

Influence des paramètres électriques sur les propriétés d'une décharge glissante

Identification de la source d'alimentation et Applications environnementales

S. Pellerin, M. Wartel, G. Charles

GREMI, UMR7344 CNRS Université d'Orléans, Orléans, France

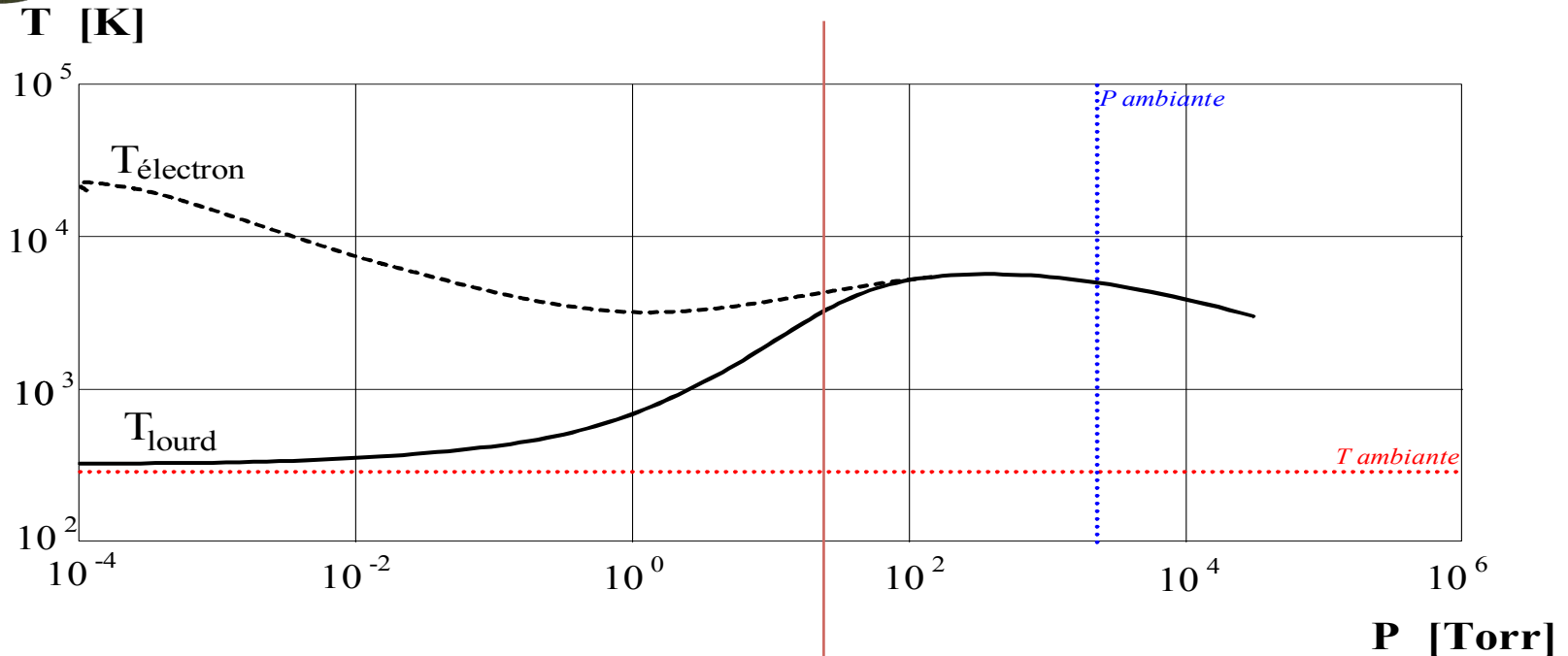
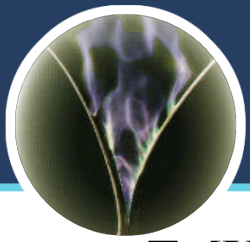
D.-G. Astanei

Université Technique Gheorghe Asachi de Iasi, Roumanie

B. Hnatiuc

Université Maritime de Constanta, Roumanie





Plasma 'Hors Equilibre': $T_{\text{électron}} \gg T_{\text{gaz}}$

↪ réactivité électrochimique, bonne sélectivité

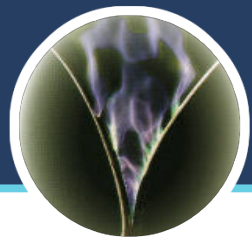
Plasma 'THERMIQUE': $T_{\text{électron}} \approx T_{\text{gaz}}$

↪ source d'enthalpie (découpe, four...), mais mal adaptée à la chimie des plasmas

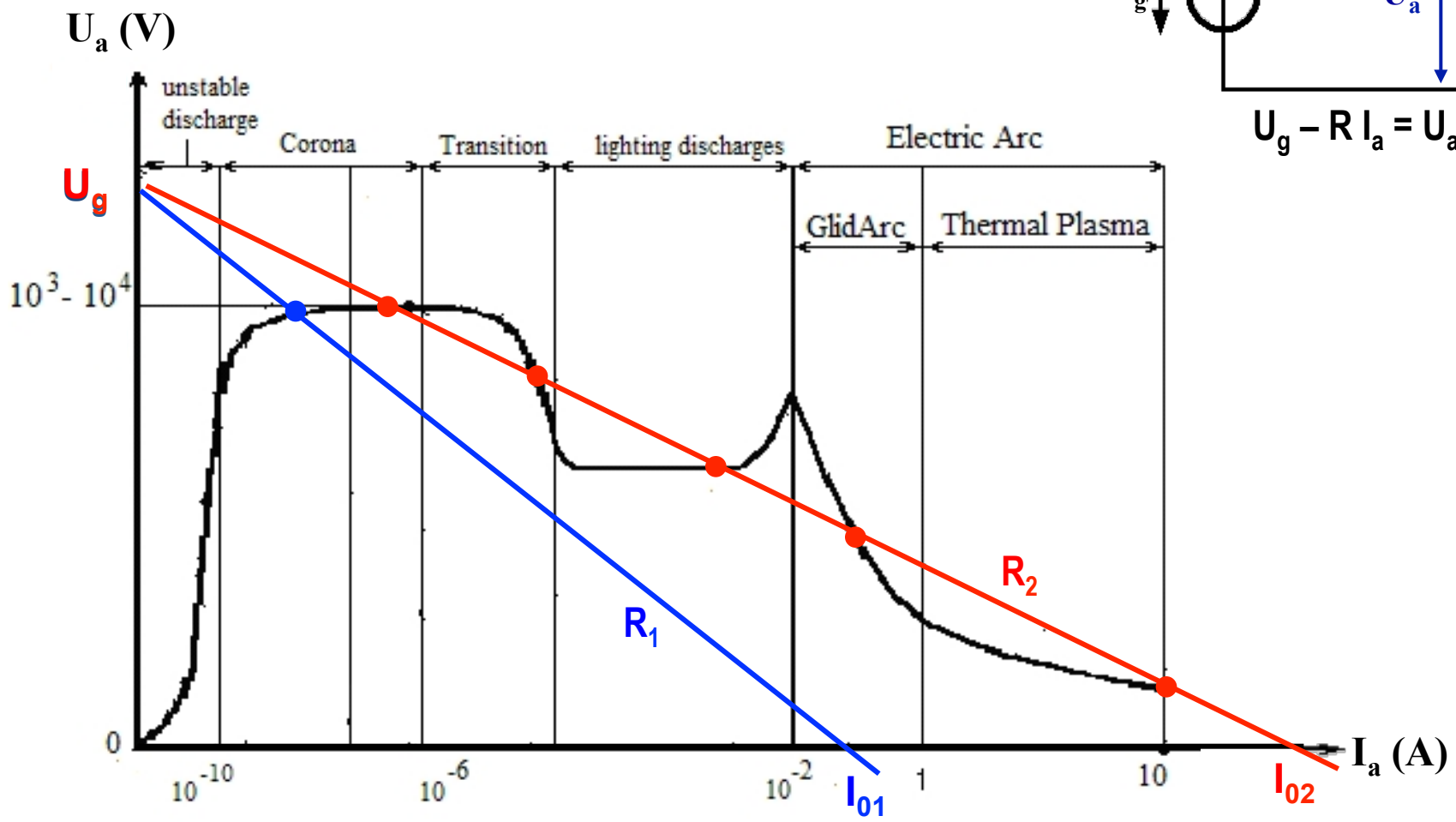
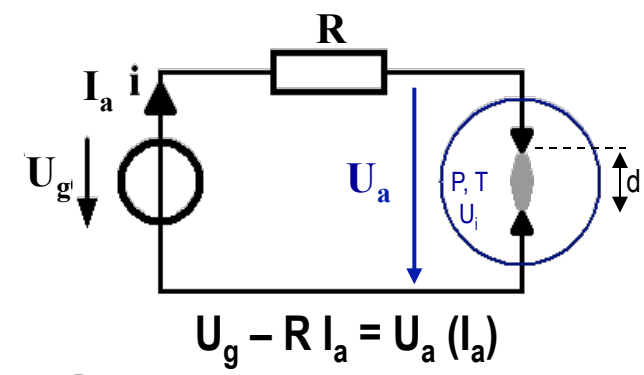
● Décharges électriques hors d'équilibre

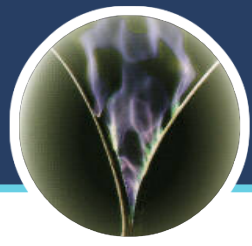
↪ Grand volume de plasmas très réactifs à basse température

⇒ Réacteurs chimiques pour la protection de l'environnement,

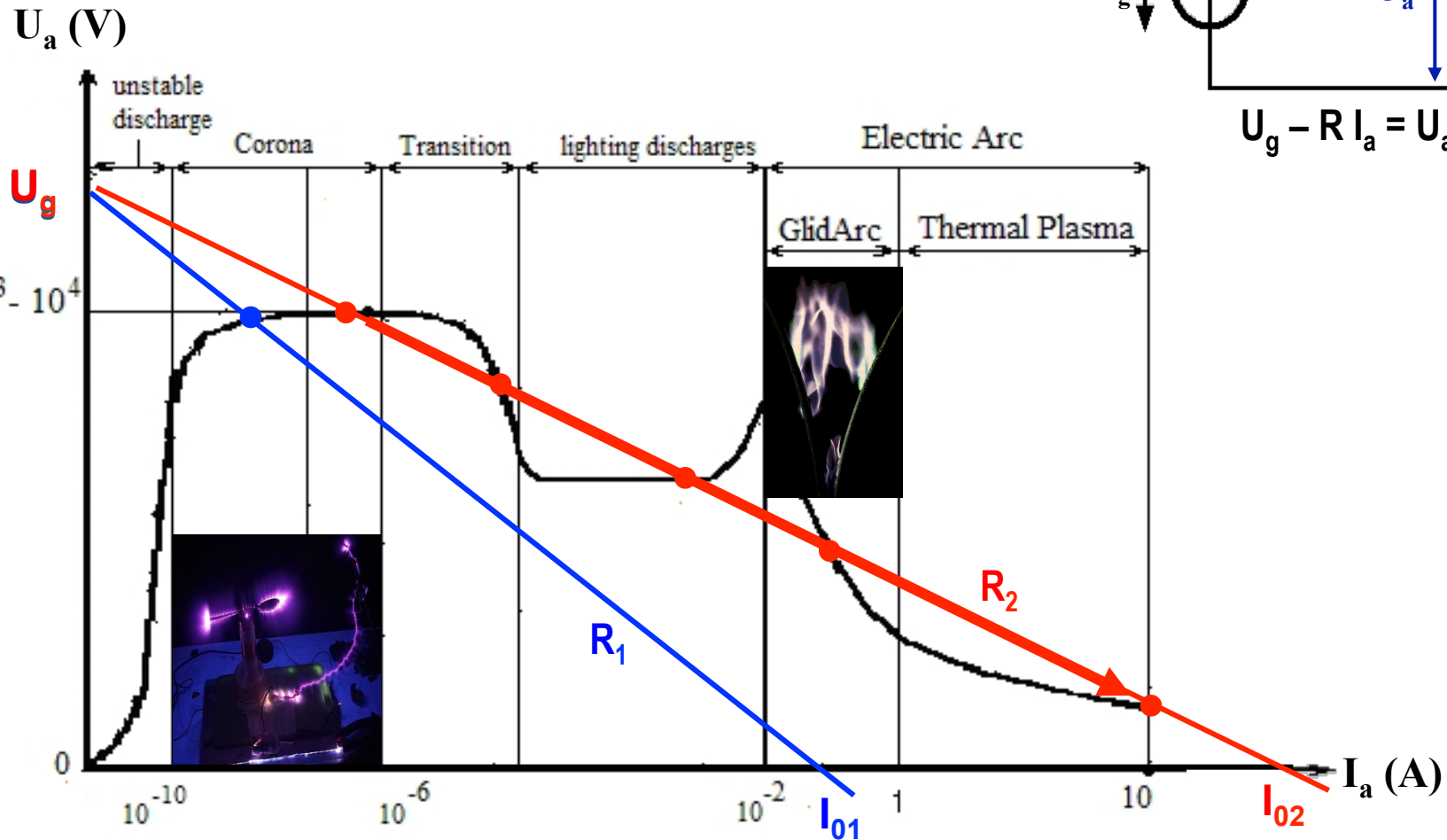
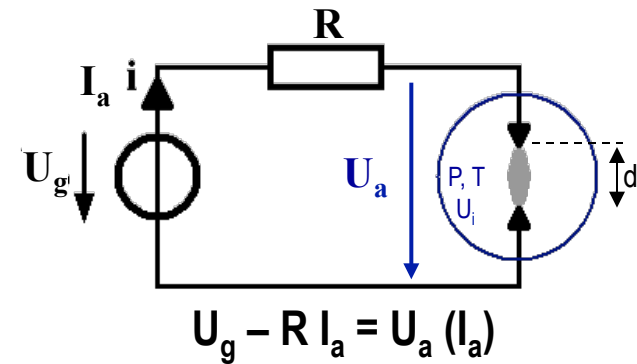


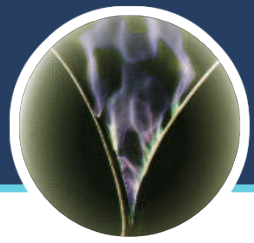
Décharge électrique de type Plasma froid





Décharge électrique de type Plasma froid



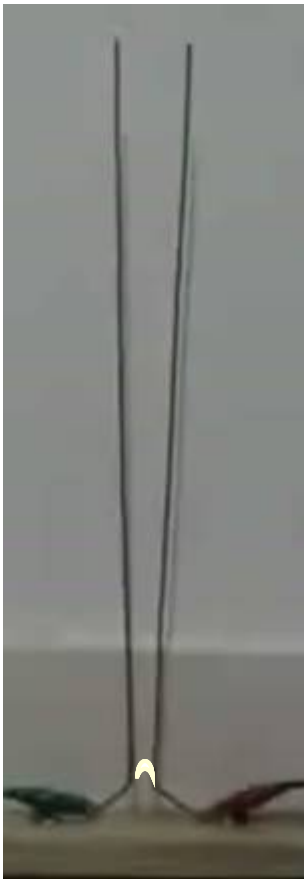


Caractéristiques des arcs glissants

● Décharges électriques hors d'équilibre

↳ Grand volume de plasmas très réactifs à basse température

⇒ Réacteurs chimiques pour la protection de l'environnement, traitement des surfaces...



