

Etude d'un interrupteur moyenne tension Interaction arc / plastique

Projet AAE

Jean Quémeneur, Mathieu Masquère, Flavien Valensi,
Yann Cressault & Philippe Teulet

Jérôme Douchin et Laure Trémas



- 1 . Introduction et contexte de l'étude**
- 2. Présentation des outils mis en place avec le POM**
- 3. Comparaisons POM/PTFE/PA66/UF171**
- 4. Spectroscopie optique**
- 5. Discussions et conclusions**

Motivations :

Caractériser expérimentalement l'interaction arc/plastique lors d'une phase de coupure d'un arc électrique dans un interrupteur moyenne tension à coupure dans l'air

1^{er} objectif : Caractérisation du dispositif de coupure

2^{ème} objectif : Caractérisation du milieu air/vapeur et corrélation avec la performance en coupure/interruption du courant.

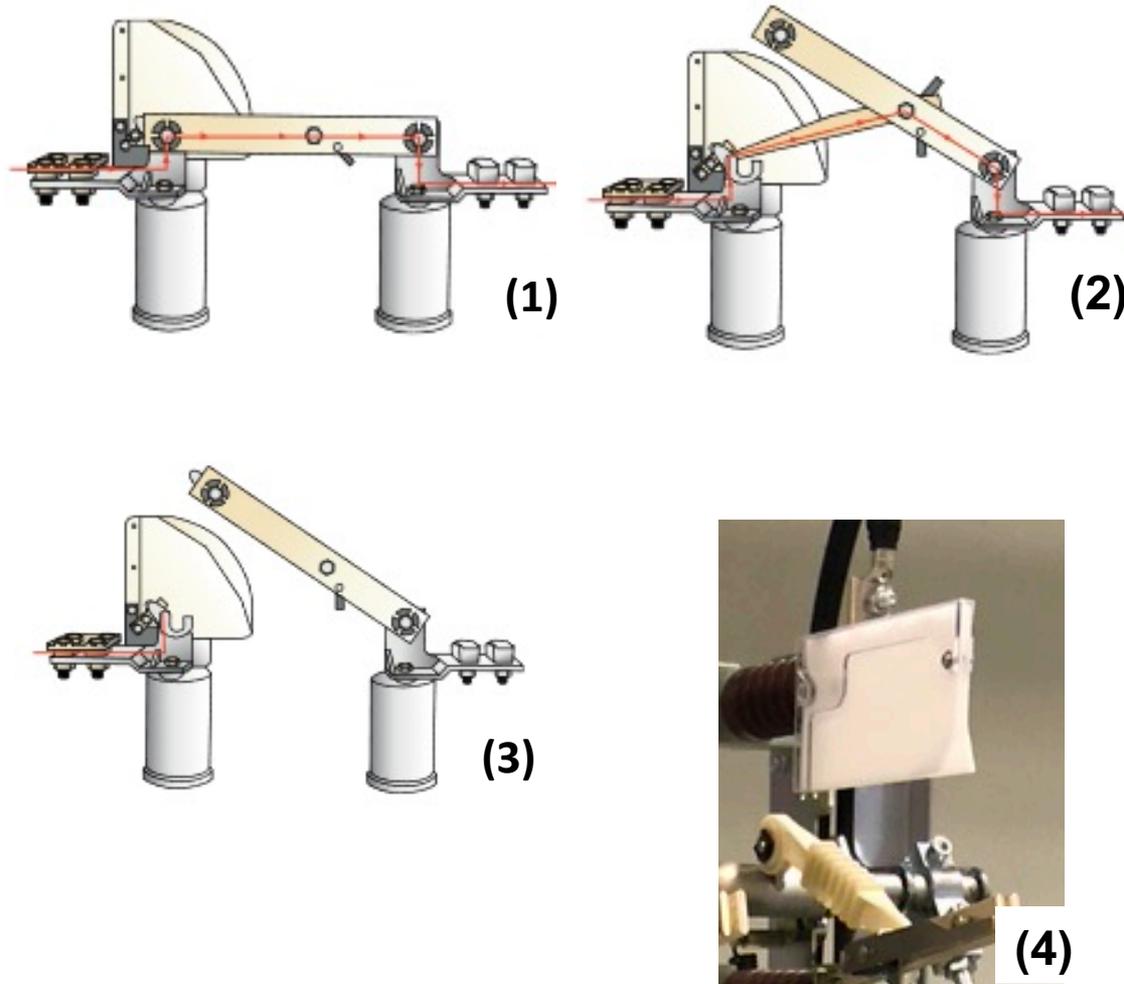
→ Quels paramètres rentrent en jeu lors de la phase d'interruption du courant

→ Sur quels paramètres pourrions nous jouer pour augmenter le nombre d'interruption sans maintenance.

Dispositif mis en place :

- Mise à disposition d'un interrupteur à air L-Tri de chez Schneider Electric
- Mise en place d'une alimentation permettant de générer une demi alternance de courant de 2kA sous 1500V max.





Présentation de l'interrupteur

- (1) **circuit fermé** le courant passe dans le couteau principal;
- (2) **phase d'ouverture** le courant passe dans le couteau secondaire
- (3) **circuit ouvert** le système doit garantir l'isolation

Programme d'essai



- 4 matériaux (plaques)

Matériaux
POM – (Polyoxymethylene) $(-\text{CH}_2-\text{O}-)_n$
PTFE – (Polytetrafluoroethylene) $(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-)_n$
UF – (Urea-Formaldehyde resin) $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ (-\text{CH}_2-\text{NH}-\text{C}-\text{NH}-\text{CH}_2-)_n \end{array}$
PA66 – (Polyamide 66) $(-\text{NH}(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}-)_n$

- **Onde de courant (630A RMS)**
- **Etude sur 1 seule phase du produit**
- **10 tirs consécutifs pour chaque matériaux**

→ Synchronisation de l'ouverture du couteau avec le départ de l'onde

→ Première étape :

Les premières séries de mesures ont montré un délai variable entre l'instant où est envoyé la demande d'ouverture et l'ouverture du couteau secondaire.

→ Seconde étape :

- Pour ajuster au mieux le départ de l'onde avec l'ouverture du couteau, un optocoupleur a été rajouté sur l'un des couteaux primaires.
- L'incertitude entre cet instant et l'ouverture du couteau secondaire passe de 2,8ms à 0,3ms

Plan d'expérience

17 novembre 2021



Matériaux

POM H - Delrin

PTFE

UROCHEM 171 (UF – Formaldéhyde)

BASF Ultramid A3X1G5
(PA66 GF25FR)

Mesures électriques →

Tension, courant,
puissance et énergie

Pesées →

Masse ablatée, taux d'érosion

Imagerie rapide →

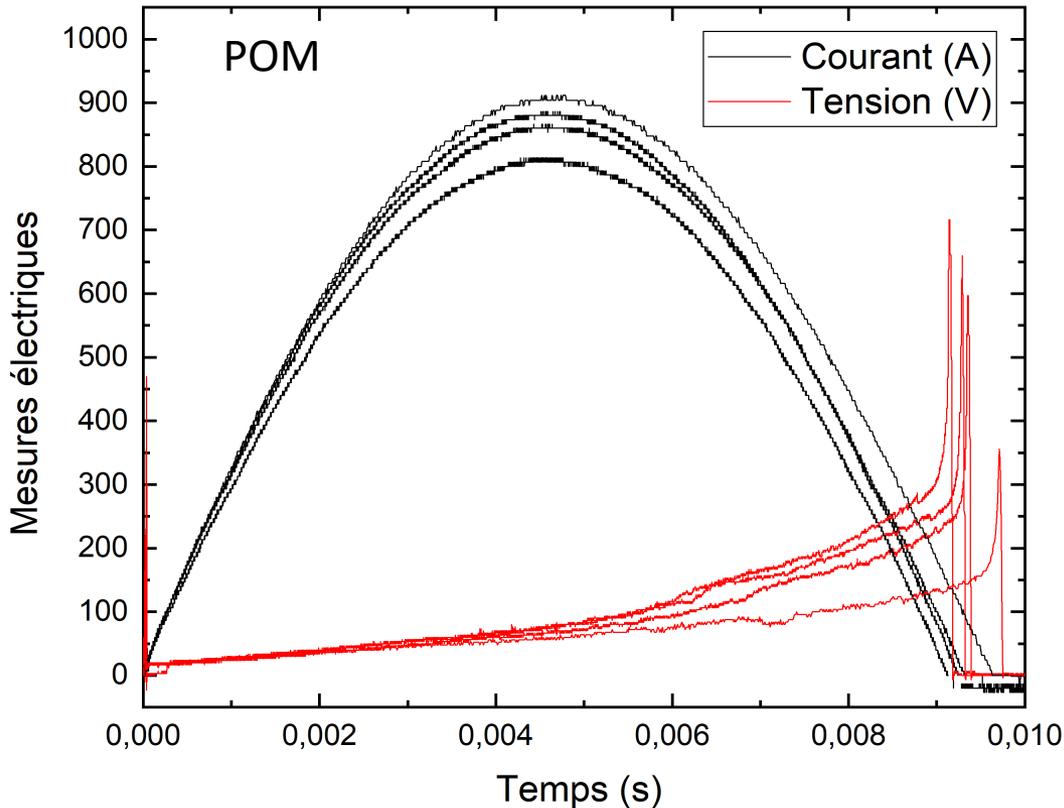
Apparition de l'arc, vitesse d'ouverture
Allongement de l'arc et ablation

Spectroscopie →

Espèces présentes
Principales propriétés du milieu

Conditions opératoires :

- POM-H
- Onde 630A RMS



→ Pour une même tension de charge, très légère dispersion sur l'amplitude de l'onde de courant résultante.

