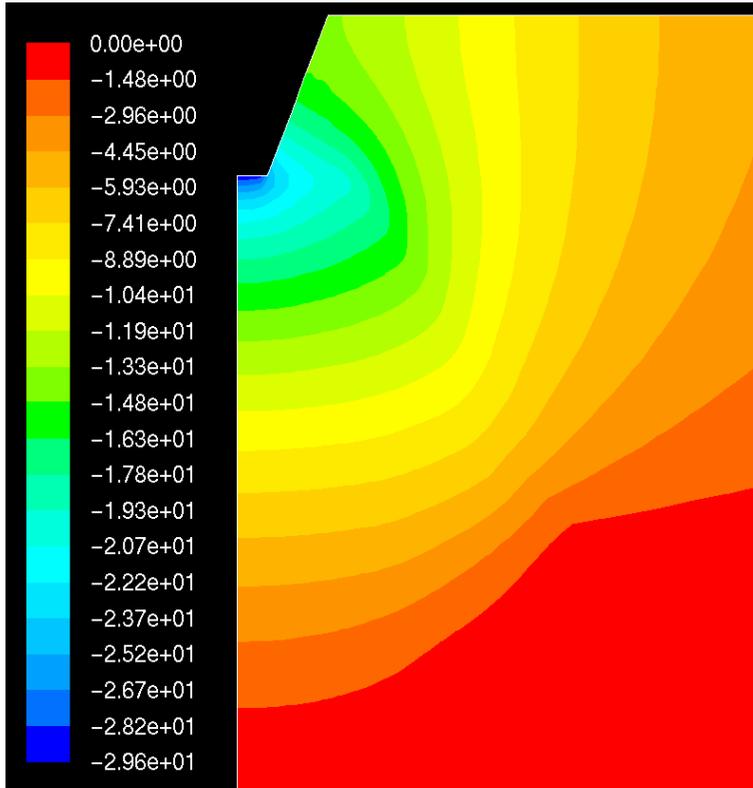
## Simulation arc libre : *Solveur*

- Résolution du système avec le logiciel  **FLUENT**  
INCORPORATED
- Méthode des volumes finis.
- Calcul série ou parallèle sur PC bureau, cluster de PC de la fédération EPEE, machine multicoeurs, machine HP Itanium, 32 ou 64 bits.
- Les performances varient en fonction des modèles... Il n'y pas de configuration unique idéale.
- Tests en cours avec logiciel COMSOL Multiphysics  basé sur la méthode des éléments finis.

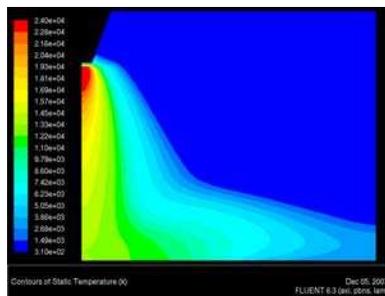
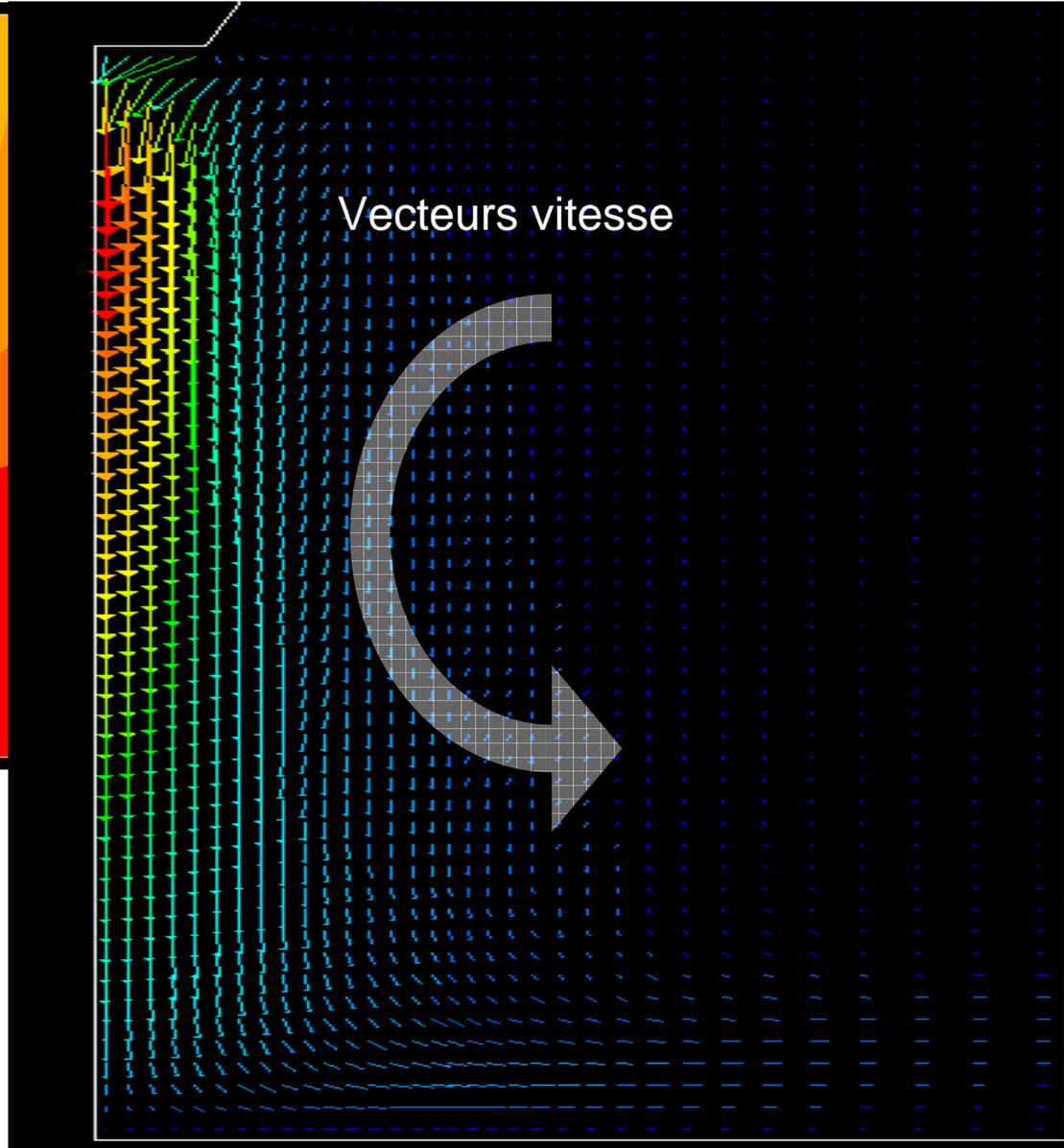
## Simulation numérique de l'arc libre : *Résultats*



## Simulation numérique de l'arc libre : Résultats



Potentiel électrique (V)



# Simulation numérique d'un arc électrique : premier pas...

**... vers les applications des  
plasmas thermiques**

## Simulation numérique de l'arc d'un disjoncteur

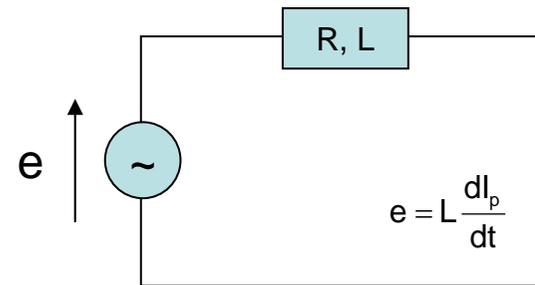
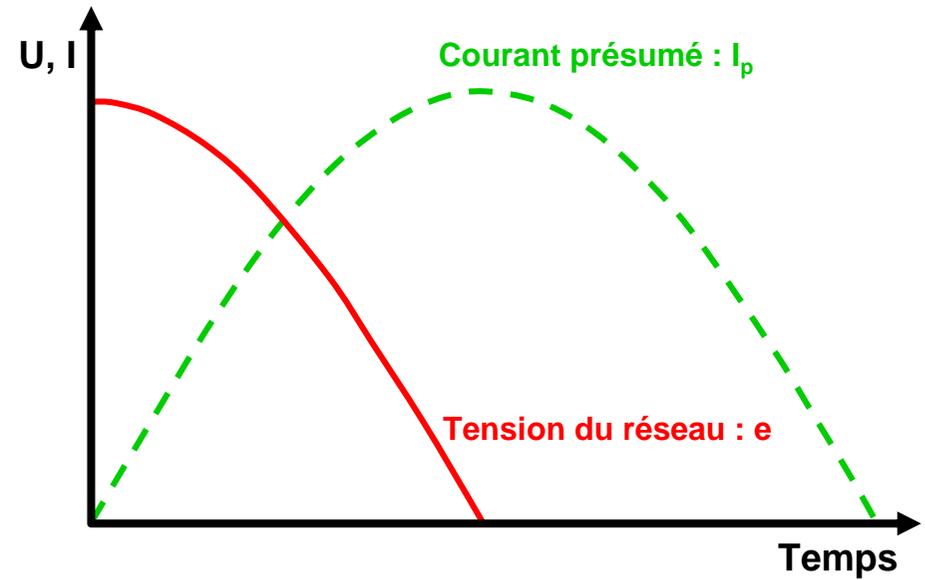
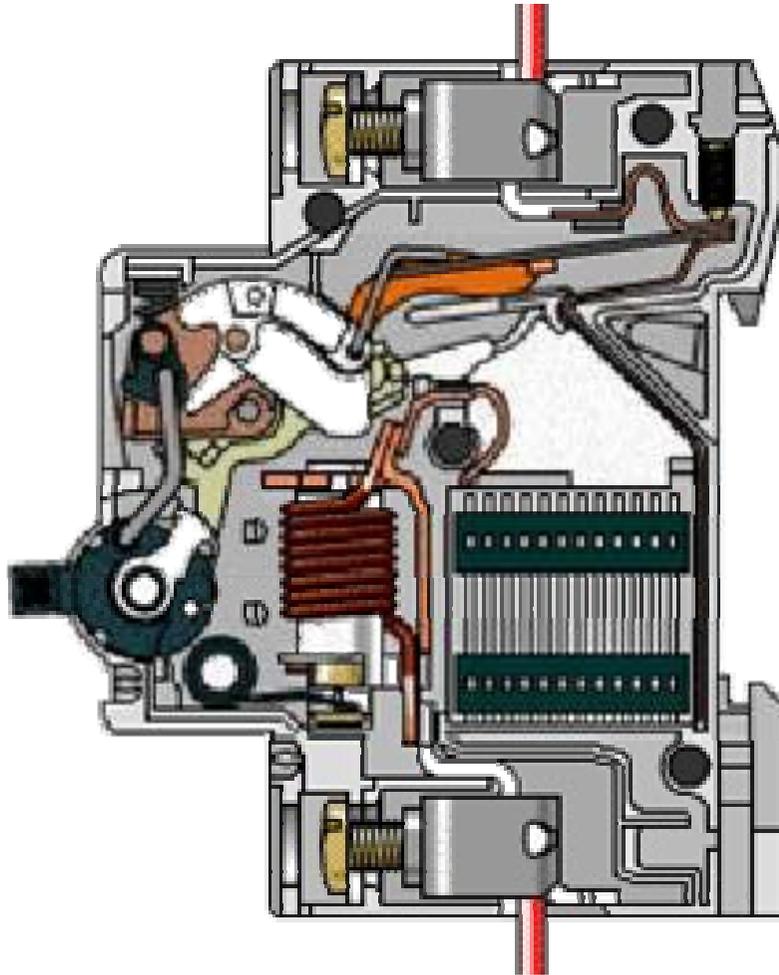