- Plasma en quasi-équilibre thermique = **dispositif d'enthalpie à haute pression**
Courant d'arc élevé, basse tension; Haute puissance
Champ électrique dans la colonne autour de $E \approx 1\text{kV.m}^{-1}$
Émission thermoélectronique ⇒ faible chute de tension aux électrodes ($\approx 10\text{V}$)
↳ Faible sélectivité et faible efficacité pour les réactions chimiques!
- Décharge luminescente ("Glow Discharge")
Courant faible et puissance limitée; basse pression
Champ électrique dans la colonne autour de $E \approx 10\text{kV.m}^{-1}$
Émission secondaire ⇒ Chute de tension élevée aux électrodes ($\approx 100\text{V}$)

Dispositif réunissant les avantages de ces 2 systèmes ⇒ **GLIDARC**

- ↳ Plusieurs électrodes divergentes dans un flux de gaz
- ↳ Fonctionnement à pression atmosphérique ou supérieure
- ↳ Alimentation DC ou AC



Arc glissant entre ces électrodes ('échelle de Jacob')

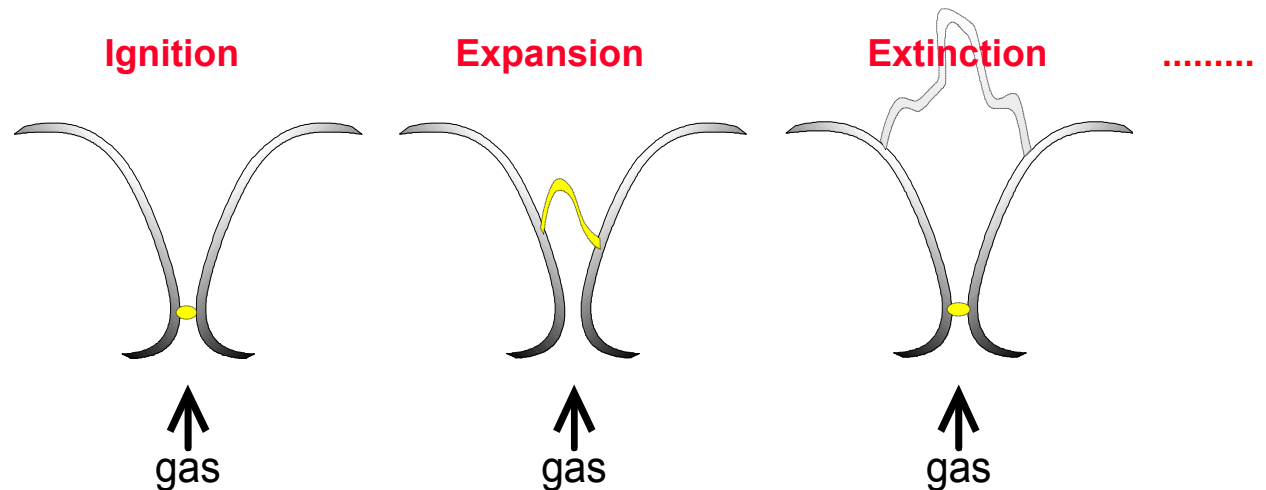
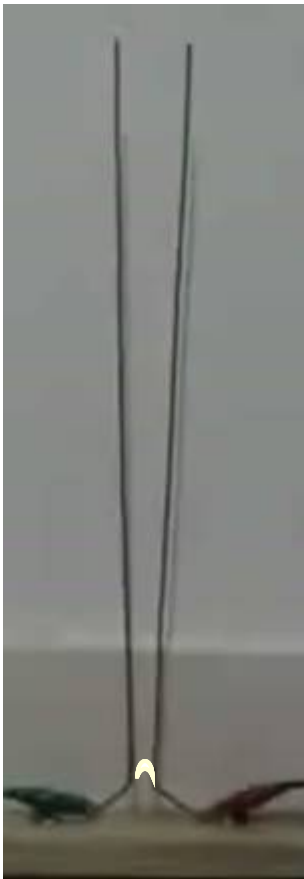


Caractéristiques des arcs glissants

- **Décharges électriques hors d'équilibre**

 - ↳ **Grand volume de plasmas très réactifs à basse température**

 - ⇒ Réacteurs chimiques pour la protection de l'environnement, traitement des surfaces...



Dispositif réunissant les avantages de ces 2 systèmes ⇒ **GLIDARC**

- ↳ Plusieurs électrodes divergentes dans un flux de gaz
- ↳ Fonctionnement à pression atmosphérique ou supérieure
- ↳ Alimentation DC ou AC



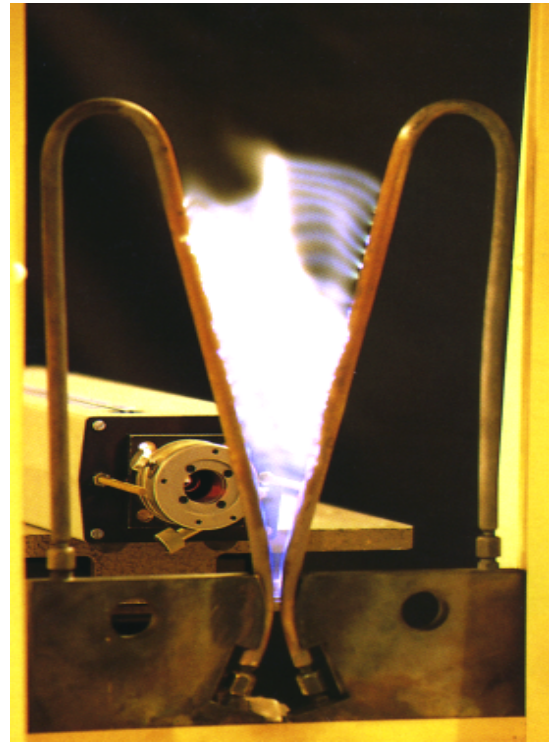
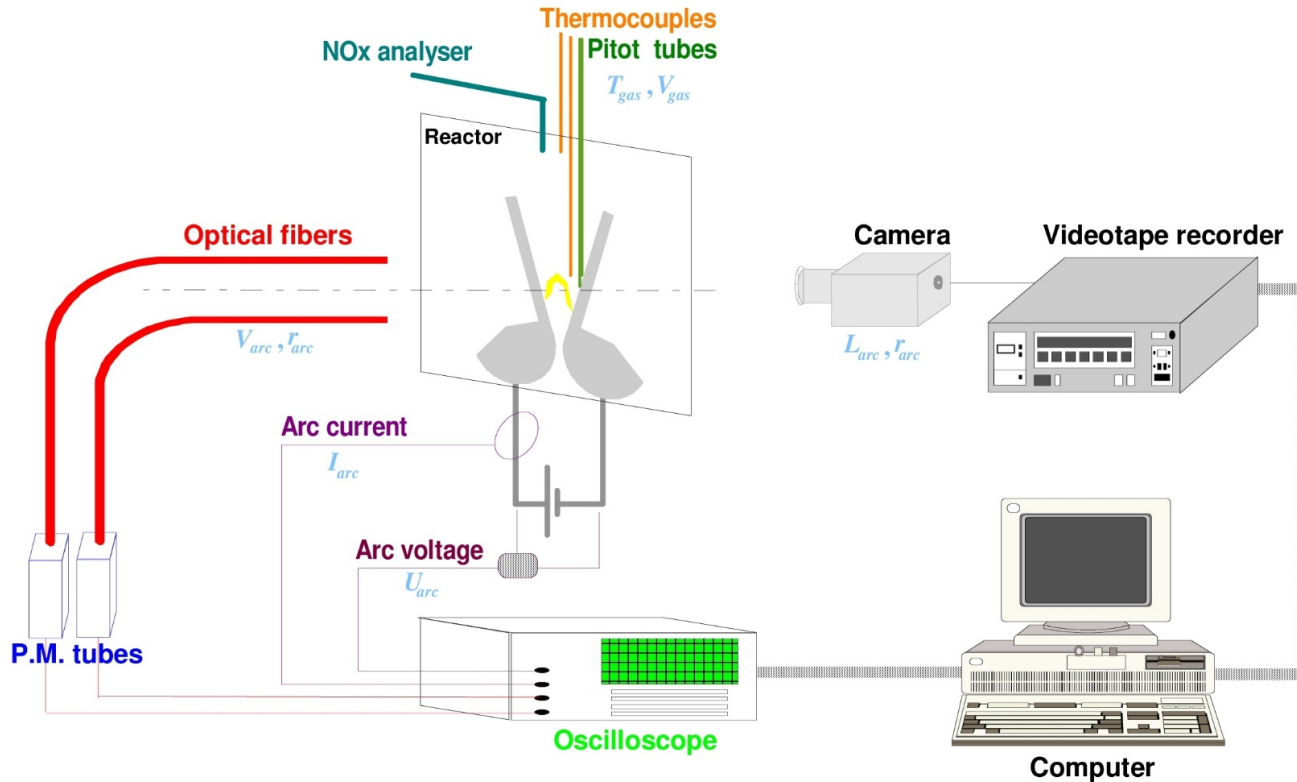
Arc glissant entre ces électrodes ('échelle de Jacob')



Dispositif expérimental

Réacteur à arc glissant

↳ plasma à deux dimensions

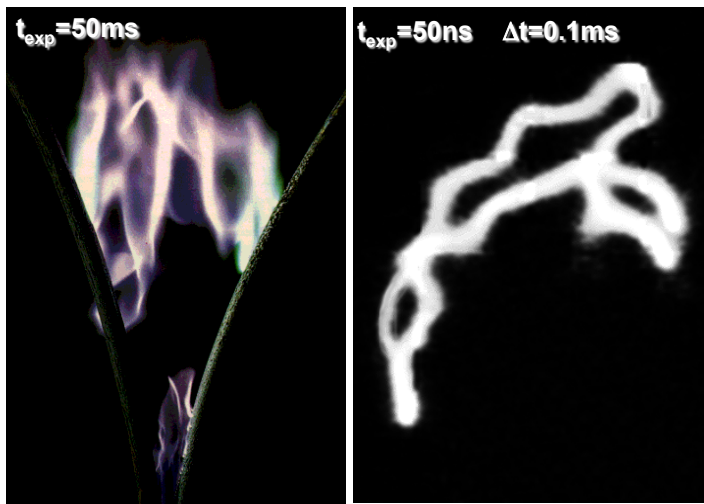


↳ Mesure simultanées de tous les paramètres...

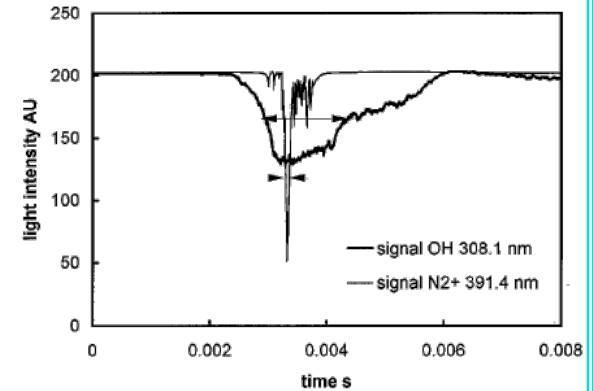
Cas du fonctionnement DC:
 $U_g = 4500V - r_0 = 2500\Omega$



Cas DC: Comportement de l'arc glissant



Vue latérale

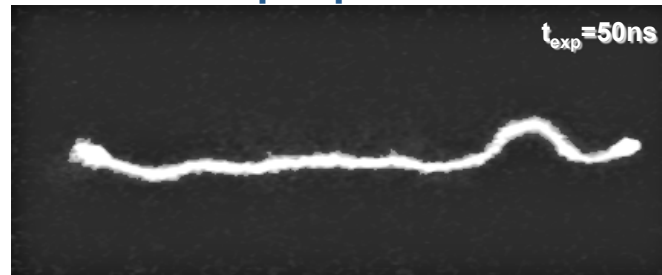


⇒ Cordon de plasma dont $r_1 \searrow$ lorsque D_g
⇒ Coeur lumineux, zone active périphérique

Vue longitudinale

⇒ décharge libre

⇒ entre 2 plaques de verre



⇒ Rayon de conduction quasi-constant r_1
⇒ Extension dans toutes les directions

- Décharge non localisée, mouvement "aléatoire"
- Volume plasma qui dépend du temps
- Variations brutales de tensions
- Plasma non homogène
En interaction avec le flux de gaz



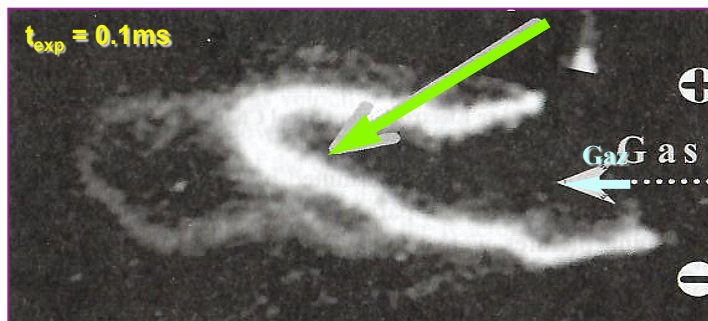
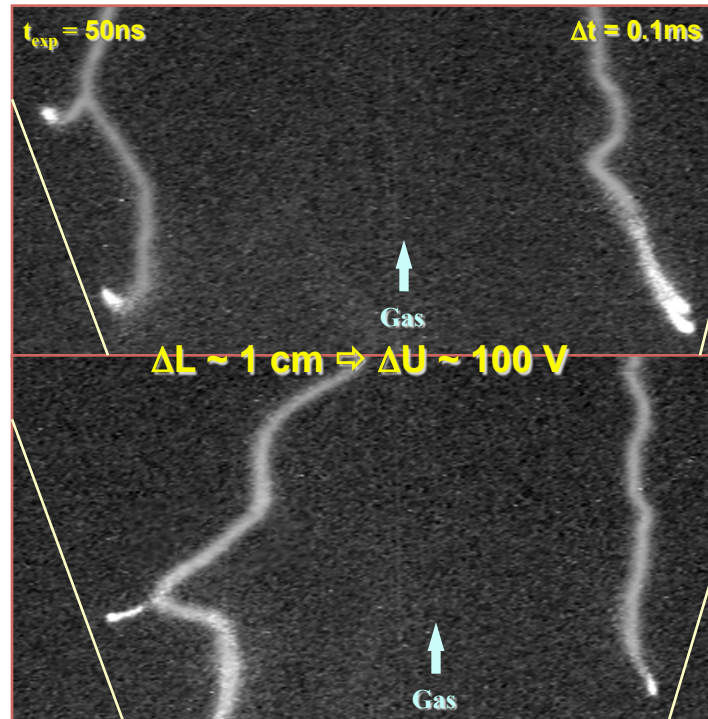
Cas DC: Comportement de l'arc glissant

Saut du pied d'arc à la cathode
Glissement du pied d'arc à l'anode
Reclaquages entre 2 portions d'arc

- ↪ Raccourcissements de l'arc
- ↪ Diminution de R_a à $I_a \approx \text{constant}$
 - ⇒ Variations rapides de la tension d'arc

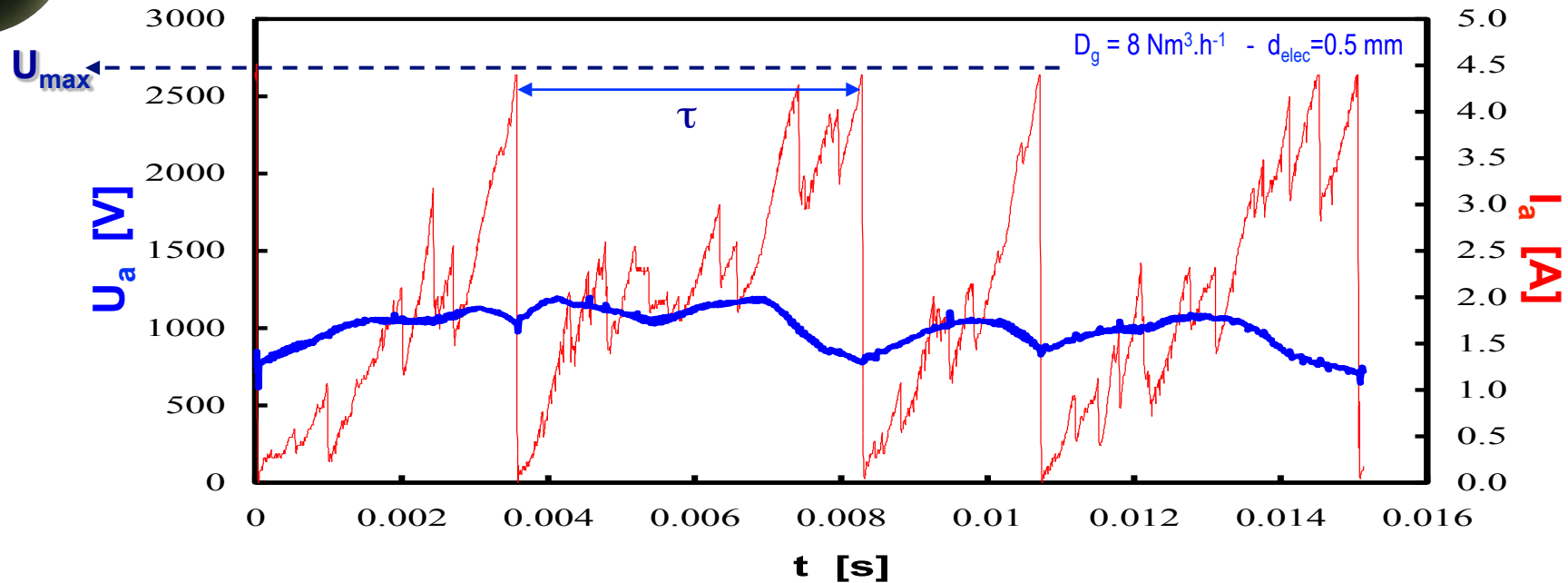
Vitesse relative entre gaz et arc $V_{rel} = V_{gaz} - V_{arc} > 0$