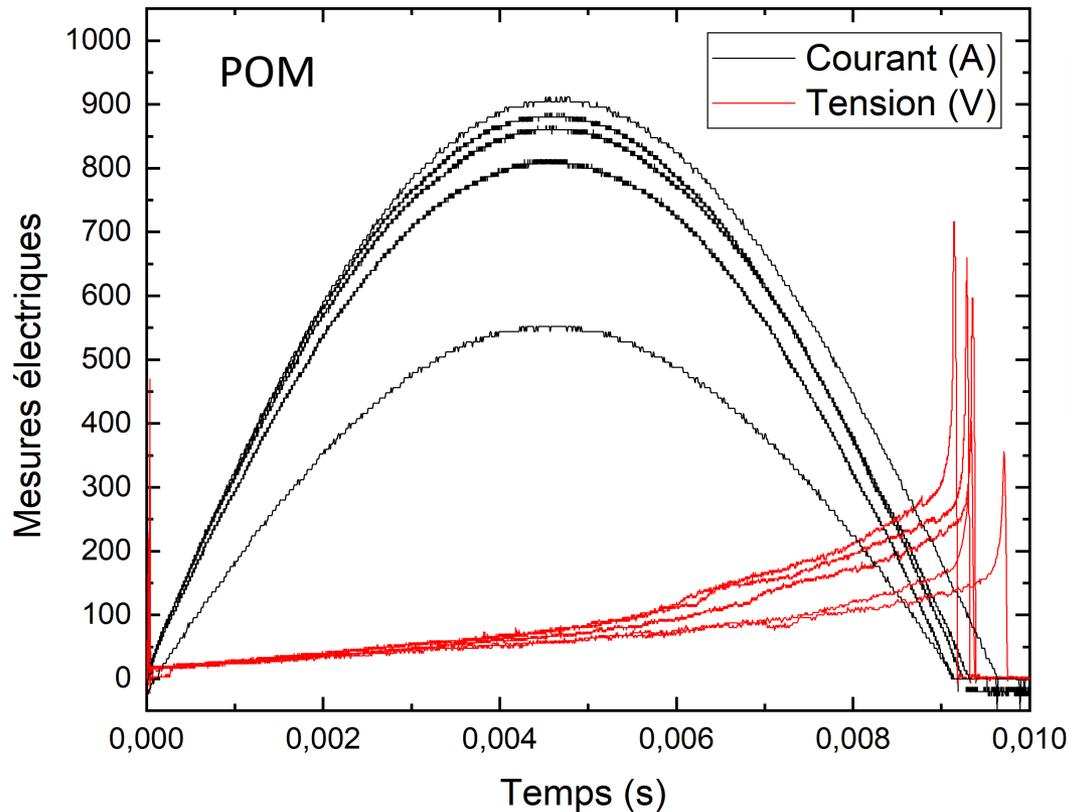
→ $t < 4\text{ms}$: Faible écart de la tension

→ $t > 4\text{ms}$: Variation de U_{ARC} plus marquée

→ A confronter avec l'imagerie rapide

Conditions opératoires :

- POM-H
- Onde 630A RMS

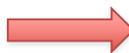
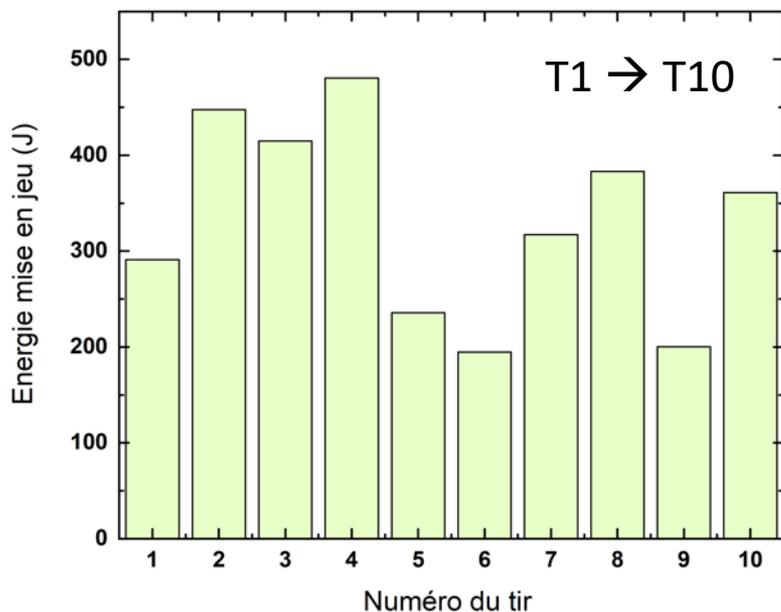


→ Au cours de la série, nous avons pu obtenir quelques ratés (dépôt de suies,...)

→ Comparaison et discussion des mesures non pas pour une valeur de courant mais en terme d'énergie mise en jeu lors de la série de tirs

Pesées tous les 5 tirs :

- **Pion, Couteau et Parois plastiques**



Les tirs 6 et 9 correspondent à des tirs où nous avons eu une onde d'amplitude réduite.

Energie cumulée (10tirs) (J)

3326 J

Energie Moyenne/tir (J)

332 J

Ecart Type (J)

102 J



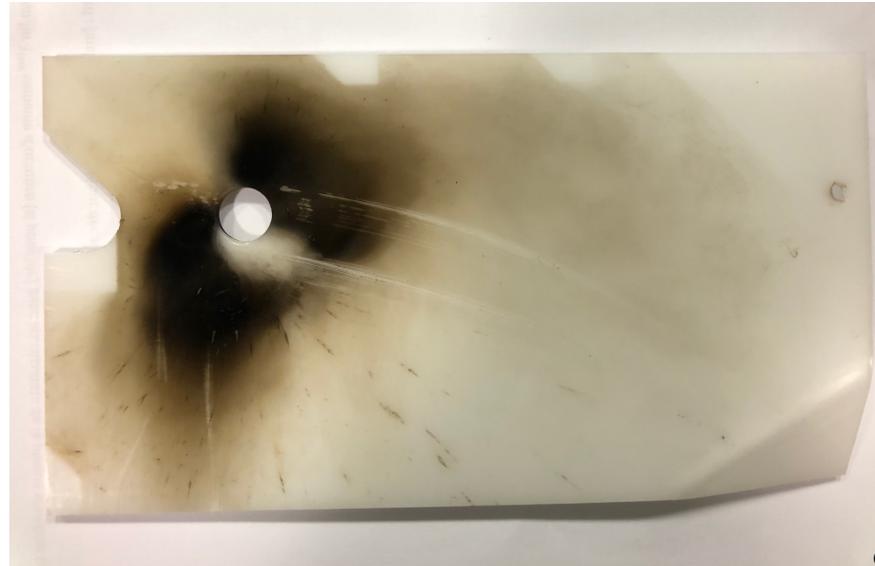
Erosion marquée du couteau



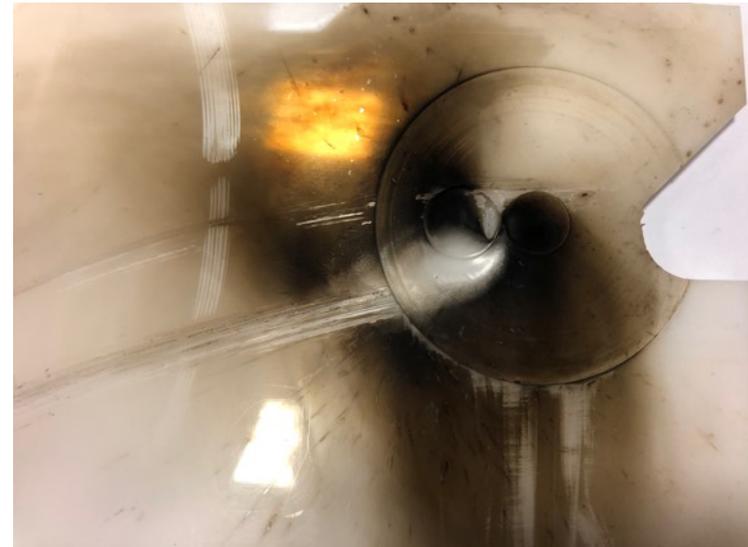
Erosion des parois « Symétrique »