Dans un disjoncteur, à la séparation des contacts, il y a création d'un arc électrique qu'il faut éteindre rapidement.

Le modèle de l'arc du disjoncteur est celui de l'arc libre avec les modifications principales suivantes :

- Le calcul est cette fois **dépendant du temps**.
- On ne peut généralement plus négliger les **phénomènes de turbulence**.
- Le gaz plasmagène est plus complexe.

## Simulation numérique de l'arc d'un disjoncteur

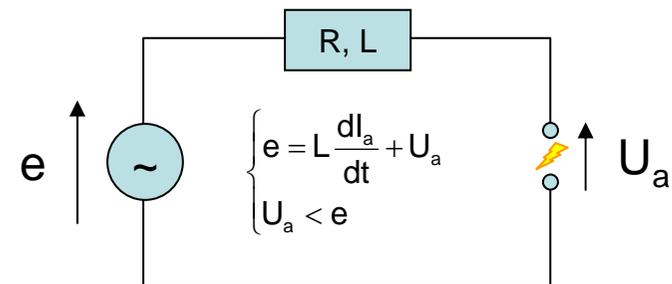
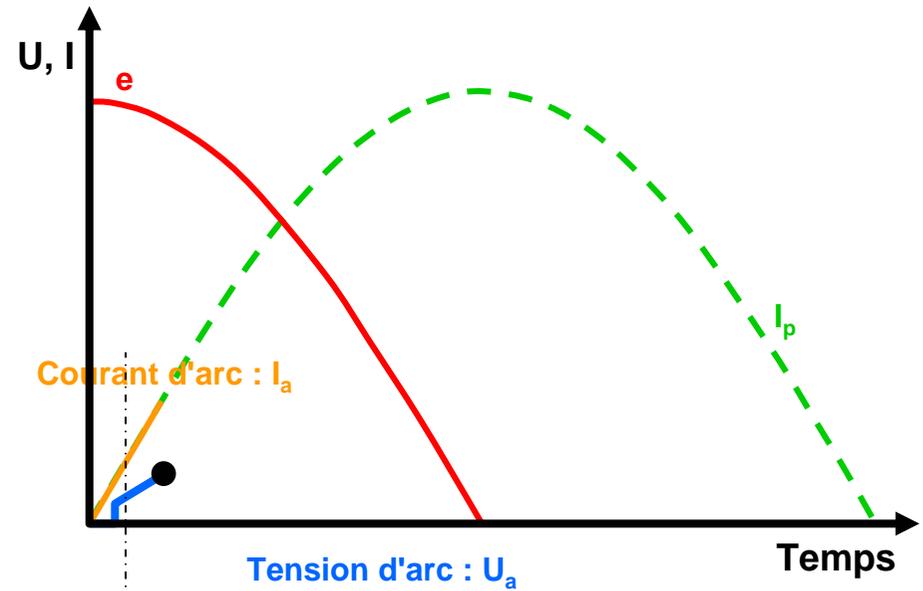
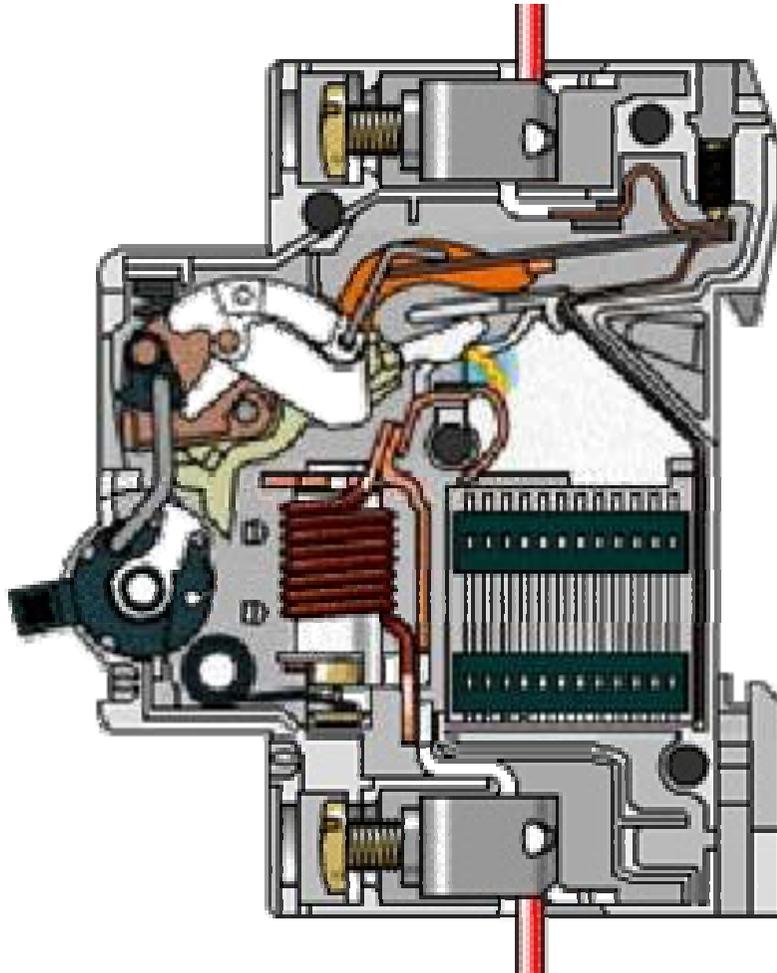


$$e = L \frac{di_p}{dt}$$

On néglige R

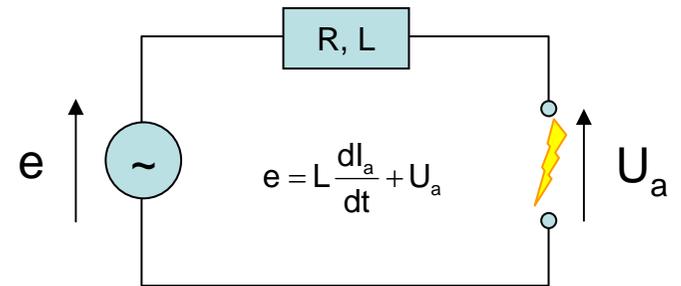
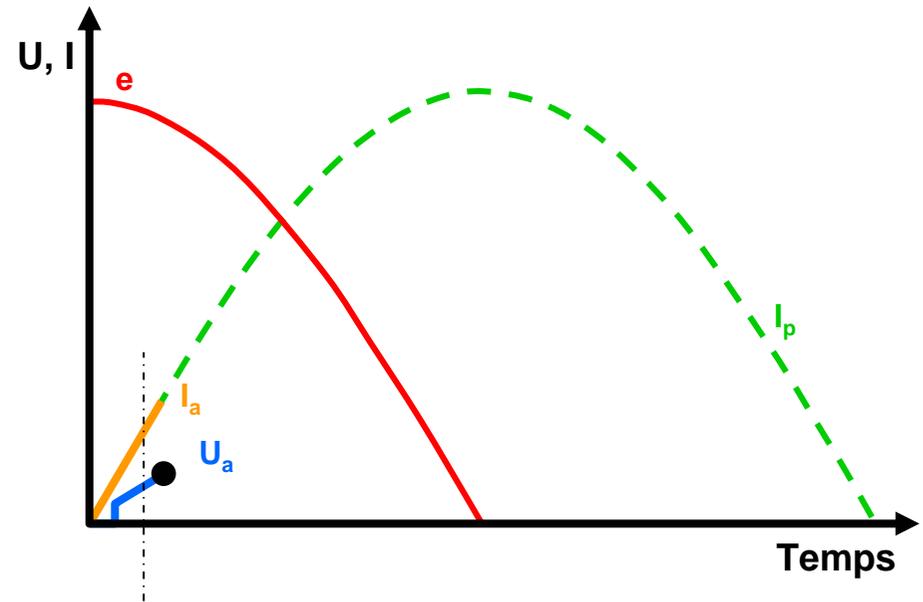
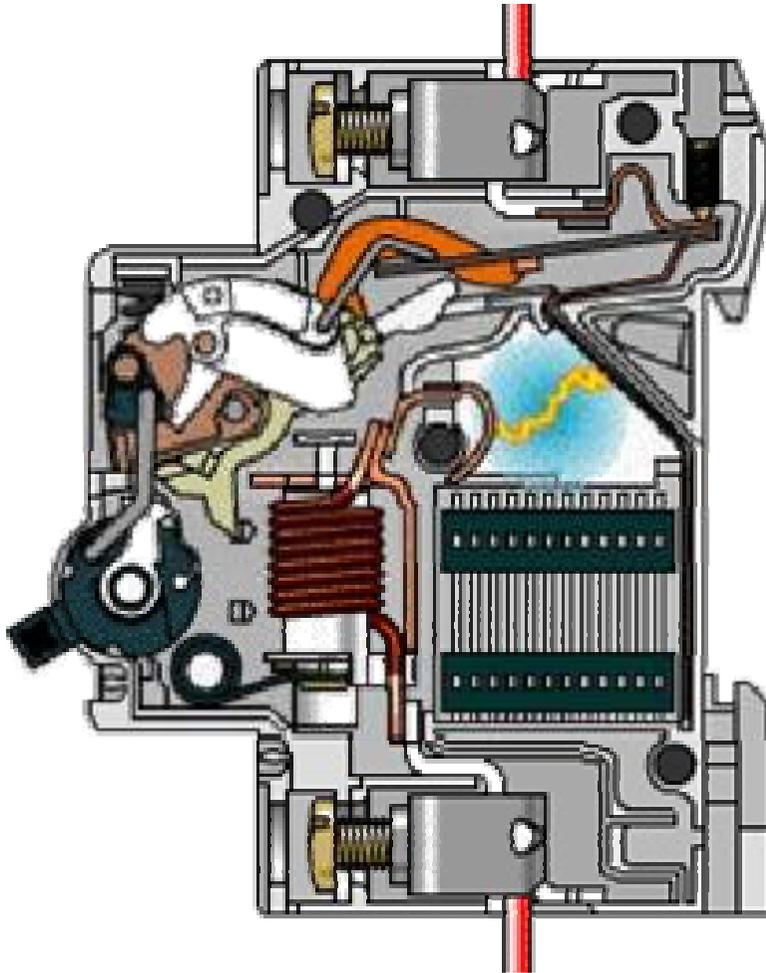
Avant le déclenchement sur court-circuit

