

Projet AEE / LAPLACE

# Etude expérimentale de la dynamique d'un arc électrique impulsionnel évoluant entre deux rails en présence de pastilles $\text{AgC}_4$ ou $\text{SnO}_2$ et d'un champ magnétique



Pauline Pau Carpintero (Stage M1)  
Malyk Benmouffok  
Pierre Fort  
Pierre Freton  
Jean-Jacques Gonzalez



Patrice Joyeux



Moussa Chnani  
Aurore Risacher



Pascal André

Projet financé par l'Association Arc Electrique

- Etudier expérimentalement le déplacement d'un arc dans différentes situations
  - ❖ En présence d'un champ magnétique extérieur
  - ❖ Pour différentes natures de pastilles.
- Modéliser le déplacement de l'arc
  - ❖ En prenant en compte la chute de tension des gaines

## Motivations



« Disjoncteur basse tension »



<https://www.electrotechnique5.com/2019/09/intervention-sur-les-jeux-de-barres.html>



« Jeux de barres »

## AXE EXPERIMENTAL

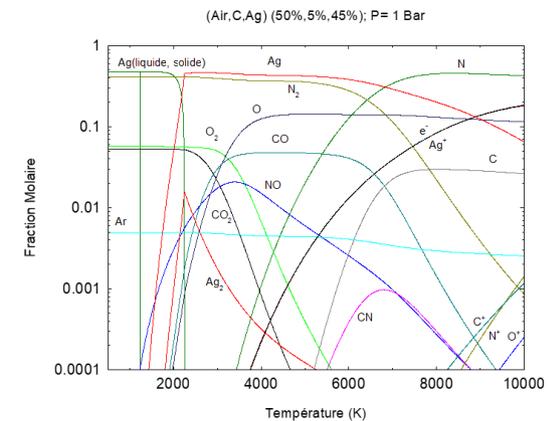


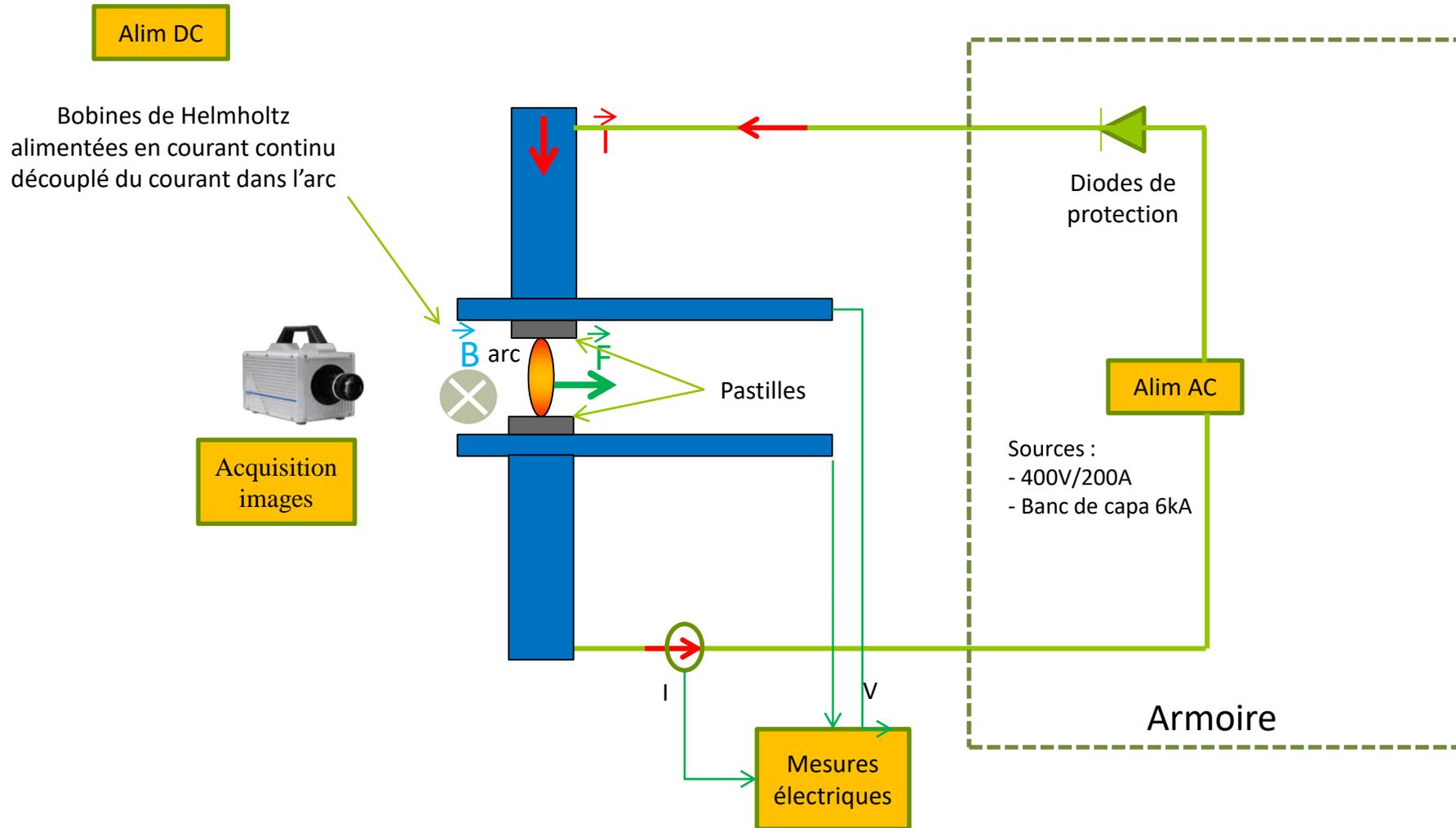
- Mise en place d'un dispositif expérimental
- Etude du comportement de l'arc en présence de pastille
- Influence d'un champ magnétique extérieur.

## AXE THEORIQUE



- Calcul de compositions
- Modèle MHD et résultats





**Voyons à présent chacun des éléments de ce schéma**

## Source impulsionnelle (Réalisée spécifiquement pour le projet)



### Banc capacitif

- Circuit LC ( $C=30\text{mF}$ ,  $350\mu\text{H}$ ) chargé sous 300V générant lors de la décharge une demi alternance de courant 50Hz pouvant atteindre 1.2kA crête.

⇒ Générer l'arc électrique

⇒ Alimentation de la maquette



## Sources DC

- 1 Alimentations DC 200A -400V

⇒ Générer le champ magnétique extérieur

⇒ Alimentation des bobines de Helmholtz

- Courant dans le bras mobile
- Courant total
- Tension rail/rail
- Tension rail/bras

- Acquisition d'images



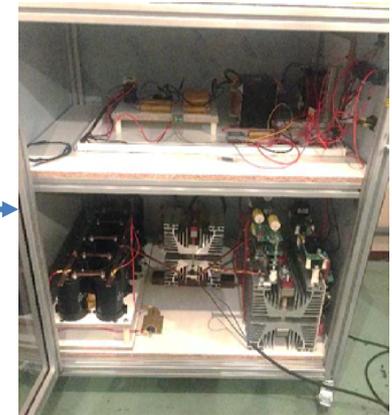
Déclenchement TTL

Mesures électriques

Déclenchement



Optique



Déclenchement

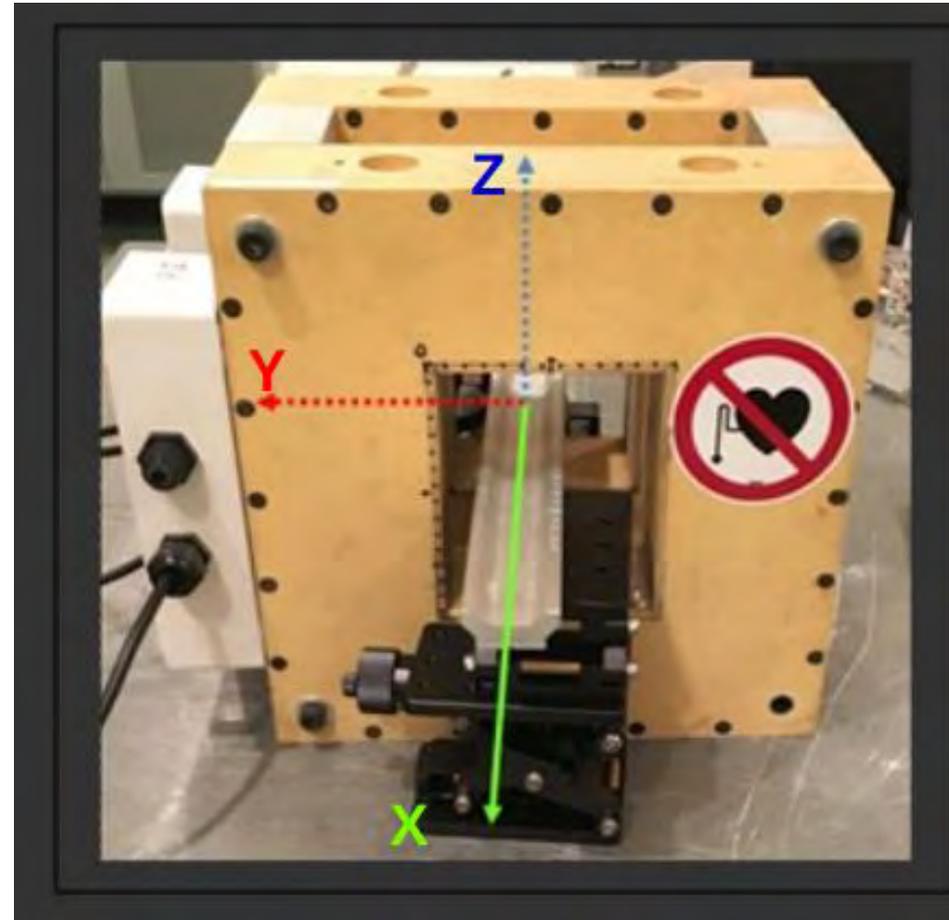
Ouverture du bras mobile





Matériel Hager livré le 18/12/2019

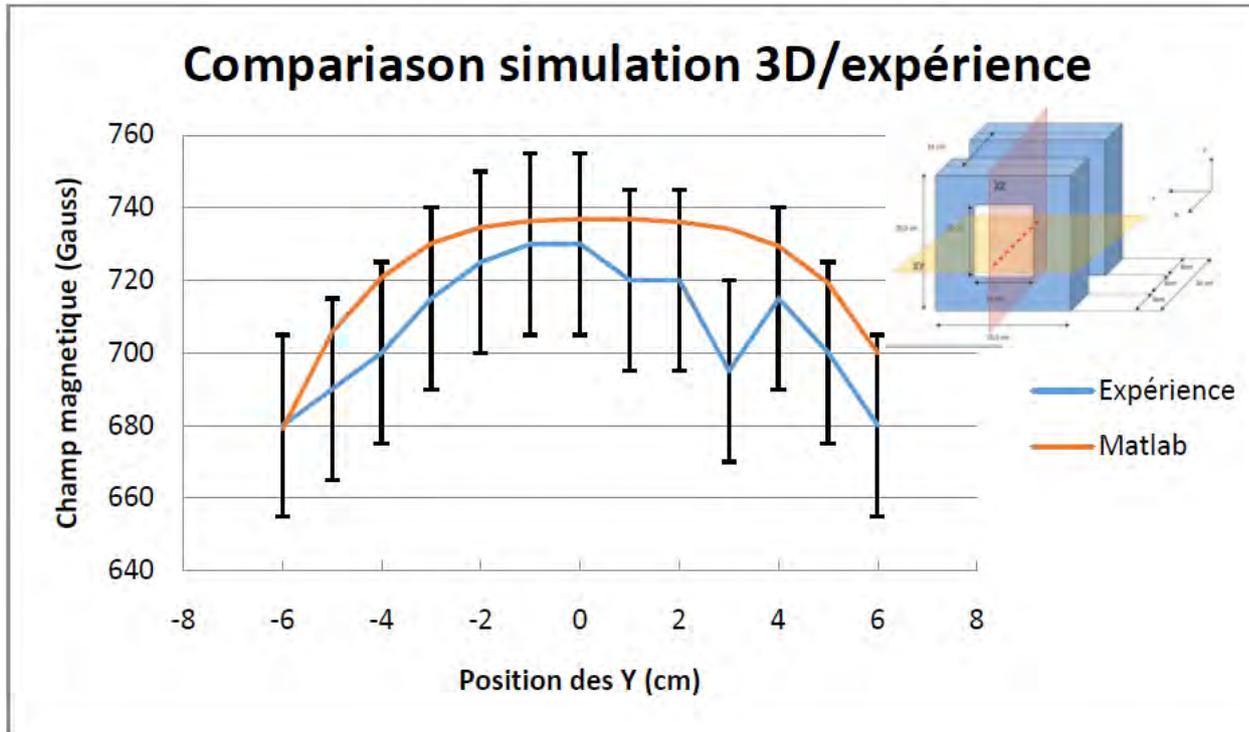
- Alimentation DC
- Bobines doivent pouvoir contenir la maquette
- Le champ doit être caractérisé
- Les champs théoriques/expérimentaux doivent être confrontés