	Pion	Couteau	Plaque G	Plaque D
Ablation (mg) :	3,4	-133	-55	-51
Taux (µg/J)	1	-40	-16	-15

POM-H – 10 tirs



POM-H – 10 tirs



- Ablation des parois plastiques localisée autour du pion (au niveau de la zone d'apparition de l'arc)
- La forme des dépôts de suies semble indiquer un pompage du gaz suivant une direction privilégiée

→ Confrontation de ces résultats avec l'imagerie rapide

Choix du positionnement de la caméra

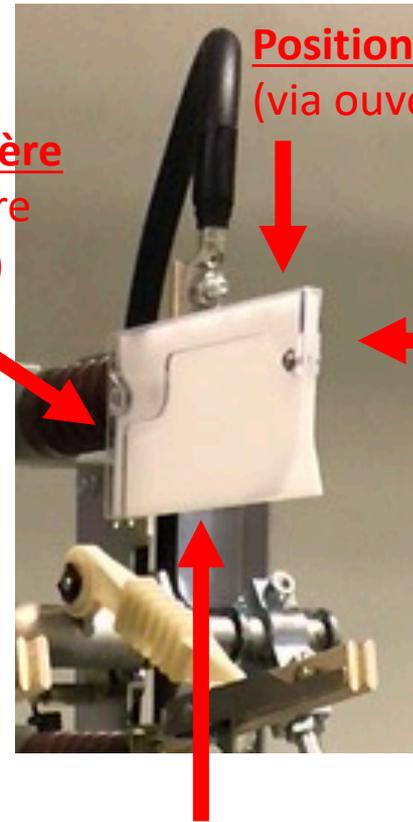
Objectifs :

- Visualisation de la décharge
- Expansion de l'arc
- Imagerie / filtre interférentiel analyse temporelle de l'ablation

Configurations opératoires (imagerie rapide) :

- Densité Neutre ND300
- Filtre H_{α} : bande passante centrée sur la raie hydrogène + ND200
($\lambda = 656 \text{ nm} - \Delta\lambda = 1 \text{ nm}$)
- Filtre F: bande passante centrée sur une raie du fluor + ND200
($\lambda = 687 \text{ nm} - \Delta\lambda = 4 \text{ nm}$)

Position arrière
(via ouverture
arrière plexi)

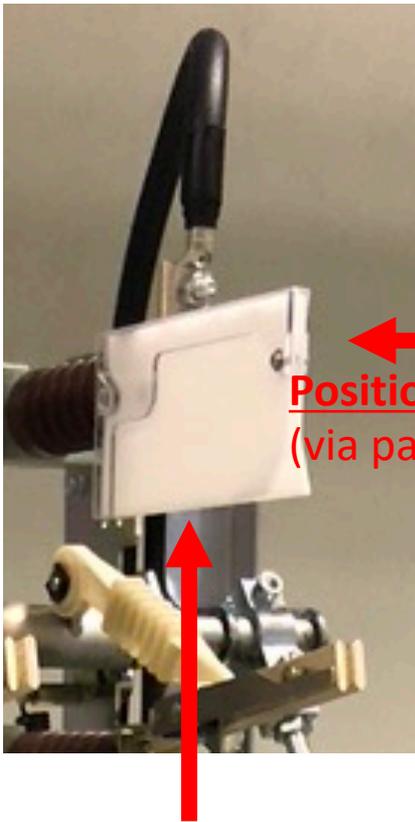


Position supérieure
(via ouverture plexi)

Position latérale
(via paroi plexi)

Position inférieure
(visée entre les deux plaques)

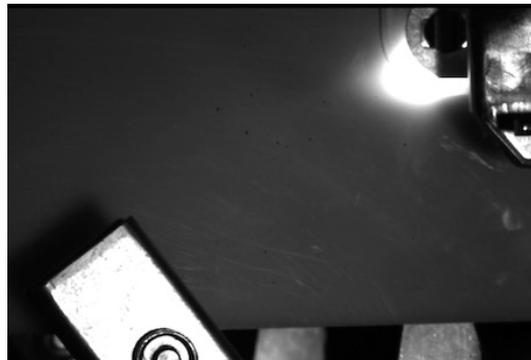
Choix du positionnement de la caméra



Position latérale
(via paroi plexi)

Position inférieure
(visée entre les deux plaques)

Position latérale (via fenêtre plexi)



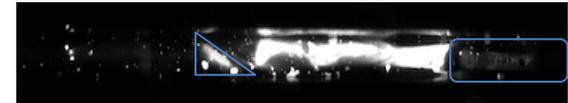
Avantages :

- Mouvement du mécanisme bien visible
- Mouvement de l'arc dans sa globalité

Inconvénients :

- Plaque transparente (plexi) : intrusif

Position inférieure (visée entre les deux plaques)



Avantages

- Vue directe sur la décharge
- Bon positionnement de la caméra pour visualisation le passage du couteau sur le pion

Inconvénients

- Mouvement du mécanisme
- Couteau qui masque les premiers instants

POM-H

→ Caméra rapide Photron AX100 (10000 ima/s)

→ Densité Neutre : ND300

Photron FASTCAM Mini AX100 type 540K-M-8...

1/950000 sec

image : 0

Time : 14:57

1024 x 416

+0.0 ms

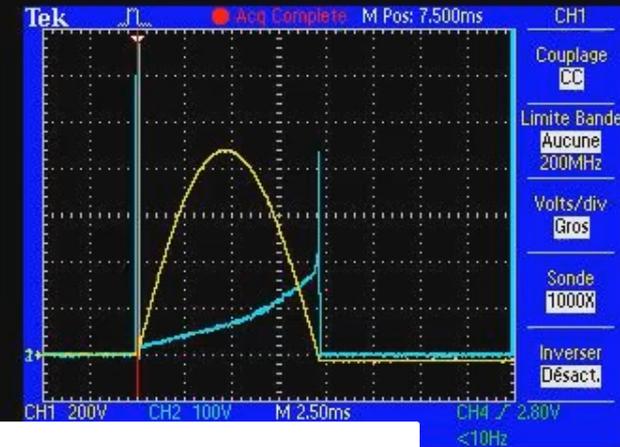
10000 i/s

Début

Date : 2020/11/19

Position inférieure
(visée entre les deux
plaques)

Pion



→ Longueur d'arc, Vitesse d'allongement...

→ Pour le POM : $L_{\max} = 20 \text{ mm}$ et $v = 4,5 \text{ m/s}$

POM-H

- Prise en main et réglages synchronisations du départ de l'onde vs mécanisme.
- Bonne reproductibilité des tirs, malgré quelques ratés (onde de courant « réduites ») pouvant provenir de la présence de suies.
- Pour le POM, le taux d'ablation des parois est proche de celle du couteau.
- Très faible érosion du Pion.
- Visualisation de l'allongement de l'arc au cours du temps.