## Simulation numérique de l'arc d'un disjoncteur



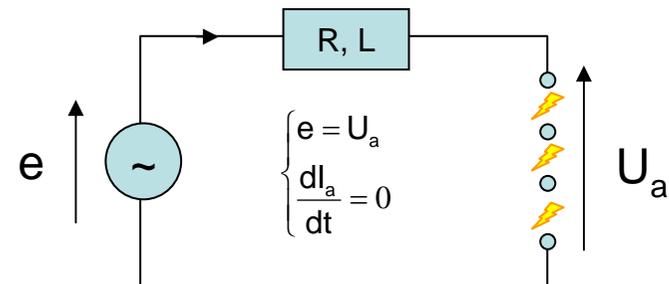
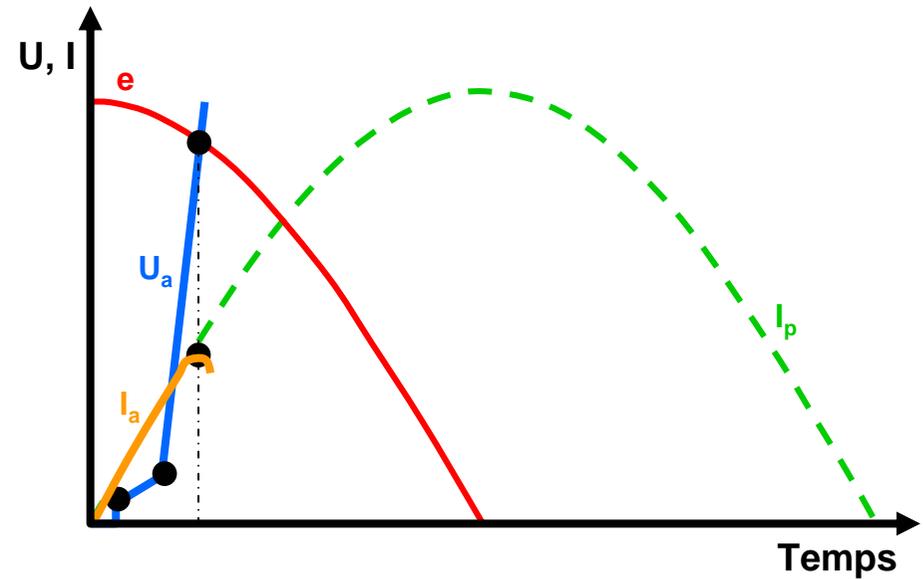
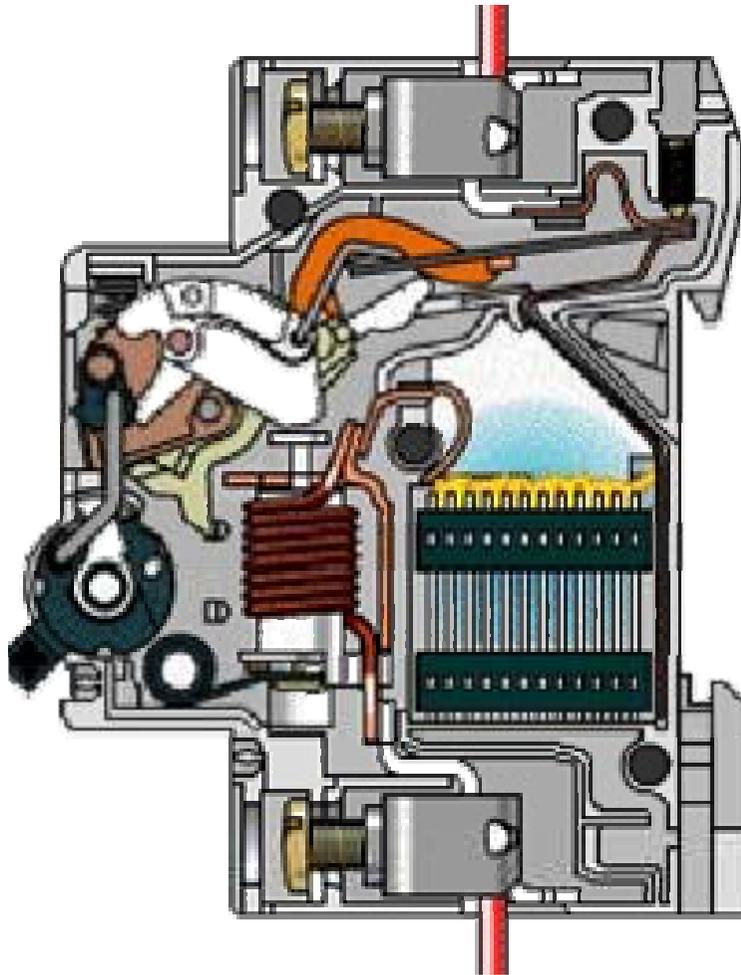
Ouverture des contacts  $\Rightarrow$  Pont métallique fondu  $\Rightarrow$  Plasma

## Simulation numérique de l'arc d'un disjoncteur



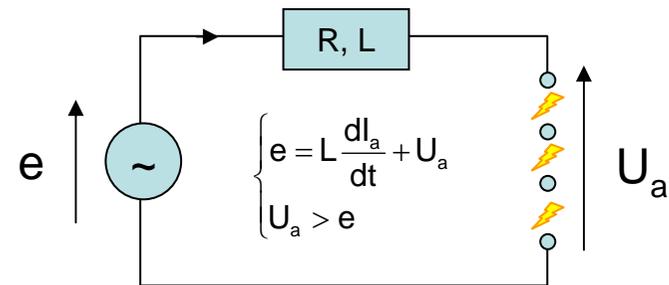
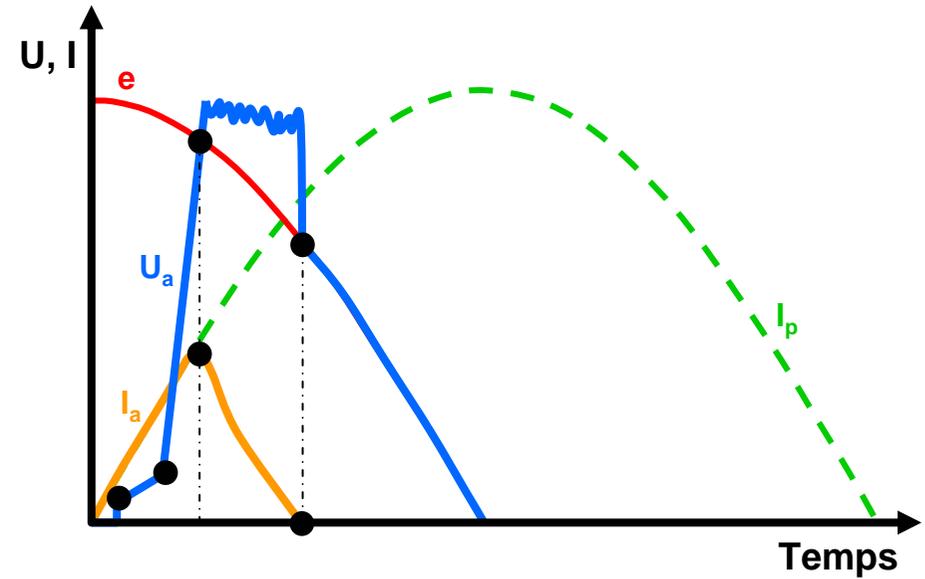
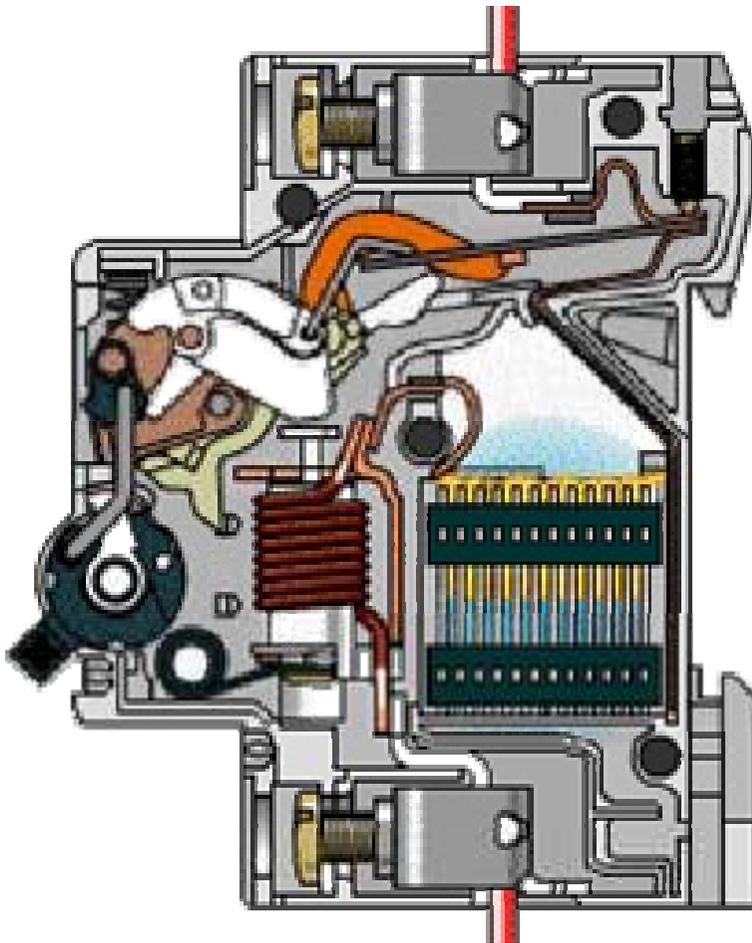
Commutation  $\Rightarrow$  Déplacement de l'arc

