



ÉCOLE TECHNOLOGIQUE DES PLASMAS FROIDS

15^e JOURNÉES DU RÉSEAU



28 septembre - 1 octobre 2020, Saint-Dié-des-Vosges

Plasmas micrométriques

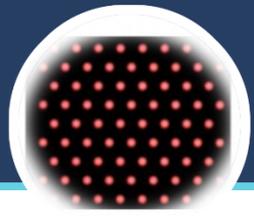
R. Dussart

GREMI, Université d'Orléans - CNRS

*14 Rue d'Issoudun BP 6744,
45067 Orléans, France*

Groupe de Recherches sur l'Énergétique des Milieux Ionisés
14 rue d'Issoudun 45067 Orléans Cedex 2 France





Plan

Definition – Différents types de microplasmas

Rappel sur les décharges DC macroscopiques

Décharges électrodes planes

Décharges à cathodes creuses

Les MHCD : Décharges à micro cathodes creuses

Historique

Claquage, allumage

Gaine de charges d'espace, régime impulsionnel

Etendre le volume des microplasmas :

Les MCSD

Les matrices de microplasmas

Microdécharges sur silicium



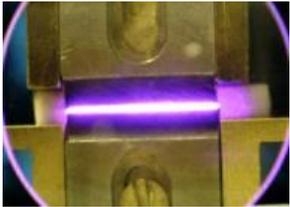
Définition et différents types de microplasmas

Microplasma : plasma dont l'une des dimensions est inférieure au mm.

Grande diversité, étudiés un peu partout en France

Microplasmas microondes

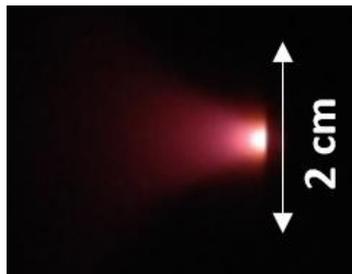
Orsay, O. Leroy



IJL, Nancy, T. Belmonte,
G. Henrion



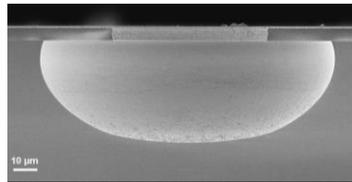
C. Lazzaroni, LSPM



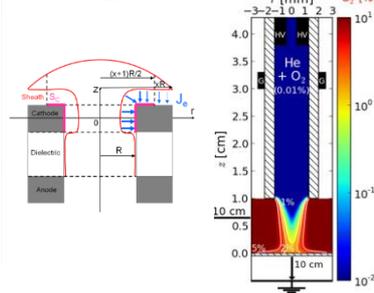
Joao Santos Sousa, Orsay



S. Iseni, R. Dussart, GREMI

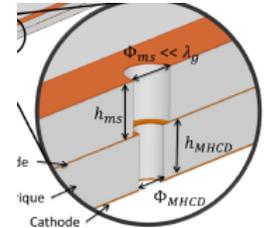
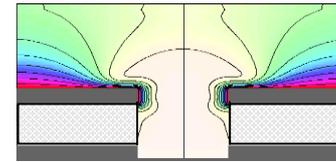


P. Chabert, A. Bourdon
LPP



Microcathodes creuses

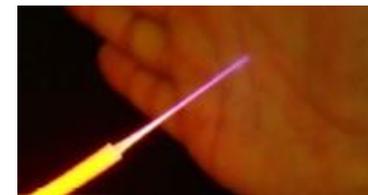
L. Pitchford, J.P. Bœuf, T. Callegary
Toulouse



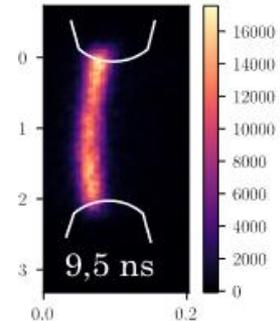
Microplasmas nanoseconde

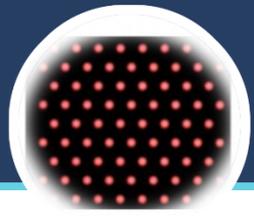
Jets plasmas

JM Pouvesle, E. Robert,
C. Douat, GREMI



PPRIM, David PAI





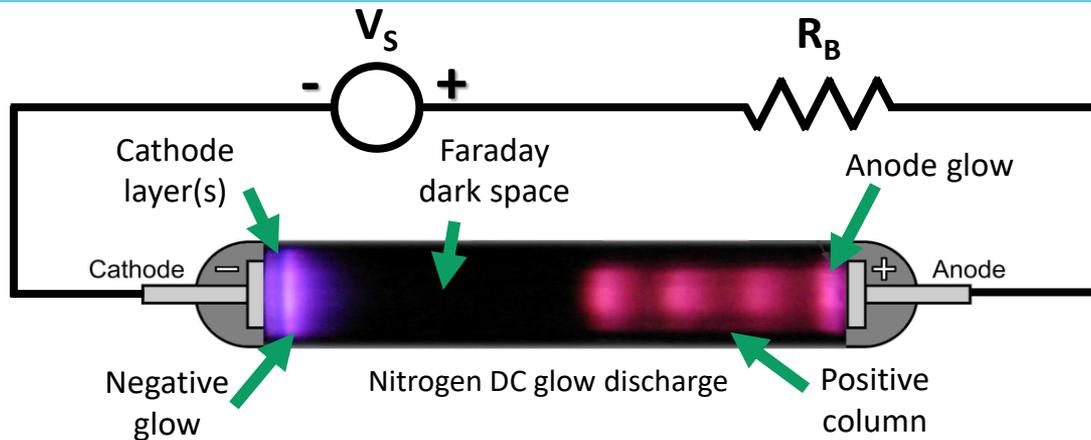
Intérêt des microplasmas

“Microplasmas combine the potential of low temperature plasmas with the advantages of being micro. The discharges create a **highly reactive** environment that contains **charged particles, excited species, radicals, and photons**, and the reduced dimensions **enable low-power sources** with small footprints suited for **integration in microsystems and portable devices**. Microplasmas represent a **new realm in plasma physics** that is receiving growing attention for its potential economic and technological impact in many scientific disciplines.”

Felipe Iza, Plasma Processes & Polymers, 2008, 5, 322–344

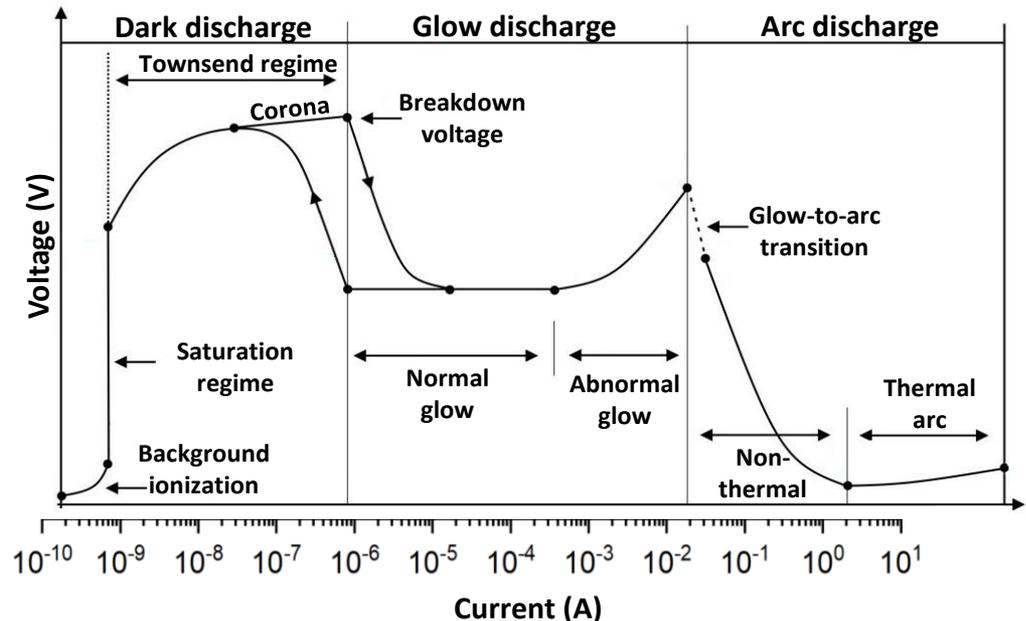


Retour sur les décharges DC macroscopiques



En décharge DC luminescente, plusieurs régimes :