Matériaux
POM – H
PTFE
BASF Ultramid A3X1G5 (PA66 GF25FR)
UROCHEM 171 (UF – Formaldéhyde)



Mesures électriques

Pesées

Imagerie rapide

POM-H / PTFE / PA66 / UF 171

Mesures électriques



Tension, courant, puissance et énergie

Imagerie rapide

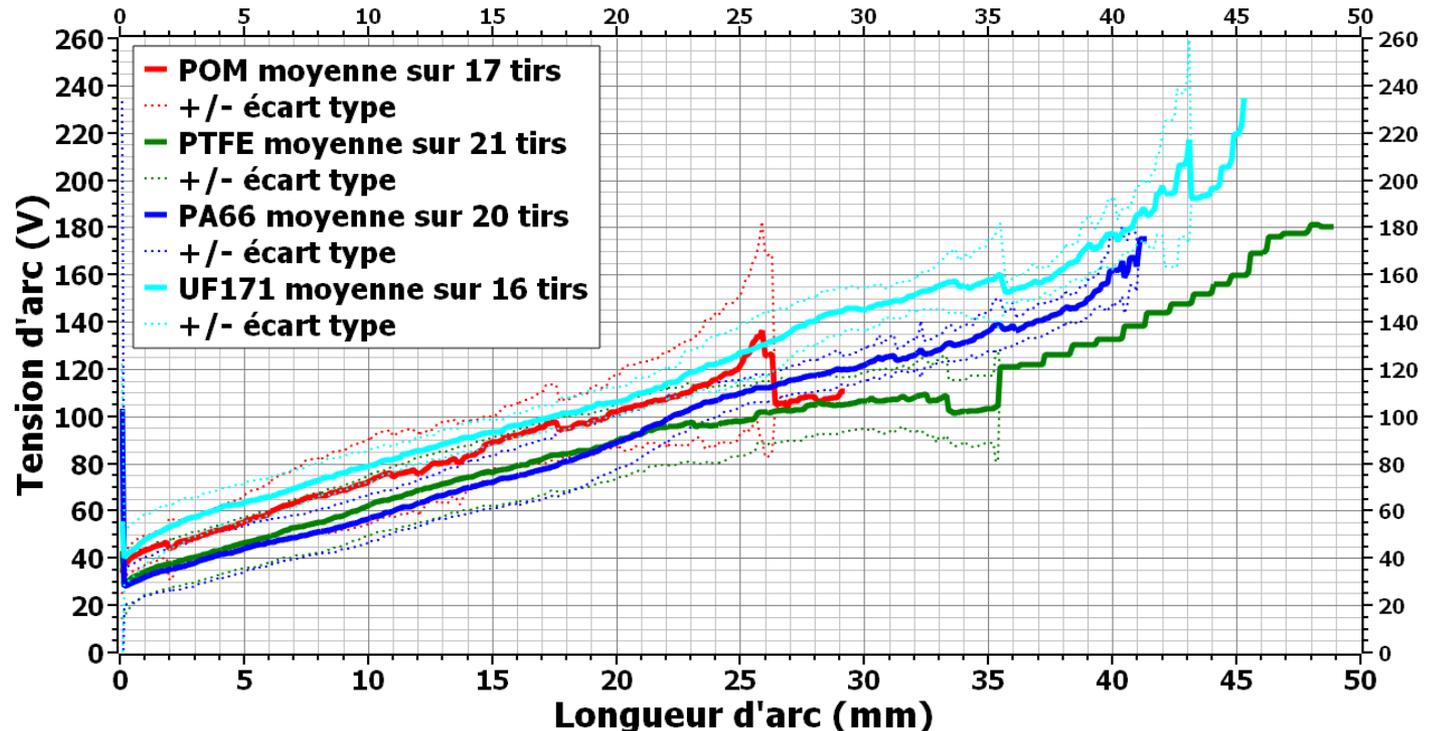
Apparition de l'arc, vitesse d'ouverture
Allongement de l'arc et ablation

→ Corrélation des mesures électriques et des longueurs d'arcs obtenues par imagerie

→ Longueurs d'arcs différentes suivant les matériaux.

→ Nature et géométrie des parois influent grandement sur la vitesse d'ouverture

→ Impact sur la tension



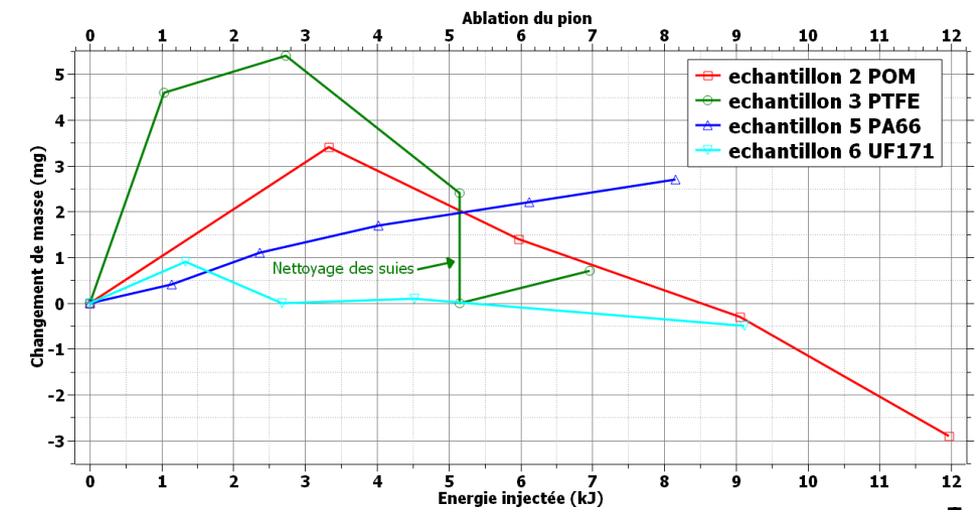
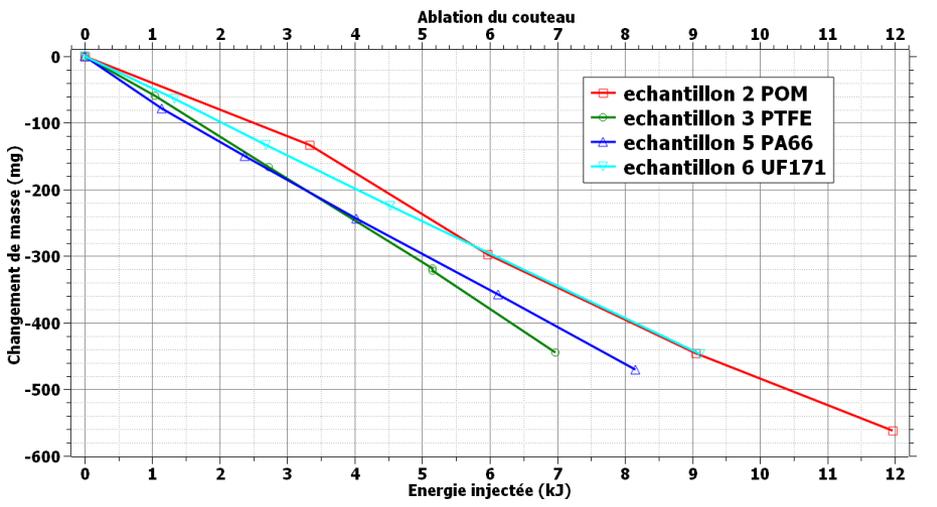
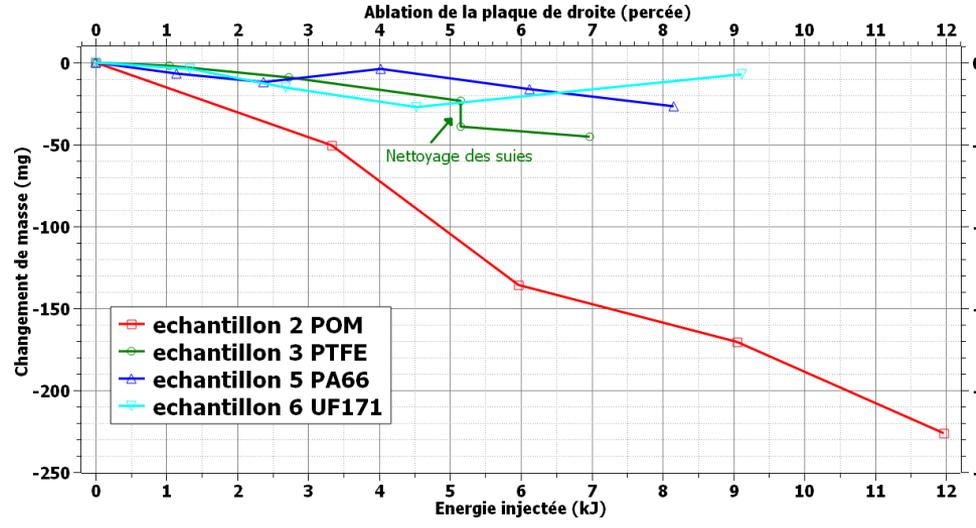
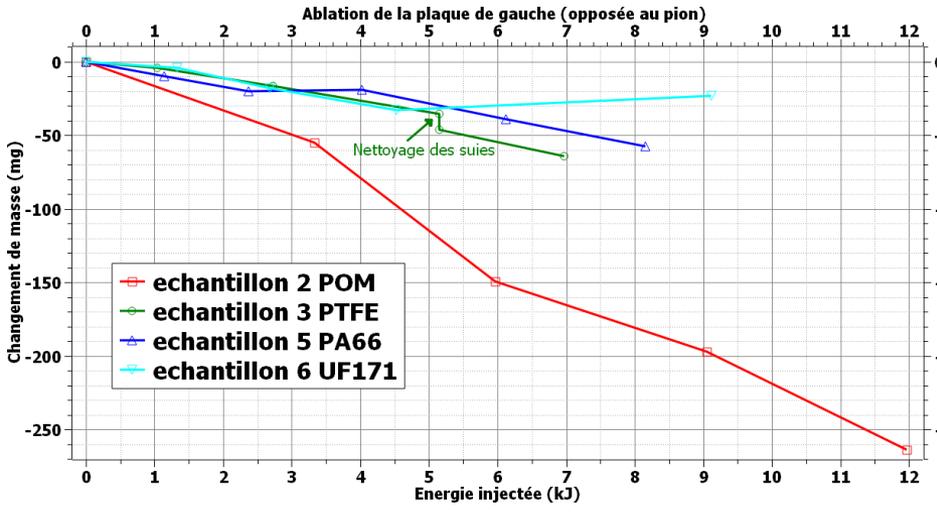
→ Pour une longueur d'arc donnée, les courbes du POM et UF171 sont supérieures vs PTFE et PA66