- ↪ Effet de balayage
 - ⇒ Augmentation de la zone réactive





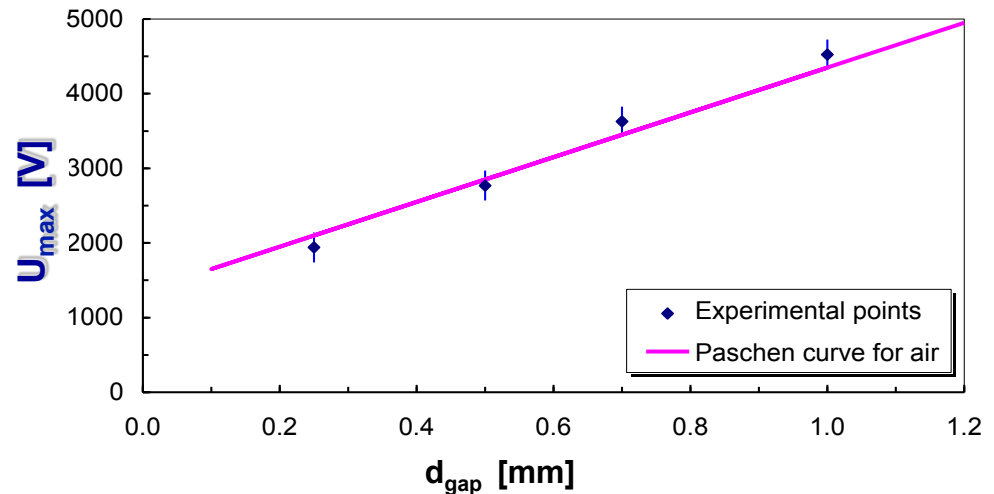
Cas DC: Paramètres électriques



Cycles successifs de Amorçage-Extension-Extinction

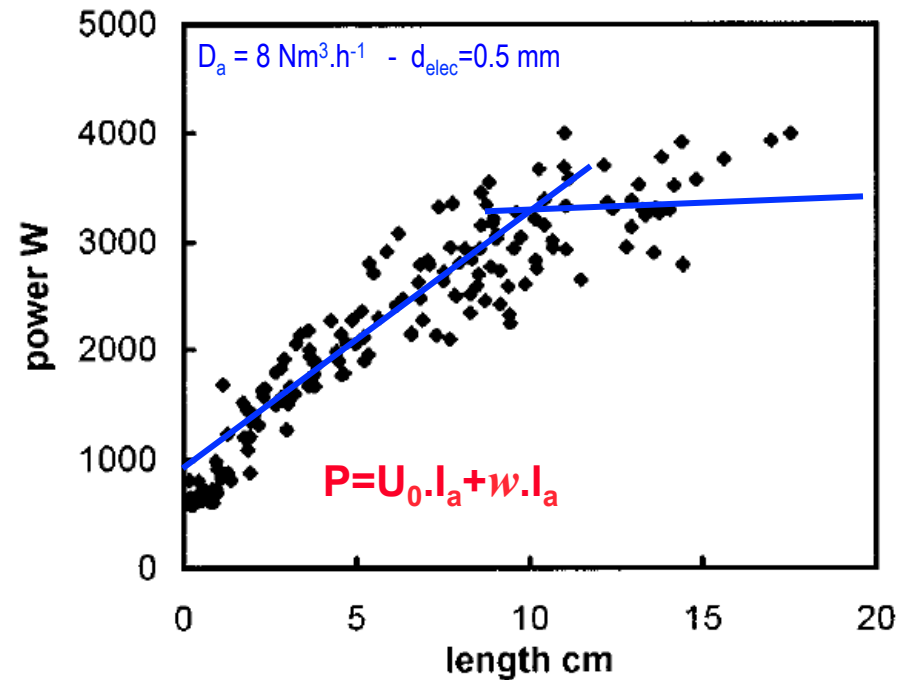
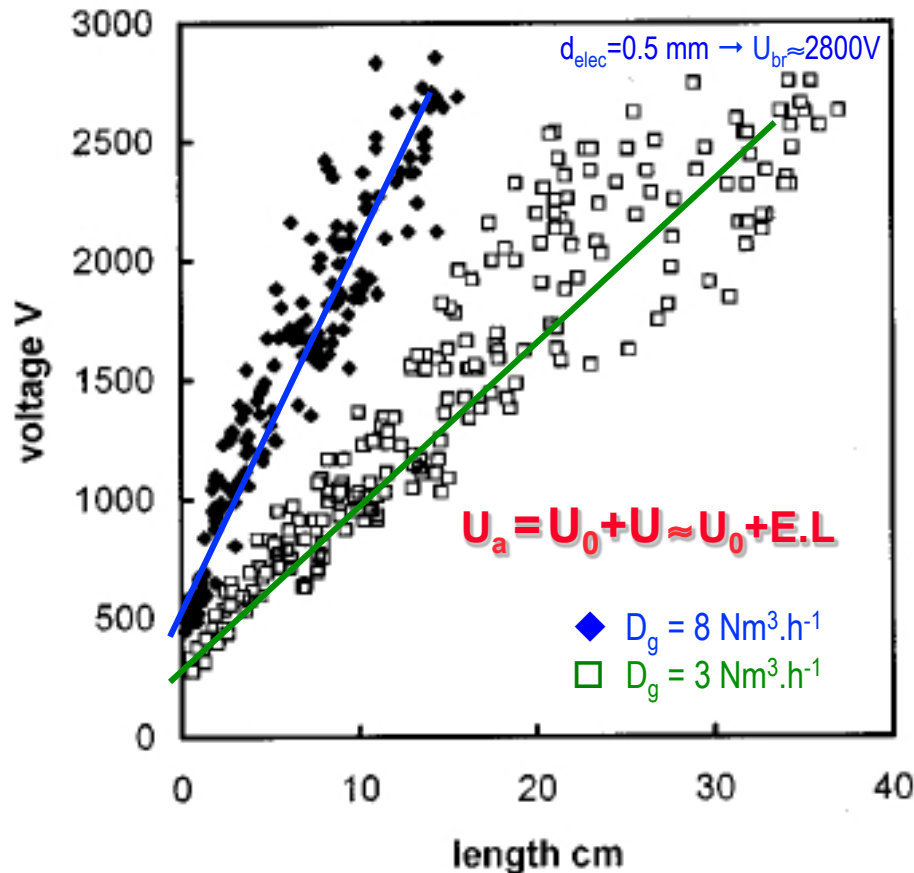
↳ Durée d'arc τ limitée, qui \searrow lorsque D_g \nearrow

↳ $U_{\max} = C_{-}^{te} \approx U_{\text{Paschen}}$ au col des électrodes



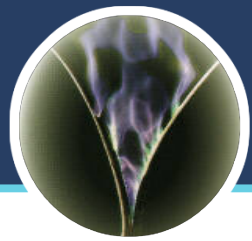


Cas DC: Paramètres électriques

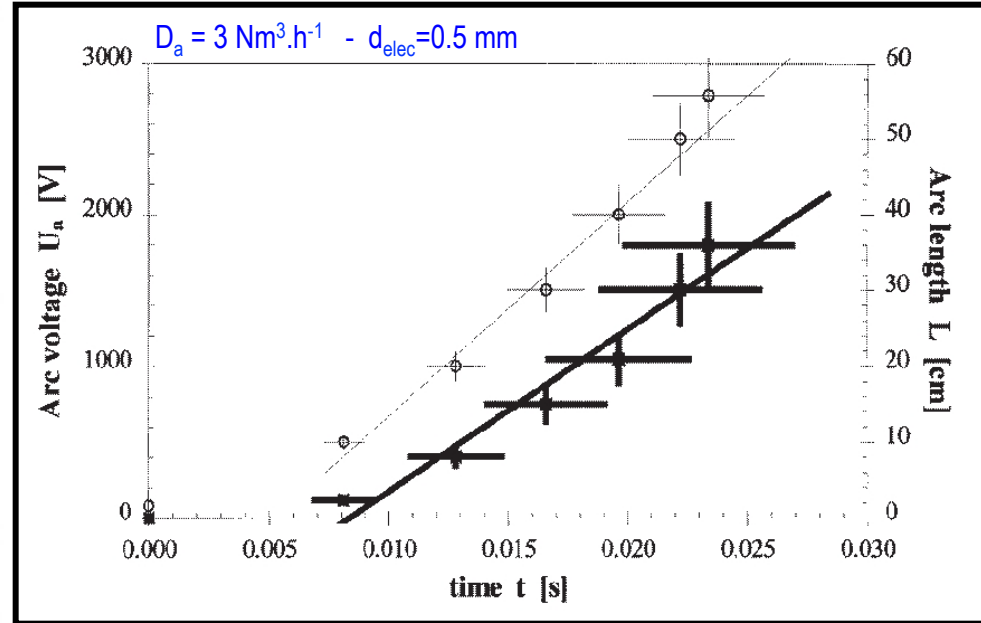
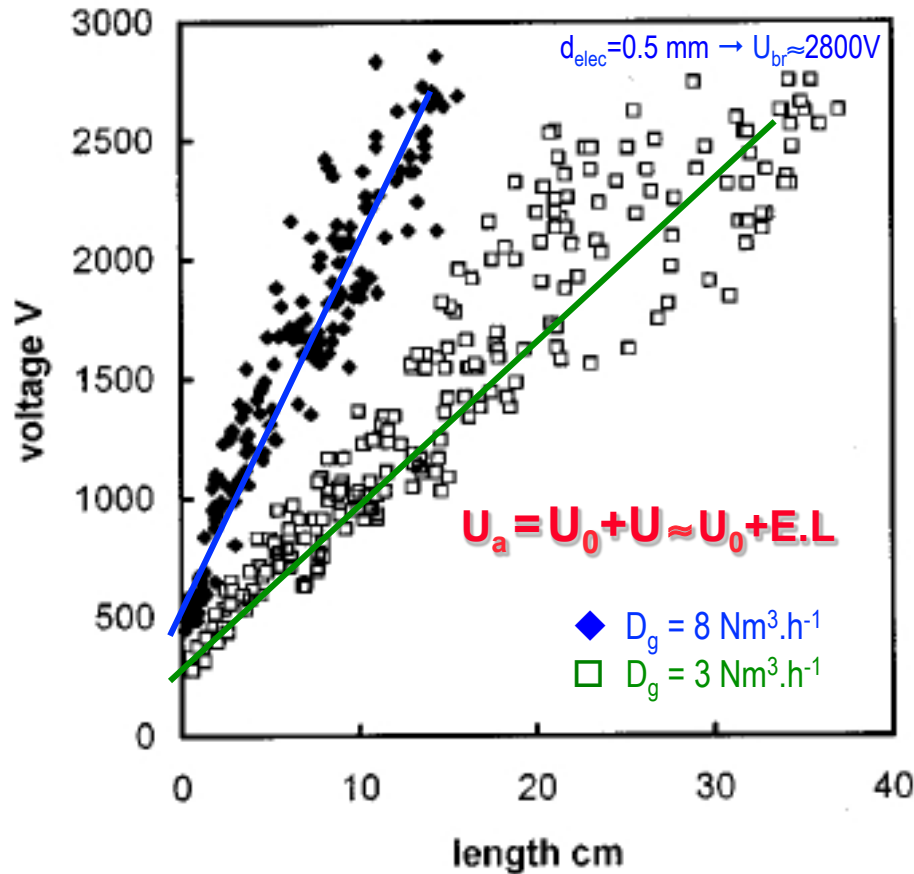


- ↪ $E \approx$ quasi-constant dans la colonne dépend du débit de gaz [$10\text{-}15 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$]
- ↪ Chute de tension aux électrodes U_0 de quelques centaines de V

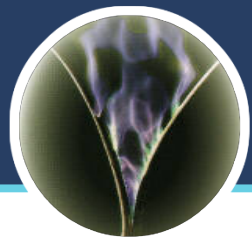
- ↪ Puissance électrique w par unité de longueur quasi-constante dans la colonne



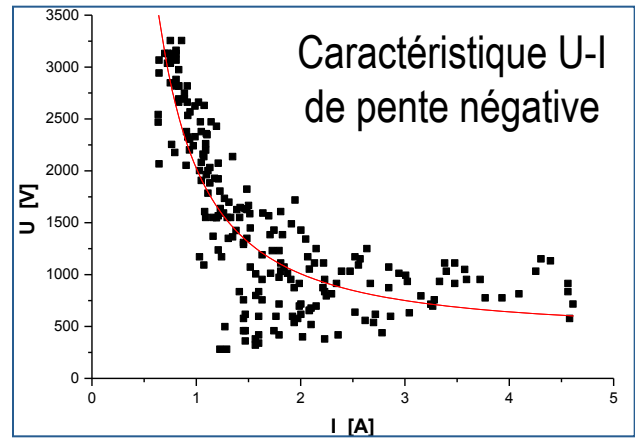
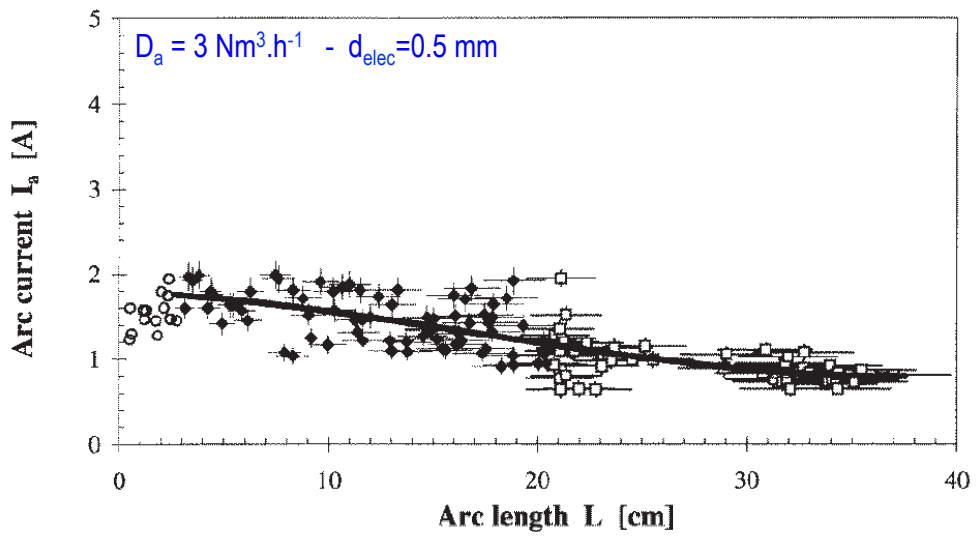
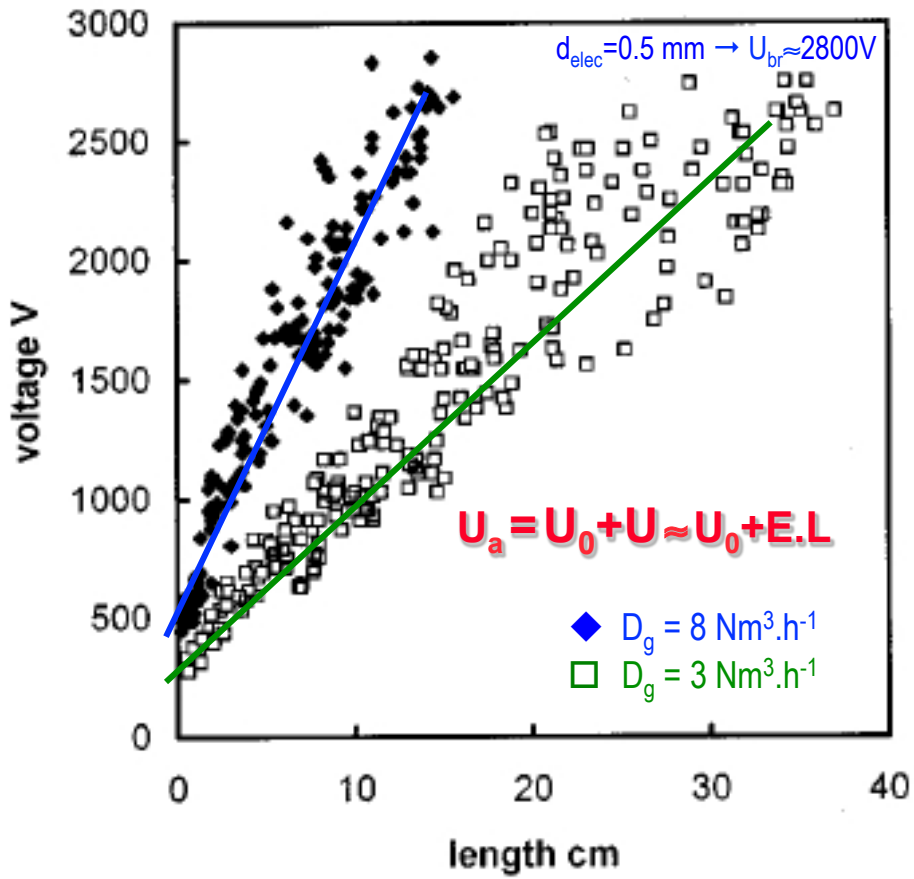
Cas DC: Paramètres électriques