- Régime de Townsend
- Régime normal
- Régime anormal
- Régime d'arc

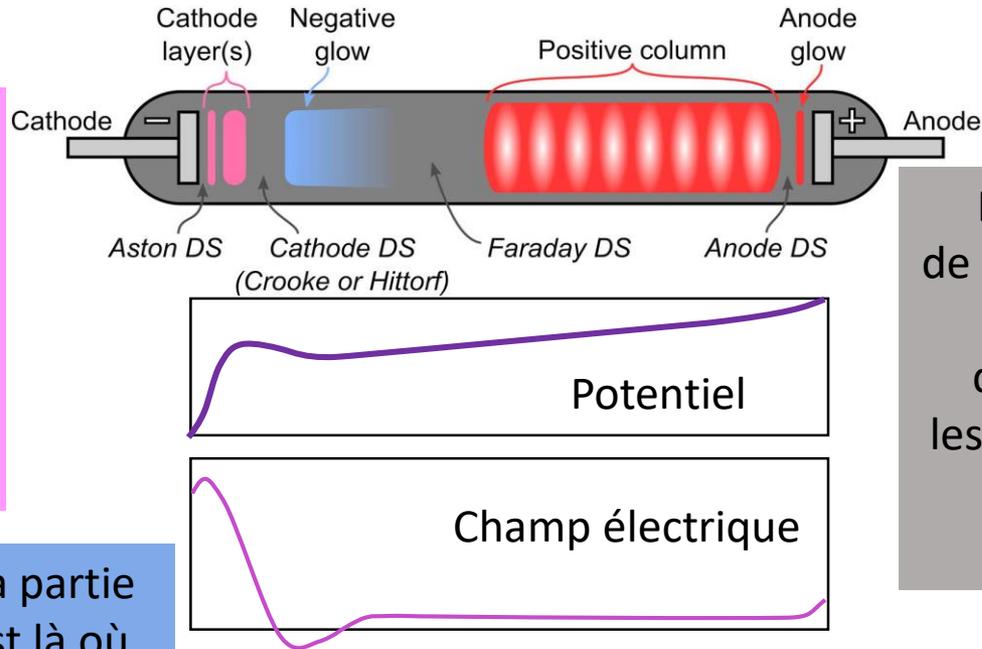


[1] J T Gudmundsson and A Hecimovic 2017 *Plasma Sources Sci. Technol.* **26** 123001

[2] V A Lisovski et al 2012 *Eur. J. Phys.* **33** 153



Retour sur les décharges DC macroscopiques



Les électrons secondaires émis par la cathode commencent leur accélération dans l'espace sombre d'Aston.

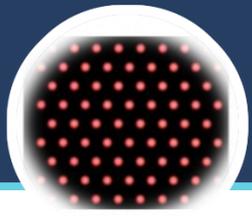
La lueur négative est la partie la plus lumineuse : c'est là où les électrons secondaires font des collisions inélastiques pour exciter et ioniser les atomes ou molécules. C'est la frontière de la gaine où on a la chute de potentiel principale.

Dans l'espace sombre de Faraday, les électrons n'ont pas assez d'énergie pour exciter les atomes et molécules et ils se recombinaient avec les ions.

Dans la colonne positive, le plasma est neutre et le champ électrique très faible. On a une décharge luminescente uniforme, sauf quand il y a une striation. La vitesse de dérive des électrons est faible dans la colonne positive.

[1] J T Gudmundsson and A Hecimovic 2017 *Plasma Sources Sci. Technol.* **26** 123001

Claquage des décharges DC macroscopiques



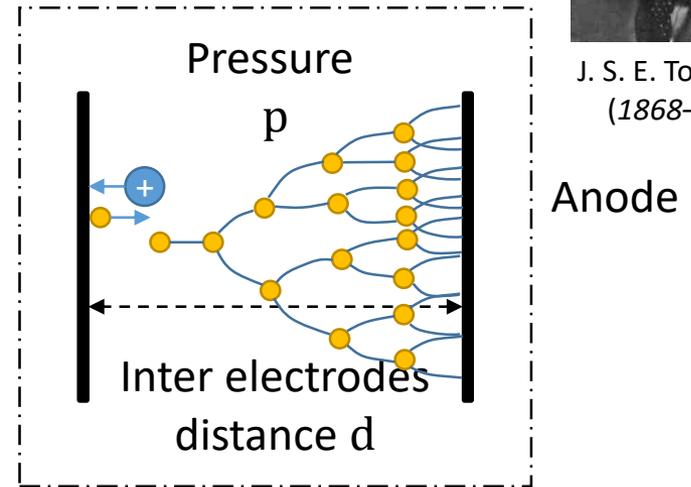
J. S. E. Townsend
(1868–1957)

Avalanche électronique

α : premier coefficient de Townsend

$$d\Gamma_e = \alpha(z)\Gamma_e dz$$

$$\Gamma_e(z) = \Gamma_e(0) \exp\left(\int_0^z \alpha(z') dz'\right) \quad \text{Cathode}$$



Anode

Continuité de la charge

$$\Gamma_e(d) - \Gamma_e(0) = \Gamma_i(0) - \Gamma_i(L)$$

Emission secondaire

γ_{se} : coefficient d'émission secondaire

$$\Gamma_e(0) = \gamma_{se}\Gamma_i(0)$$

$$\alpha = \text{const} \Rightarrow \int_0^d \alpha(z') dz' = \alpha d$$

$$\alpha d = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma_{se}}\right)$$

$$\alpha = A \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right)$$

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln Apd - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma_{se}}\right)\right]}$$

A, B : constantes dépendant du gaz

Ex: pour l'Ar, $A = 11,5 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ et $B = 176 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$

γ_{se} : dépend du matériau, des ions, de l'état de surface et un peu de l'énergie des ions

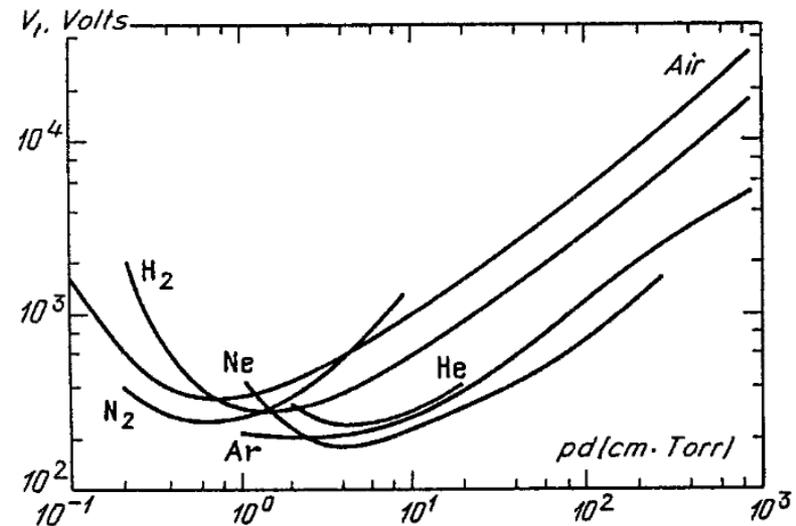
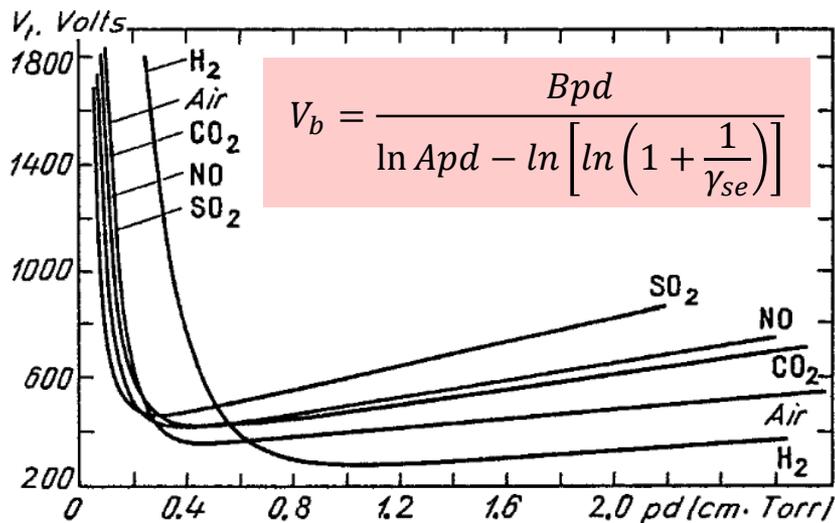