Bobines de Helmholtz

**Voyons à présent chacun des éléments de ce schéma**

Intensité appliquée 100A



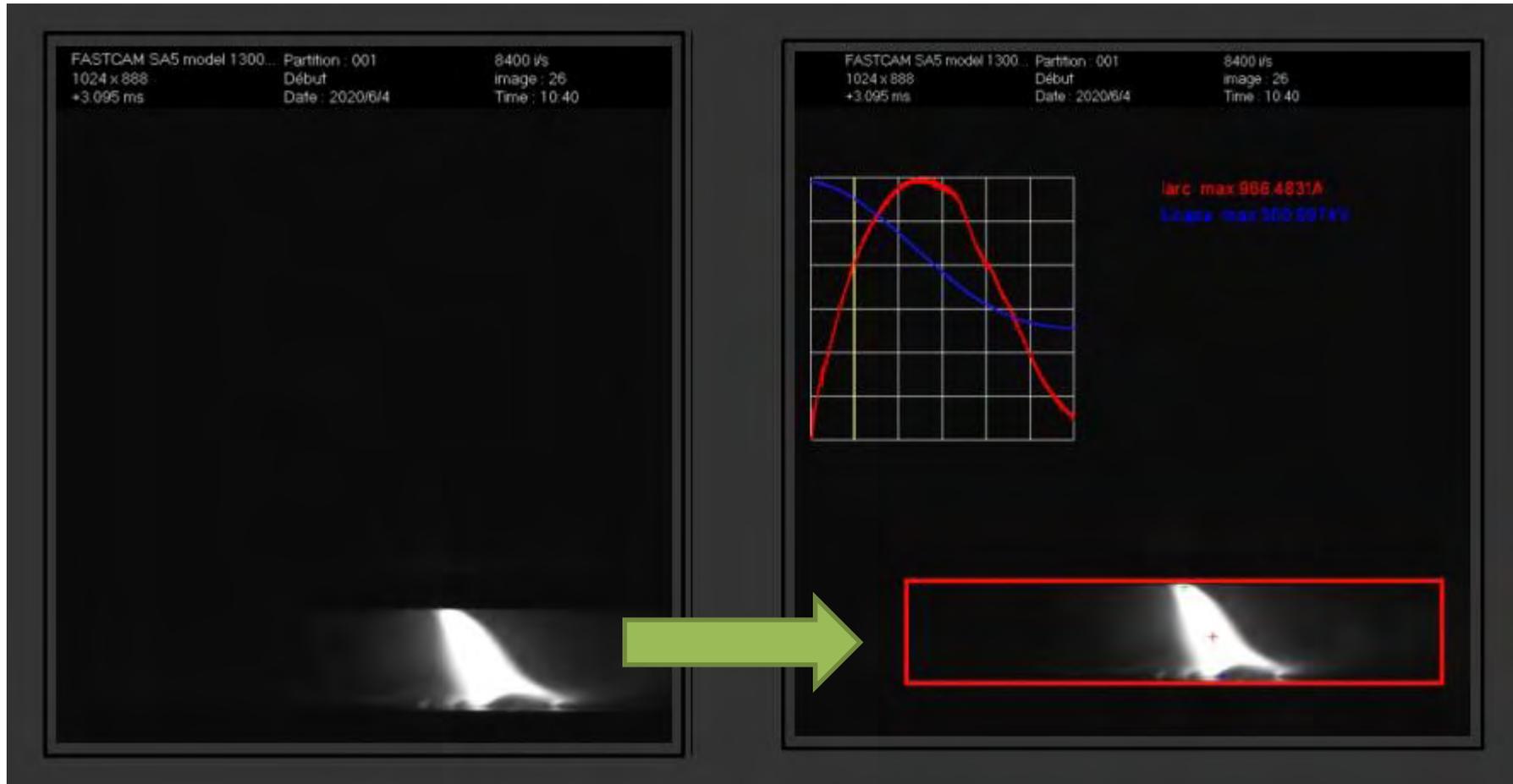
**Expérience:** Mesures réalisées à partir d'une sonde magnétique développée au LAPLACE

**Théorique:** Développement d'un soft spécifique 3D à partir d'un article de Misakian\*.



Bonne adéquation modèle/expérience





Images « brutes »  
obtenues par caméra



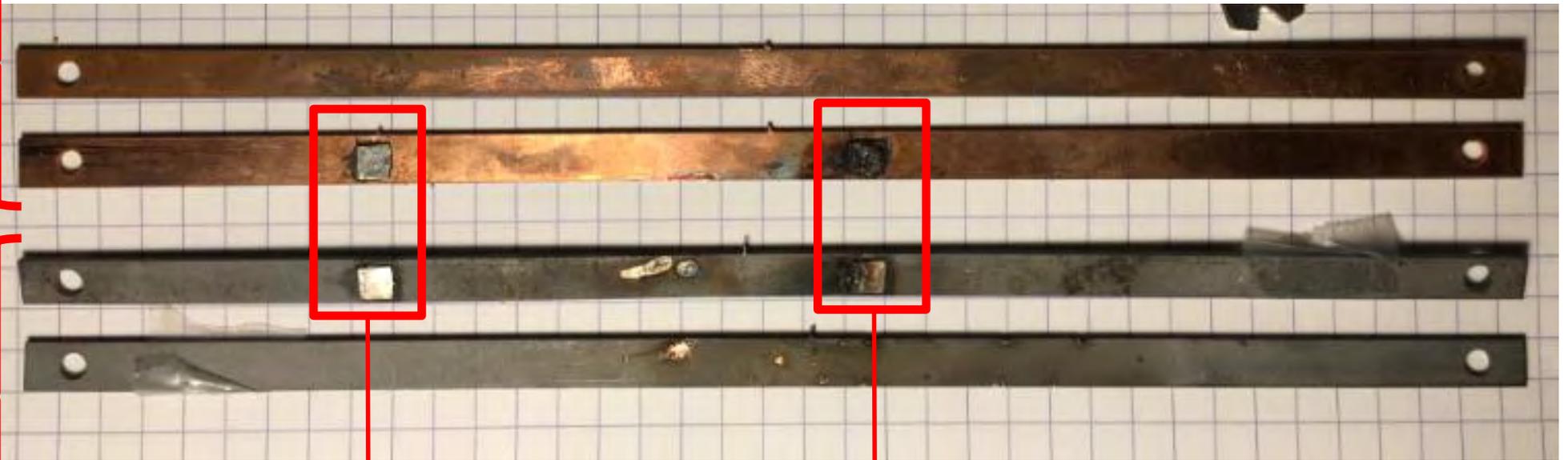
Images par caméra plus mesures électriques  
après traitement dans le soft développé

Amélioration du soft pour exploitation des résultats

- Influence du champ magnétique
  - ❖ Avec et sans
  - ❖ Influence de son intensité
  
- Influence de la nature des rails avec pastilles AgC4
  - ❖ Cuivre:  $\text{CuC}_{12}\text{H}_{12}$
  - ❖ Acier: XC45
  
- Influence de la nature des pastilles
  - ❖ AgC4 (96%Ag et 4%C )
  - ❖  $\text{AgSnO}_2$

Rails: environ 5mm de large et 25 cm de long

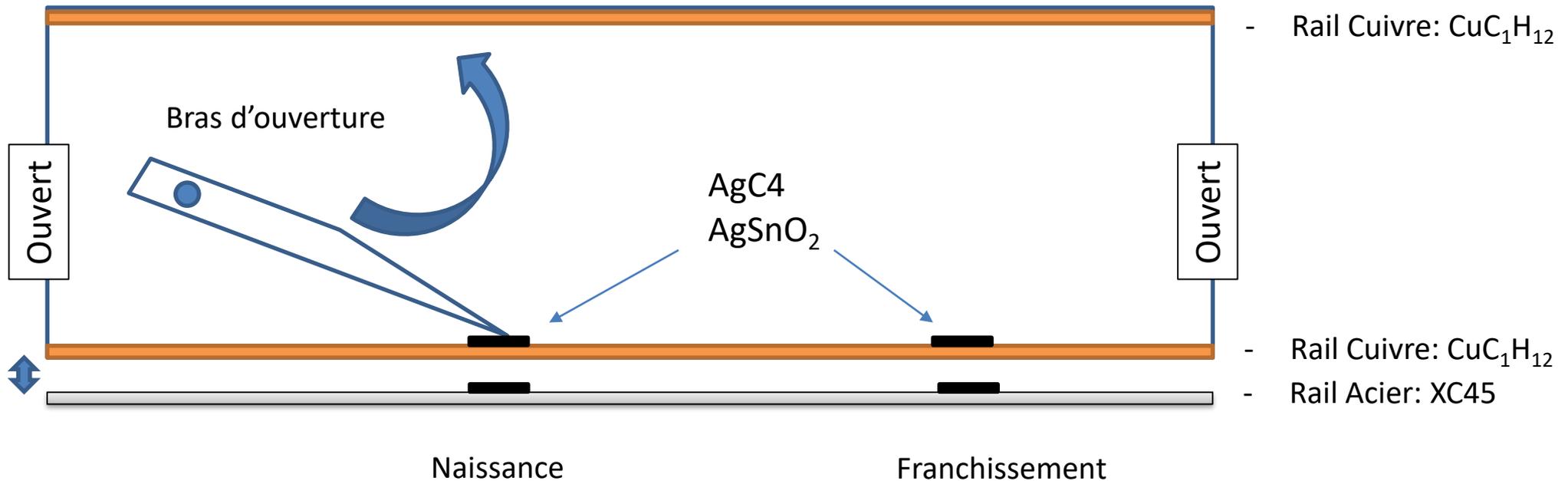
- Cuivre :  $\text{CuC}_1\text{H}_{12}$



- Acier : XC45.

Pastilles ←  $\text{AgC}_4$   
 $\text{AgSnO}_2$  → Pastilles

Protocole: rails neufs non oxydés juste frottés avant utilisation.