- ↪ Chute de tension aux électrodes U_0 de qqes centaines de V
- ↪ Courant d'arc I_a qui décroît légèrement lorsque l'arc s'allonge
- ↪ $E \approx$ quasi-constant dans la colonne, mais dépend du débit de gaz [10-15 kV.m⁻¹]



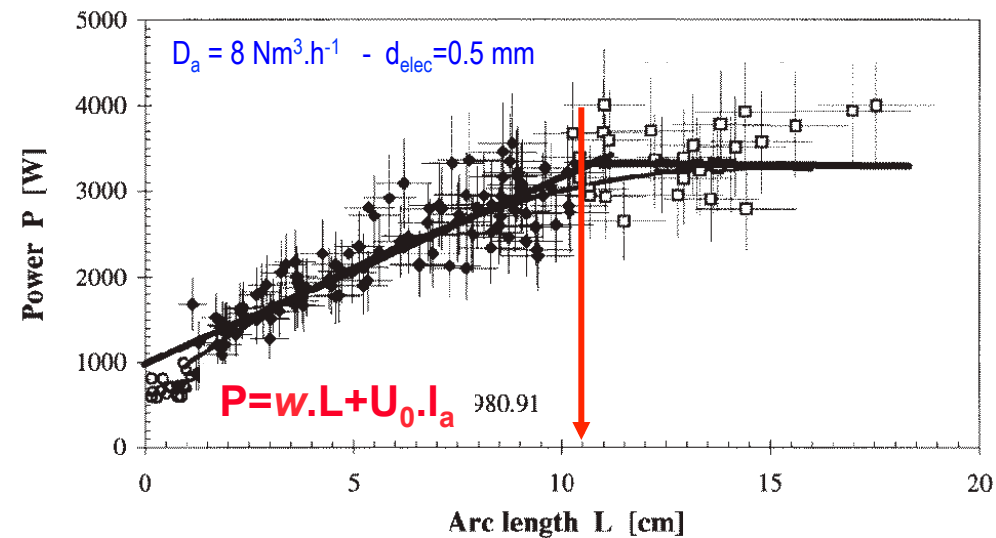
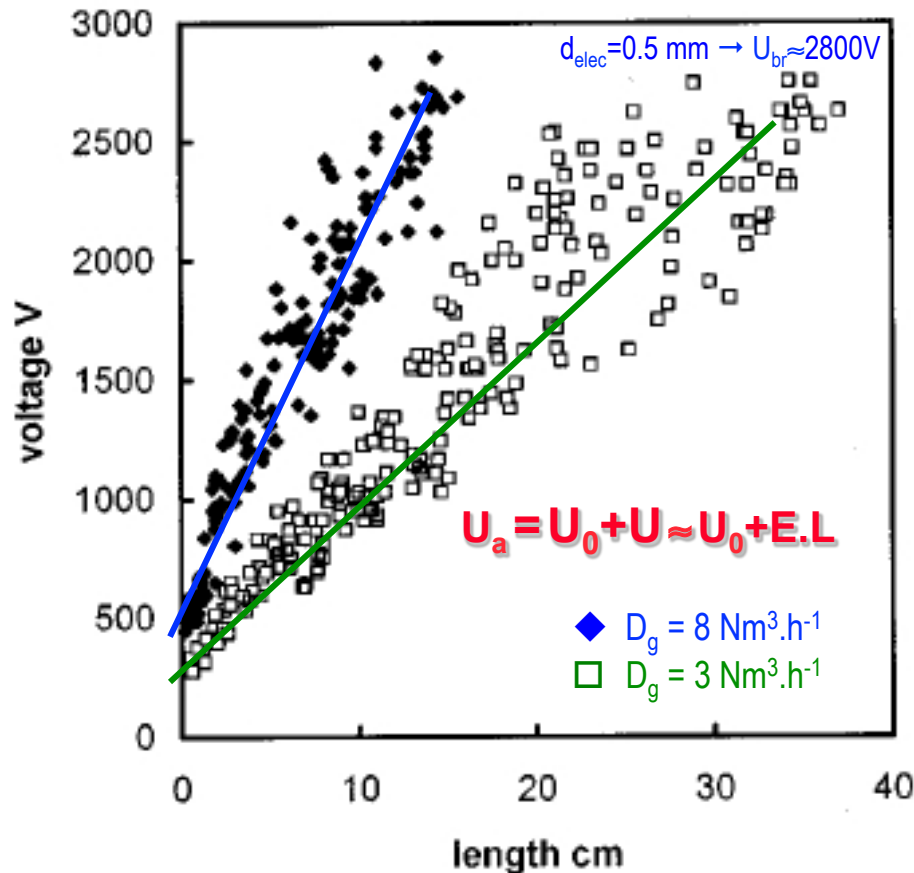
Cas DC: Paramètres électriques



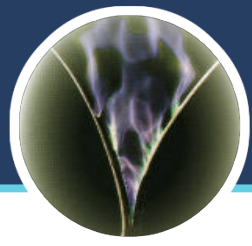
- ↪ Chute de tension aux électrodes U_0 de qqes centaines de V
- ↪ Courant d'arc I_a qui décroît légèrement lorsque l'arc s'allonge
- ↪ $E \approx$ quasi-constant dans la colonne, mais dépend du débit de gaz [$10-15 \text{ kV.m}^{-1}$]



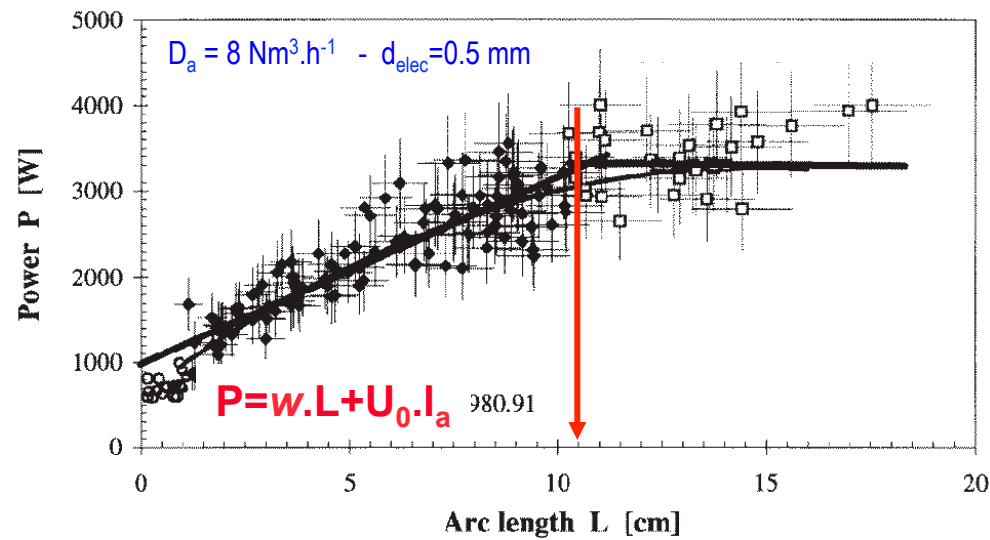
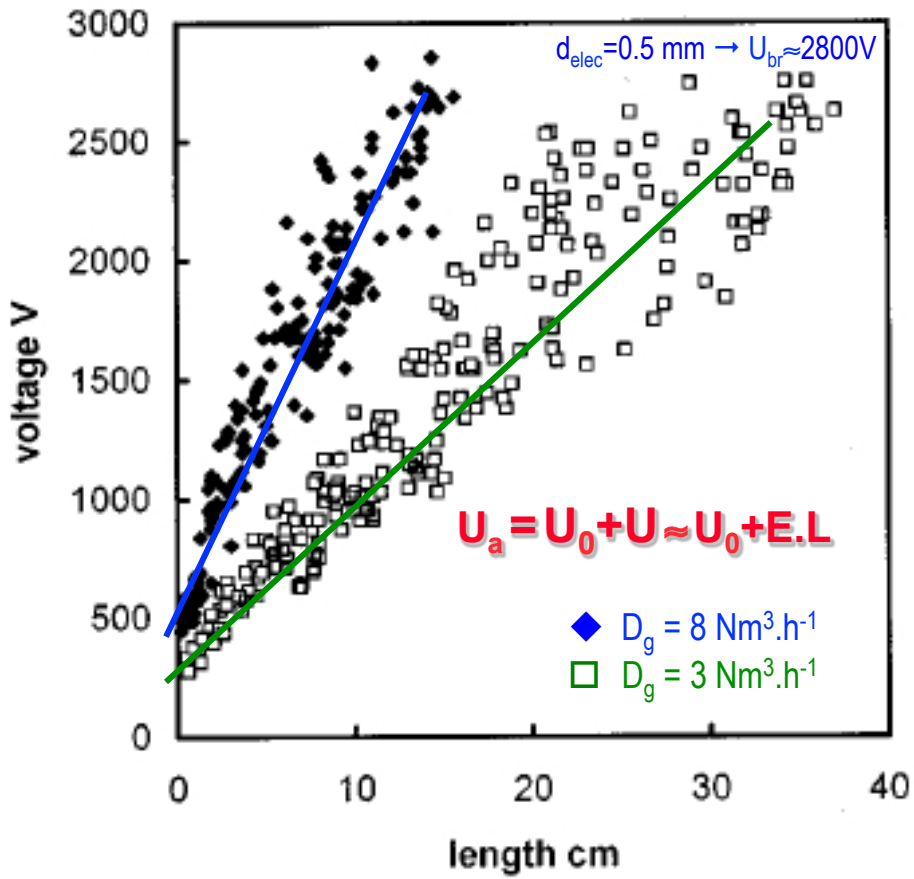
Cas DC: Paramètres électriques



- ↪ Chute de tension aux électrodes U_0 de quelques centaines de V
- ↪ Courant d'arc I_a qui décroît légèrement lorsque l'arc s'allonge
- ↪ $E \approx$ quasi-constant dans la colonne, mais dépend du débit de gaz [10-15 kV.m⁻¹]
- ↪ Puissance électrique w par unité de longueur quasi-constante dans la colonne, jusqu'à $L=L_1$

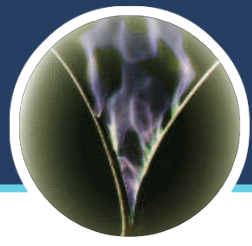


Cas DC: Paramètres électriques



$$\begin{cases} P = wL + P_0 \\ U = \frac{wL}{I_a} \end{cases}$$

- ↪ Chute de tension aux électrodes U_0 de qqes centaines de V
- ↪ Courant d'arc I_a qui décroît légèrement lorsque l'arc s'allonge
- ↪ $E \approx$ quasi-constant dans la colonne, mais dépend du débit de gaz [10-15 kV.m⁻¹]
- ↪ Puissance électrique w par unité de longueur quasi-constante dans la colonne, jusqu'à $L=L_1$

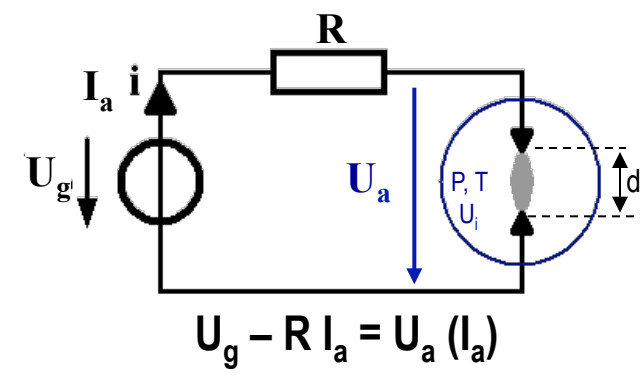


Cas DC: Choix de l'alimentation

$$\begin{cases} U_a = U_0 + U & \text{et} & U \approx EL \\ P = P_0 + wL & \text{avec} & P_0 = I_a U_0 \end{cases} \Rightarrow U = \frac{wL}{I_a}$$

$$\Rightarrow U_g = U_0 + \frac{wL}{I_a} + RI_a$$

$$\Rightarrow RI_a^2 - (U_g - U_0)I_a + wL = 0$$



équation qui admet une solution si $L \leq L_1 \equiv \frac{(U_g - U_0)^2}{4Rw} \Rightarrow P_m \approx w L_1$

$$\Rightarrow \begin{cases} I_a = I_1 \left(1 + \sqrt{1 - L/L_1}\right) \\ U_a = U_1 \left(1 - \sqrt{1 - L/L_1}\right) \\ E = E_1 \left(\frac{1 - \sqrt{1 - L/L_1}}{L/L_1}\right) \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} I_1 \equiv \frac{(U_g - U_0)}{2R} \\ U_1 \equiv \frac{(U_g - U_0)}{2} \\ E_1 \equiv \frac{(U_g - U_0)}{2L_1} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} W = W_1 \cdot \left(\frac{L}{L_1}\right)^2 \\ W_1 \equiv \frac{w L_1 t_1}{2} \\ \langle P \rangle = \frac{w L_1}{2} \end{cases}$$

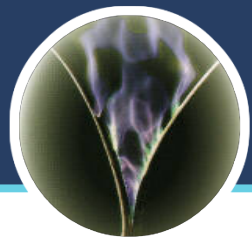
avec $P = wL \approx w \cdot k \cdot t$



Cas DC: Choix de l'alimentation

$$L \leq L_1 \equiv \frac{(U_g - U_0)^2}{4R_w} \Rightarrow P_m \approx w L_1$$

D_g (N m ³ h ⁻¹)	w (kW m ⁻¹)	E (kV m ⁻¹)	U_0 (V)	L_1 (cm)		U_1 (V)		i_1 (A)	
				Calc.	Meas.	Calc.	Meas.	Calc.	Meas.
3	7.4	8.02	359	23.1	21.1	2071	1617	0.83	1.15
	±17%	±11%	±33%	±30%	±27%	±10%	±27%	±10%	±19%
8	21.8	14.33	645	6.8	11.0	1928	1582	0.77	1.33
	±10%	±5%	±9%	±25%	±27%	±10%	±27%	±10%	±9%