Comparaison POM/PTFE/PA66/UF171

17 novembre 2021

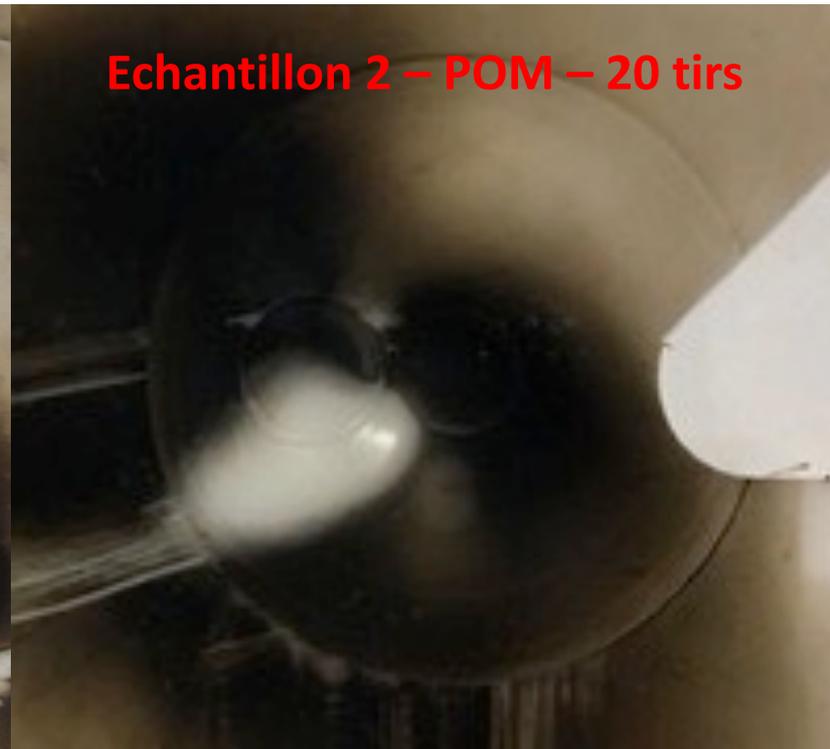
Echantillon	n°2 POM	n°3 PTFE	n°5 PA66	n°6 UF171
Nombre de tirs effectués	41	24	20	20
Energie totale cumulée	11,97 kJ	6,97 kJ	8,16 kJ	9,12 kJ
Energie moyenne par tir	291 J	290 J	400 J	455,8 J
Ecart type	89 J	95 J	17 J	9 J
Ablation paroi plastique (taux)	490 mg 41 µg/J	59 mg 8 µg/J	84 mg 10 µg/J	31 mg 3 µg/J
Ablation métallique (taux)	564 mg 47 µg/J	316 mg 45 µg/J	467 mg 57 µg/J	447 mg 49 µg/J
Remarque	Perçage en face du pion par l'ablation	Ouverture rapide (PTFE)	Ouverture rapide (jeu) Plaque + fine Espace inter-paroi + grand	Important dépôt de suie Ouverture + rapide Présence de mastic dans la zone ablatée

Ablation des différents éléments en fonction de l'énergie injectée



➔ Ablation plus marquée dans le cas du POM vs PTFE, PA66 et UF171

Ablation paroi POM / PTFE



→ Ablation des parois aux proches voisinages du pion

→ Présence de suies

Photron FASTCAM Mini AX100 type 540K-M-8...
1/400000 sec
image : 10
Time : 17:02

1024 x 416
+1.0 ms

10000 i/s
Début
Date : 2020/10/15

Imagerie rapide

- 10000 im/s
- **Filtre ND**

Pion



Photron FASTCAM Mini AX100 type 540K-M-8...
1/1000000 sec
image : 10
Time : 15:52

1024 x 416
+1.0 ms

10000 i/s
Début
Date : 2020/10/15

Imagerie rapide

- 10000 im/s
- **Filtre H_{alpha}**

Pion



POM-H (Vue inférieure)

Comparaison Imagerie

- Pas de différence notable entre les films pour différents filtres
- On aurait pu s'attendre à une zone plus lumineuse ou contrastée au proche voisinage du pion.
- Hydrogène choix non judicieux (milieu Air) ?
- A comparer PTFE / Filtre F

Paroi POM-H (Vue latérale)

Photron FASTCAM Mini AX100 type 540K-M-8... 6800 i/s
1/100000 sec 1024 x 608 Début
image : 0 +0.000 ms
Time : 09:48

Photron FASTCAM Mini AX100 type 540K-M-8... 6800 i/s
1/25000 sec 1024 x 608 Début
image : 0 +0.000 ms
Time : 15:21

Imagerie rapide

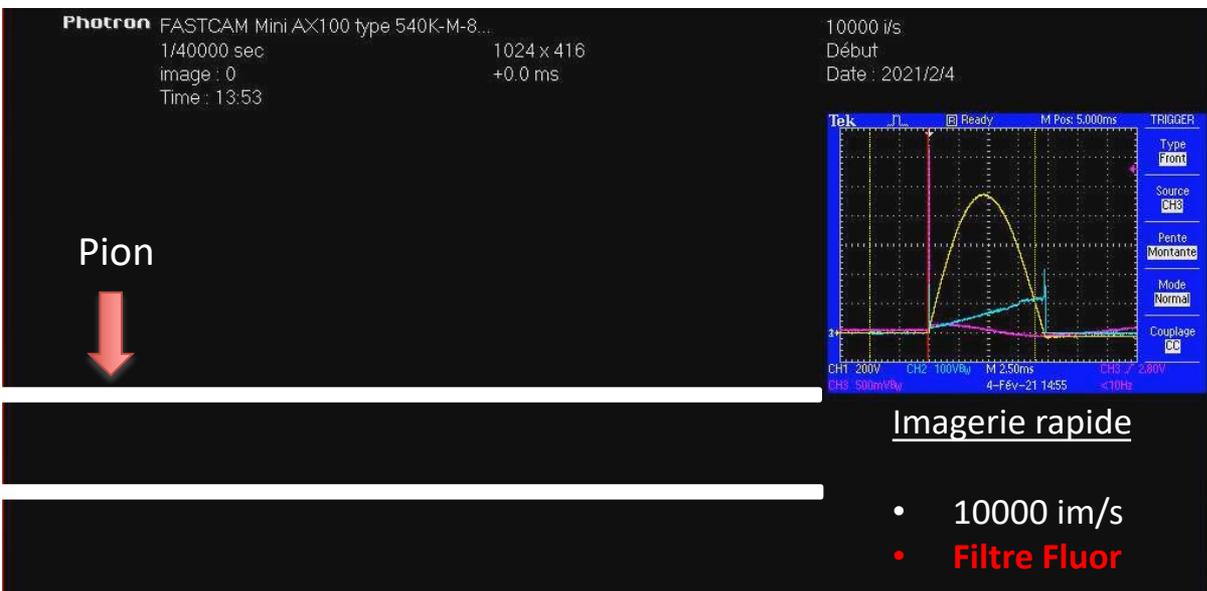
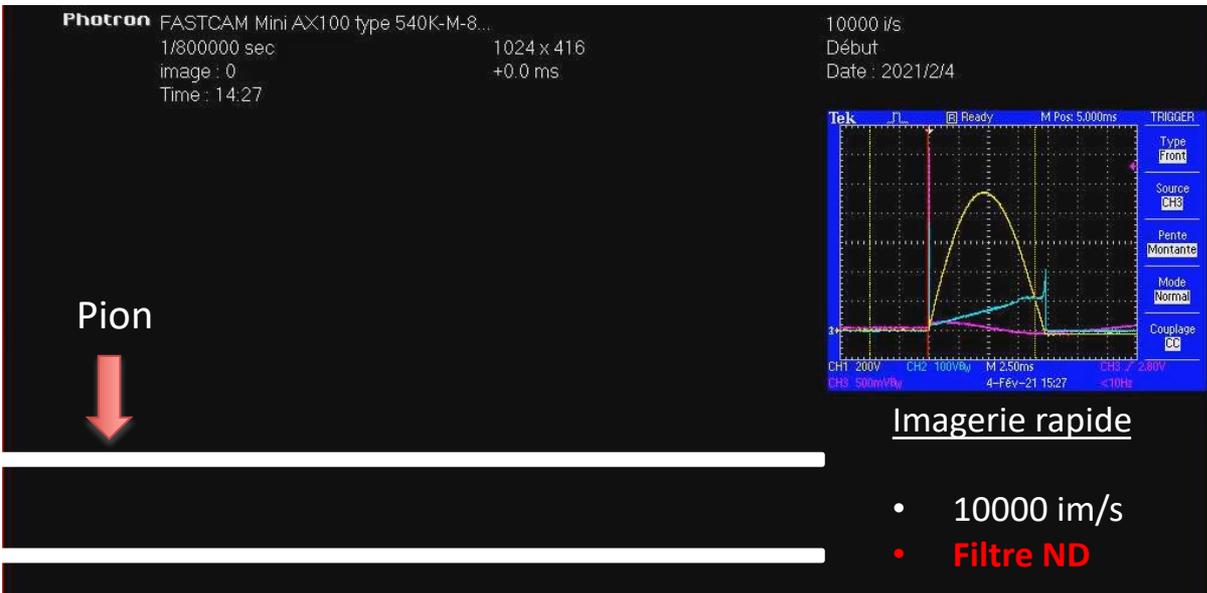
- 6800 im/s
- **Filtre ND**