**Deux études principales sur configuration O-O (maquette ouverte en amont et ouverte en aval):**

- ❖ Etude de la naissance de l'arc sur la pastille pour deux matériaux de rail Cu et Fe
- ❖ Etude du franchissement de la pastille lors du déplacement de l'arc pour deux types de rail: Cu et Fe.

- ❖ Les campagnes expérimentales ont commencé en décembre 2020
- ❖ Plusieurs dizaines de tirs ont été nécessaires pour le réglage et l'optimisation de la maquette.
- ❖ Le plan d'expérience initial représentait plus de 120 échantillons, ramené à 72.
- ❖ 72 tirs: soit un total d'environ 24 jours d'expérience répartis sur 3 mois

- Pour différentes valeurs de  $I_{DC}$ 
  - ❖ Quantification de la vitesse de déplacement de l'arc
  - ❖ Quantification du temps de commutation sans pastille
  - ❖ Quantification du temps de commutation avec pastille de AgC4
  - ❖ Influence de la nature du rail sur le temps de commutation

**Définition du temps de commutation:** temps à partir duquel l'intensité de courant dans le bras est à zéro au profit de l'intensité dans le rail supérieur.

## Illustration

Une tension de charge de 300V permet d'obtenir une intensité nominale de 1200 A.

IDC = 60 A – Rail de Cuivre – Pas de pastille – Amorçage par fil fusible

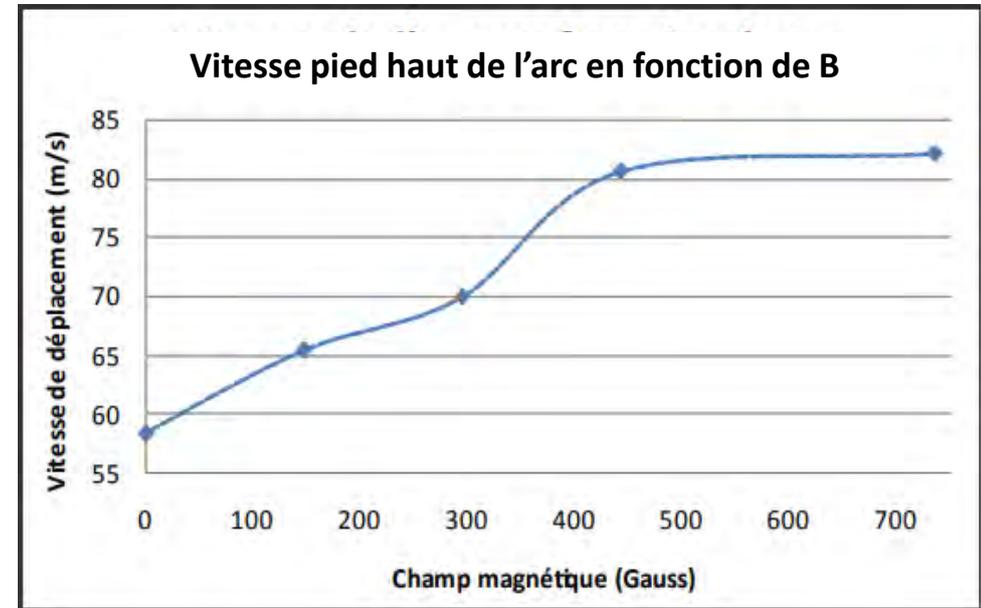


Pour les 4 mêmes instants, un résultat « attendu » est illustré sur les deux figures ci-dessus, à savoir un déplacement beaucoup plus rapide en présence de champ magnétique extérieur.

## Vitesse de déplacement

IDC = différentes valeurs – Rail de Cuivre – Pas de pastille

$I_{DC}$ (A)	0	20	40	60	100
B(Gauss)	0	147	294	442	736
Vitesse pied arc haut (m/s)	57.7	66.2	69.1	80.5	83.0
Vitesse pied arc bas (m/s)	59.1	64.8	70.7	80.7	81.1

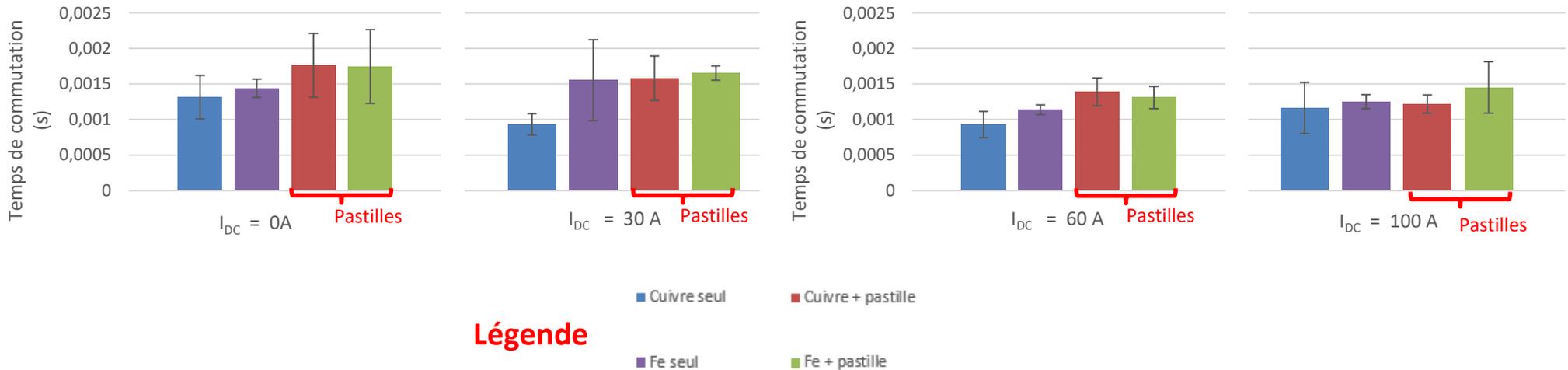


- ❖  $I_{AC} = 800A - 50Hz$
- ❖ Les pieds d'arc « haut » et « bas » se déplacent sensiblement à la même vitesse.
- ❖ Entre 300 et 400 Gauss l'influence est plus conséquente
- ❖ Mise en évidence de l'influence du champ magnétique sur les vitesses de déplacement de l'arc

## Temps de commutation

$I_{DC}$ (A)	0	20	40	60	100
B(Gauss)	0	147	294	442	736

Rappel: rail haut en cuivre (anode (+))  
Rail bas paramétrable (cathode (-))

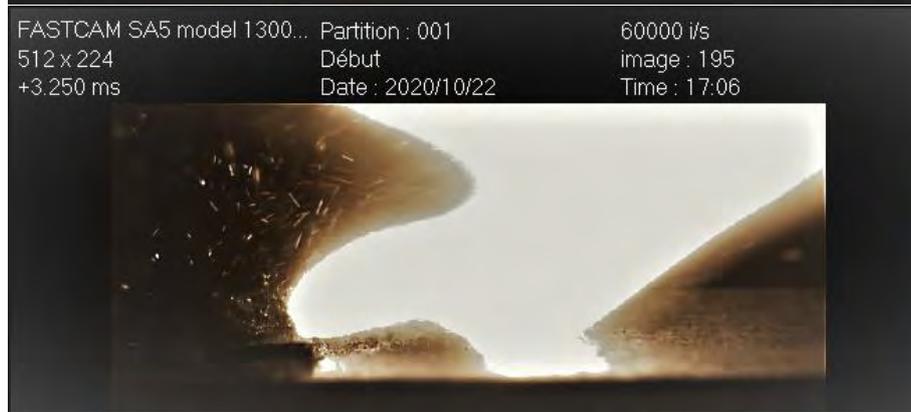
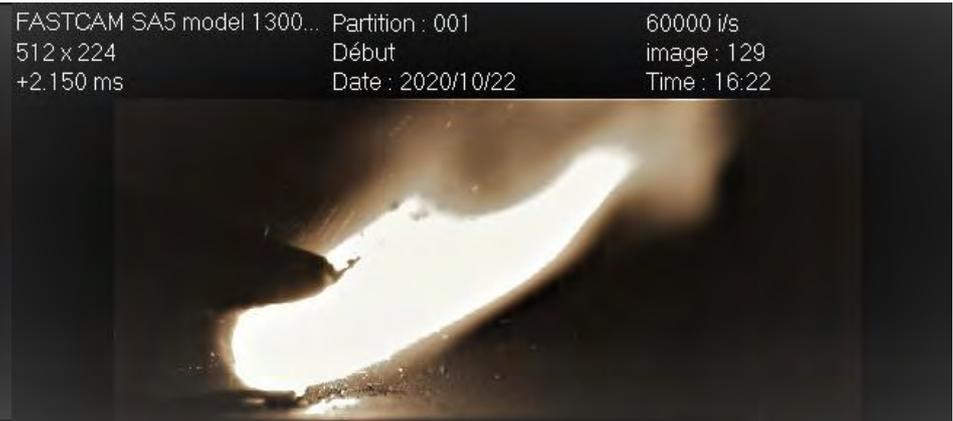
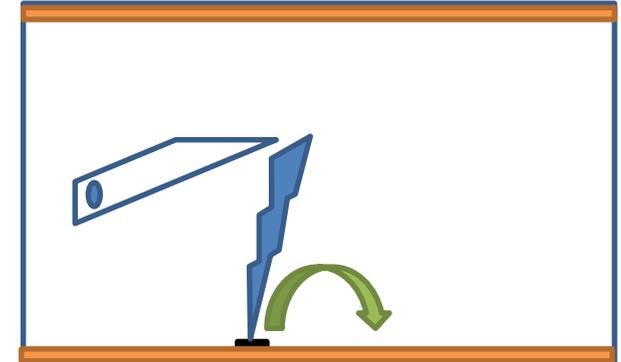
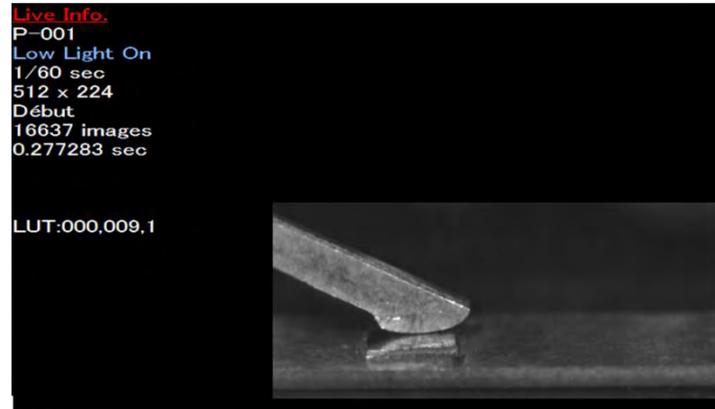


- ❖ On observe que la présence de pastille augmente systématiquement le temps de commutation.
- ❖ Cependant, si observe uniquement les histogrammes rouges, on s'aperçoit que le temps de commutation diminue également avec l'augmentation du champ magnétique.
- ❖ La même étude a été réalisée avec le rail du bas (cathode) en fer. Les mêmes comportements sont obtenus. Les cas fer seul sont plus rapides que les cas fer avec pastille  $AgC_4$ . La présence de CM réduit les temps de commutation.