Courbe de Paschen



F. Paschen
(1865–1947)

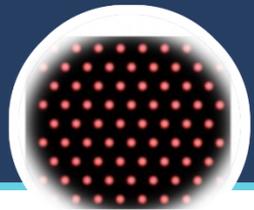
Indique la tension minimale à appliquer pour initier la décharge dans le cas de deux électrodes planes séparées d'une distance d et où règne un gaz à la pression P .



Y. P. Raizer, Gas discharge physics, Springer, 1997

$$(pd)_{min} = \frac{e^1}{A} \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma_{se}} \right)$$

$$V_{b,min} = \frac{B}{A} e^1 \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma_{se}} \right)$$



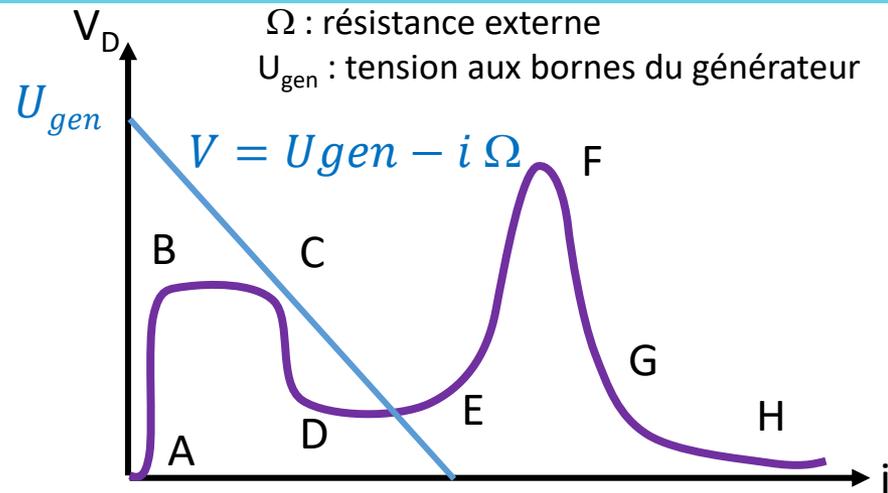
Transition régime normal – régime anormal

Entre D et E

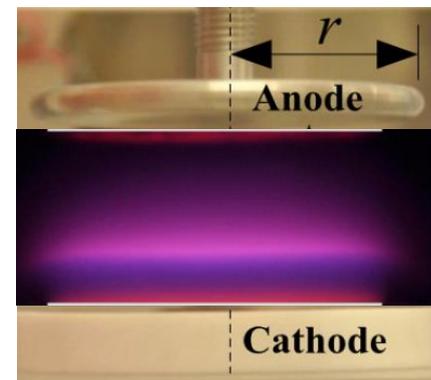
- V_D reste constant
- Régime **normal** de décharge électroluminescente.
- La densité de courant j est **constante**.
- Pour augmenter I , **la décharge s'étend sur la surface cathodique** : $I = A \times j$ avec $j = \text{const}$

Entre E et F

- V_D augmente
- Régime **anormal** de décharge électroluminescente.
- La densité de courant j augmente.
- Pour augmenter I , il n'y a pas d'autre possibilité que d'augmenter j car la surface est saturée.
- Davantage d'électrons sont extraits de la surface
 $I = A \times j$ avec $A = \text{const}$



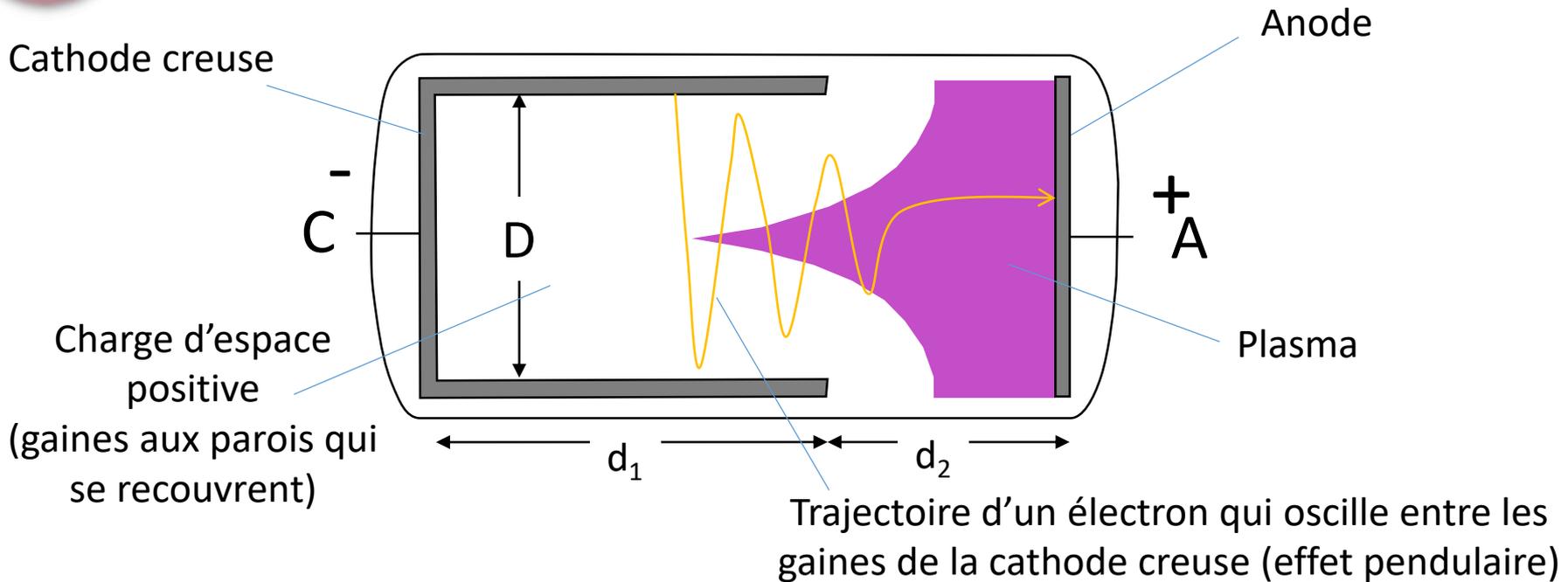
Y. P. Raizer, Gas discharge physics, Springer, 1997



Yangyang FU et al, Phys. Plasmas 24, 083510 (2017)



Décharge à cathode creuse



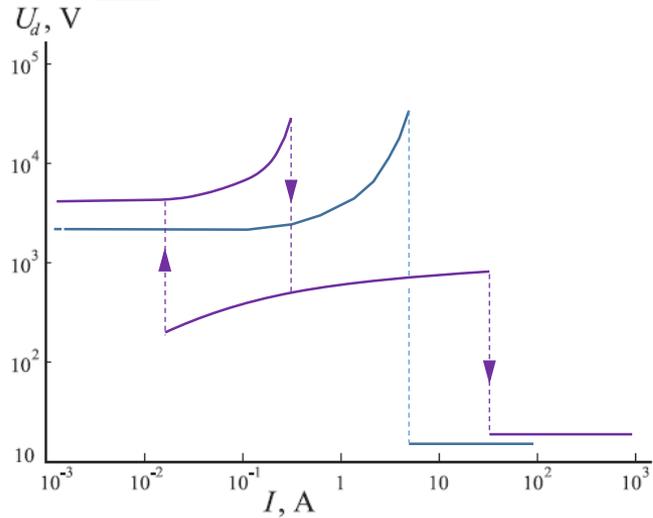
$d_1 = 0 \Rightarrow$ électrodes planes séparées de d_2
Ici, la **distance inter électrode** n'est pas bien définie.