## Simulation numérique de l'arc d'un disjoncteur



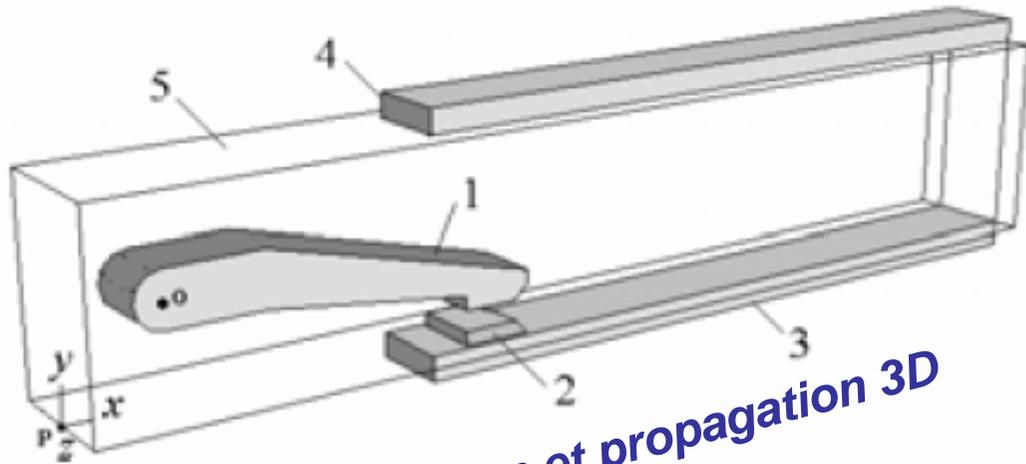
Allongement de l'arc  $\Rightarrow$  Insertion dans chambre de coupure  $\Rightarrow$  Fractionnement

## Simulation numérique de l'arc d'un disjoncteur



Sectionnement de l'arc  $\Rightarrow$  Extinction

# Simulation numérique de l'arc d'un disjoncteur



Commutation et propagation 3D

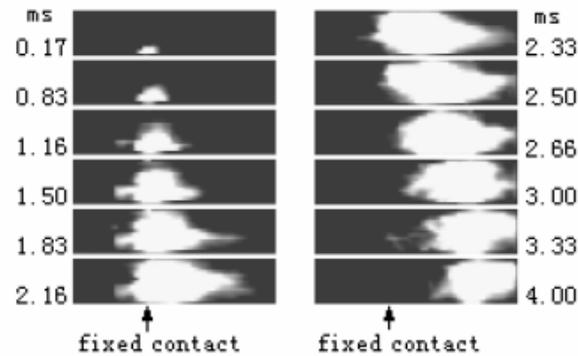
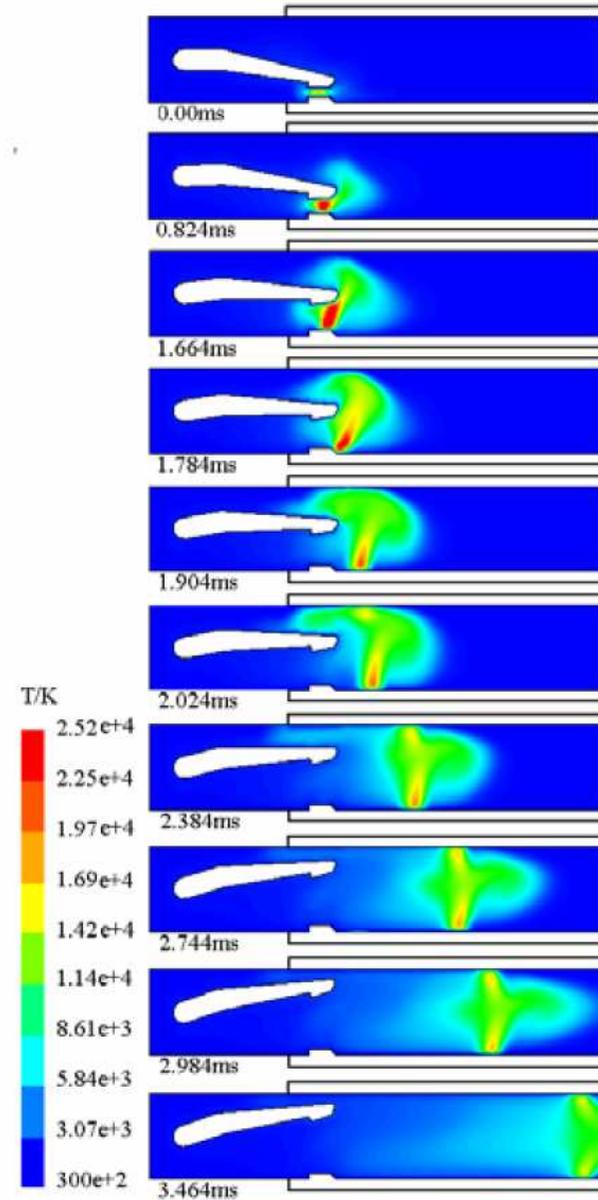
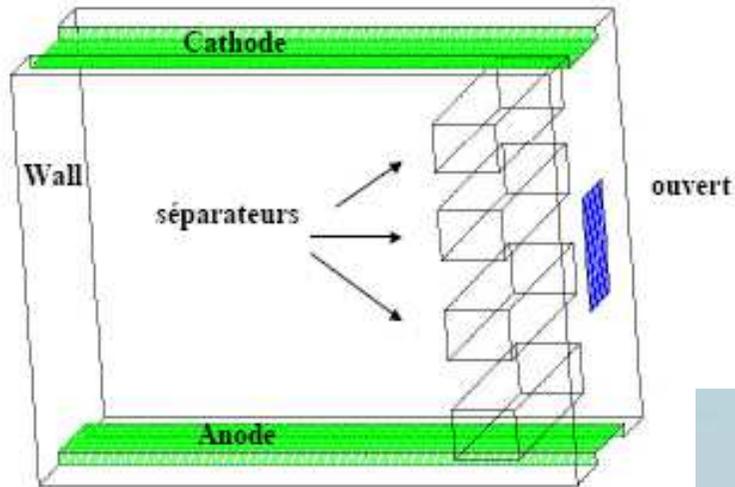