$$\sigma_{Cu} = 59.6 \cdot 10^6 \text{ S/m}$$

$$\sigma_{Fe} = 9.93 \cdot 10^6 \text{ S/m}$$

$$\sigma_{Ag} = 63 \cdot 10^6 \text{ S/m}$$



Cu-Cu

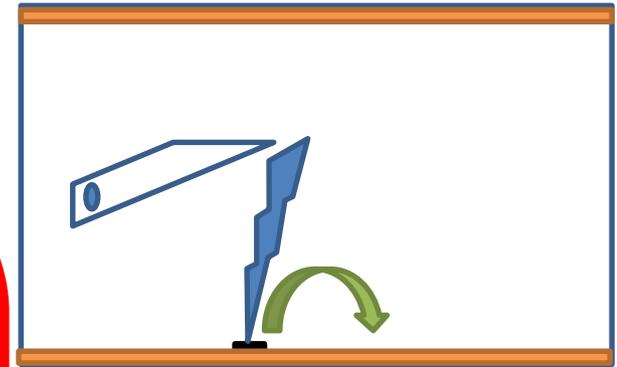
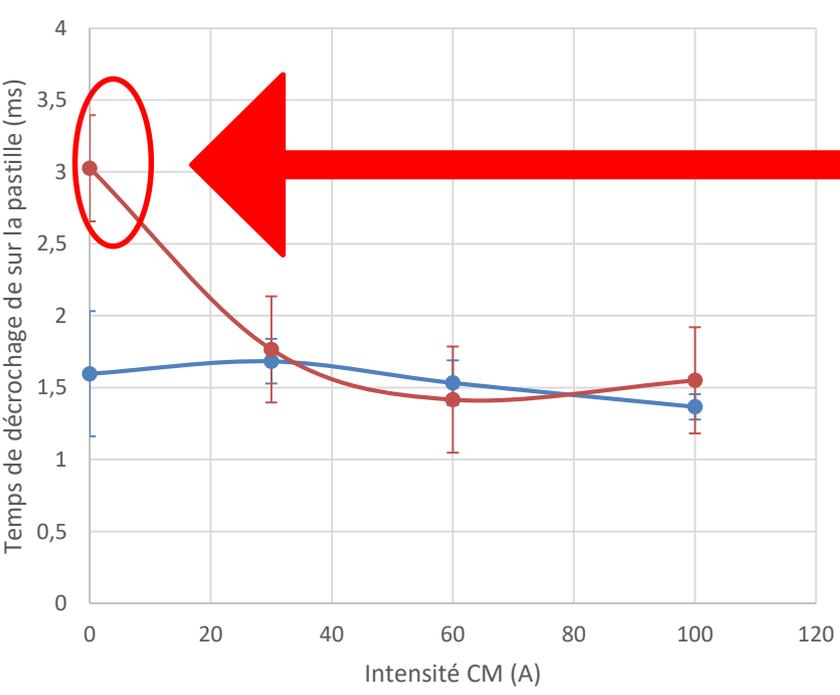
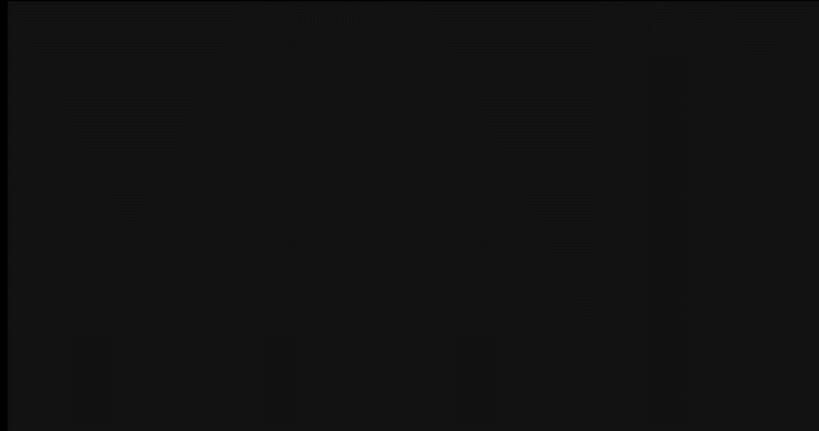
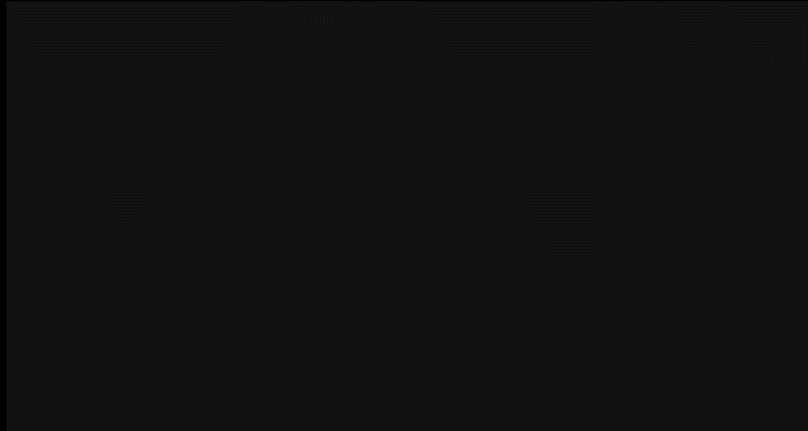
Fe-Fe

FASTCAM SA5 model 1300... Partition : 001  
 512 x 272 Début  
 +2.56 ms Date : 2021/2/2

50000 i/s image : 128  
 Time : 12:18

FASTCAM SA5 model 1300... Partition : 001  
 512 x 272 Début  
 +2.26 ms Date : 2021/2/2

50000 i/s image : 113  
 Time : 12:34



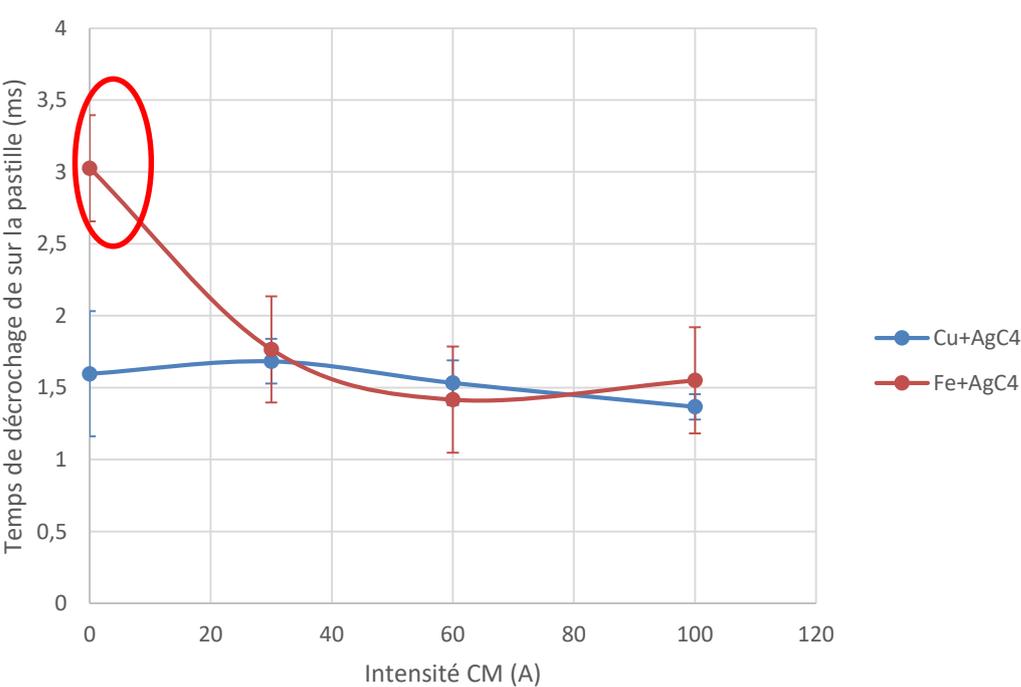
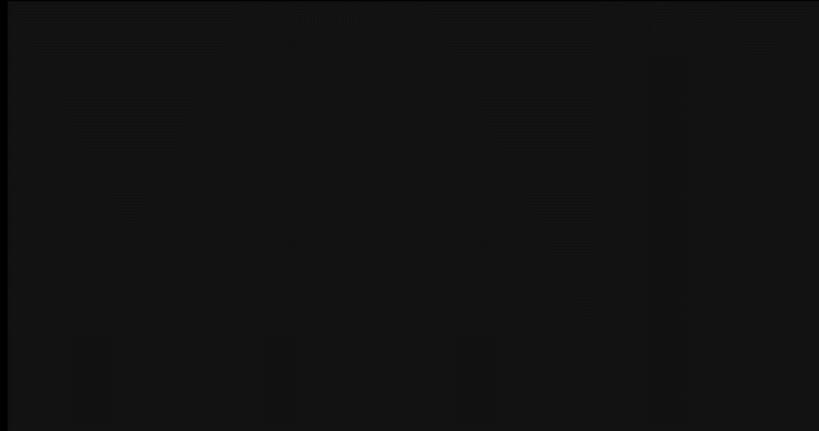
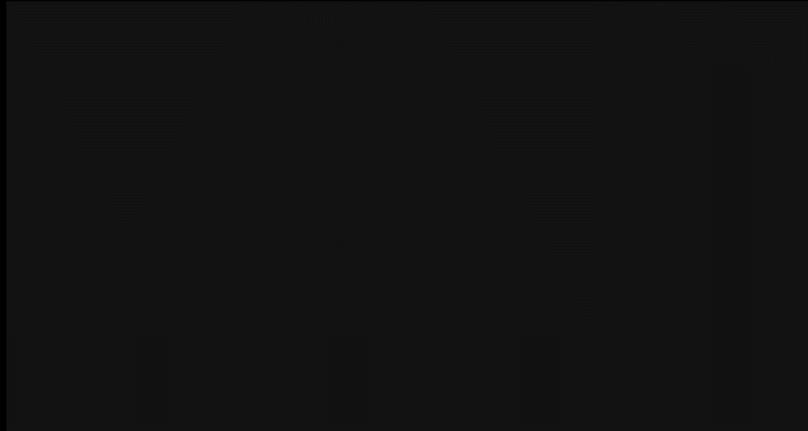
Accroche prolongée du pied d'arc sur la pastille.  
 => Conductivité plus favorable sur la pastille

FASTCAM SA5 model 1300... Partition : 001  
 512 x 272 Début  
 +2.56 ms Date : 2021/2/2

50000 i/s  
 image : 128  
 Time : 12:18

FASTCAM SA5 model 1300... Partition : 001  
 512 x 272 Début  
 +2.26 ms Date : 2021/2/2

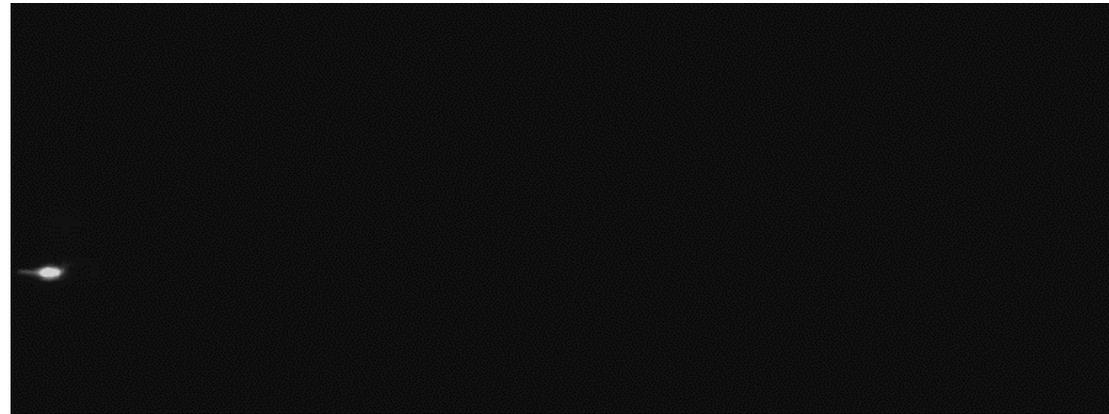
50000 i/s  
 image : 113  
 Time : 12:34