Cas DC: Choix de l'alimentation

$$L \leq L_1 \equiv \frac{(U_g - U_0)^2}{4Rw} \Rightarrow P_m \approx w L_1$$

$$\Rightarrow \begin{cases} I_a = I_1 \left(1 + \sqrt{1 - L/L_1}\right) \\ U_a = U_1 \left(1 - \sqrt{1 - L/L_1}\right) \\ E = E_1 \left(\frac{1 - \sqrt{1 - L/L_1}}{L/L_1}\right) \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} I_1 \equiv \frac{(U_g - U_0)}{2R} \\ U_1 \equiv \frac{(U_g - U_0)}{2} \\ E_1 \equiv \frac{(U_g - U_0)}{2L_1} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} W = W_1 \cdot \left(\frac{L}{L_1}\right)^2 \\ W_1 \equiv \frac{w L_1 t_1}{2} \\ \langle P \rangle = \frac{w L_1}{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{Br} = U_1 = \frac{U_g}{2} \\ L_{Br} = L_1 = \frac{U_g^2}{4rw} \\ \langle P \rangle = \frac{w L_1}{2} \\ i_{max} = \frac{U_g}{r} \end{cases} \begin{cases} 8\langle P \rangle = U_g i_{max} \\ \langle i \rangle = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} i dt = \frac{5 U_g}{6 r} \\ U_g \langle i \rangle = \frac{20}{3} \langle P \rangle \end{cases}$$

avec $U_0 \ll U_g$

avec $L \approx k.t$

$\langle P \rangle = 2kW$
 $\langle i \rangle = 2A$

$U_g = 6666V$
 $r = 2777\Omega$

$U_{br} = U_1 = 3333V$

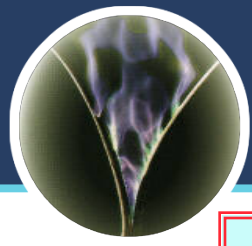
$d_{elec} = 0.65mm$



Cas DC: Influence du gaz

Paramètres du claquage diélectrique au col des électrodes - cas où $d_{elec}=0.6mm$

Gas	H ₂			Ar			CO ₂		Air			N ₂		
D_g [l/mn]	2.9	3.2	4.2	5.3	18.4	36.1	5.7	11.8	6.3	21.6	41.2	6.4	29.3	41.6
U_{Br} [V]	1665	972	595	2838	3023	3068	3095	3111	3128	3155	3253	3220	3345	3444
t_{Br} [μs]	60	84	89	864	800	37	735	1640	972	1080	1900	1260	850	487



Cas DC: Paramètres électriques

- ☞ Haute tension ; Bas courant ; Haute pression
- ☞ Faible diamètre ; $V_{el} \approx 300V$; $E \approx 10-15kV/m$

☞ Transition Luninescente-Arc

Deux régions:

Près du col des électrodes

- ☞ Arcs courts; Faible tension
- ☞ V_{rel} élevée, variant rapidement;

En dehors du col:

- ☞ Arcs longs, haute tension;
- ☞ V_{rel} faible $\Rightarrow V_{rel} \rightarrow 0$;

Si le flux de gaz augmente:

- ☞ La longueur maximale atteinte diminue
- ☞ Le rayon de conduction diminue (constriction)
- ☞ Le champs électrique augmente, et la durée d'arc diminue

⇒ Évolution d'un arc vers une décharge

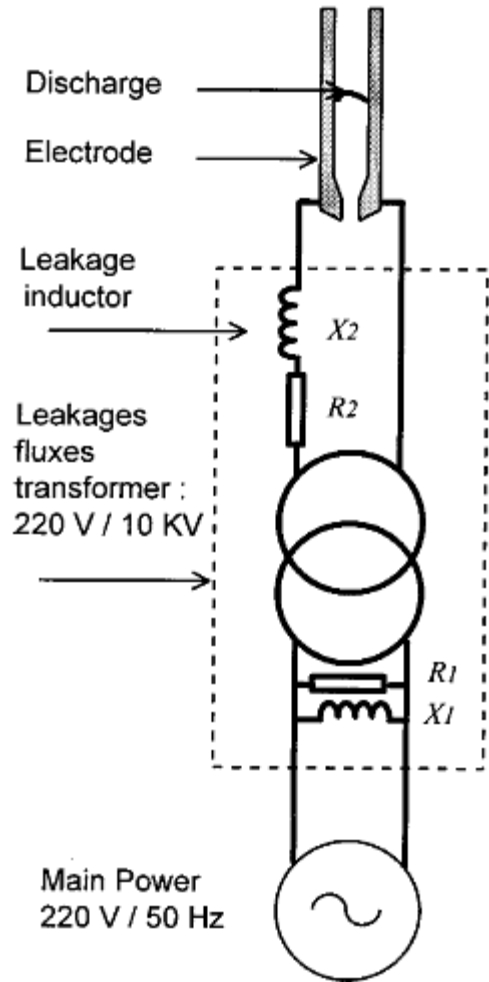
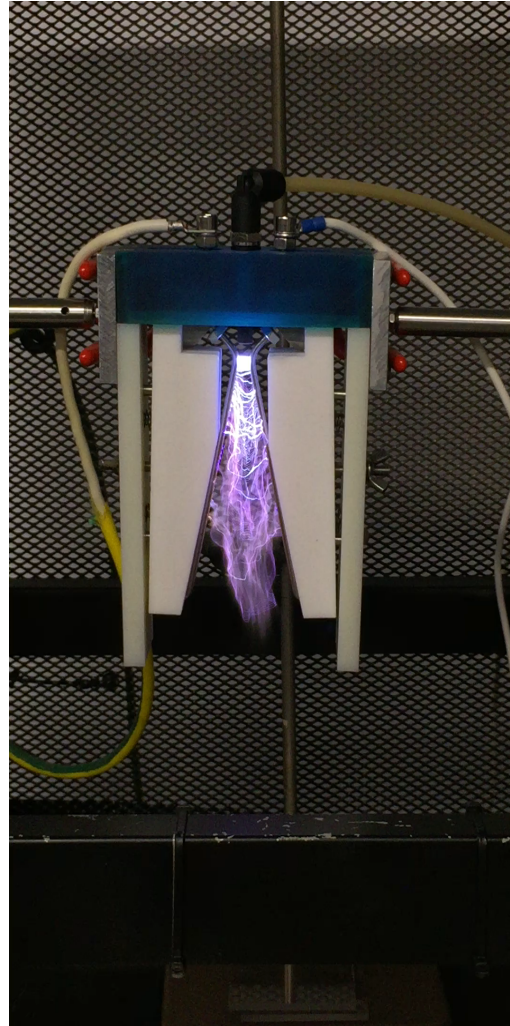
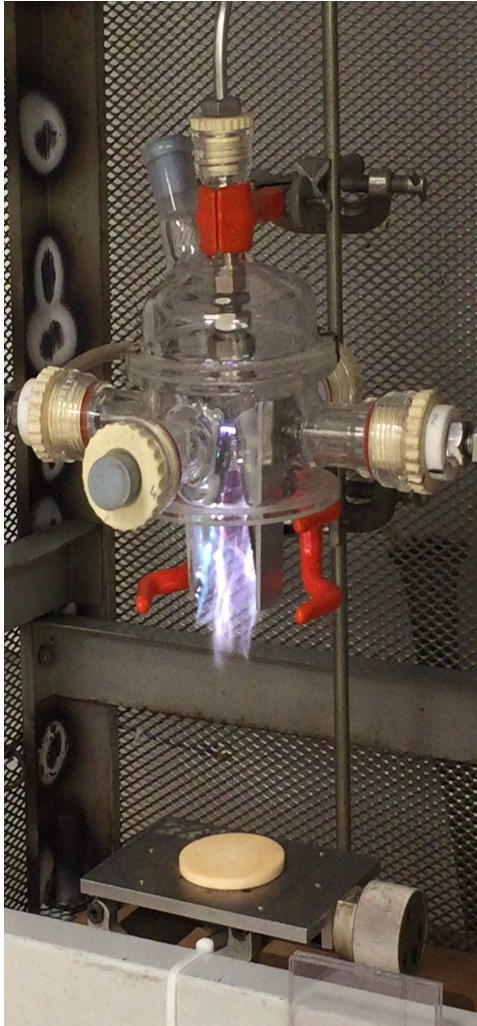
Paramètres d'influence:

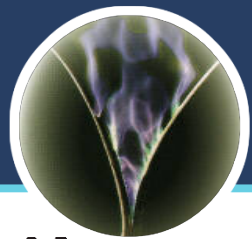
- | | |
|---|--------------------------------|
| ☞ Distance au col des électrodes | (→ claquage) |
| ☞ Type de gaz (→ U_{br}) / Flux de gaz | (→ refroidissement) |
| ☞ Divergence des électrodes | (→ allongement de la décharge) |
| ☞ FEM à vide du générateur | (> U_{br}) |
| ☞ Géométrie du réacteur | (→ taux de gaz traité) |
| ☞ Matériaux des électrodes | (→ déplacement / 'Pollution') |



Cas AC: Comportement de l'arc glissant

Cas du fonctionnement AC 50Hz:
Alimentation AUPEM Sefli - 10kV - 100mA

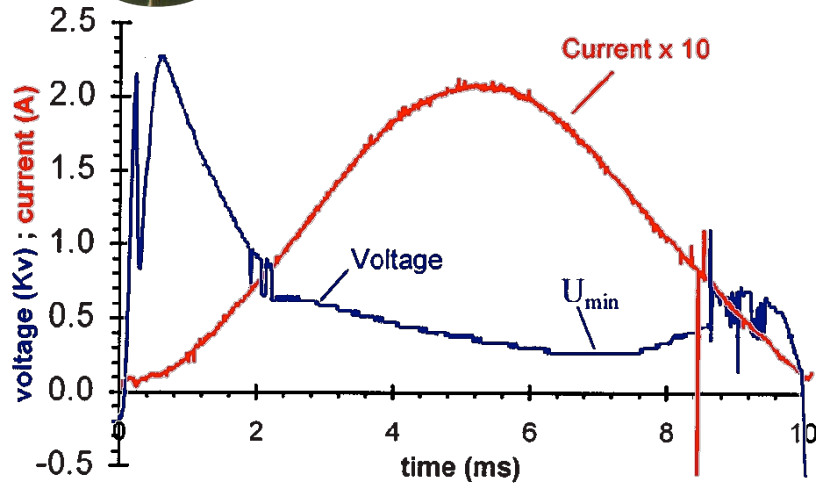




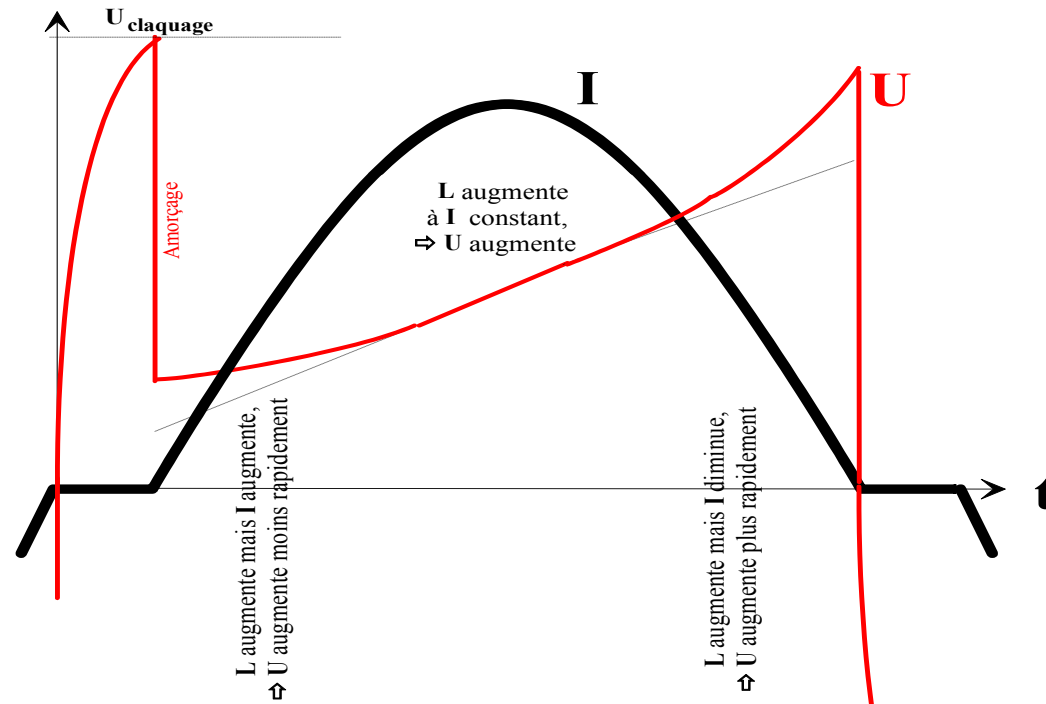
Cas AC: Comportement de l'arc glissant

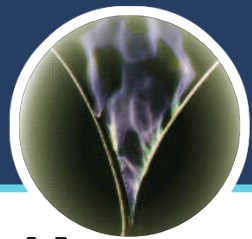
Cas du fonctionnement AC 50Hz:
Alimentation AUPEM Sefli - 10kV - 100mA

$$\begin{cases} U_a = U_0 + U \\ U \approx EL \end{cases} \Rightarrow P = (U_0 + EL) I_a \frac{2\sqrt{2}}{\pi}$$



Faible débit (→ 5l/mn)

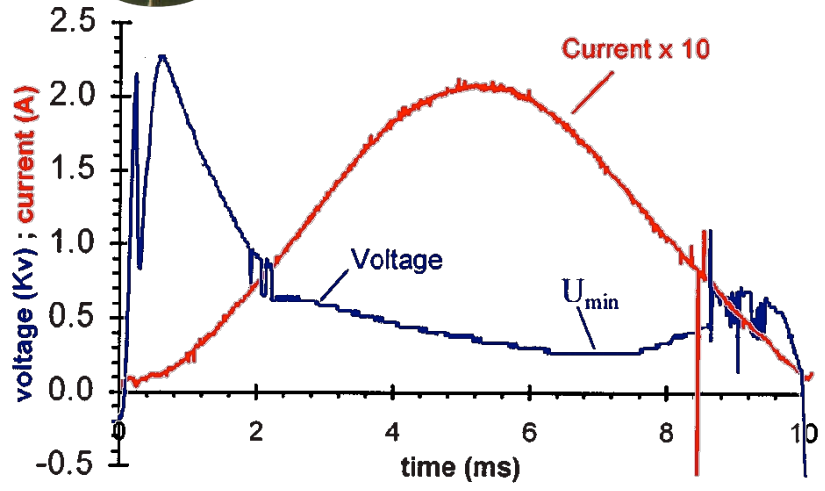




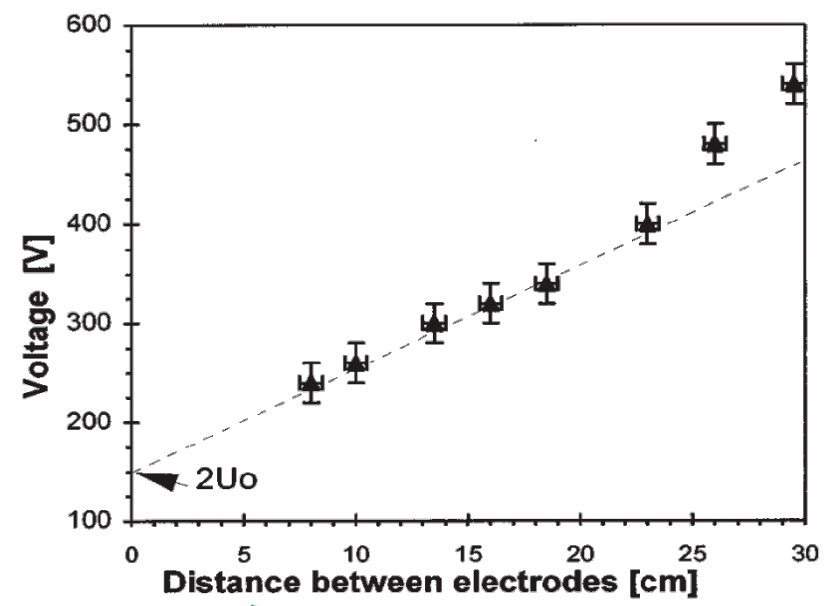
Cas AC: Comportement de l'arc glissant

Cas du fonctionnement AC 50Hz:
Alimentation AUPEM Sefli - 10kV - 100mA

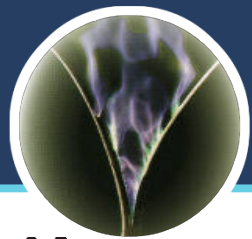
$$\begin{cases} U_a = U_0 + U \\ U \approx EL \end{cases} \Rightarrow P = (U_0 + EL)I_a$$



Faible débit...