Cas où la décharge **recouvre toute la surface cathodique** :

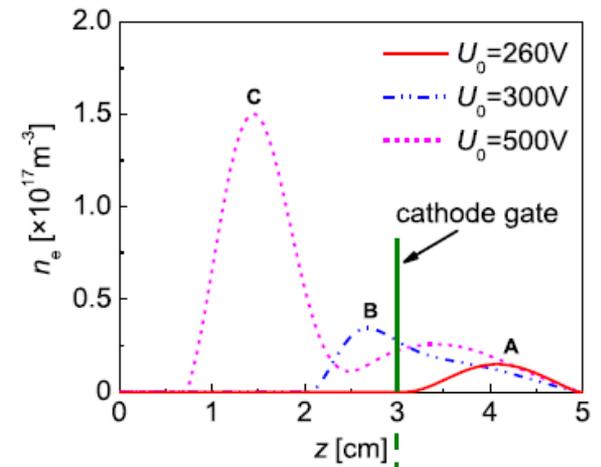
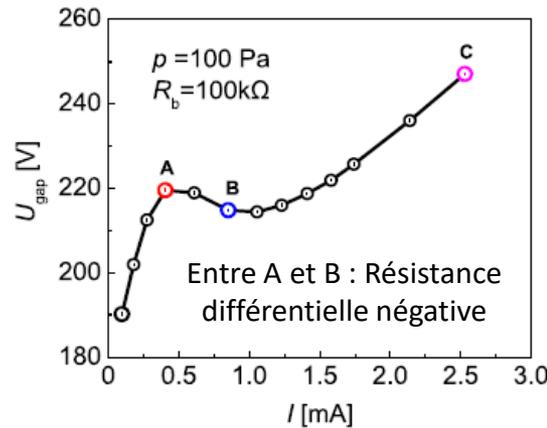
- **décharge anormale** pour les électrodes planes (U_D augmente avec I et la gaine diminue)
- dans les décharge à cathode creuse, j augmente beaucoup plus fortement que dans les décharges planes en régime anormal.



Comparaison décharges plan-plan et cathode creuse



Caractéristique V – I pour une cathode creuse dans l'Ar



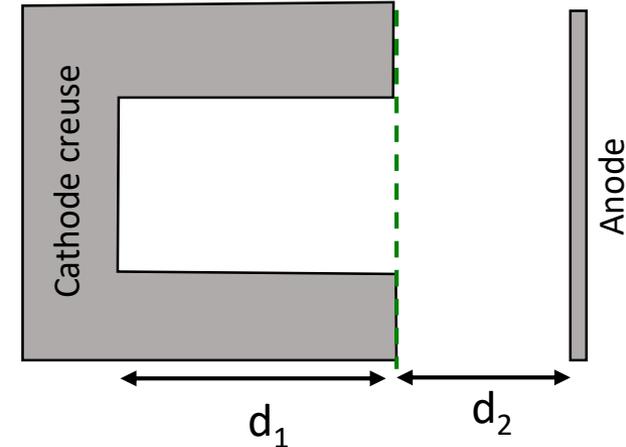
Kolobov, Metel, J. Phys. D: Appl. Phys. 48 (2015) 233001

Décharge électrodes planes

- régime normal évoluant vers le régime anormal et le régime d'arc

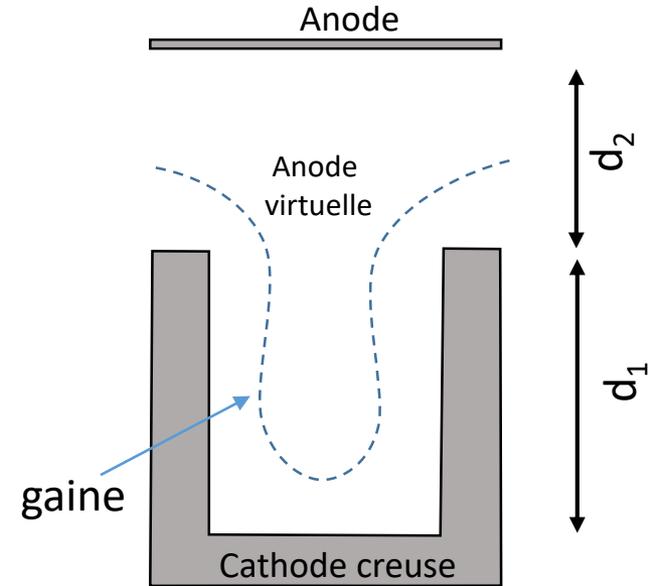
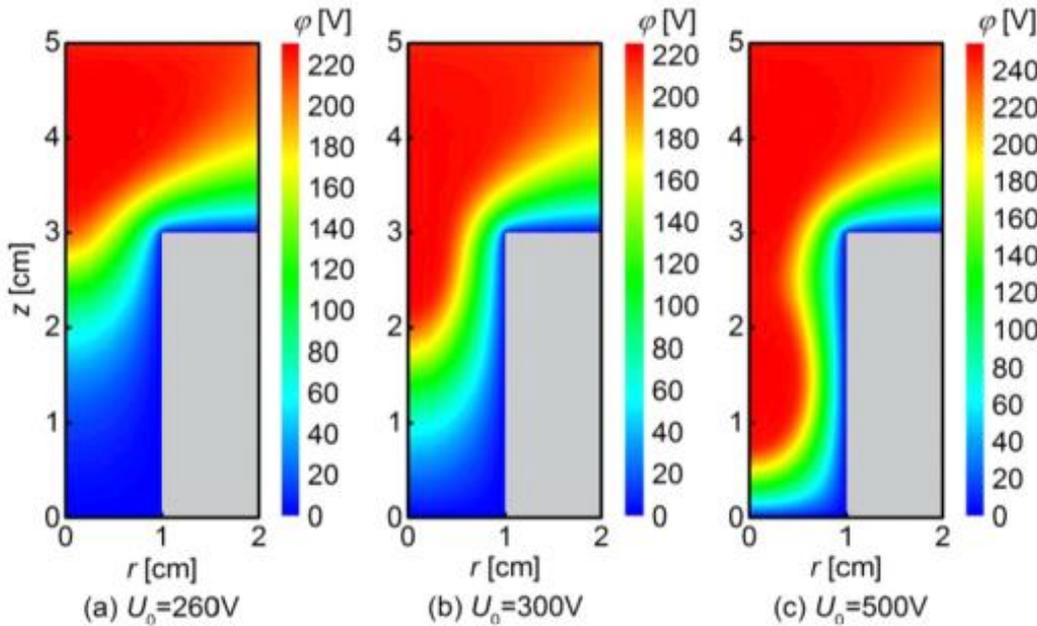
Décharge cathode creuse

- Tension plus élevée sur la première partie. Le plasma est à l'extérieur de la cathode creuse.
- Passage vers le régime normal avec augmentation de la tension. Le plasma s'étend sur la cathode. Régime d'arc à fort courant
- Entre B et C, l'épaisseur de gaine diminue et **le plasma est à l'intérieur de la cathode creuse.**



Fu et al. Phys. Plasmas 24, 083516 (2017)

Décharges à cathode creuse en fonction du courant

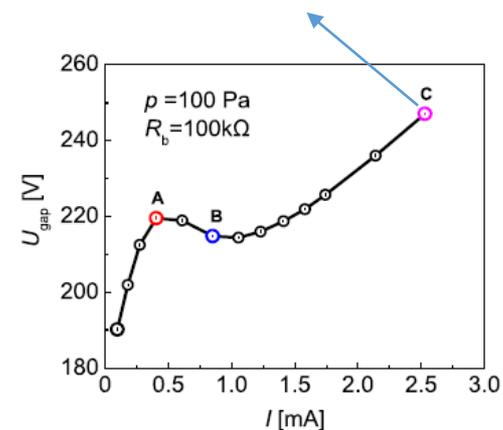


$p = 100 \text{ Pa}$ $R_b = 100 \text{ k}\Omega$, U_0 tension du générateur DC

Décharge cathode creuse

A faible courant, légère distorsion de la gaine au niveau de la cathode.