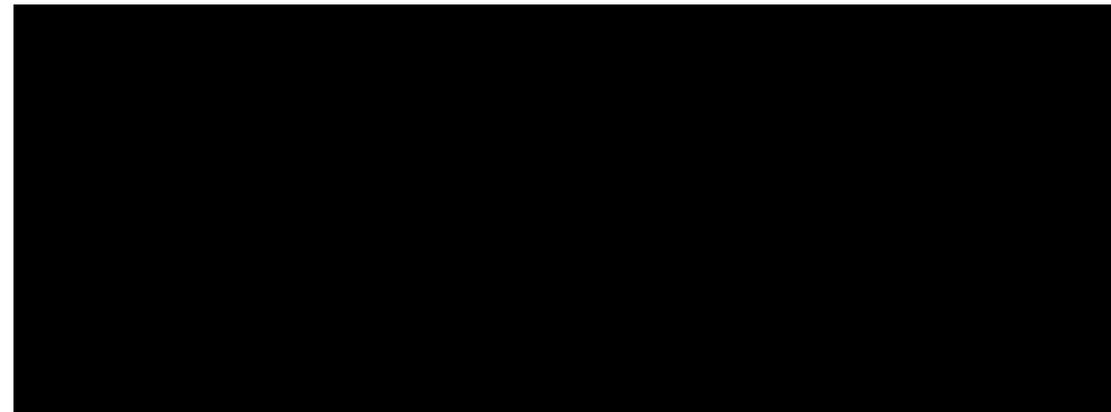
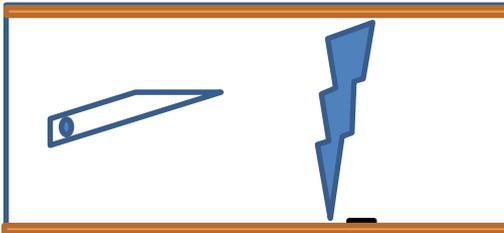
En l'absence de CM externe, et étant donnée la meilleure conductivité de la pastille  $AgC_4$  en comparaison à celle du fer, on a observé un temps d'accrochage plus important avec rails en fer que dans le cas des rails en cuivre.

Ce phénomène n'est plus apparu des lors qu'un CM externe est appliqué.

Arc sur rail Cu+AgC4  
300V  
Pas de CM



Arc sur rail Cu+AgC4  
300V  
Avec CM

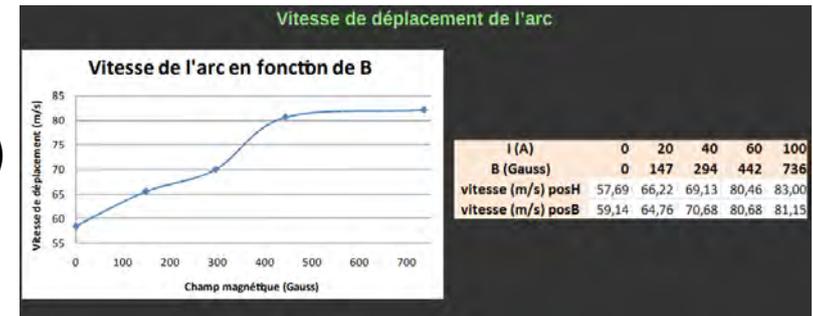


L'arc contourne la pastille en s'accrochant sur les bords du rail. Etude difficile et peu répétable.

Solution potentielle: Modifier la forme du rail pour que l'arc ne puisse pas passer ailleurs que sur la pastille



- Mise en place d'un code de calcul  $CM=f(\text{courant})$
- Mise en place de la maquette
- Fort impact du CM sur le déplacement de l'arc



- Définitions des cas test et ajustement de la maquette avec nombre important d'essais

## Amorçage

- Le CM aide à la commutation de l'arc
- La présence de la pastille a tendance à ralentir la durée de la commutation
- La nature du rail a un effet atténué par le CM

## Déplacement

- Le CM accélère l'arc.
- L'étude n'a pas permis de véritablement quantifier l'influence de la présence de la pastille lors du déplacement de l'arc.
- Géométrie pourrait être revue

## Motivations:

- Etablir une base de données des grandeurs thermodynamiques spécifiques

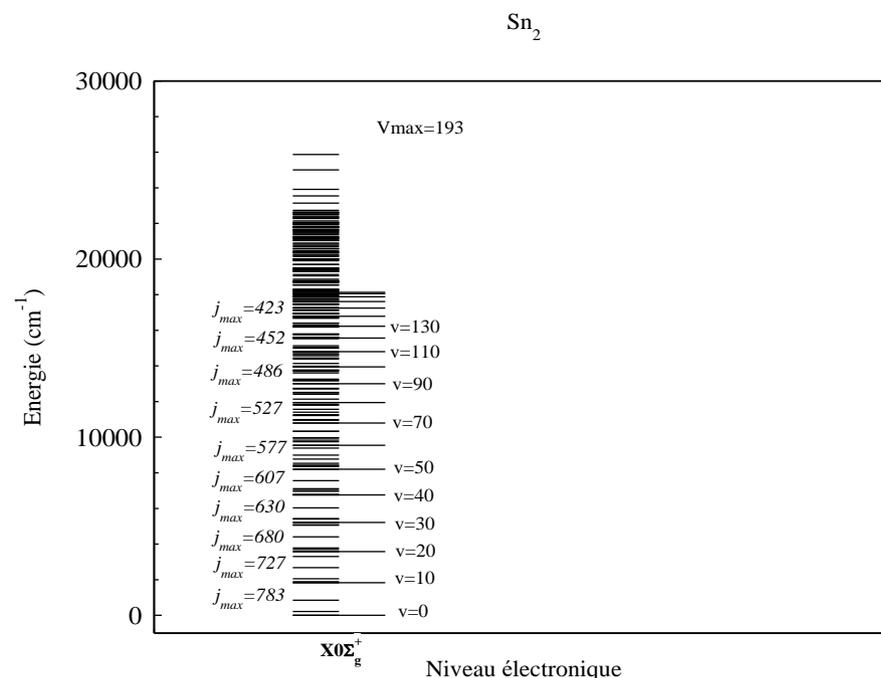
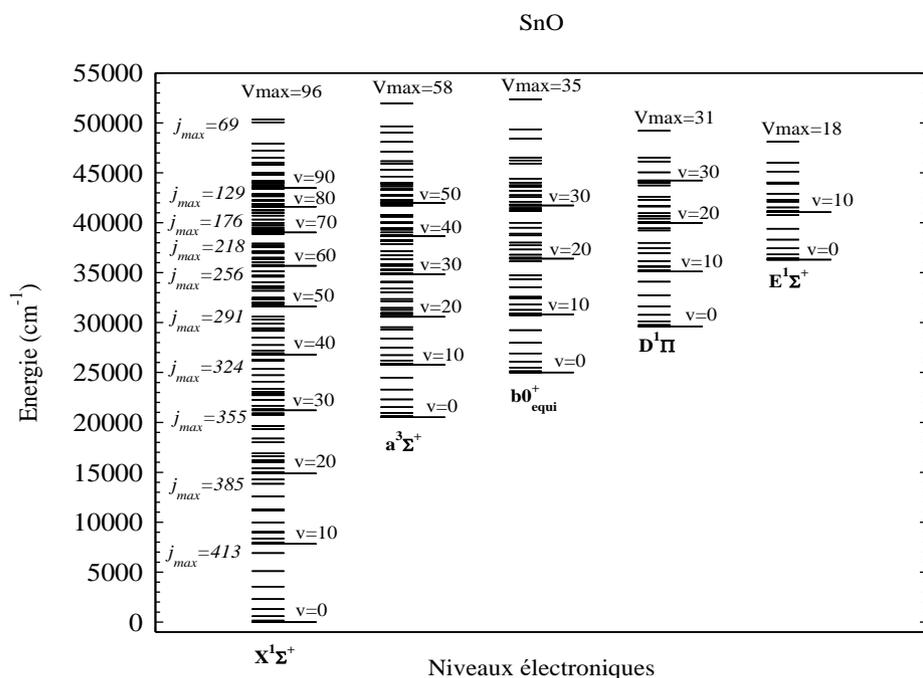
Air ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , Ar,  $\text{CO}_2$ ), Ag,  $\text{SnO}_2$

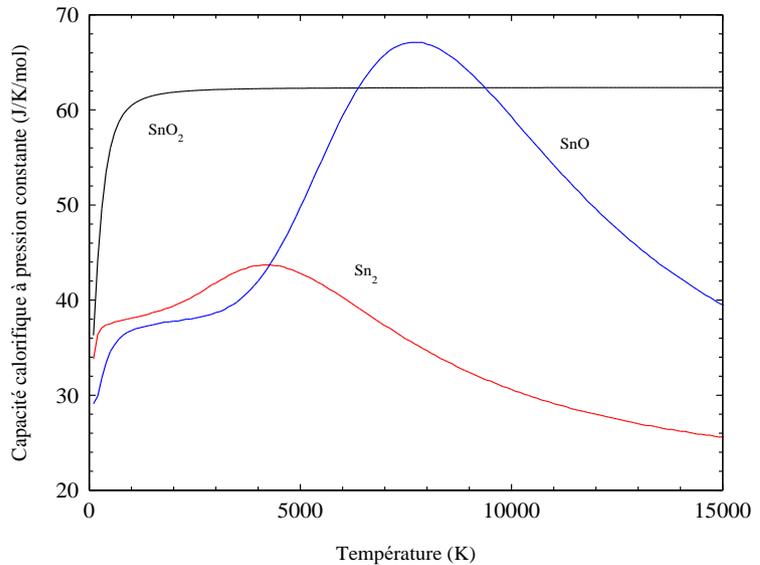
Sn, SnO,  $\text{SnO}_2$  : pas disponibles NIST Webook et JANAF

- Etudier les fractions molaires en fonction de la pression, du déséquilibre thermique et de la formulation des pastilles.

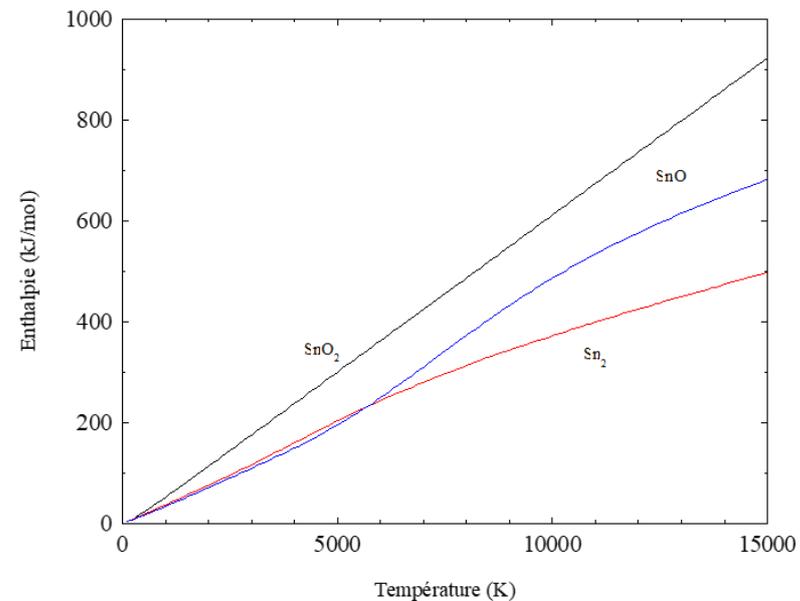
Pour le monoxyde d'étain gazeux SnO, 5 configurations électroniques sont considérées :  $X^1\Sigma^+$   $a^3\Sigma^+$   $b0_{equi}^+$   $D^1\Pi$  et  $E^1\Sigma^+$ .  
 Pour les niveaux de Sn<sub>2</sub>, on prend en compte la configuration électronique  $X0\Sigma_g^+$ .