Fig.3 Movie of the arc motion recorded by high-speed camera

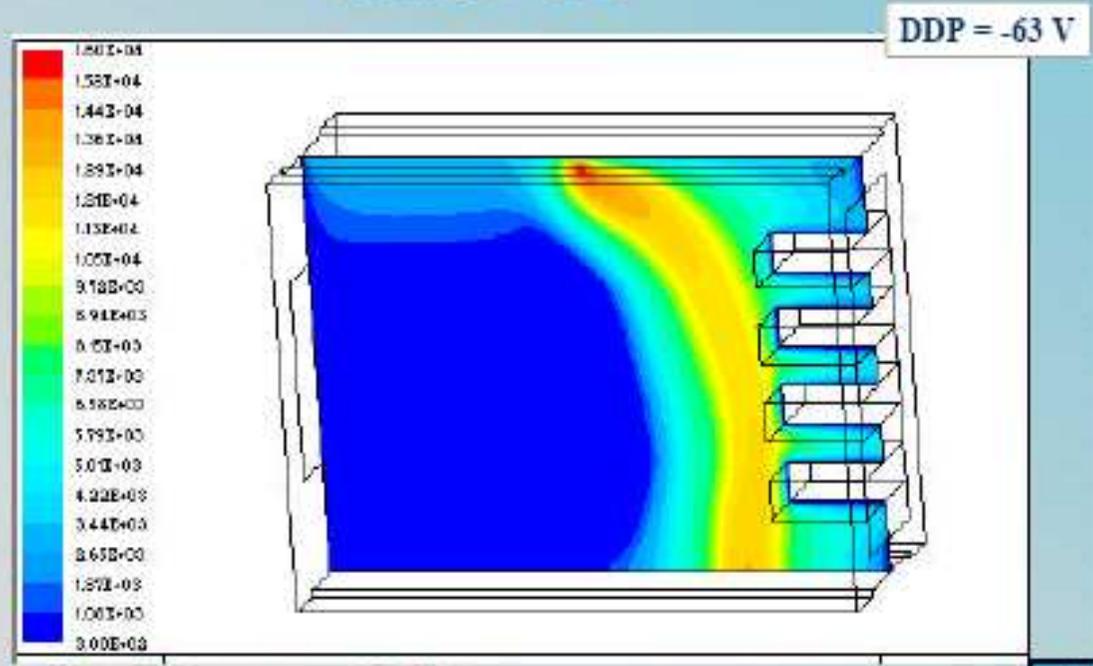


## Simulation numérique de l'arc d'un disjoncteur

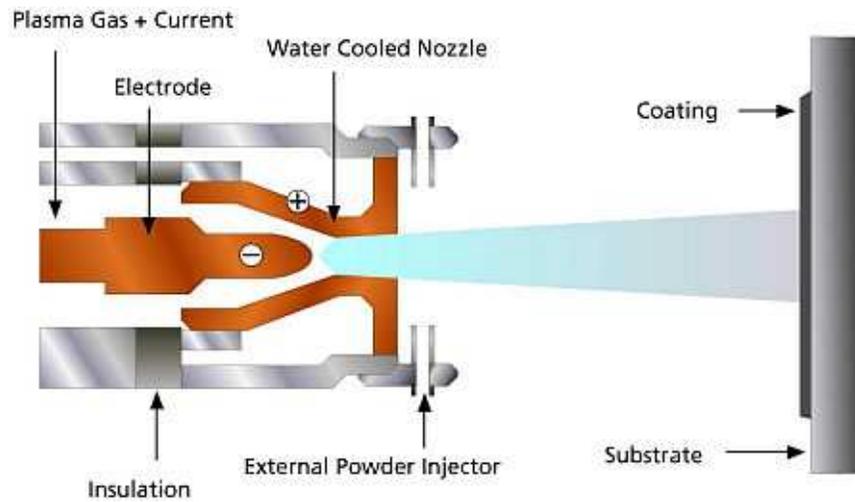


### *Interaction avec les séparateurs*

Champ de température - 100A  
(soufflage:  $v = 2\text{m/s}$ )



## Simulation numérique d'une torche de projection

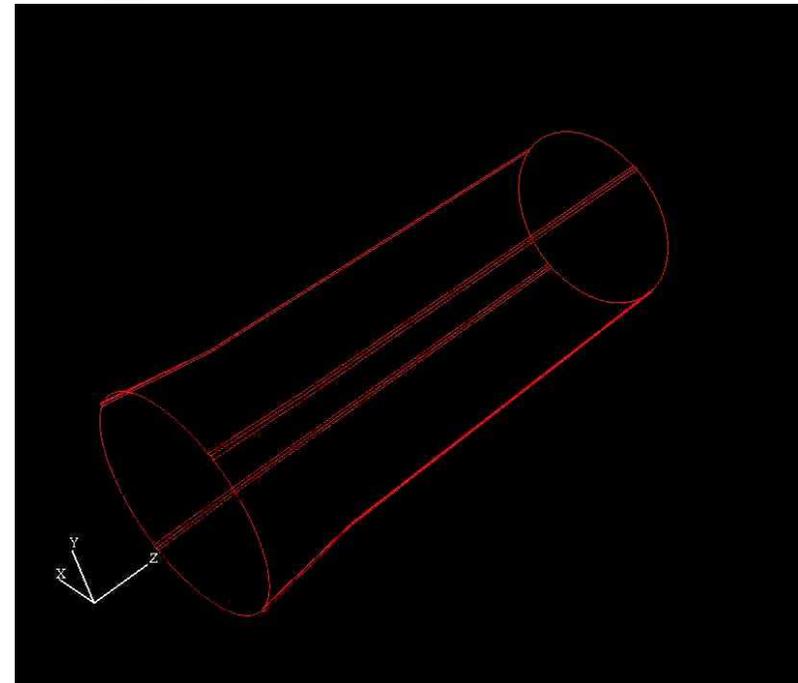
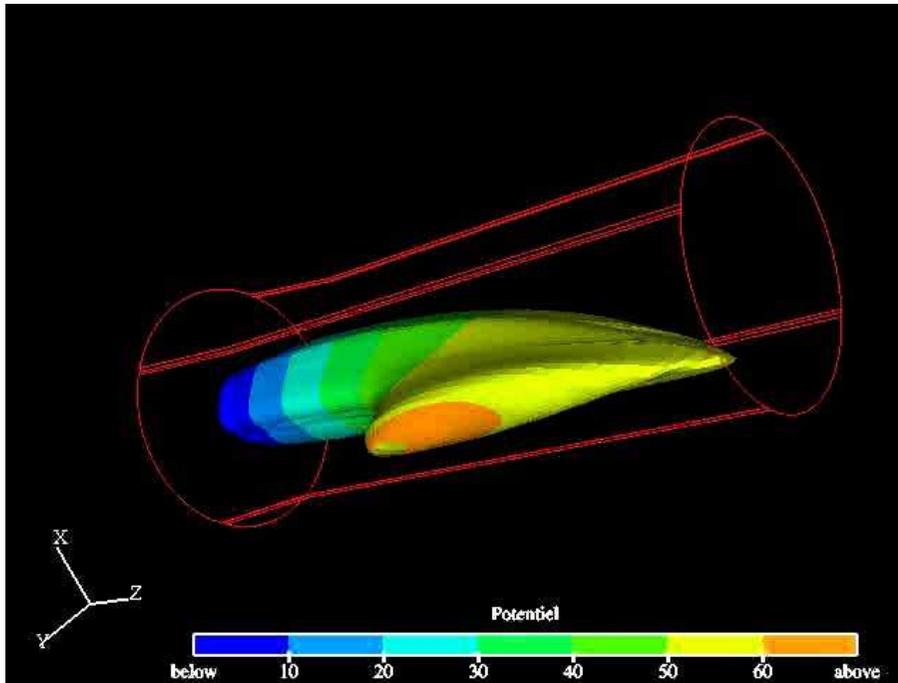
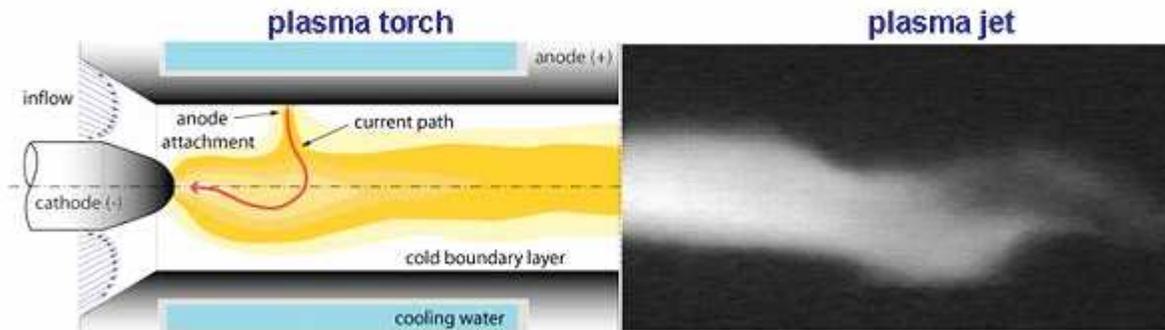


La projection thermique permet de faire des traitements de surface en projetant des poudres partiellement fondues dans un jet de plasma.

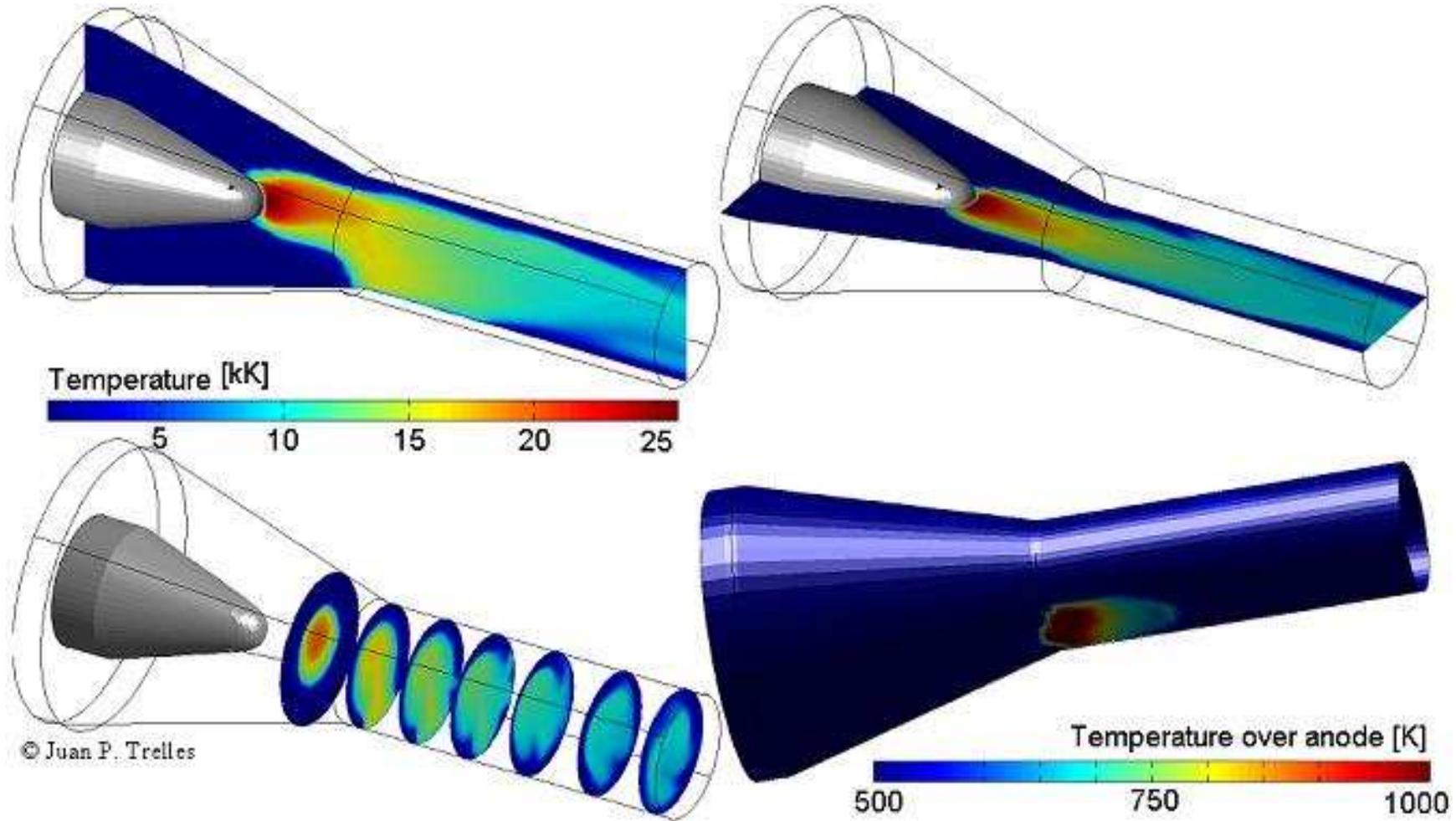
Le modèle de l'arc de la torche est celui de l'arc libre avec les modifications principales suivantes :