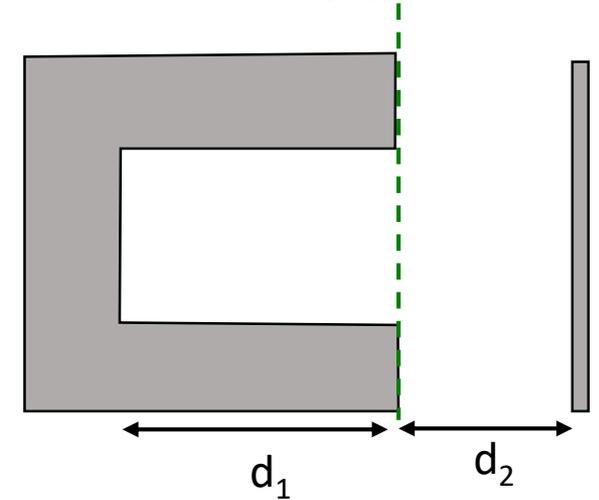
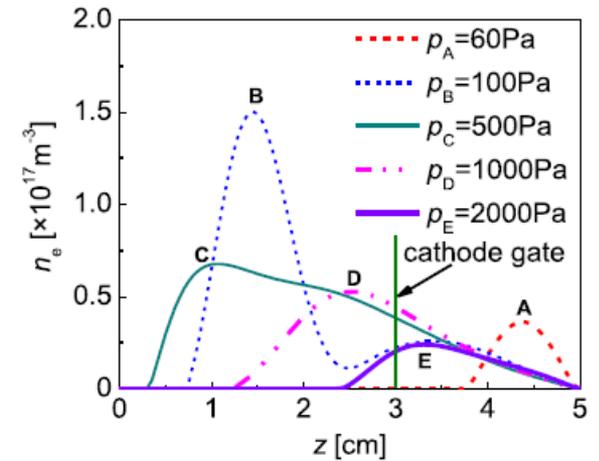
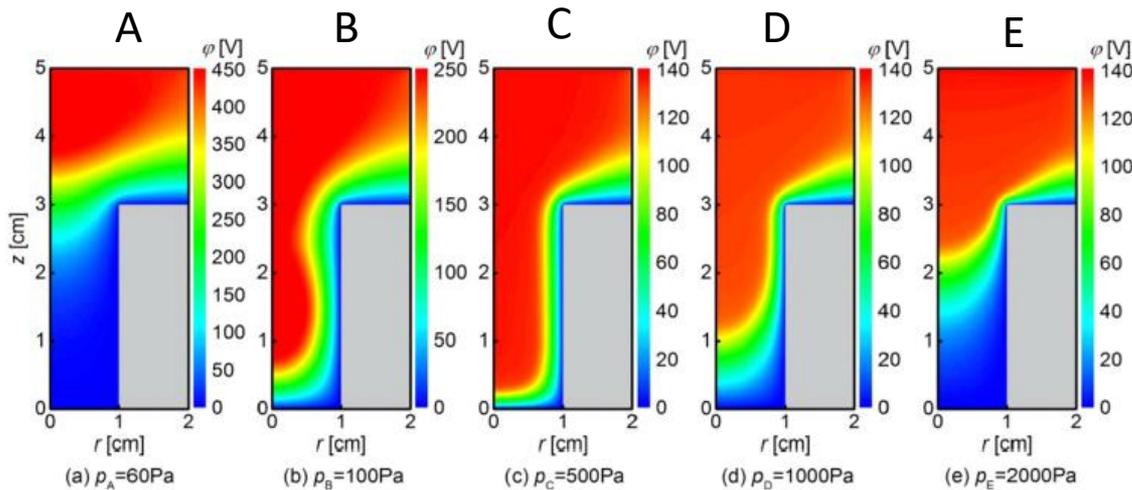
A fort courant, le plasma entre dans la cavité. L'épaisseur de gaine diminue.



Fu et al. Phys. Plasmas 24, 083516 (2017)



Décharges à cathode creuse en fonction de la pression



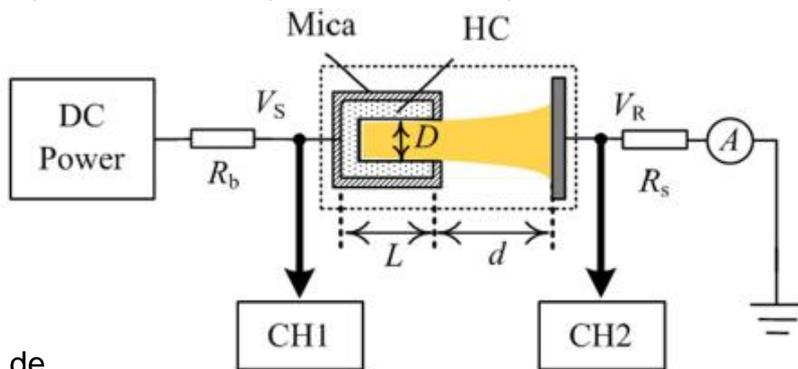
$U_0 = 500 \text{ V}, R_b = 100 \text{ k}\Omega,$

Pression optimale autour de 100 Pa dans ces conditions.
 Au-delà, n_e diminue et le maximum est de nouveau en dehors de la cavité ($P = 2000 \text{ Pa}$)

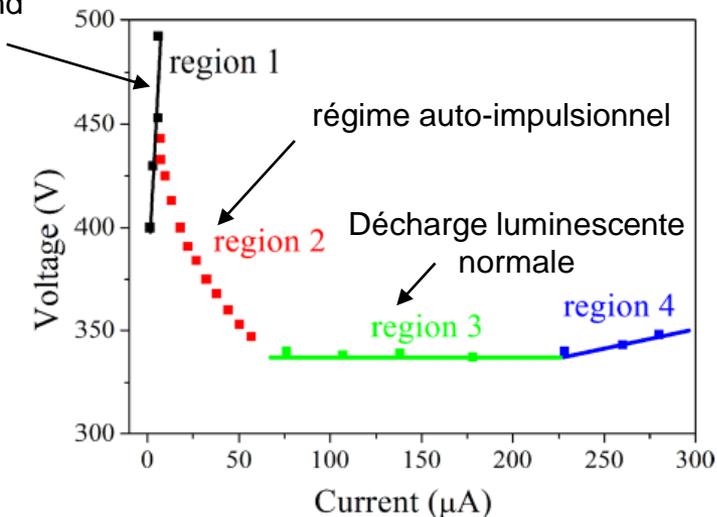
Les instabilités dans les cathodes creuses macroscopiques