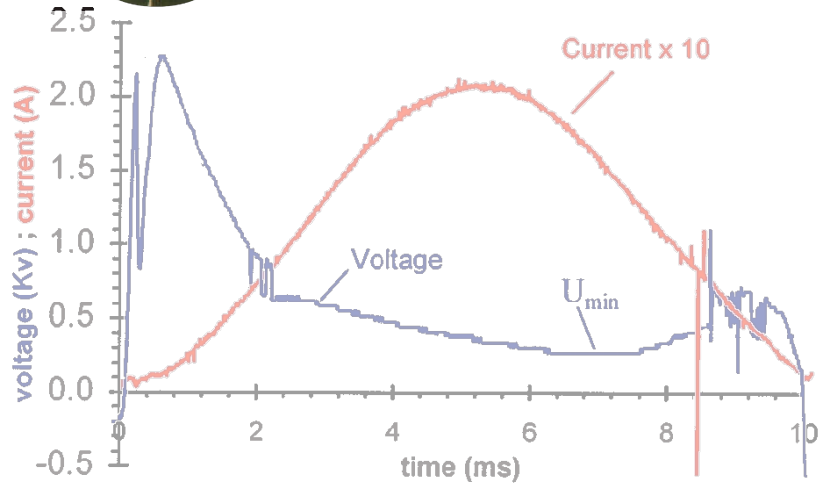
→ $U_0 \approx 80V$, plutôt caractéristique d'une décharge



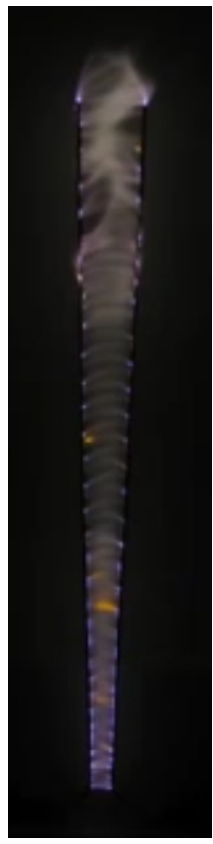
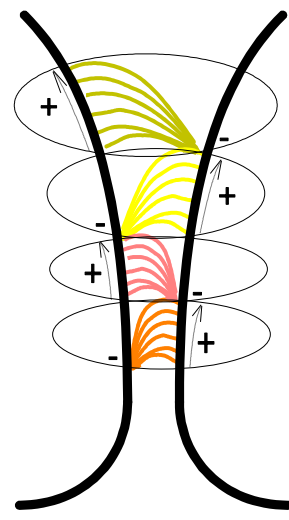
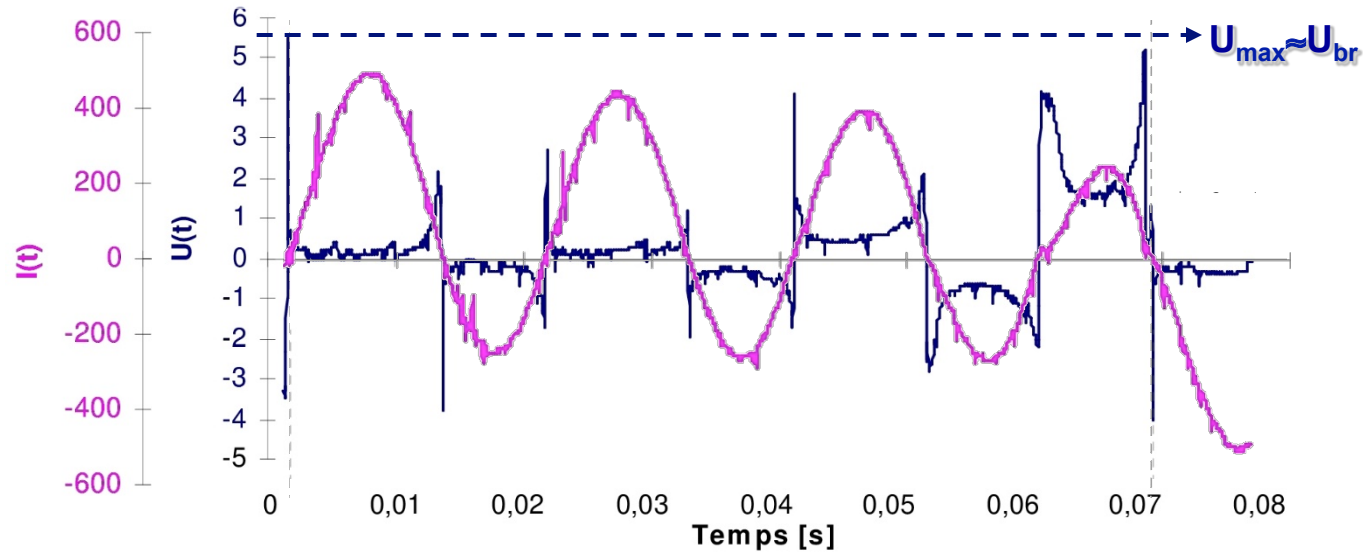
Cas AC: Comportement de l'arc glissant

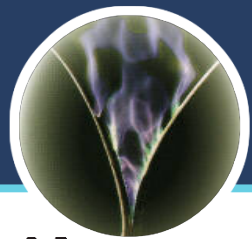
Cas du fonctionnement AC 50Hz:
Alimentation AUPEM Sefli - 10kV - 100mA

$$\begin{cases} U_a = U_0 + U \\ U \approx EL \end{cases} \Rightarrow P = (U_0 + EL)I_a$$



Très faible débit ...

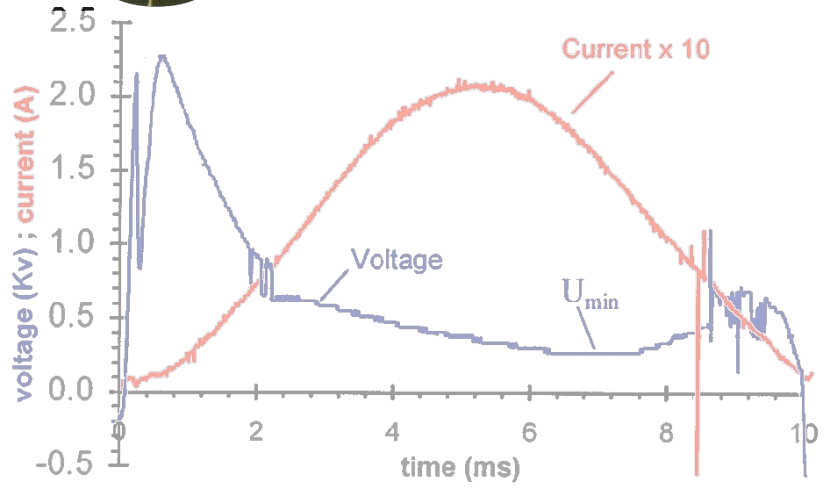




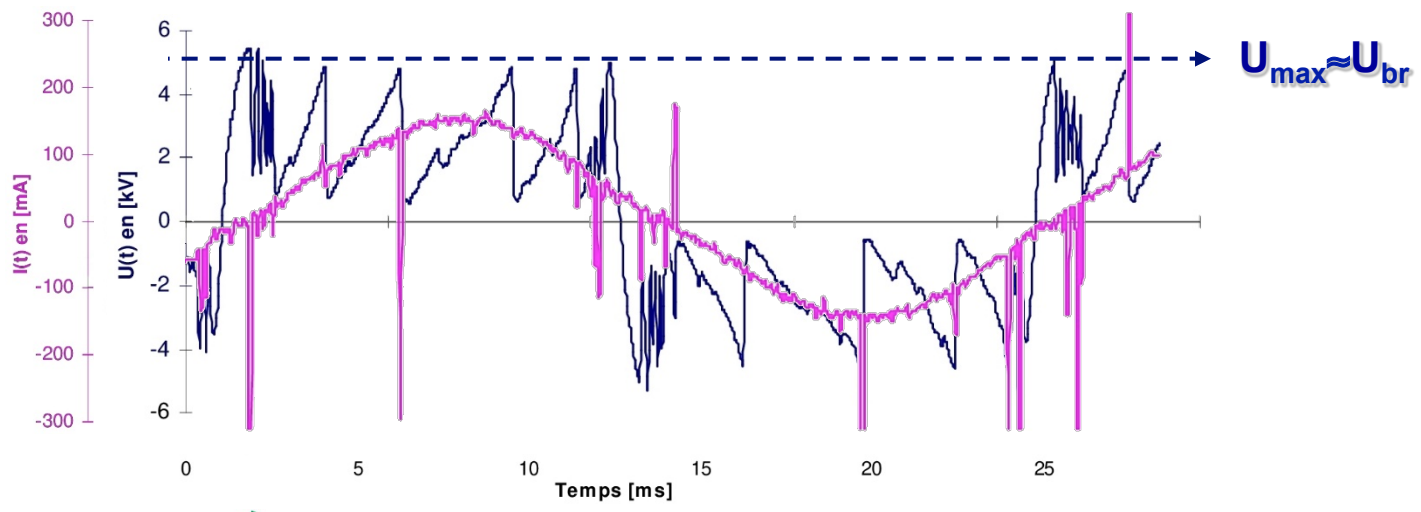
Cas AC: Comportement de l'arc glissant

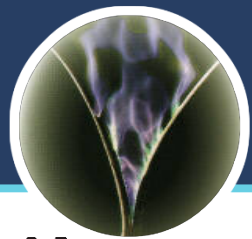
**Cas du fonctionnement AC 50Hz:
Alimentation AUPEM Sefli - 10kV - 100mA**

$$\begin{cases} U_a = U_0 + U \\ U \approx EL \end{cases} \Rightarrow P = (U_0 + EL)I_a$$



Débit élevé...

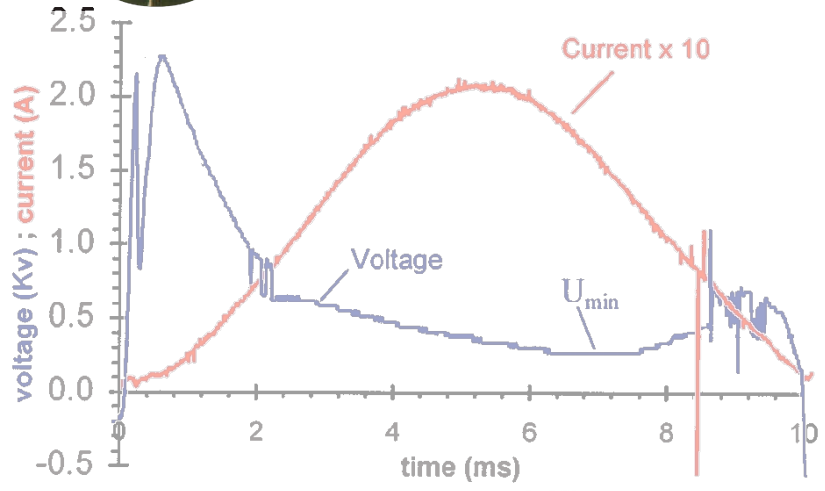




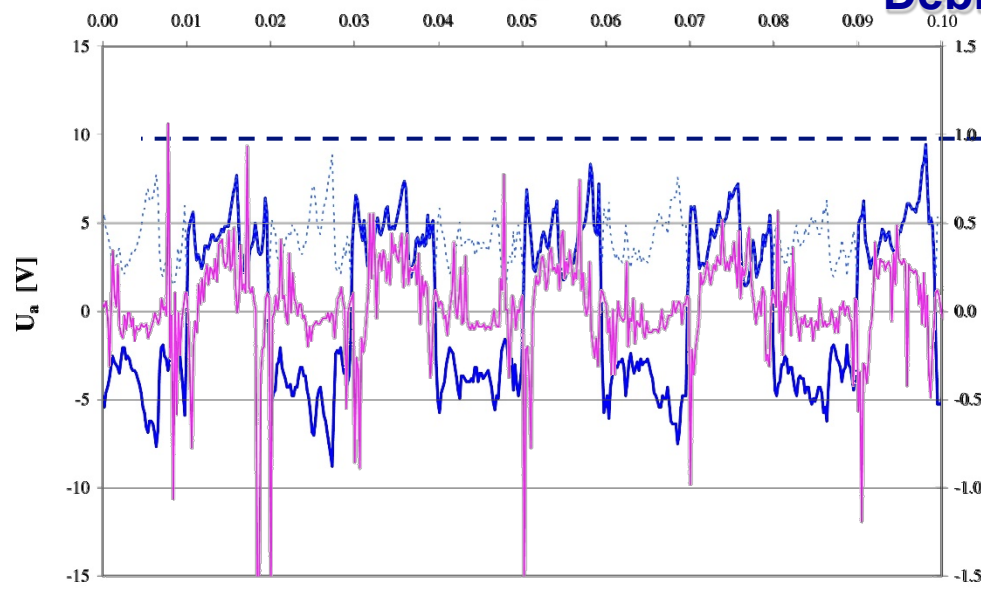
Cas AC: Comportement de l'arc glissant

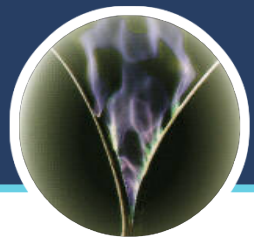
**Cas du fonctionnement AC 50Hz:
Alimentation AUPEM Sefli - 10kV - 100mA**

$$\begin{cases} U_a = U_0 + U \\ U \approx EL \end{cases} \Rightarrow P = (U_0 + EL)I_a$$



Débit très élevé!