- Le calcul est cette fois **dépendant du temps**.
- On ne peut généralement plus négliger les **phénomènes de turbulence**.
- Les électrodes sont à 90°.

## Simulation numérique d'une torche de projection

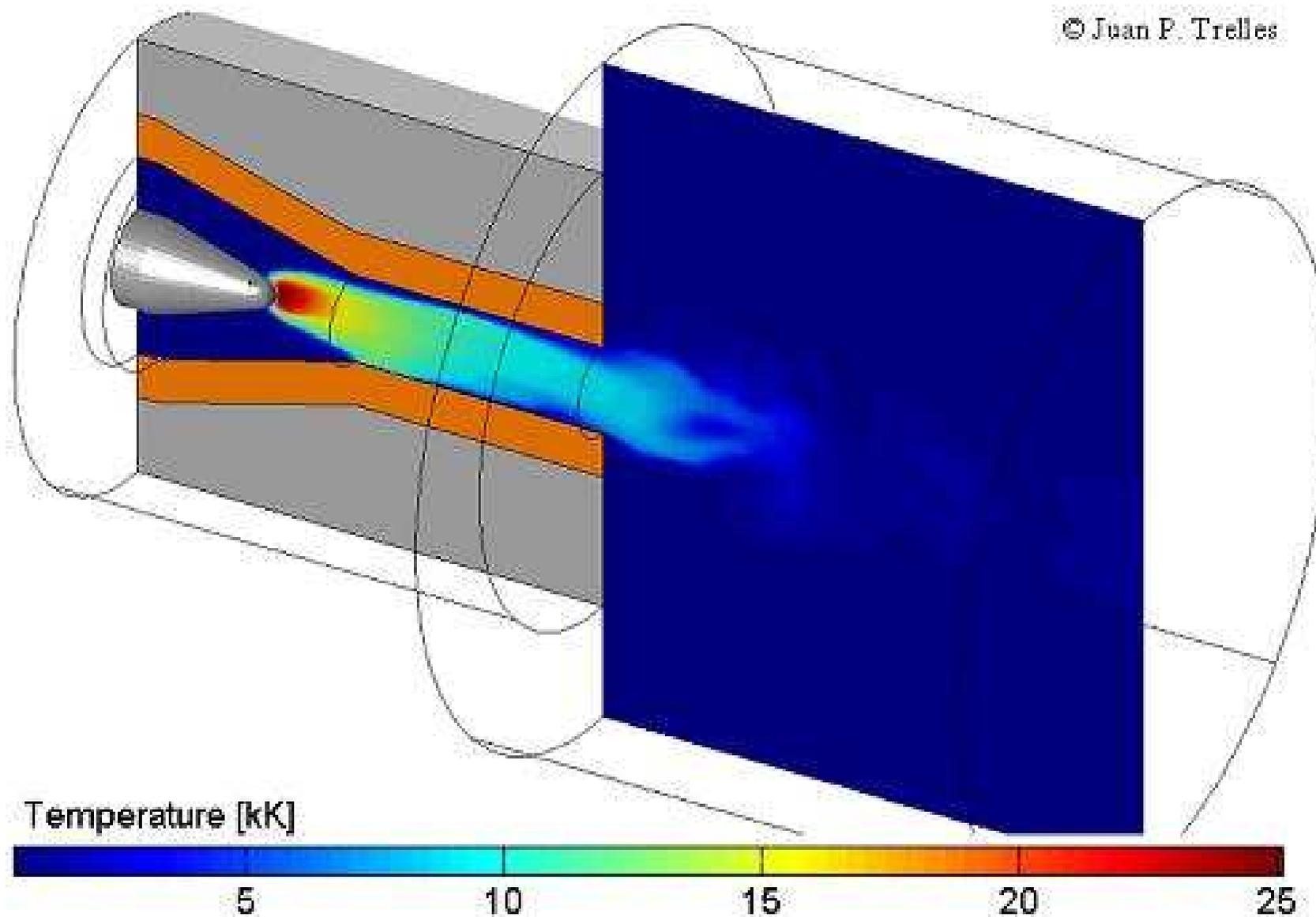


## Simulation numérique d'une torche de projection



## Simulation numérique d'une torche de projection

© Juan P. Trelles

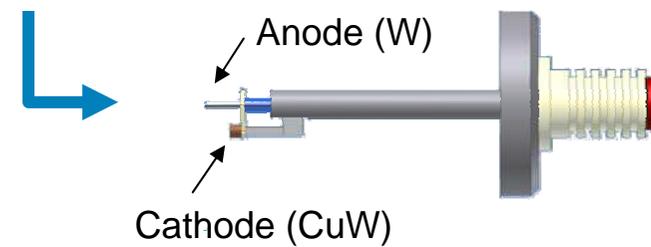
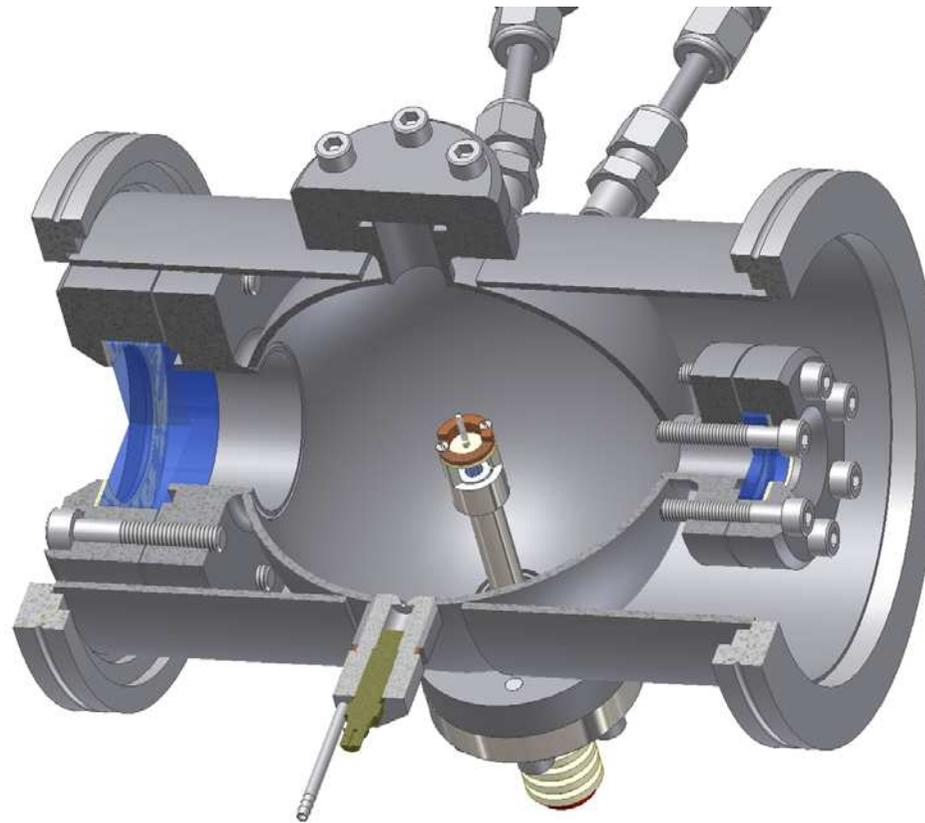


## Vers d'autres applications : *Simulation de l'allumage*

- Volume: **300 cm<sup>3</sup>**

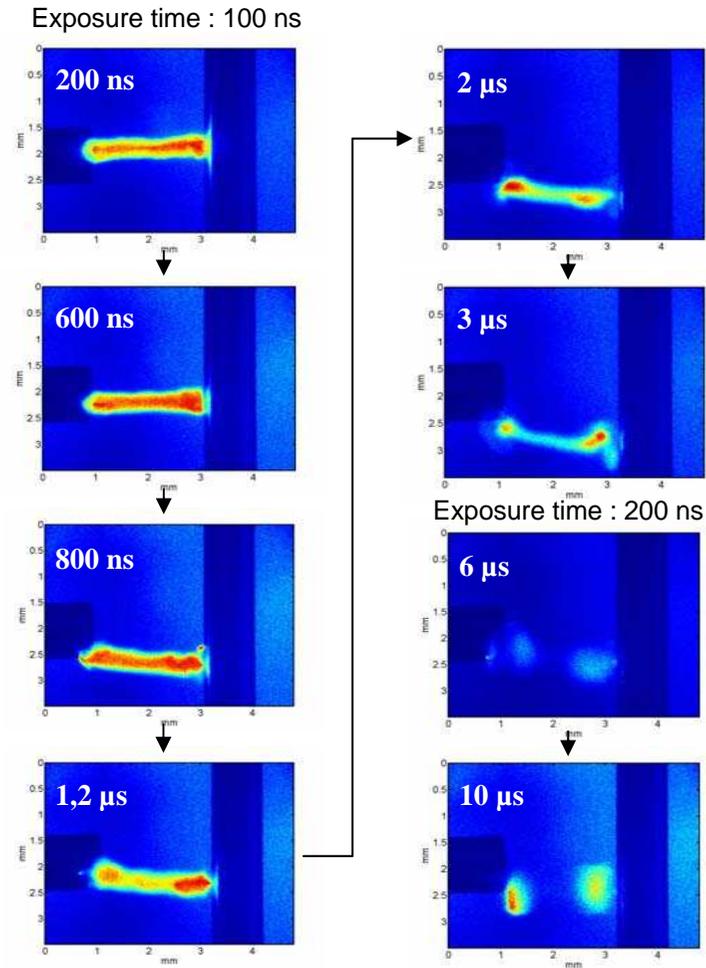
- Gaz: **air, methane** and **air/methane**