Imagerie rapide

- 6800 im/s
- **Filtre H**

Comparaison Imagerie

- ➔ Visualisation d'une importante quantité de métal fondu éjecté
- ➔ Imagerie relativement similaire entre les acquisitions densités neutres ND vs Filtre H
- ➔ **Mesures spectroscopiques**



Paroi PTFE (Vue inférieure)

Comparaison Imagerie

- ➔ Identique au POM avec filtre H α : Pas de différence notable entre ND vs Fluor
- ➔ On aurait pu s'attendre à une zone plus lumineuse ou contrastée au proche voisinage du pion.
- ➔ Bande spectrale inadaptée, Pb axe de visée ?

Paroi PTFE (Vue latérale)

Photron FASTCAM Mini AX100 type 540K-M-8...
1/250000 sec
image : 0
Time : 12:54

6800 i/s
Début

1024 x 608
+0.000 ms

Photron FASTCAM Mini AX100 type 540K-M-8...
1/50000 sec
image : 0
Time : 12:27

6800 i/s
Début

1024 x 608
+0.000 ms

Imagerie rapide

- 6800 im/s
- **Filtre ND**

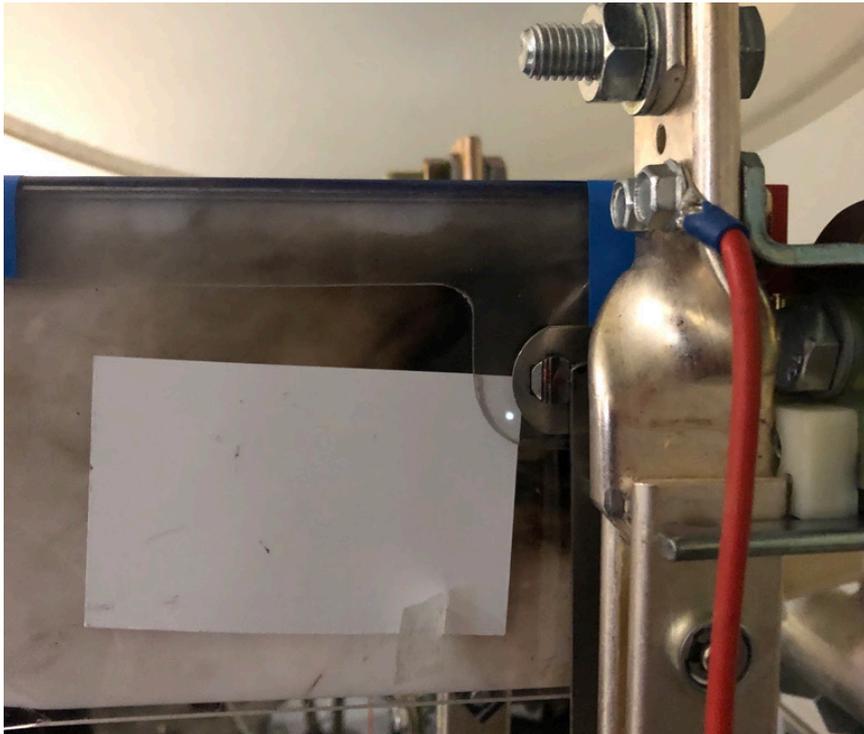
Imagerie rapide

- 6800 im/s
- **Filtre Fluor**

Comparaison Imagerie

- ➔ Importante quantité de métal fondu éjecté autour du couteau
- ➔ Identique au POM avec filtre H α : Pas de différence notable entre les films ND vs filtre Fluor
- ➔ **Mesures spectroscopiques**

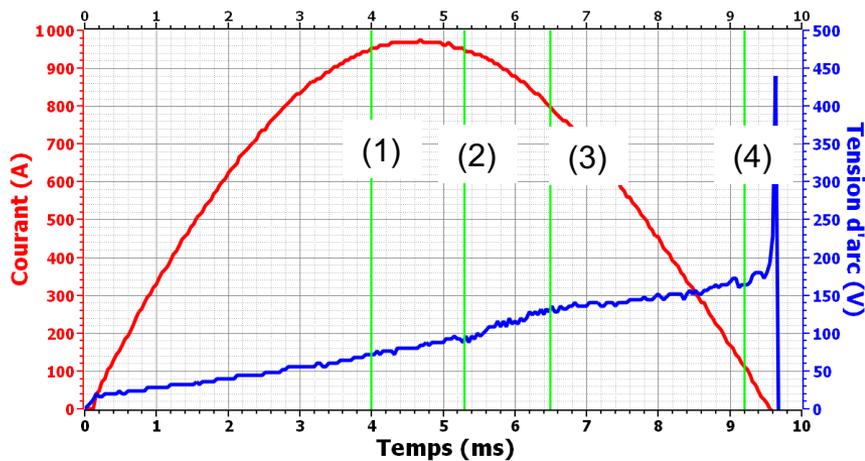
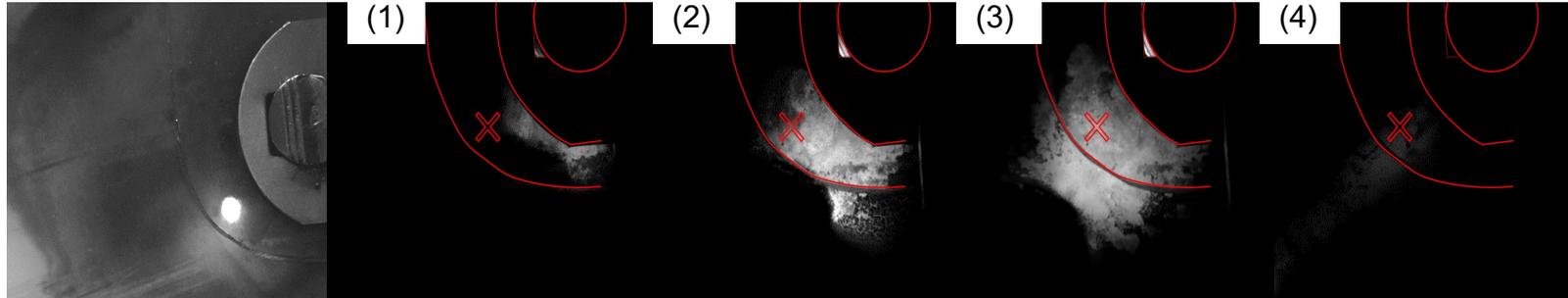
- Imagerie rapide + Filtre interférentiel n'ont pas permis d'apporter une information supplémentaire.
- Spectroscopie optique d'émission sur certaines zones ciblées du spectre