Pour SnO<sub>2</sub>, on prend un rotateur sphérique

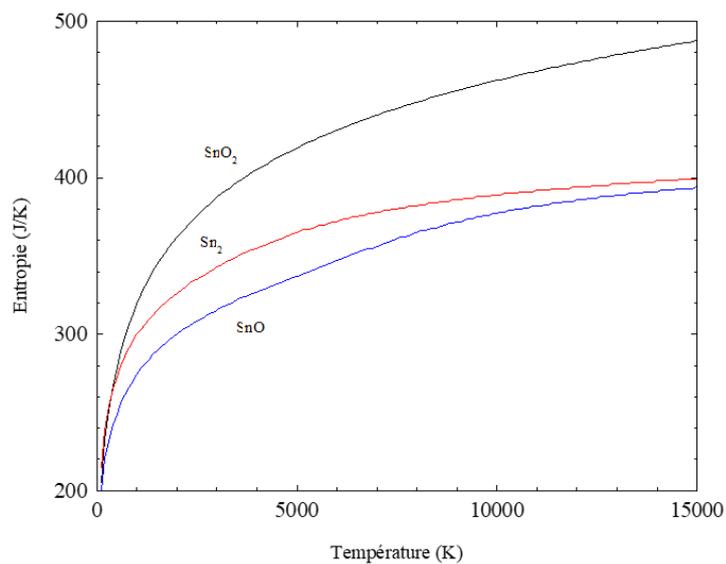




Capacité calorifique



Enthalpie



Entropie

## Pour Ag, C, Air:

Pour les espèces monoatomiques :

$\text{Ag}^-$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Ag}^{++}$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Ar}^{++}$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{C}^-$ ,  $\text{C}^+$ ,  $\text{C}^{++}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{N}^{++}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{O}^-$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}^{++}$  et les électrons.

Pour les espèces diatomiques :

$\text{Ag}_2$ ,  $\text{C}_2$ ,  $\text{C}_2^-$ ,  $\text{C}_2^+$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{CN}^-$ ,  $\text{CN}^+$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}^-$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2^-$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}^-$ ,  $\text{NO}^+$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{O}_2^+$ .

Pour les espèces polyatomiques :

$\text{C}_2\text{N}$ ,  $\text{C}_2\text{N}_2$ ,  $\text{C}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_3$ ,  $\text{C}_3\text{O}_2$ ,  $\text{C}_4$ ,  $\text{C}_4\text{N}_2$ ,  $\text{C}_5$ ,  $\text{CNN}$ ,  $\text{CNO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2^-$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{N}_2\text{O}^+$ ,  $\text{N}_3$ ,  $\text{NCN}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{CO}_2^+$ .

Pour les phases condensées : **Graphite, Ag (solide), Ag(liquide)**

## Pour Ag, SnO<sub>2</sub> Air:

Pour les espèces monoatomiques :

$\text{Ag}^-$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Ag}^{++}$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Ar}^{++}$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{C}^-$ ,  $\text{C}^+$ ,  $\text{C}^{++}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{N}^{++}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{O}^-$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}^{++}$ ,  $\text{Sn}$ ,  $\text{Sn}^-$ ,  $\text{Sn}^+$ ,  $\text{Sn}^{++}$  et les électrons.

Pour les espèces diatomiques :

$\text{Ag}_2$ ,  $\text{C}_2$ ,  $\text{C}_2^-$ ,  $\text{C}_2^+$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{CN}^-$ ,  $\text{CN}^+$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}^-$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2^-$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}^-$ ,  $\text{NO}^+$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{SnO}$ ,  $\text{Sn}_2$ .

Pour les espèces polyatomiques :

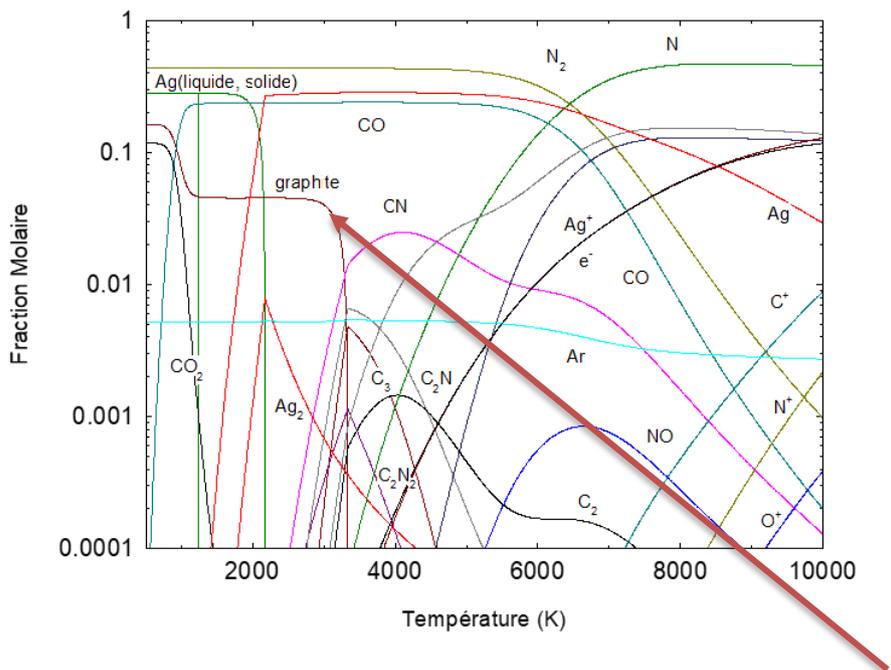
$\text{C}_2\text{N}$ ,  $\text{C}_2\text{N}_2$ ,  $\text{C}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_3$ ,  $\text{C}_3\text{O}_2$ ,  $\text{C}_4$ ,  $\text{C}_4\text{N}_2$ ,  $\text{C}_5$ ,  $\text{CNN}$ ,  $\text{CNO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2^-$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{N}_2\text{O}^+$ ,  $\text{N}_3$ ,  $\text{NCN}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{CO}_2^+$ ,  $\text{SnO}_2$ .

Pour les phases condensées : **SnO<sub>2</sub> (cristal), SnO<sub>2</sub> (liquide), Ag (solide), Ag(liquide)**

Pour Ag, C, Air: Influence de la constitution du contact

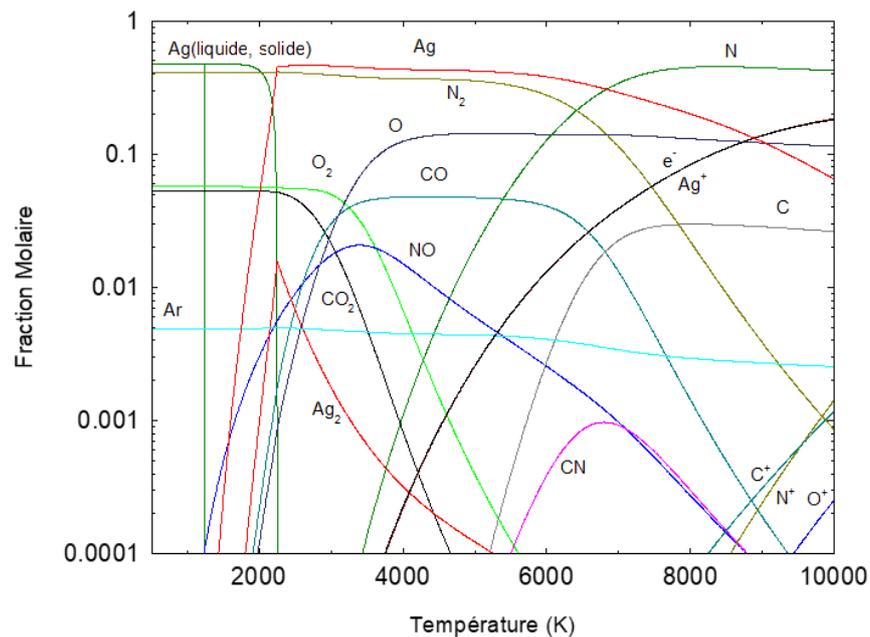
**25% C**

(Air,C,Ag) (50%,25%,25%); P= 1 Bar



**5% C**

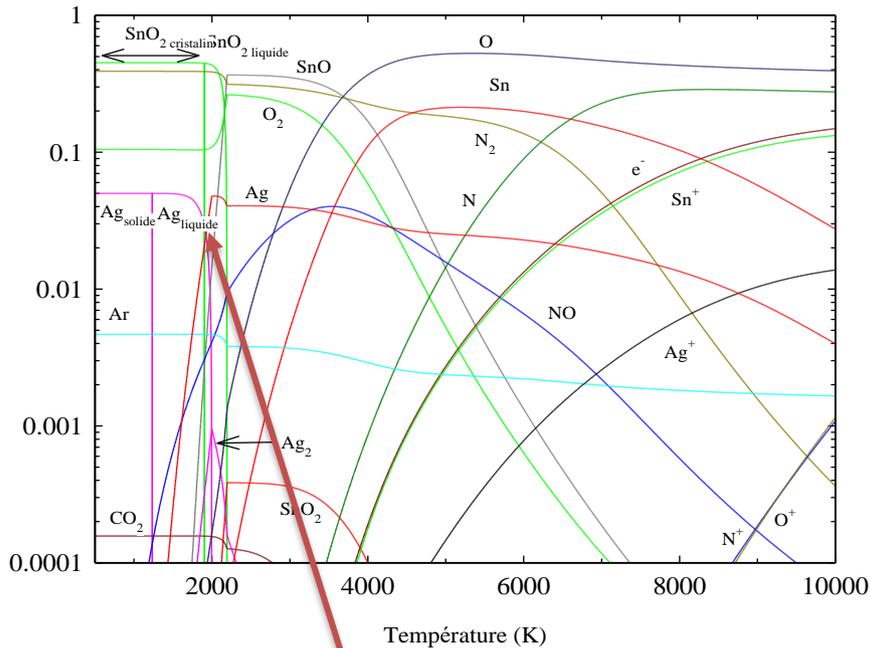
(Air,C,Ag) (50%,5%,45%); P= 1 Bar



Diminution de la production de graphite

## Pour Ag, SnO<sub>2</sub>, Air: Influence de la constitution du contact

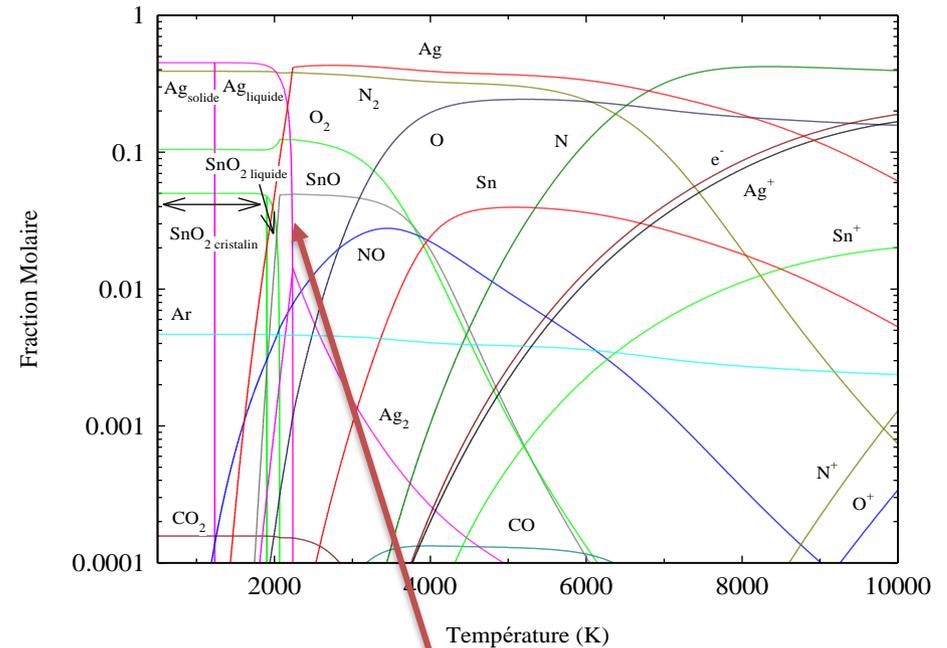
**5% Ag** (Air, Ag, SnO<sub>2</sub>) (50%, 5%, 45%) ; P=1 Bar