- Pression initiale : **1 to 4 bars**



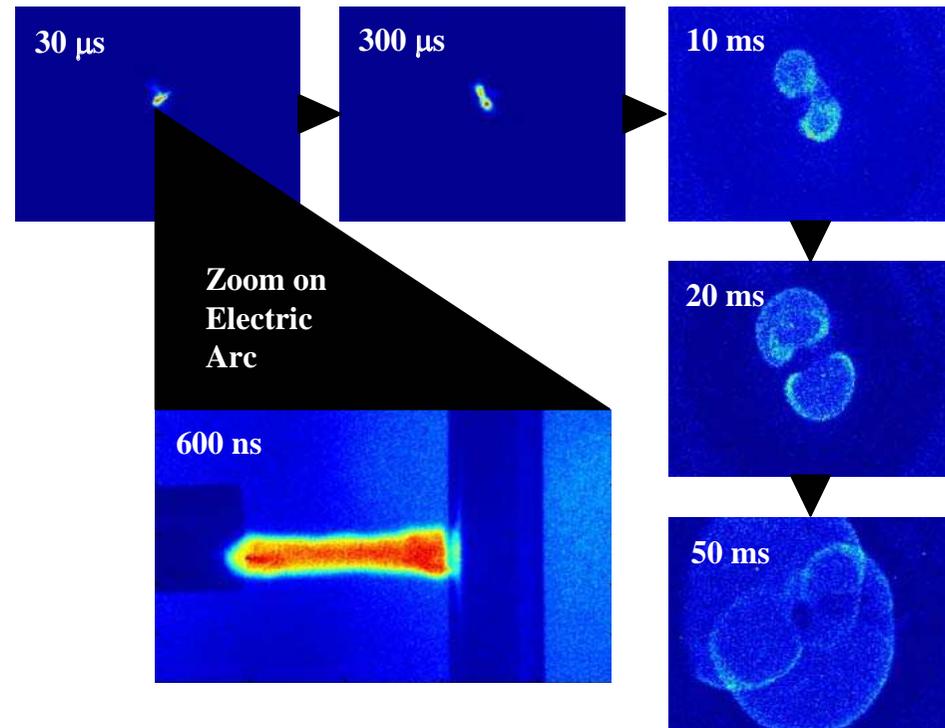
## Vers d'autres applications : Simulation de l'allumage

### Spark photos



⇒ Plasma channel radius ~ 0.2 mm

### Combustion photos

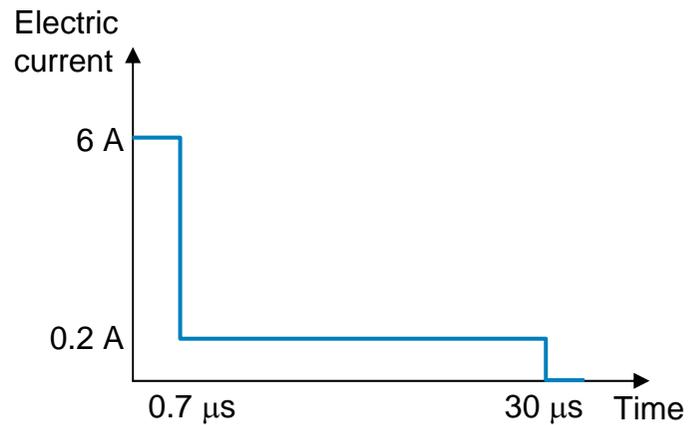


⇒ Combustion fully ignited ~ 1 ms

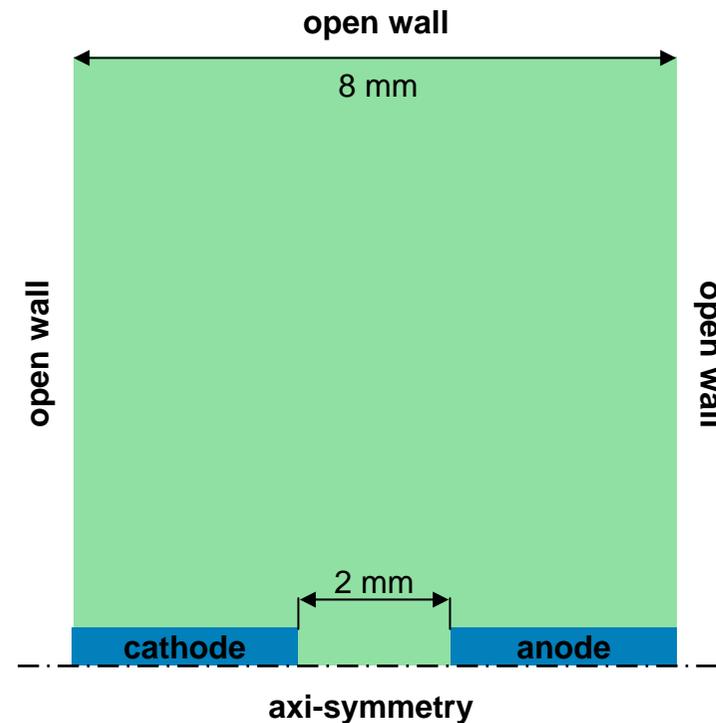
## L'arc électrique et les plasmas thermiques

### ● Boundary conditions:

- Open walls (1 bar)
- Electrodes (no slip, 300 K)
- Zero potential on the cathode
- Electric current on the anode



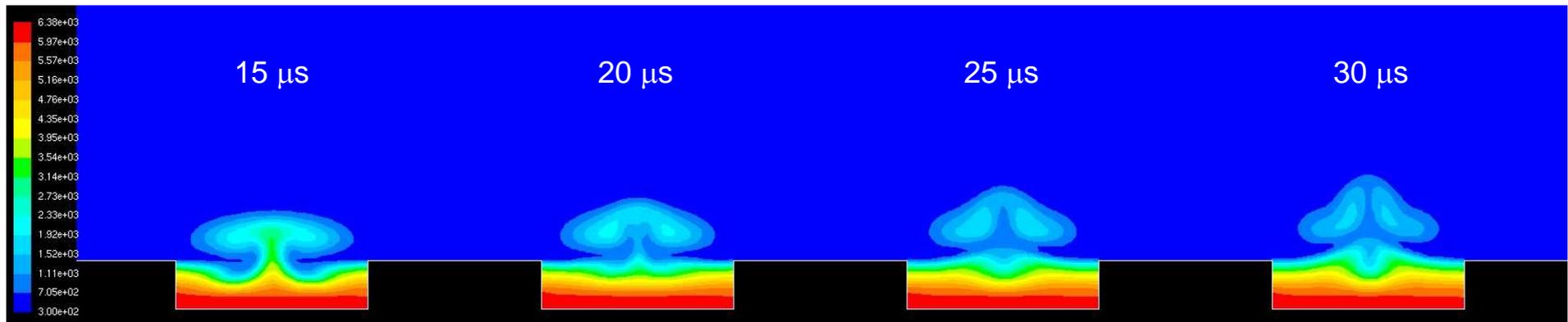
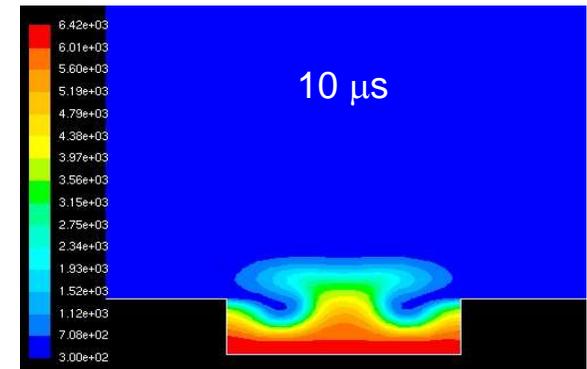
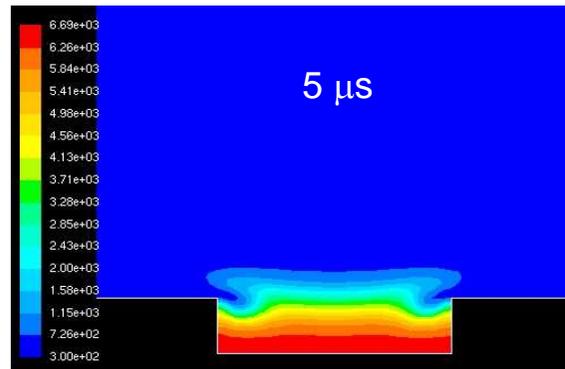
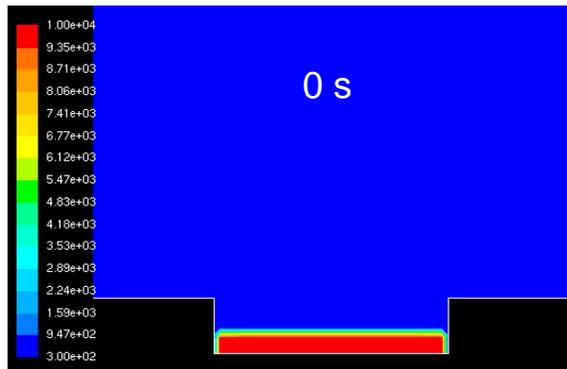
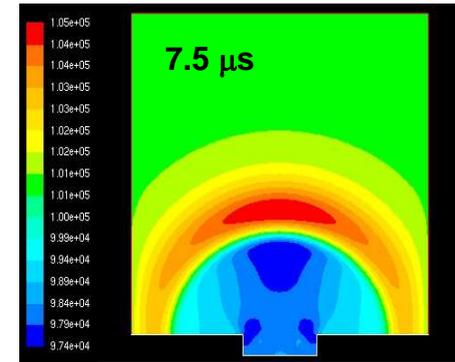
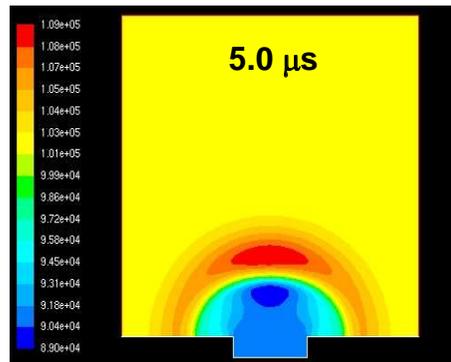
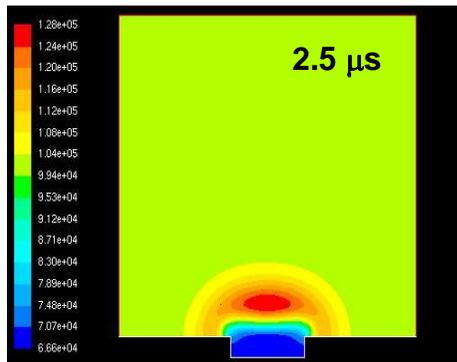
### ● Computation domain