Ar, $D = 10$ mm, $L = 20$ mm, $d = 100$ mm

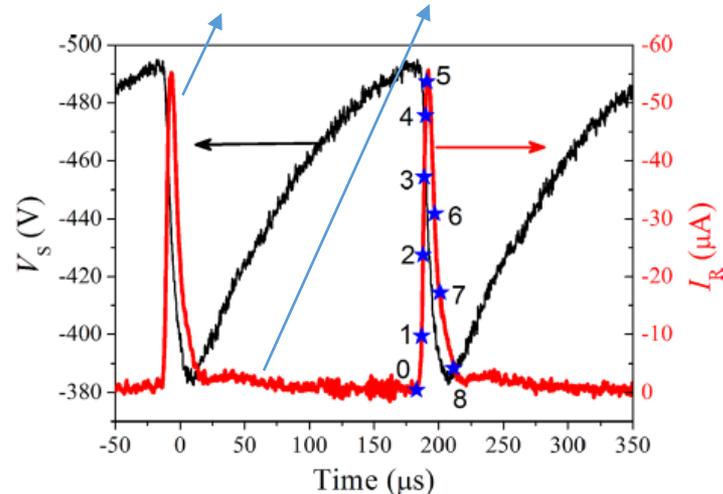
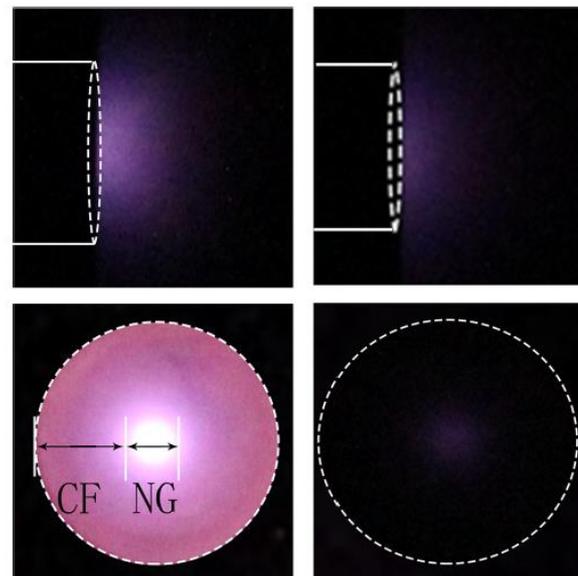
$3 \mu\text{A}$, AR, $P = 0,5$ Torr



Régime de Townsend



Instabilités (régime auto-impulsionnel) : Transition entre décharge de Townsend à faible courant et décharge luminescente à plus fort courant.



Qin et al. Phys. Plasmas 23, 023501 (2016)



Transition vers le régime d'arc

Au-delà de F, après le régime anormal :

Densité de courant élevée

⇒ Echauffement de la cathode

⇒ Emission thermoélectronique suivant la loi de J Richardson-Dushman

$$J = AT kT^2 e^{\left(-\frac{W_s}{kT}\right)}$$

W_s : travail de sortie du matériau.

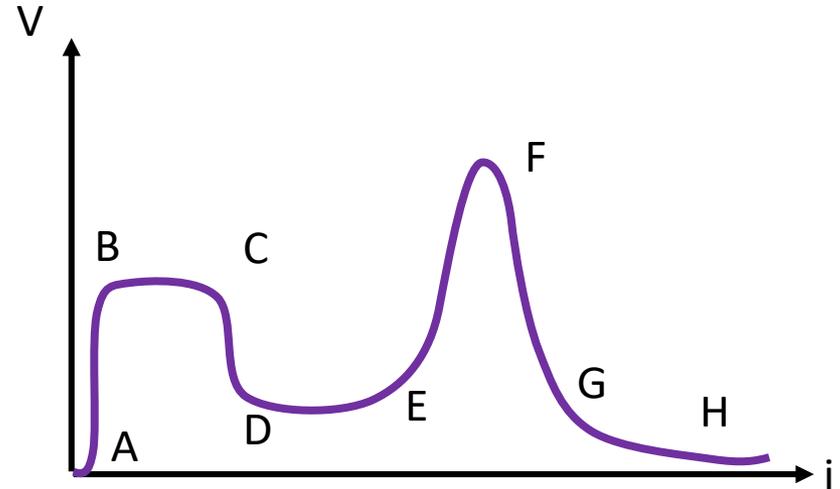
⇒ Changement de régime de fonctionnement :

La tension de décharge chute car il n'est plus nécessaire d'accélérer les ions pour créer des électrons secondaires.

⇒ **régime d'arc hors équilibre thermodynamique local.**

De G à H: Le **courant** et donc la **concentration électronique** sont suffisantes pour assurer un **équilibre thermodynamique local** du **plasma d'arc**.

La température du gaz devient très élevée ($\sim 10^4$ K).

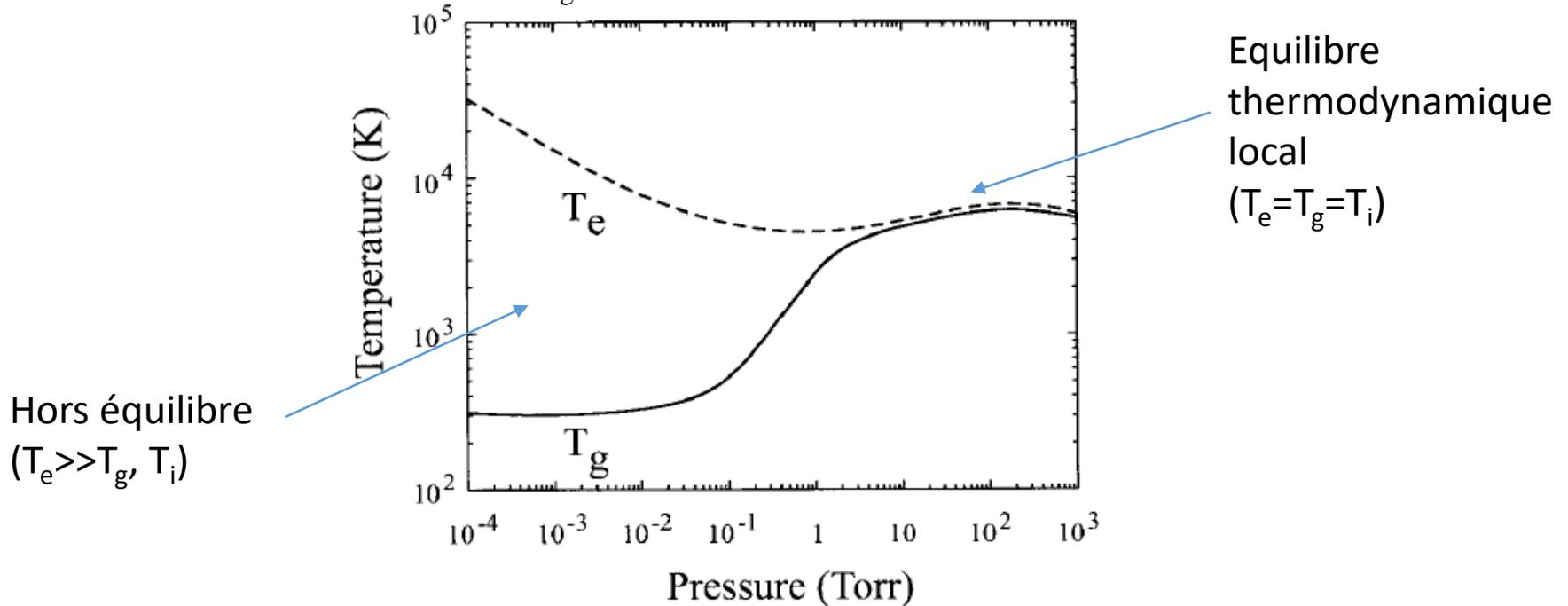




De la basse pression à la haute pression

Evolution de la température du gaz et des électrons dans un arc de vapeur de mercure à courant constant

Evolution schématique de T_e et T_g en fonction de P dans une décharge à courant constant



Plasma froid pour $P < 1$ Torr \Rightarrow Plasma thermique pour $P > 5$ Torr

A haute pression, les collisions électrons-particules lourdes vont être suffisamment nombreuses pour chauffer le gaz.

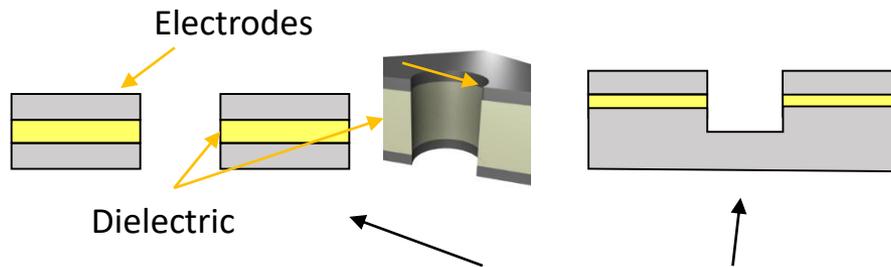
W. Elenbaas, The High Pressure Mercury Vapor Discharge. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, 1951



MHCD : Micro Hollow Cathode Discharges \Rightarrow Micro Décharges à Cathode Creuse

MHCD réintroduites par K.H. Schoenbach à Old Dominion Univ (USA) dans les années 90.