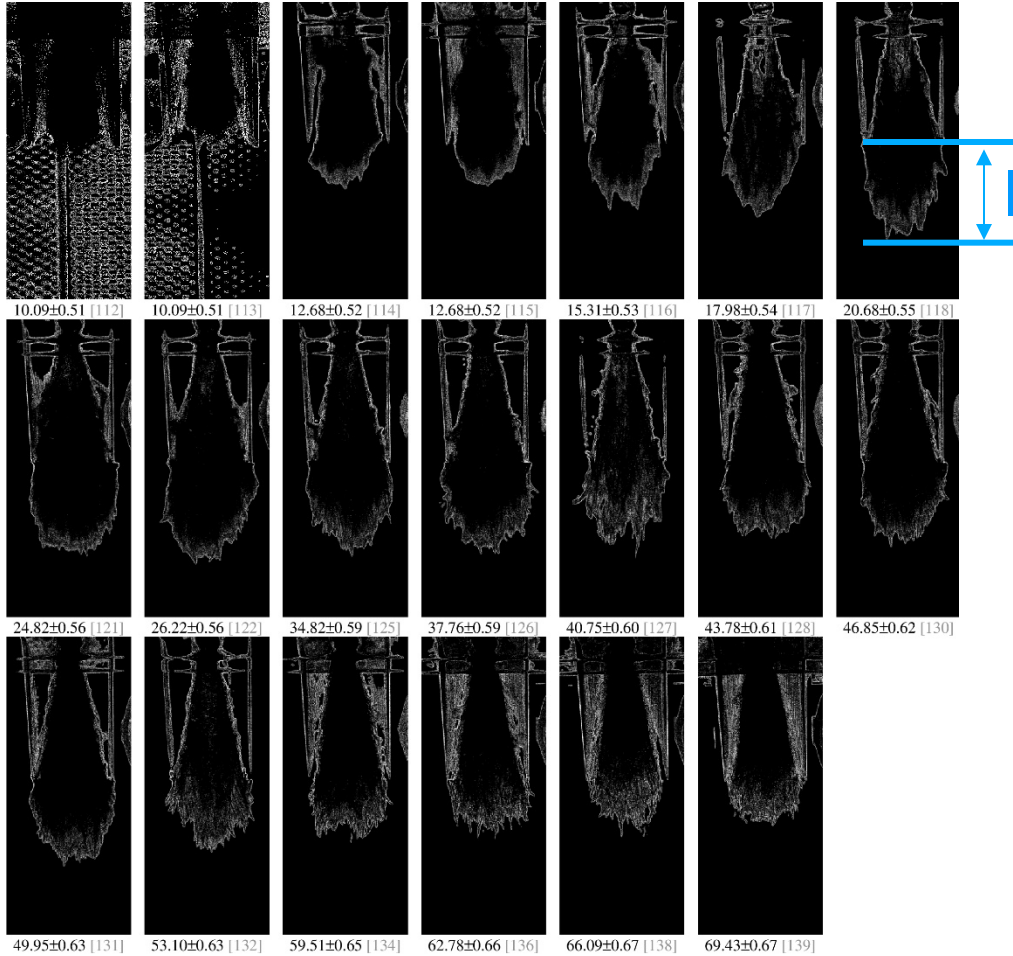


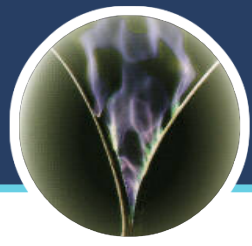


Cas AC: Effet du débit de gaz

Cas du fonctionnement AC 50Hz:
Alimentation AUPEM Sefli - 10kV - 100mA

$d_{elec} = 1.5mm$

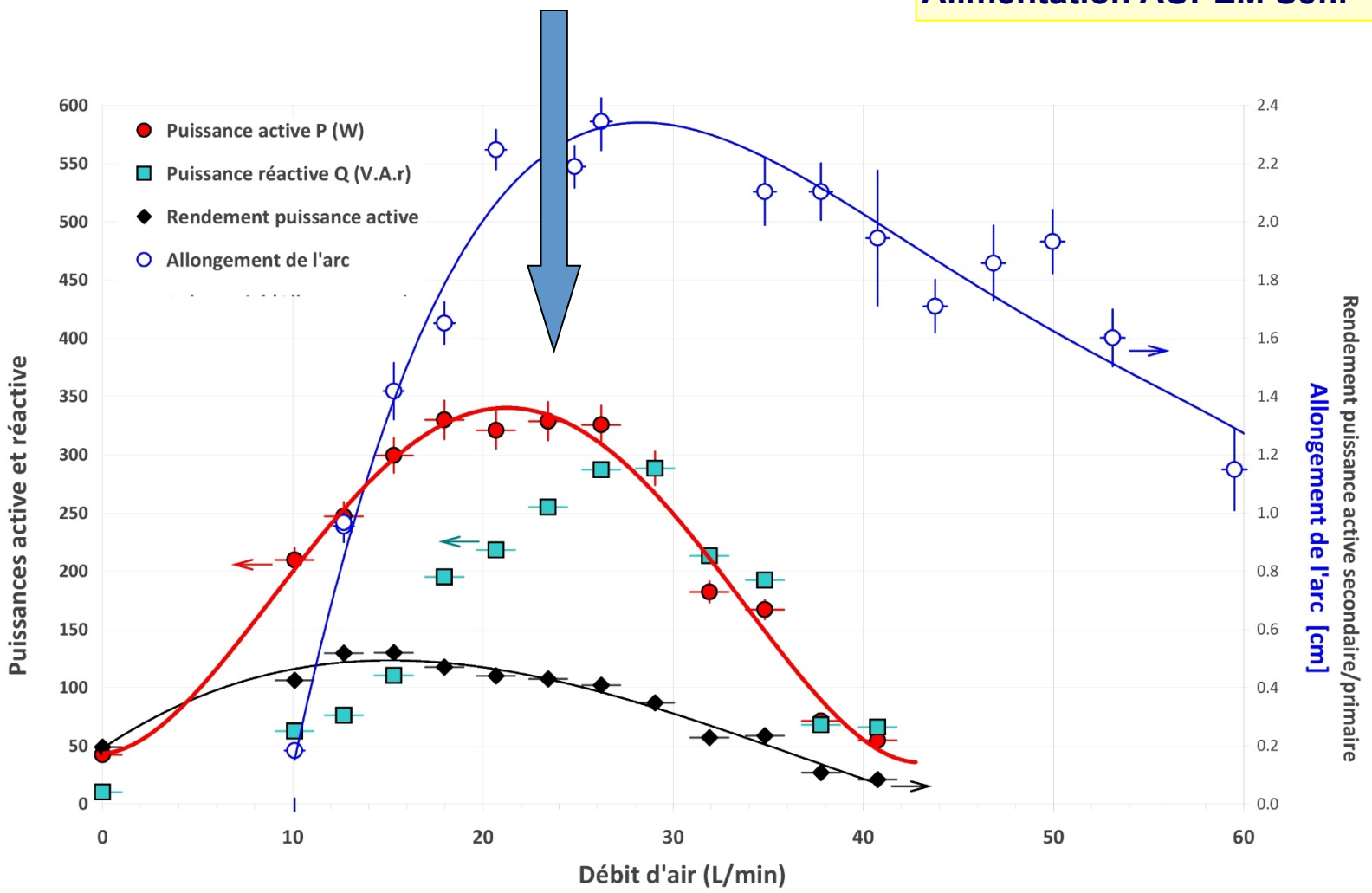




Cas AC: Effet du débit de gaz

Cas du fonctionnement AC 50Hz:
Alimentation AUPEM Sefli - 10kV - 100mA

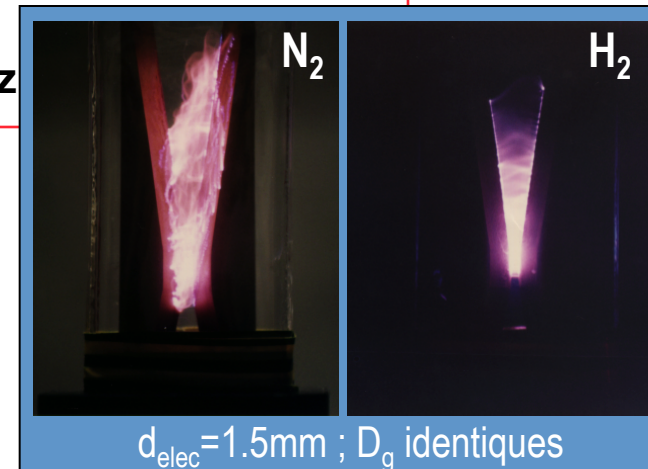
$d_{elec} = 1.5mm$





Cas AC: en guise de conclusion

- **La passage à 0 du courant favorise le régime de décharge**
 - ↳ Mais si fréquence trop élevée, pas de d'allongement
- **Importance du choix d_{elec} / D_{gaz}**
 - ↳ Mais dépend également du type de gaz



Paramètres d'influence:

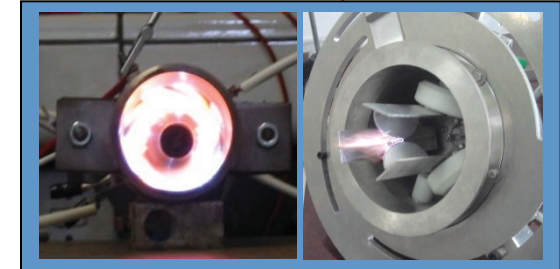
- | | |
|---|--------------------------------|
| ↗ Distance au col des électrodes | (→ claquage) |
| ↗ Type de gaz (→ U_{br}) / Flux de gaz | (→ refroidissement) |
| ↗ Divergence des électrodes | (→ allongement de la décharge) |
| ↗ FEM à vide du générateur | (> U_{br}) |
| ↗ Géométrie du réacteur | (→ taux de gaz traité) |
| ↗ Matériaux des électrodes | (→ déplacement / 'Pollution') |



Cas AC: en guise de conclusion

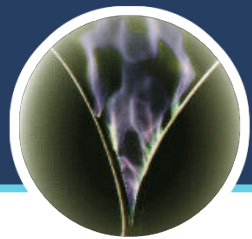
- **La passage à 0 du courant favorise le régime de décharge**
 - ↳ Mais si fréquence trop élevée, pas de d'allongement
- **Importance du choix d_{elec} / D_{gaz}**
 - ↳ Mais dépend également du type de gaz!

- **Effet de balayage → Efficacité de traitement limitée**
 - ↳ Recherche de dispositifs "volumiques" pour les traitements de flux importants ou les interactions avec une cible
 - ou **Augmenter les surfaces d'échanges** pour améliorer l'efficacité énergétique



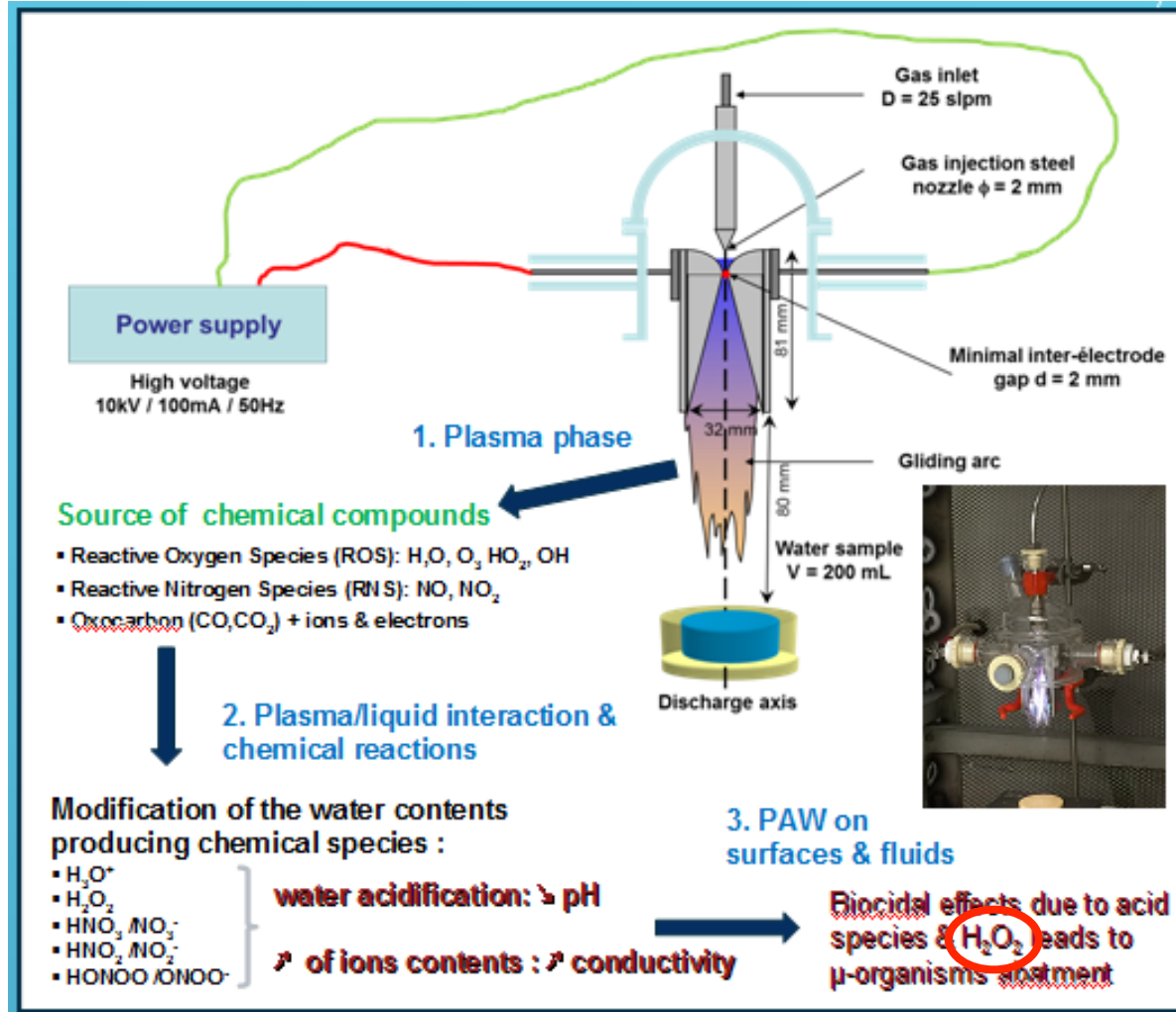
Paramètres d'influence:

- ↗ Distance au col des électrodes (→ claquage)
- ↗ Type de gaz (→ U_{br}) / Flux de gaz (→ refroidissement)
- ↗ Divergence des électrodes (→ allongement de la décharge)
- ↗ FEM à vide du générateur ($> U_{br}$)
- ↗ Géométrie du réacteur (→ taux de gaz traité)
- ↗ Matériaux des électrodes (→ déplacement / 'Pollution')



Application: Eau activée par plasma

Objectif: Évaluer d'efficacité énergétique de la fabrication d'eau activée par décharge glissante
 ↳ molécule test: H_2O_2



• Trait_é en post-décharge

- GlidArc 'classique'
- HT 10kV / 50 Hz / 100mA

Paramètres expérimentaux :

- Débit du gaz : 25L/min d'Air;
- Temps de traitement: 10mins;
- Q^{té} d'eau traitée: 200 mL;
- Énergie électrique déterminée à partir du courant et de la tension.

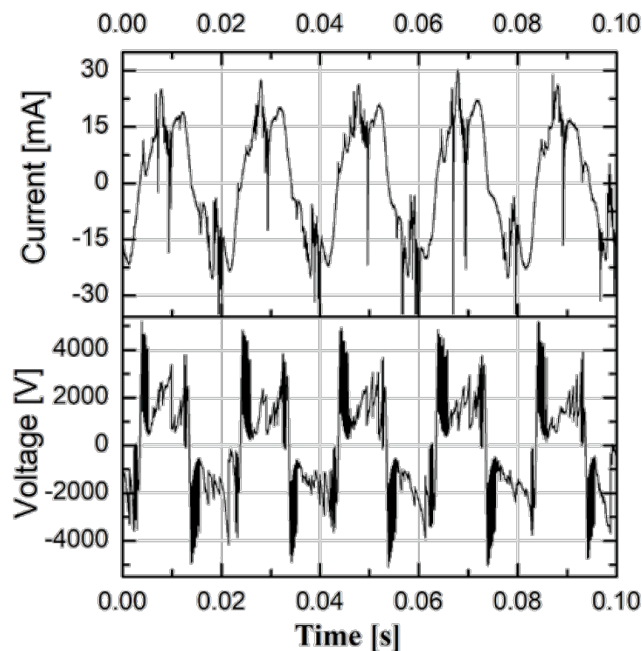
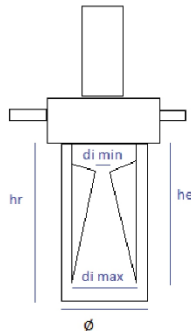
→ faible création de H_2O_2 liée à la production de nitrites/nitrates générés dans le plasma sous air

↓
EEf < 0,1 g.kWh⁻¹



Application: Eau activée par plasma

Objectif: Évaluer l'efficacité énergétique de la fabrication d'eau activée par décharge glissante
 ↳ molécule test: H_2O_2



• Trait_e en post-décharge ou Injection directe

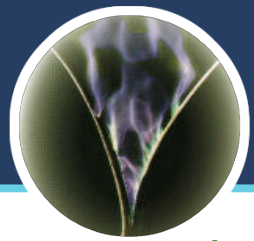
- mini-GlidArc 'classique'
- transformateur HT 9kV / 50 Hz / 30mA

Paramètres expérimentaux :

- Débit du gaz : 3 L/min d'Air;
- Débit de l'eau: 43 mL/min;
- Temps de traitement: 70s;
- Q^{te} d'eau produite pour chaque test: 50 mL;
- Énergie électrique déterminée à partir des formes d'ondes du courant et de la tension.