L'Argent est liquide  
SnO<sub>2</sub> Cristallin

L'argent liquide circule entre  
les grains d'étain.

**45% Ag** (Air, Ag, SnO<sub>2</sub>) (50%, 45%, 5%) ; P=1 Bar



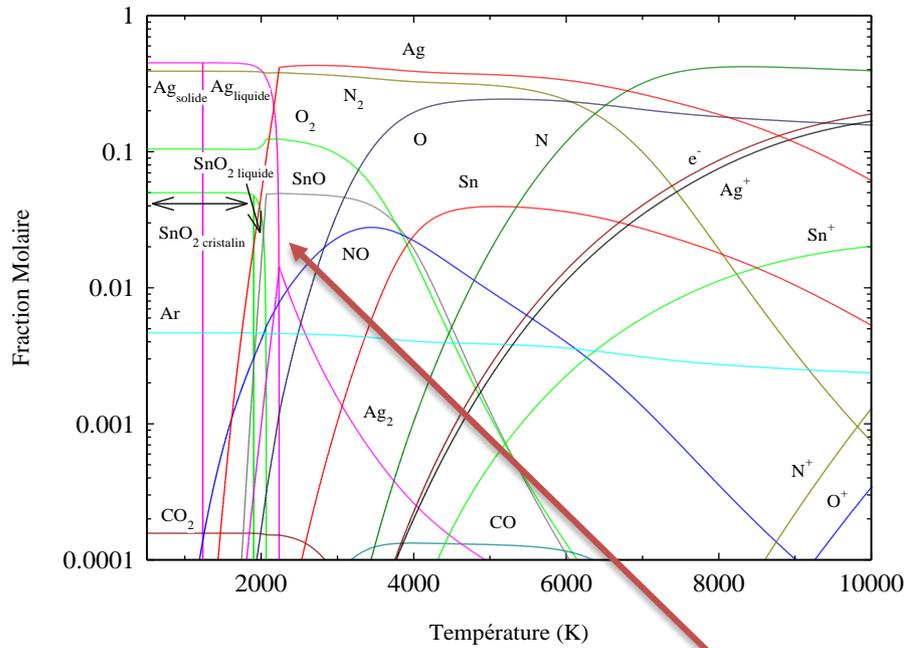
L'Argent est liquide  
SnO<sub>2</sub> gazeux

On retrouve l'argent en  
surface

## Pour Ag, SnO<sub>2</sub>, Air: Influence de la constitution du contact

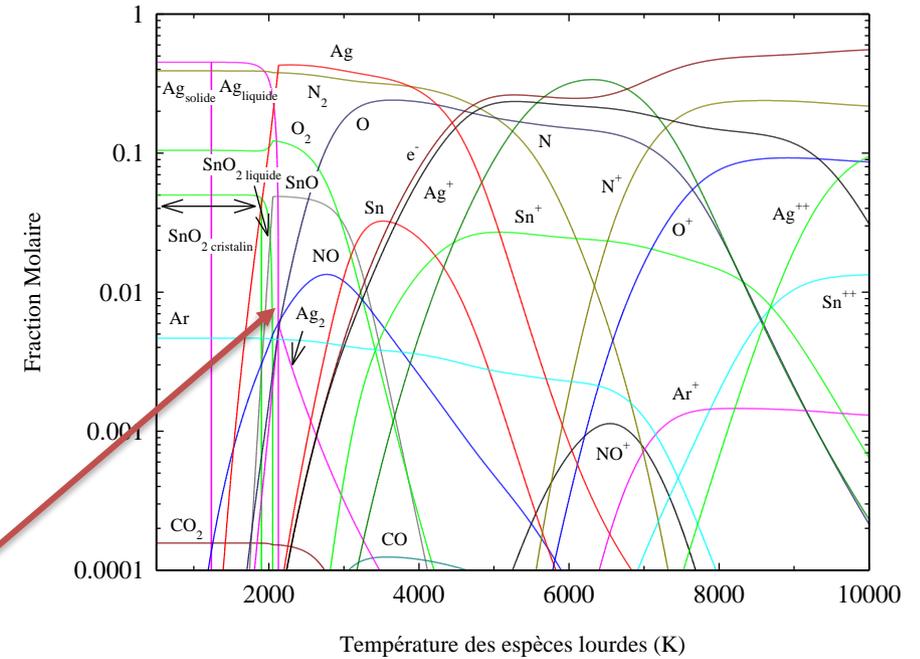
$$\Theta = T_e/T_i = 1$$

(Air, Ag, SnO<sub>2</sub>) (50%, 45%, 5%) ; P=1 Bar



$$\Theta = T_e/T_i = 2$$

(Air, Ag, SnO<sub>2</sub>) (50%, 45%, 5%) ; P=1 Bar ;  $\theta=2$



Températures de vaporisation peu sensibles  
Ionisation à plus basse température des lourds

- Mise en place d'une base de donnée pour Ag, SnO<sub>2</sub>, Carbone, Air.
- Forte influence de la constitution des contacts.
- Prise en compte du déséquilibre thermique et de la pression.
- Pour avancer, il faudrait connaître la manière dont sont fabriqué les contacts électriques :  
additifs, taille des poudres...

Evaluation de la conductivité thermique

Enthalpie de formation

## Motivation:

Prise en compte de la résistivité des gaines afin de pouvoir décrire une montée en tension lors de l'entrée de l'arc dans les séparateurs.

## Hypothèses:

Modèle magnétohydrodynamique 3D, à l'ETL, avec un écoulement laminaire dont le rayonnement est décrit par un coefficient d'émission nette.

L'initialisation est faite par un canal conducteur (Analogie à un fil fusible)

Les gaines ne sont pas modélisées mais leur résistivité prise en compte

## Equation généralisée pour la colonne

$$a \frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + b \operatorname{div}(\rho \vec{v} \Phi) = \operatorname{div}(\Gamma_{\Phi} \overrightarrow{\operatorname{grad}}(\Phi)) + S_{\Phi}$$

Terme temporel      Terme convectif      Terme diffusif      Terme source

Coefficient de diffusion

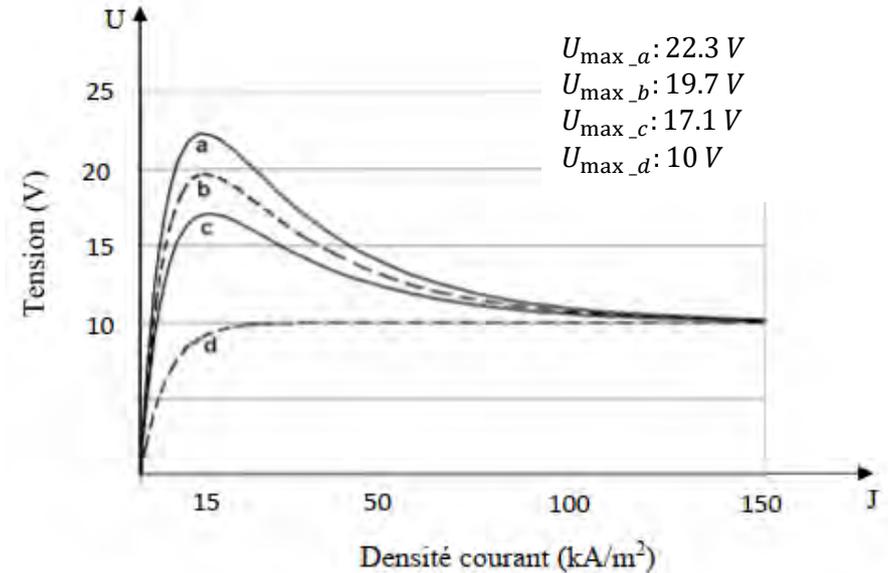
	masse	vitesse	énergie	tension	magnétique
$\Phi$	1	v	T ou h	V	A
$\Gamma_{\Phi}$	0	$\mu$	$\kappa$ ou $\kappa / C_p$	$\sigma$	1
n°éq.	1 éq.	3 éqs.	1 éq.	1 éq.	3 éqs.

## Modélisation de la gaine

**Approche microscopique: Benilov [1]**

**Approche macroscopique: Lindmayer [2]**

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



[1] Benilov M. S. and , A model of the cathode region of atmospheric pressure arc, J. Phys. D: Appl. Phys, 1995

[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

## Prise en compte de la résistivité des gaines: approche de Lindmayer retenue

### Conductivité électrique effective

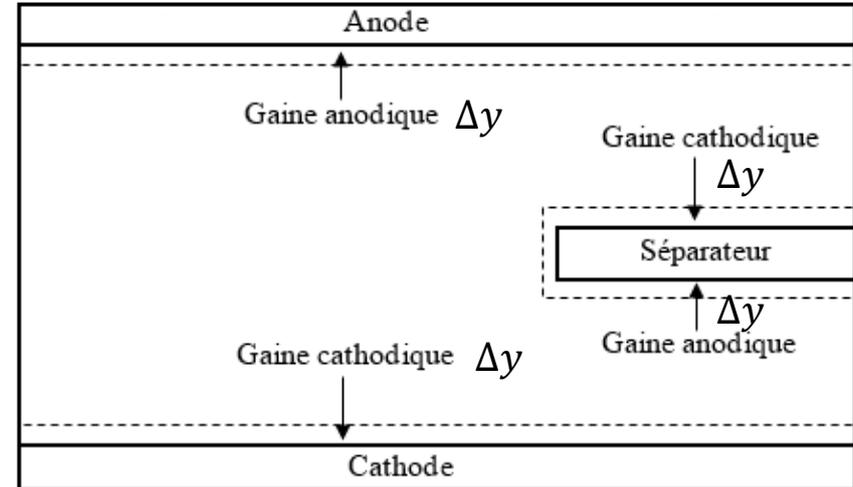
$$\sigma_{eff} = J \frac{\Delta y}{\Delta U}$$