Metal-Insulator-Metal structure



The bottom electrode is **totally** or **partially** drilled

Typical performances

- Power density : 100s of kW.cm^{-3}
- Electron density : $\sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

Les MHCD fonctionnent de **manière stable en DC** à **pression atmosphérique** en régime **hors ETL**.

Quelle en est la raison ?

Le rapport **S/V (surface / volume)** est 1000x plus important que dans les décharges DC macroscopiques. Echanges thermiques avec les surfaces sont plus efficaces pour maintenir les neutres à basse température. ($< 10^3 \text{ K}$)

\Rightarrow Régime hors équilibre thermodynamique maintenu

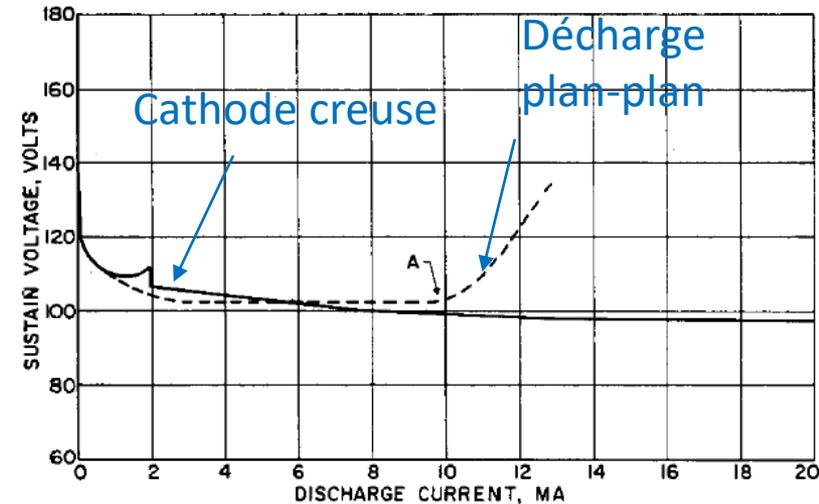
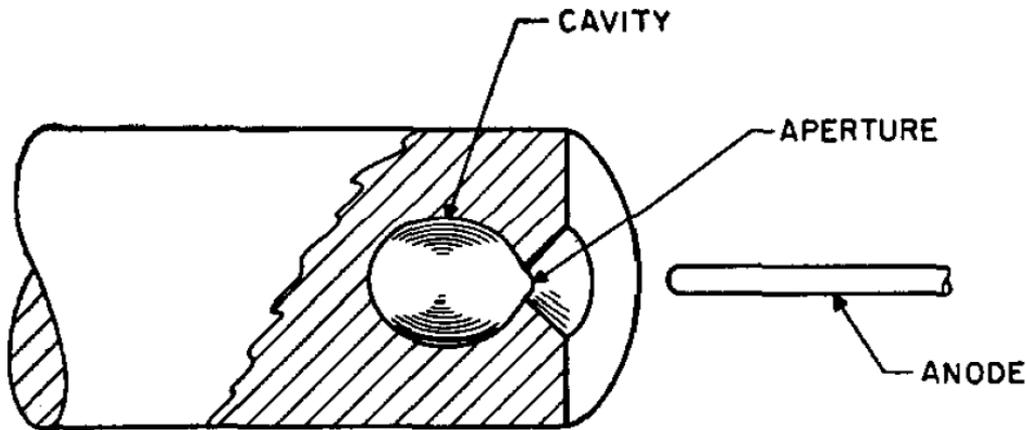


Le premier papier sur les microcathodes creuses

“New Hollow Cathode Glow Discharge”, A. D. White, JAP 30 (5) 711 1958

Cathode creuse sphérique. $J < 0.5 \text{ amp/cm}^2$.

$N_e > 10^{13} \text{ cm}^{-3}$



$\phi_{\text{cavité}} = 750 \mu\text{m}$

$\phi_{\text{aperture}} = 185 \mu\text{m}$

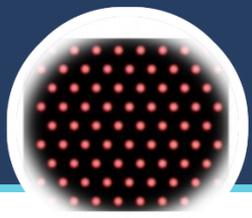
$I = 10 \text{ mA}$

Neon. $P = 100 \text{ Torr}$

Caractéristique V-I pour le Néon à 100 Torr

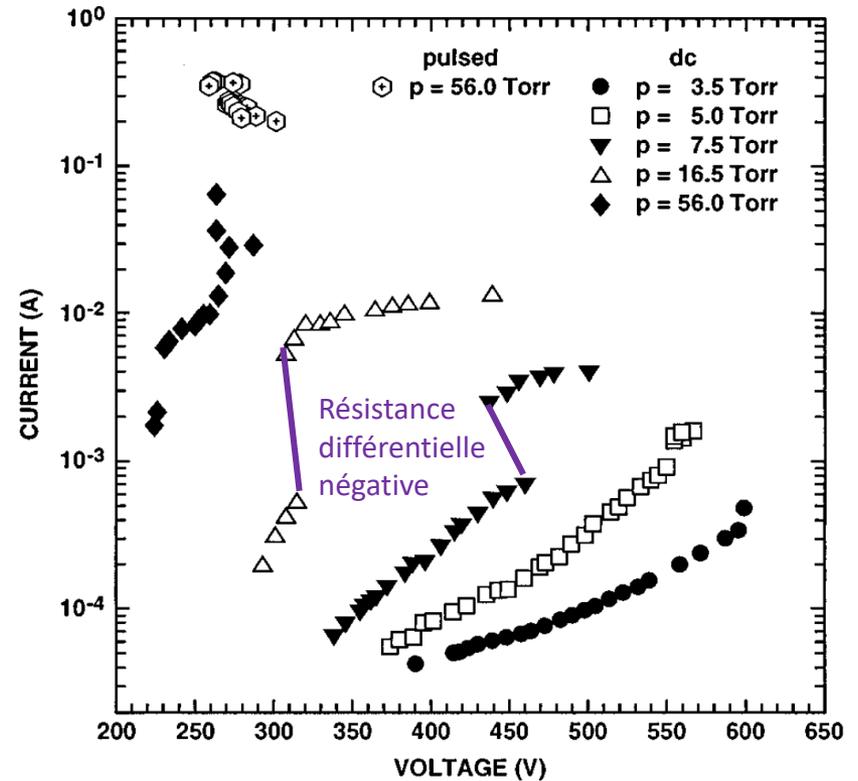
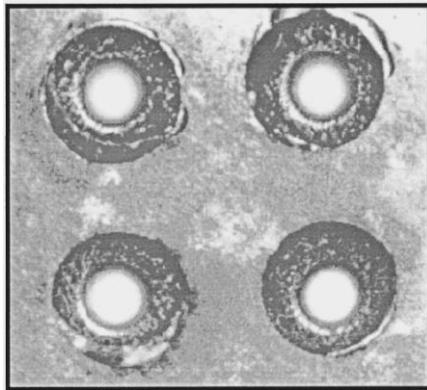
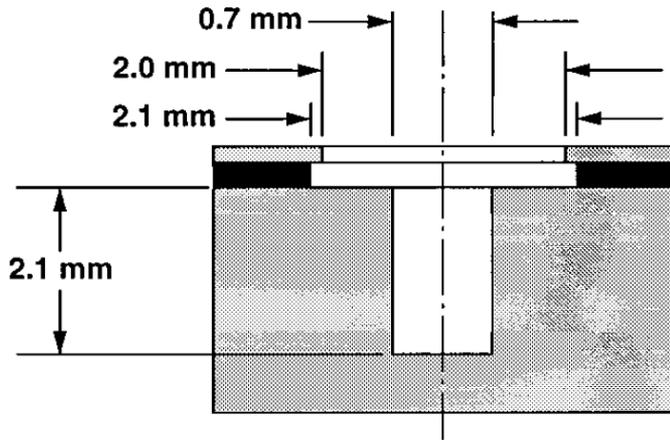
Comparaison entre décharge plan-plan (pointillés) et microcathode creuse (courbe continue).