Conditions opératoires

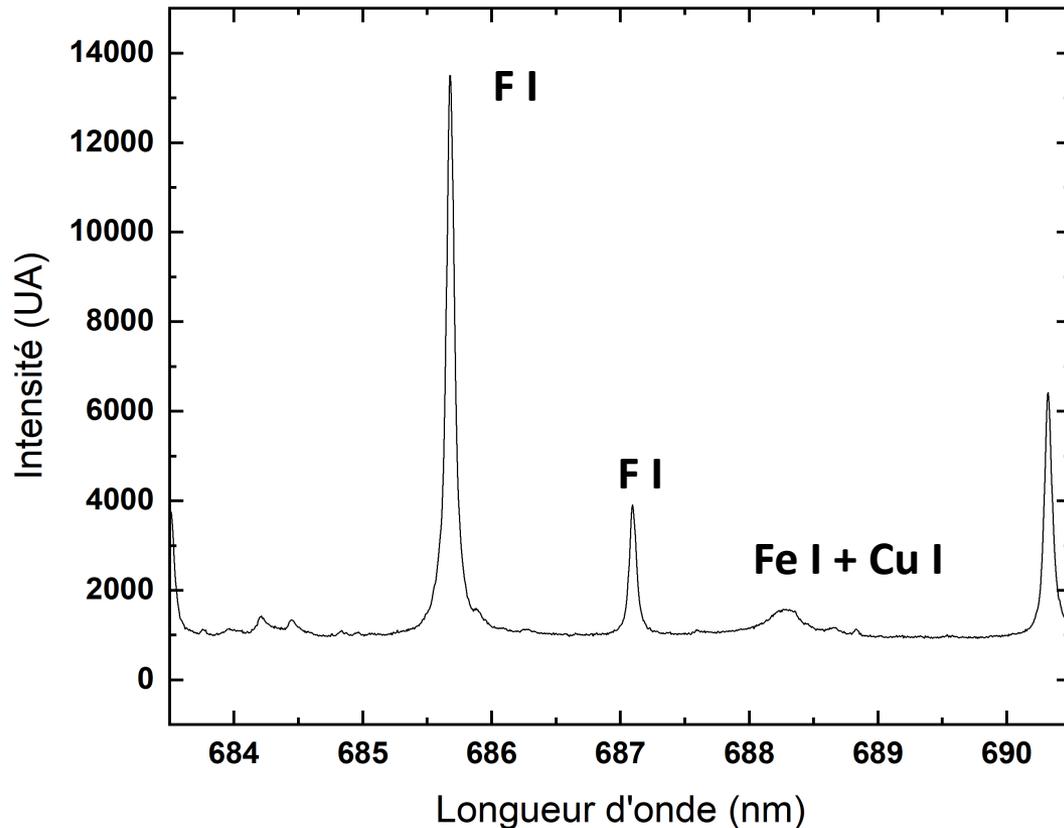
- Mesure via fibre optique + optique
- Parois : POM ou PTFE
- Visée au raz du pion (paroi plexi)
- Résolution temporelle : 3000 fps
- Espèces ciblées :
 - Fluor
 - Hydrogène
 - Fer, Cuivre

Imagerie au point de visée spectroscopique



Conditions opératoires

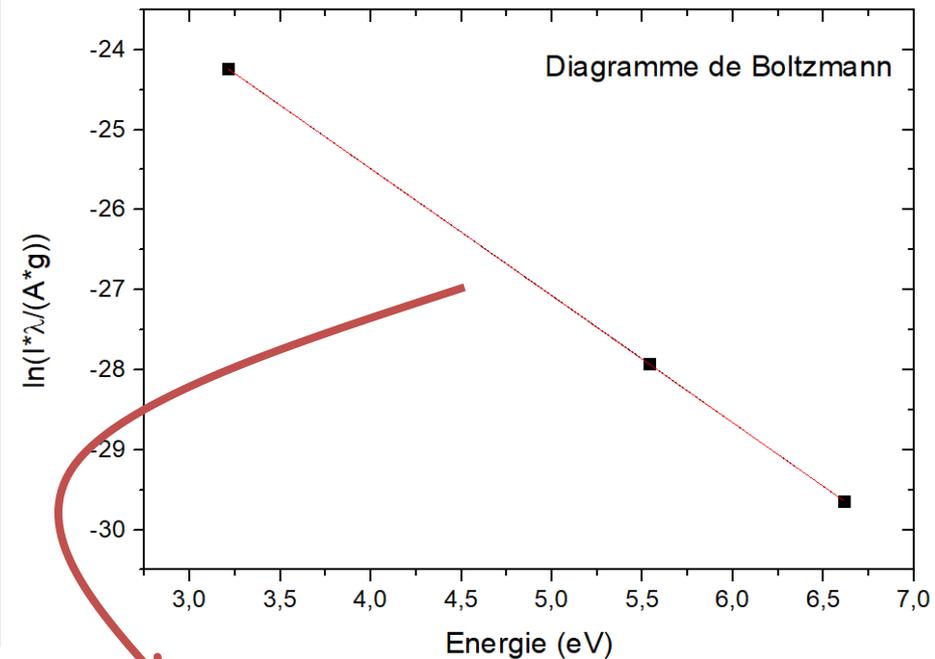
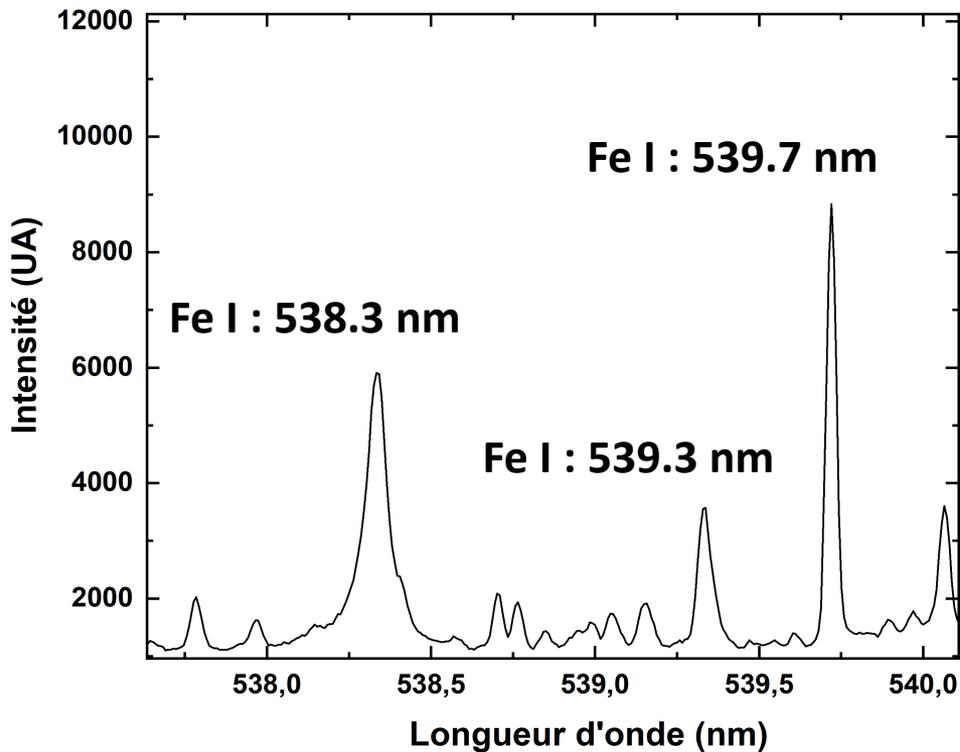
- Point de visée au plus proche voisinage de l'apparition de l'arc.
- Le point de mesure se situe dans la zone d'arc
- Espèces visées : Fluor et hydrogène

Raie du FluorAcquisition (t=6ms)

- Paroi PTFE + plexi
- Rapport FC vs Fluor : 3:1
- Il se peut que ce rapport ne soit pas suffisant pour améliorer de manière significative le signal reçu par imagerie rapide ($\lambda = 687 \text{ nm} - \Delta\lambda = 4 \text{ nm}$)

Raie du Fer

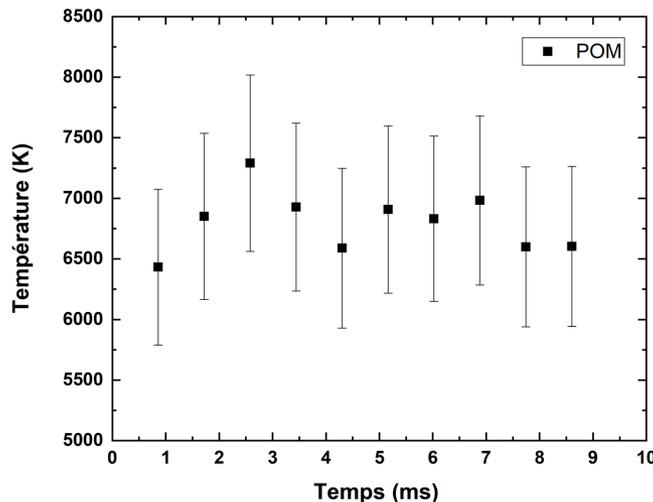
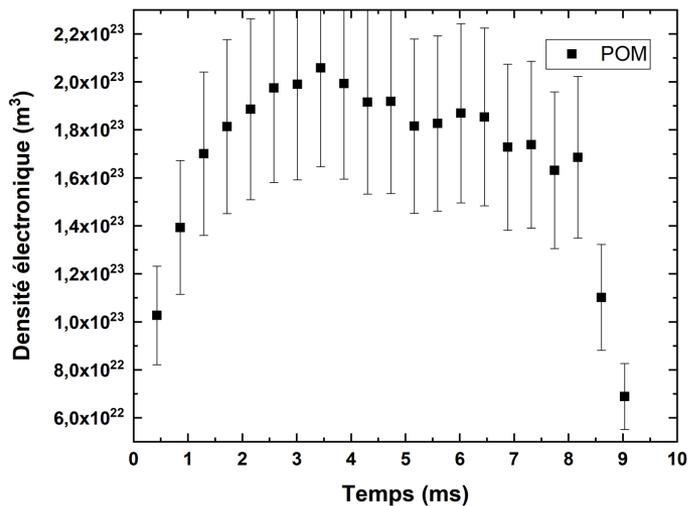
→ Présence d'un spectre riche en raie du Fe.



$$pente = \frac{-1}{k_b T}$$

→ Raies dont les niveaux émetteurs sont séparés par plus de 3 eV.