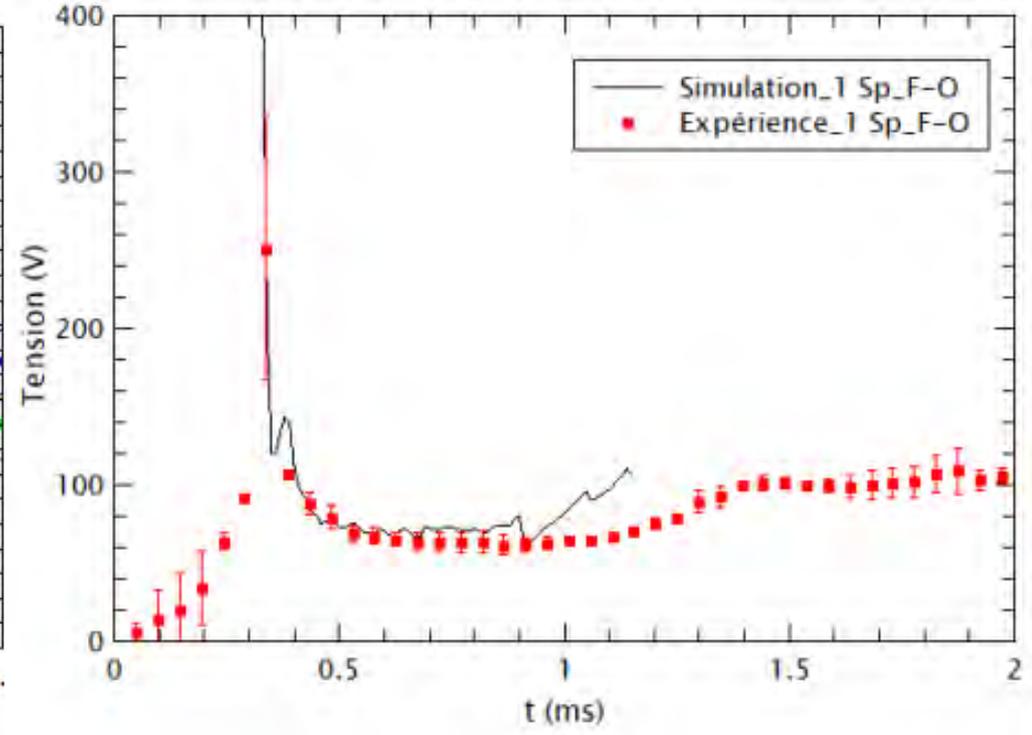
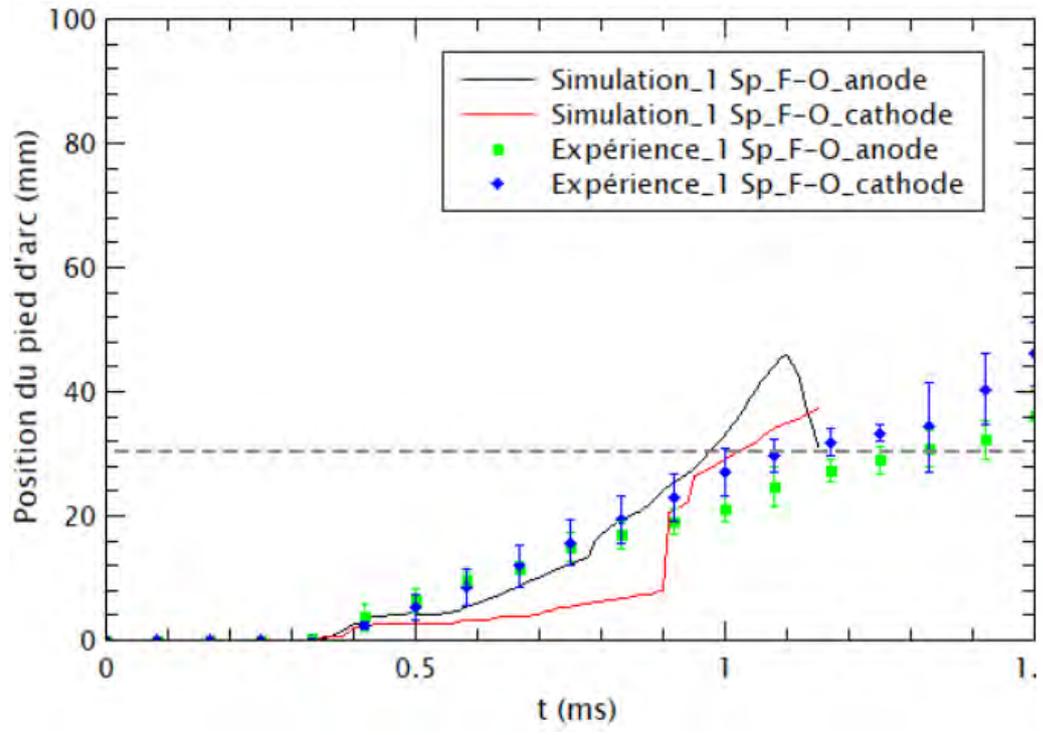
J: densité courant  
 $\Delta y$ : épaisseur de la gaine  
 $\Delta U$ : chute de tension

### Épaisseur de la gaine

$$\Delta y_{anode} = \Delta y_{cathode} = 0.1 \text{ mm [1]}$$

$$\Delta y = \text{volume/surface (UDF)}$$



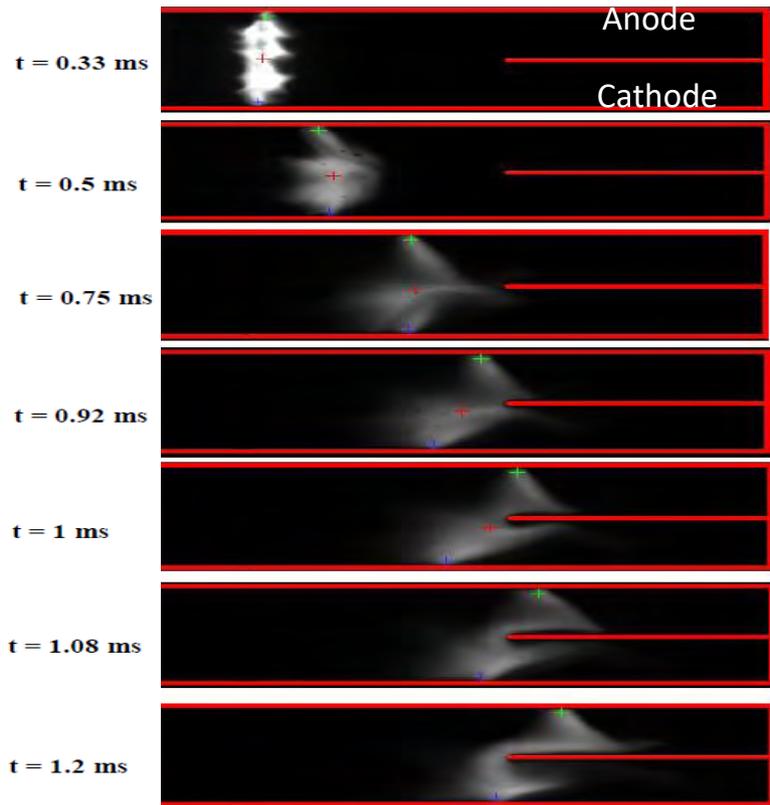


Configuration F-O (Fermée amont et Ouverte en aval)

## Arc motion comparison between model and experimental setup

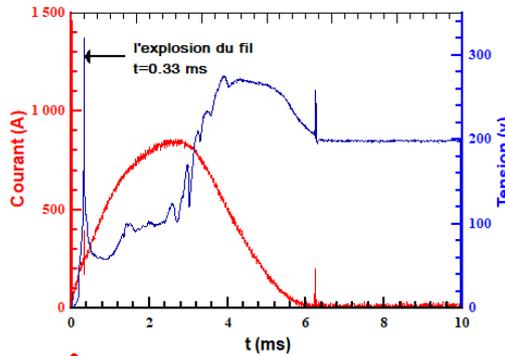
configuration F-O – 1 SP

**(B): Expérience**

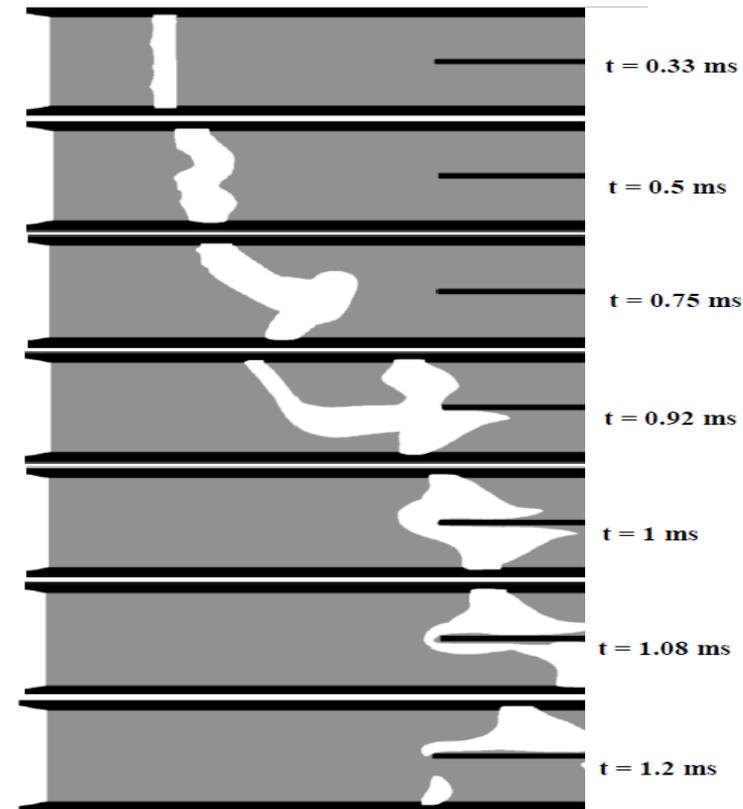


**Enette 3D**

Iso value:  
 $5 \cdot 10^9 \text{ W/m}^3/\text{Sr}$



**(A): Modèle**



Next: voltage

Le modèle de Lindmayer est apte à décrire une résistivité de gaine pour décrire une montée en tension lors de l'entrée de l'arc dans les séparateurs.

La vitesse de déplacement de l'arc prédite par la modélisation est comparable avec celle obtenue expérimentalement.

Le comportement de l'arc est analogue entre l'observation expérimentale et l'étude théorique

- M. Benmouffok, J. Lu, J.J. Gonzalez, P. Freton, P. Joyeux, « Arc voltage behavior during arc motion and splitting process », ICEPE, Corée, Séoul, Mars 2022.
- P. Carpintero, P. Joyeux, M. Benmouffok, P. Freton et J.J. Gonzalez, « Etude du déplacement d'un arc électrique entre deux rails sous l'influence d'un champ magnétique extérieur », CAEXV, 28-29 juin, Rouen 2021.
- M. Benmouffok, P. Freton, J.J. Gonzalez, P. Joyeux, P. André, M. Chnani et A. Risacher, « Etude expérimentale de la dynamique d'un arc électrique évoluant entre deux rails en présence de parstille  $\text{AgC}_4$  et d'un champ magnétique », CAEXV, 28-29 juin, Rouen 2021.
- P. André, M. Chnani, P. Freton, J.J. Gonzalez, P. Joyeux et A. Risacher « Fraction molaire dans un plasma pour les mélanges Air-AgC et Air-AgSnO<sub>2</sub> », CAEXV, 28-29 juin, Rouen 2021.