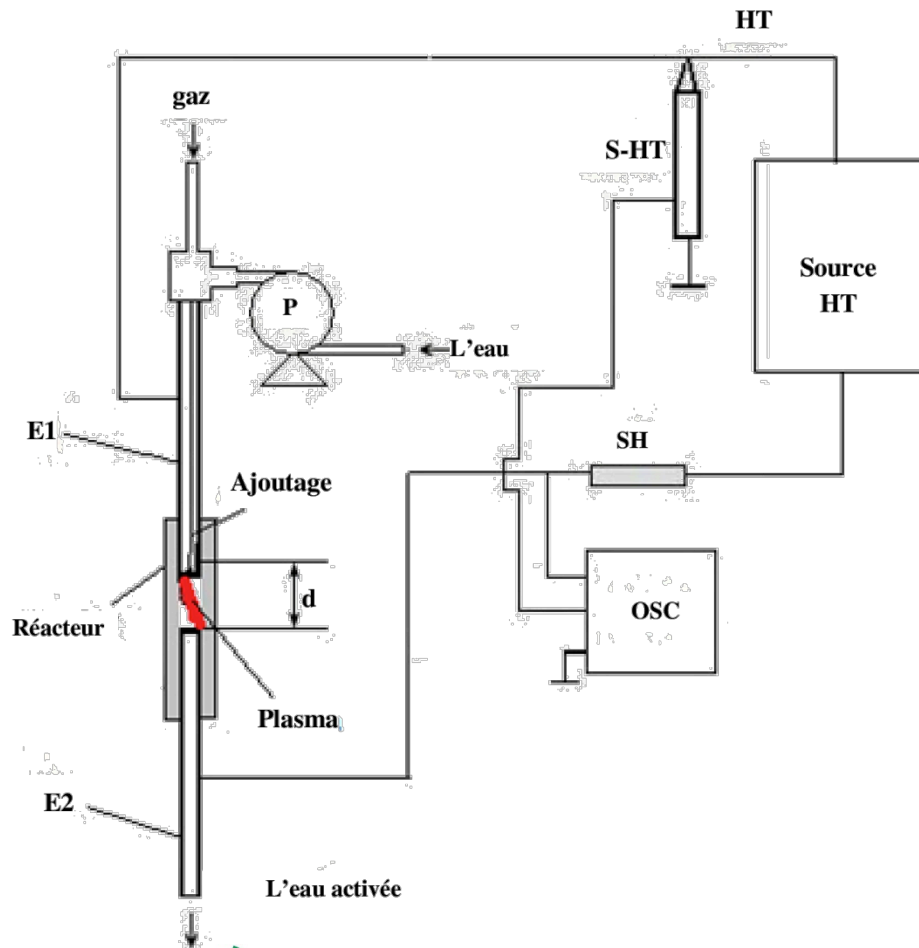


	Post-décharge	Spray
$C_{H_2O_2}$ [mg.L ⁻¹]	18	36
EEf [g.kWh ⁻¹]	1.7	2.2



Application: Eau activée par plasma

Objectif: Évaluer l'efficacité énergétique de la fabrication d'eau activée par décharge glissante
↳ molécule test: H_2O_2

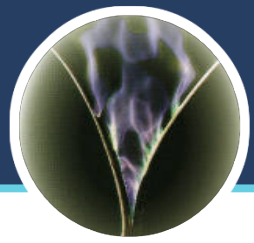


• Traitement de spray injecté dans le plasma

- mini-GlidArc 'pointe-pointe'
- transformateur haute tension 9kV / 50 Hz / 30mA
- ou Alimentation impulsionnelle permettant un réglage de la fréquence et de la largeur des impulsions

Paramètres expérimentaux :

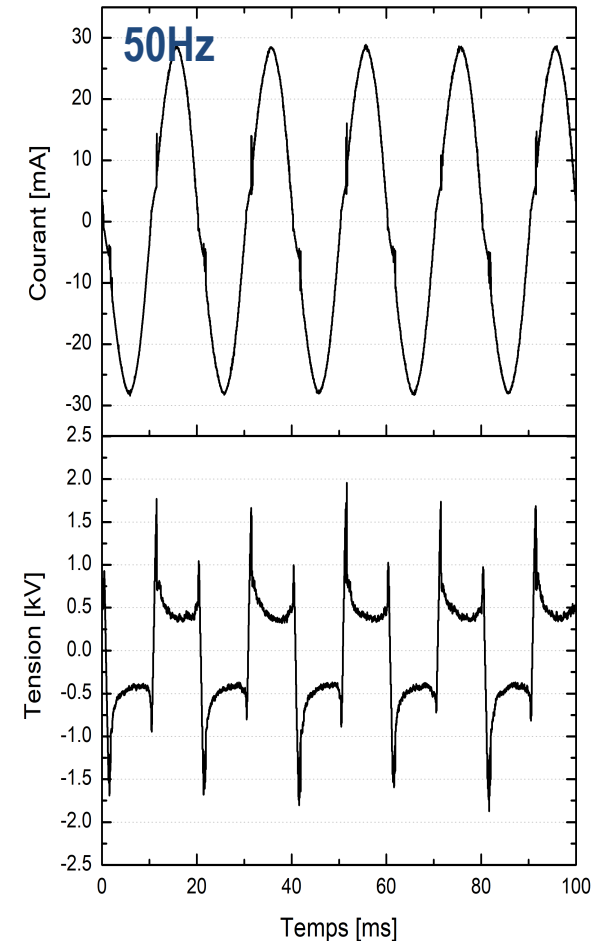
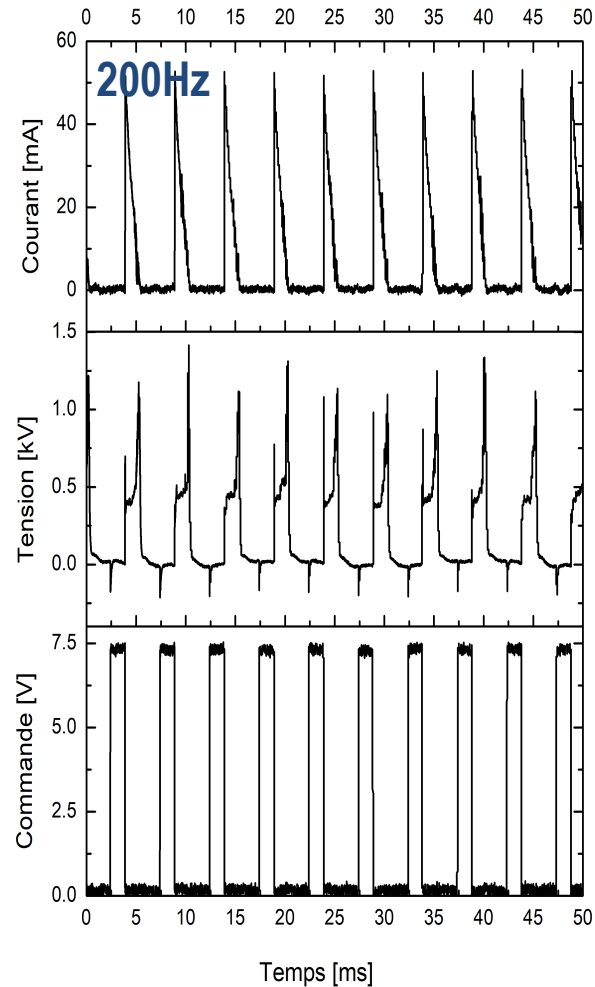
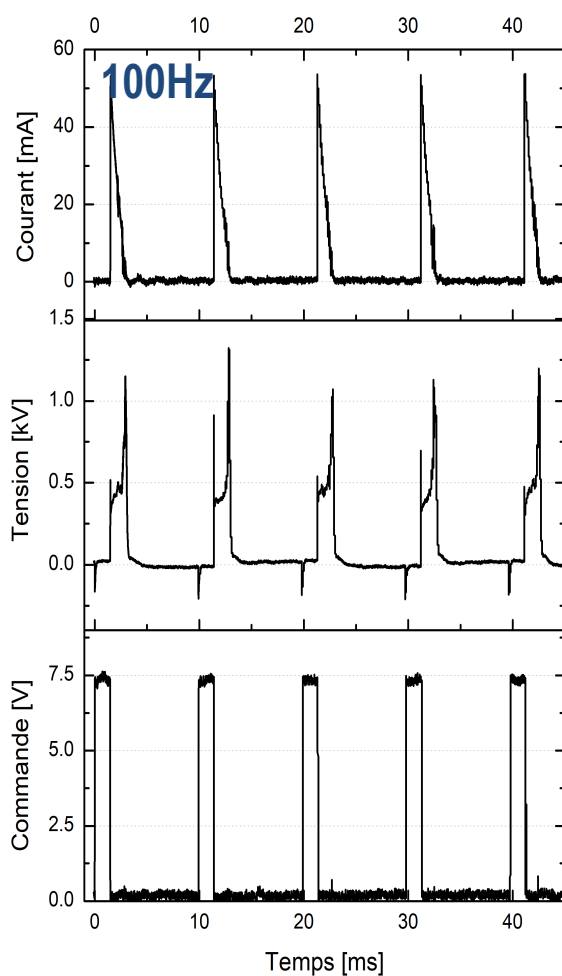
- Débit du gaz : 1,5 L/min d'Ar ;
- Débit de l'eau: 5, 10, 15 et 20 mL/min ;
- Q^{té} d'eau produite pour chaque test: 20 mL ;
- Répétitions : >3;
- Distance entre les électrodes : 3 mm ;
- Solution analysée: 2 mL d'eau activée et 1 mL de sulfate de titane ;
- Énergie électrique déterminée à partir des formes d'ondes du courant et de la tension.

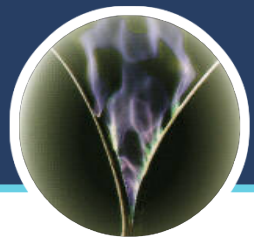


Application: Eau activée par plasma

Efficacité énergétique de la fabrication d'eau activée par décharge glissante

Formes d'ondes des paramètres électriques

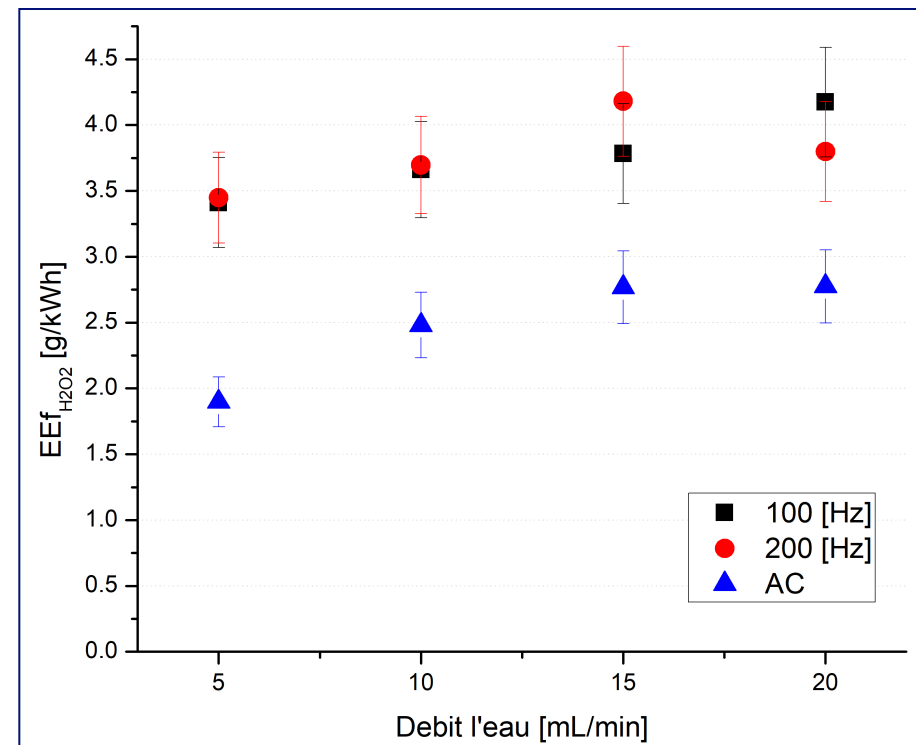
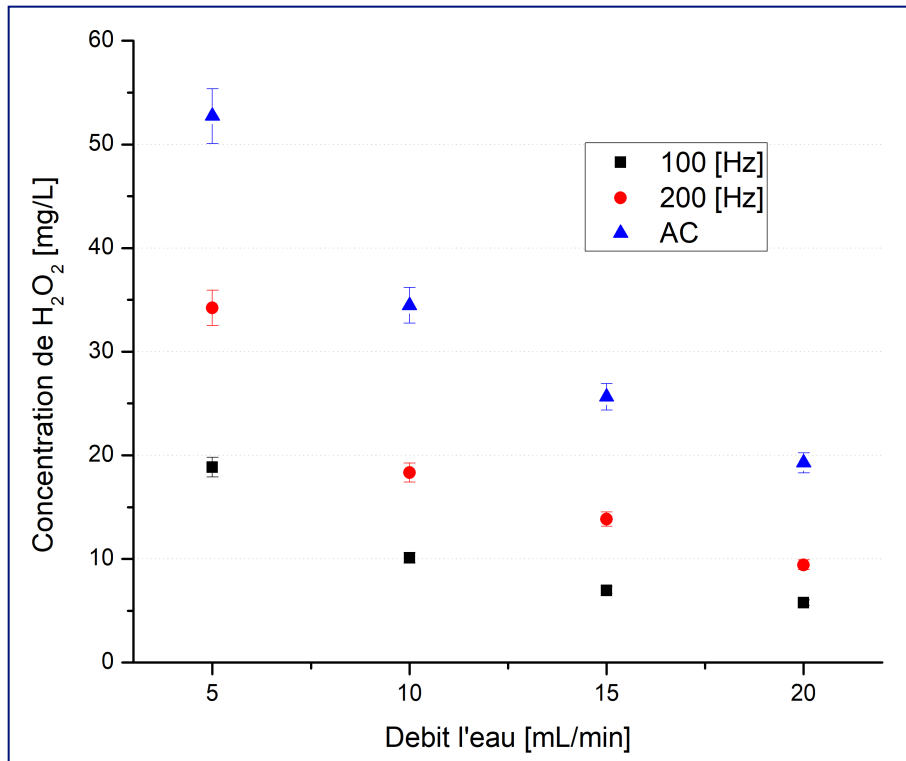




Application: Eau activée par plasma

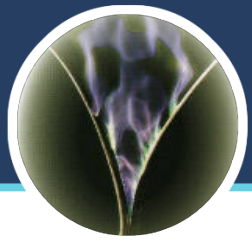
Efficacité énergétique de la fabrication d'eau activée par décharge glissante

Résultats





Conclusion



Je vous remercie de votre attention...



Références

- E. Hnatiuc, D. Astanei, M. Ursache, B. Hnatiuc, J.-L.Brisset , "A Review over the Cold Plasma Reactors and Their Applications", 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2012), 25-27 October, Iasi, Romania
- Richard F., Cormier J.-M., Pellerin S. and Chapelle J., "Physical study of gliding arc discharge", *J.Appl.Phys.*, 1996, **79**-5, 2245-2250
- Richard F., Cormier J.-M., Pellerin S. and Chapelle J., "Gliding arcs fluctuations and arc root displacement" *High Temp.Mat.Proc.*, 1997, **1**-2, 239-248
- Pellerin S., Cormier J.-M., Musiol K., Pokrzywka B., Koulidiati J., Richard F. and Chapelle J., "Spatial fluctuations of 'Gliding' arc", *High Temp.Mat.Proc.*, 1998, **2**-1, 49-68
- V.Dalaine, J.-M.Cormier, S.Pellerin and P.Lefauchaux, "Study of H₂S destruction in a 50Hz and a 25kHz gliding discharge reactors", *J.Appl.Phys.* **84**-3 (1998) 1215-1221
- V. Dalaine, J. M. Cormier, and P. Lefauchaux, " A gliding discharge applied to destruction" ", *J.Appl.Phys.* **83** (1998) 2435
- D. Astanei, I.D. Dirlau, O. Beniuga, R. Burlica, C. Gouillou, "Evaluation of Reactive Species Produced in Water by GlidArc Plasma", EPE 2018
- <https://www.youtube.com/watch?v=tnpp8ZHQtA>