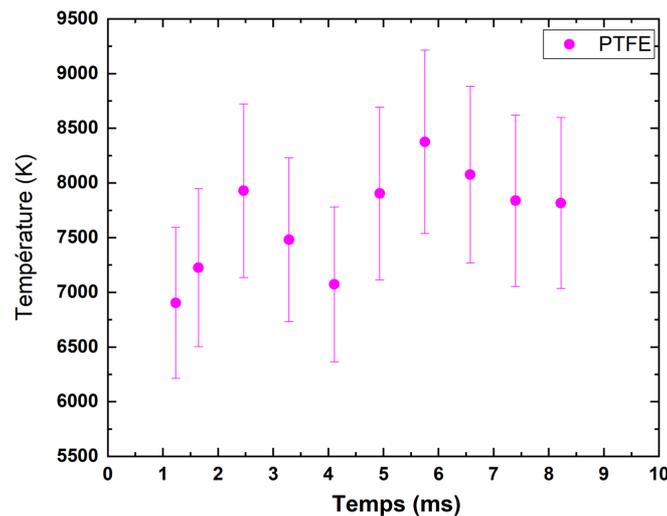
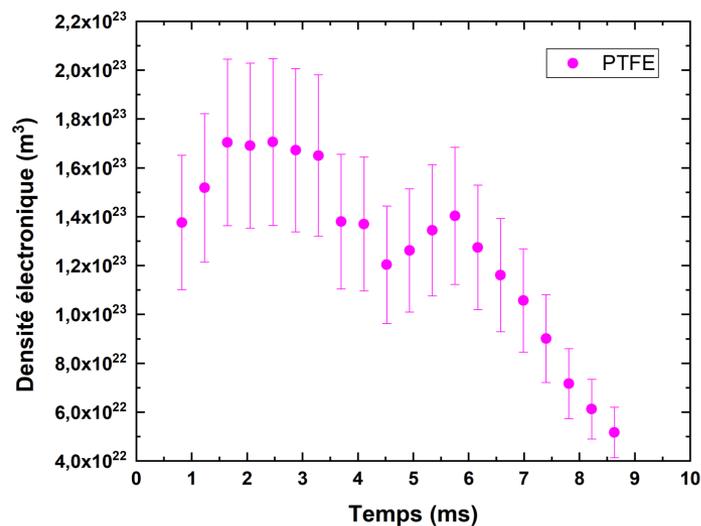
POM-H



→ Densité électronique élevée / Température faible

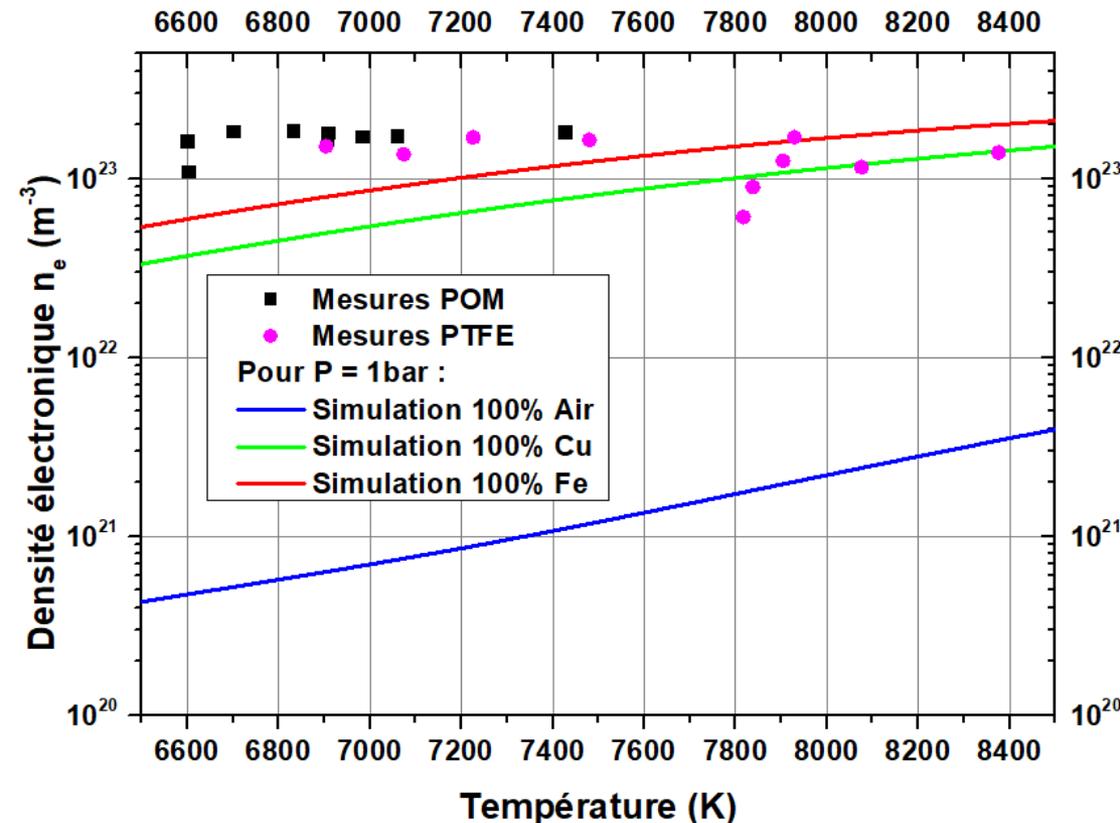
→ Variation du n_e / T à $t=4ms$, passage du couteau

PTFE



→ Les mesures semblent indiquer que nous sommes en présence d'un milieu avec des densités électroniques élevées et des températures ne dépassant pas les 8000K.

1. Milieu ouvert → P= 1bar



Comparaison mesure / calcul

- Dans le cas où l'on fait l'hypothèse que P=1bar
- Le couple densité n_e – T semble indiquer que nous sommes en présence d'un milieu avec une forte proportion de vapeur.
- Pour atteindre un tel couple Te-Ne, il nous faut être en présence d'un milieu 100% Fe.
- Surpression ?

2. Surpression → $P > 1\text{bar}$



Analyse Imagerie

- Importante quantité de métal fondu éjecté autour du couteau
- Formation d'une traînée sur les images
- Vitesse d'éjection pouvant atteindre les 300 m/s.
- Ejection induite par l'ouverture du couteau mais également par une légère surpression induite par la décharge

Cette approche semble plus probable que la précédente :

- Vitesse d'éjection des gouttelettes semble indiquer la présence d'une légère surpression.
- Dans le cas du POM, l'ablation du POM est sensiblement équivalente à celle du couteau.

Conclusions et perspectives

17 novembre 2021

- Mise en place et prise en main de l'interrupteur MT
- 4 matériaux testés (POM, PTFE, PA66 et UF171)
- Caractérisation électrique, Ablation et imagerie rapide

- Pour une tension de charge donnée :
 - Importante ablation du couteau avec les différents matériaux
 - Masse du pion reste inchangée
 - Ablation des parois en POM plus importante vs autres matériaux
 - Pour une longueur d'arc donnée (imagerie), le POM-H et UF171 semble permettre d'obtenir une tension d'arc plus importante vs autres matériaux
- Spectroscopie : Les quelques mesures effectuées semblent indiquer que nous sommes en présence d'un milieu très riche en vapeurs métalliques.
- Densités électroniques élevées (Effet de pression possible)

- Mesures spectroscopiques (Proportion Fe vs autres composants)
- Exploration plus fine du spectre de la décharge ...