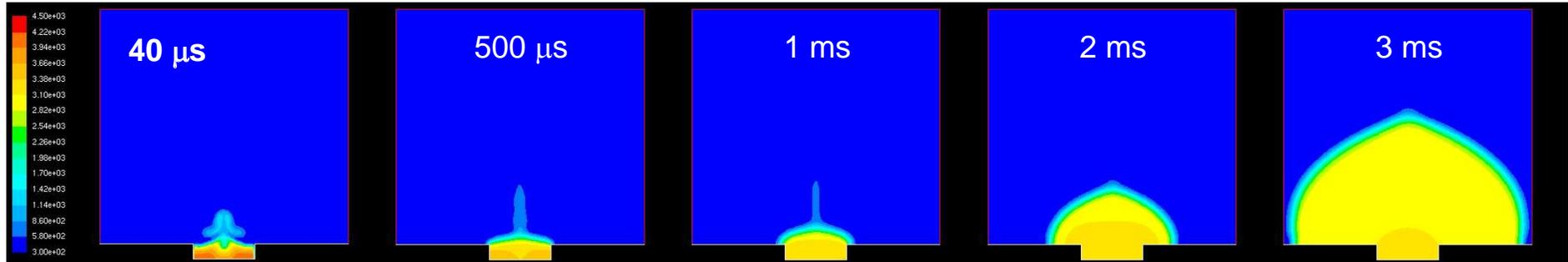
### ● Initial conditions:

- Methane/air mixture ( $\phi=1$ ,  $T=300\text{K}$ )
- Plasma channel between electrodes ( $r=0.2\text{ mm}$ ,  $T=10\text{kK}$ )
- Combustion model enabled after 40 or 60 μs

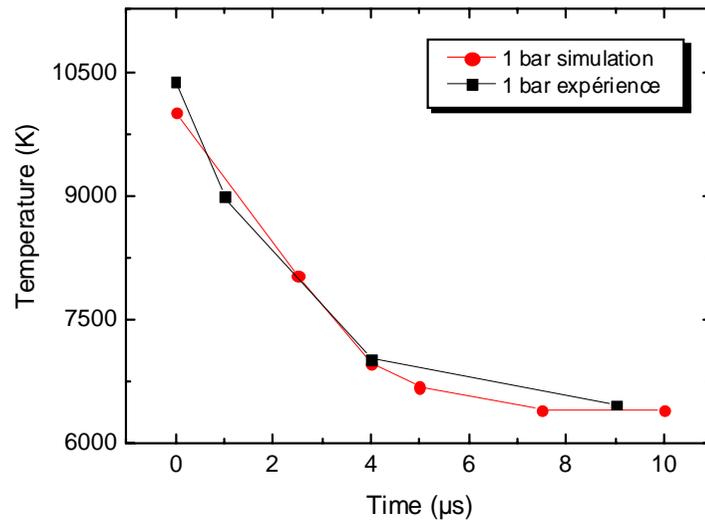
## Vers d'autres applications : Simulation de l'allumage



## Vers d'autres applications : *Simulation de l'allumage*

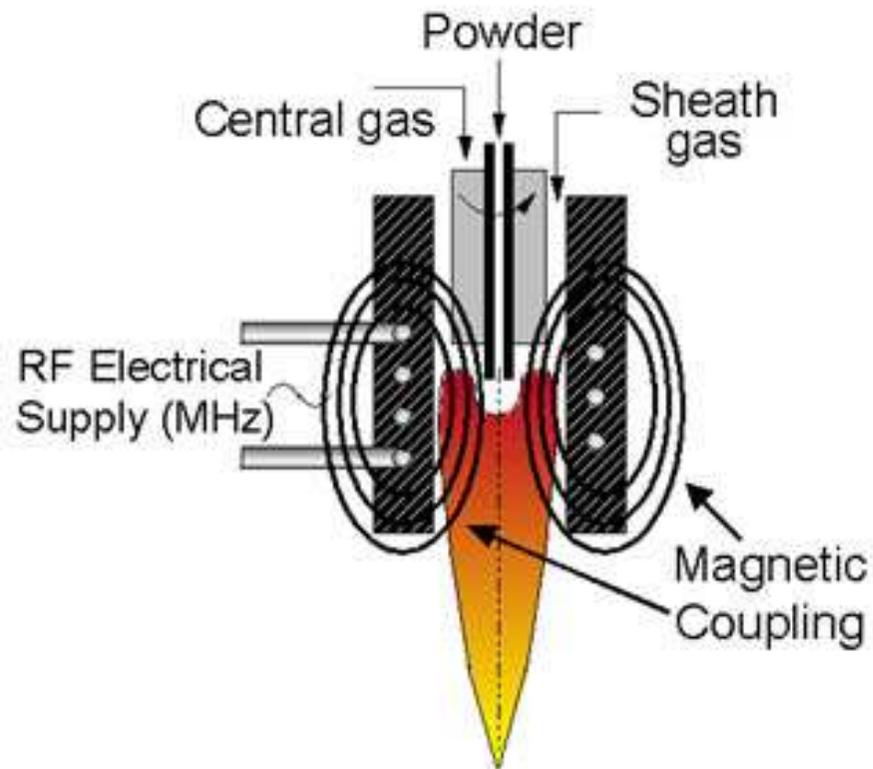


### Experimental validation



Modèle de l'arc électrique couplé un modèle de combustion : équations de conservation des espèces chimiques + schéma réactionnel

## Vers d'autres applications : *Torche ICP*



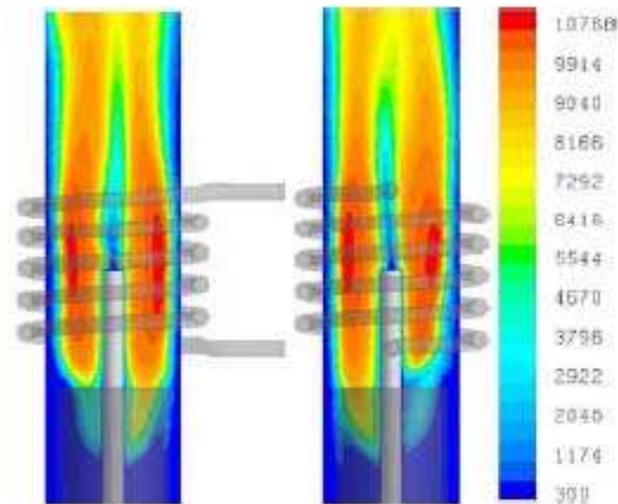
Dans ce cas, l'excitation du plasma ne se fait plus par une décharge continue mais par un couplage inductif à une alimentation RF. Les équations de l'électromagnétisme sont modifiées ainsi que les termes de couplage.

## Vers d'autres applications : *Torche ICP*

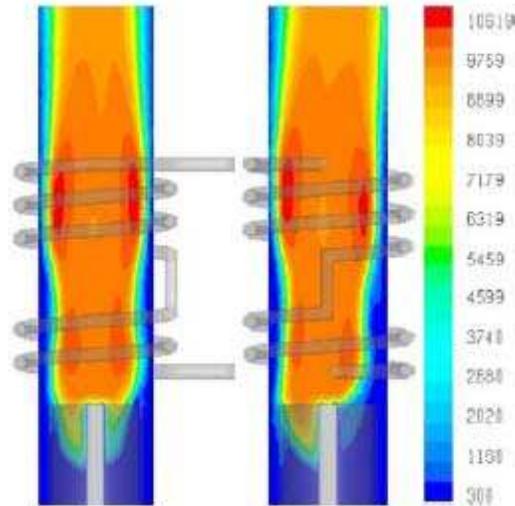


$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu_0 \sigma (\nabla V + \partial \mathbf{A} / \partial t) + \mu_0 \mathbf{J}^{\text{coil}} = 0,$$
$$\nabla \cdot [\sigma (\nabla V + \partial \mathbf{A} / \partial t)] = 0.$$

$$\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t - \nabla V, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}.$$



## Vers d'autres applications : *Torche ICP*



Profils de température