Chute de tension à 2 mA \Rightarrow la plasma pénètre dans la cavité.



MHCD (K. H. Schoenbach)

Appl. Phys. Lett. **68** (1), 1 January 1996

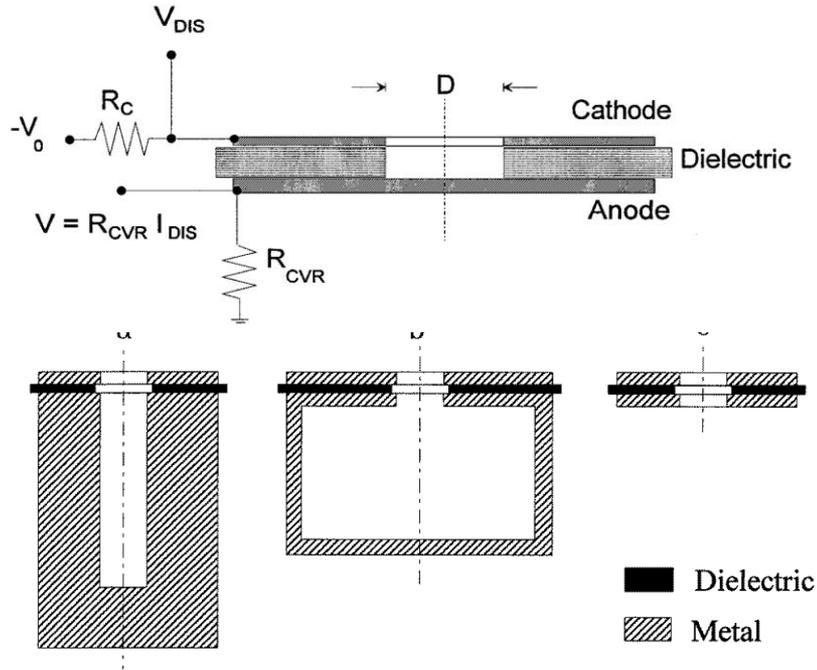


Matrice de quatre MHCD dans l'argon à $P = 16.5$ Torr



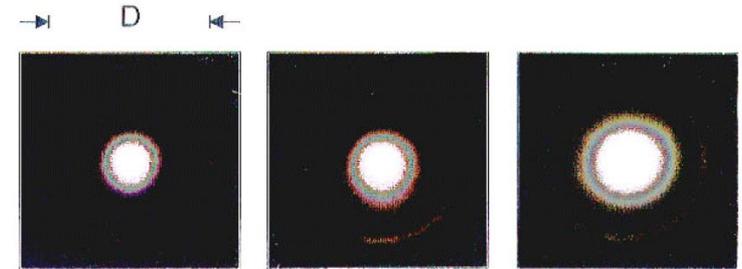
MHCD (K. H. Schoenbach)

Plasma Sources Sci. Technol. 6 (1997) 468–477



Ar, 56 Torr, diamètre de 200 μm

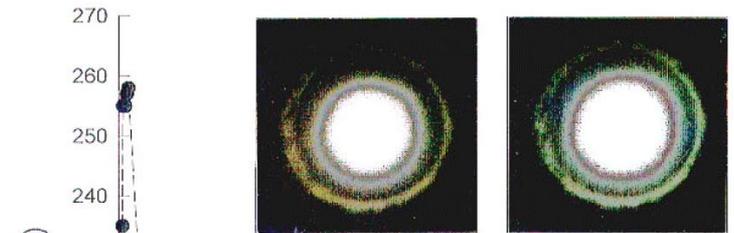
Fonctionnement à 896 Torr également



a. 0.07 mA

b. 0.36 mA

c. 1.06 mA



d. 3.36 mA

e. 6.66 mA

pD = 1.1 Torr-cm

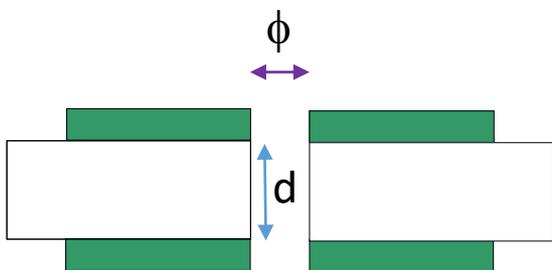
Current (mA)

Voltage (V)



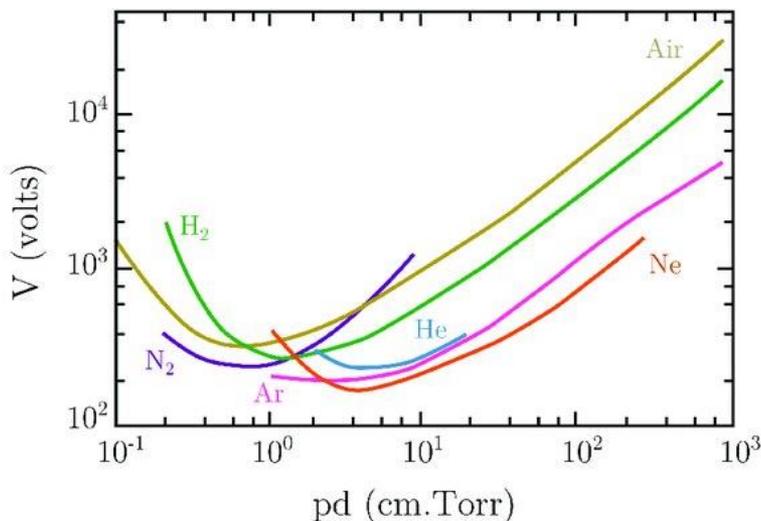
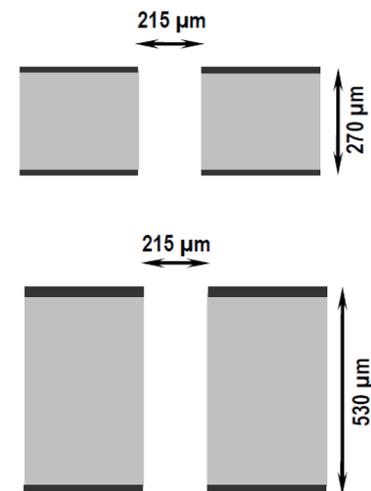
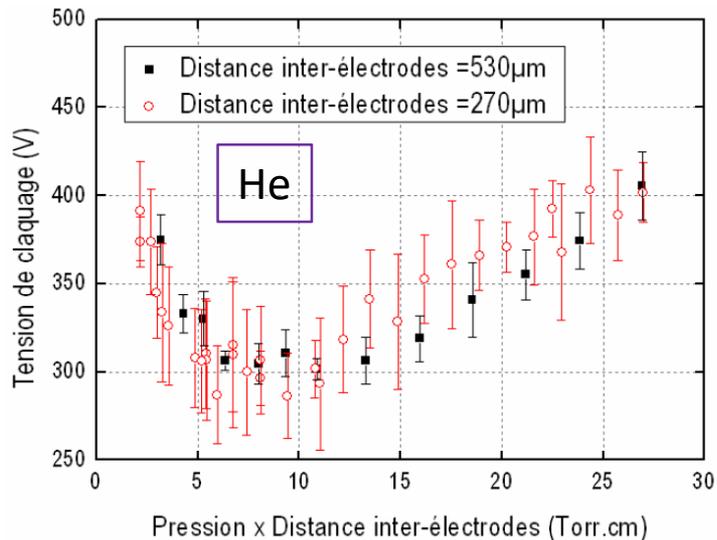
Claquage

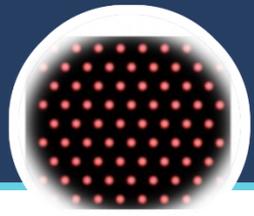
Le claquage de la MHCD suit la courbe de Paschen



Minimum pour pd entre 5 et 10 Torr.cm
Tension de claquage minimum vers 250-300 V pour l'hélium.

T. Dufour, Thèse, Nov 2009





Simulation de la formation de la décharge dans l'hélium

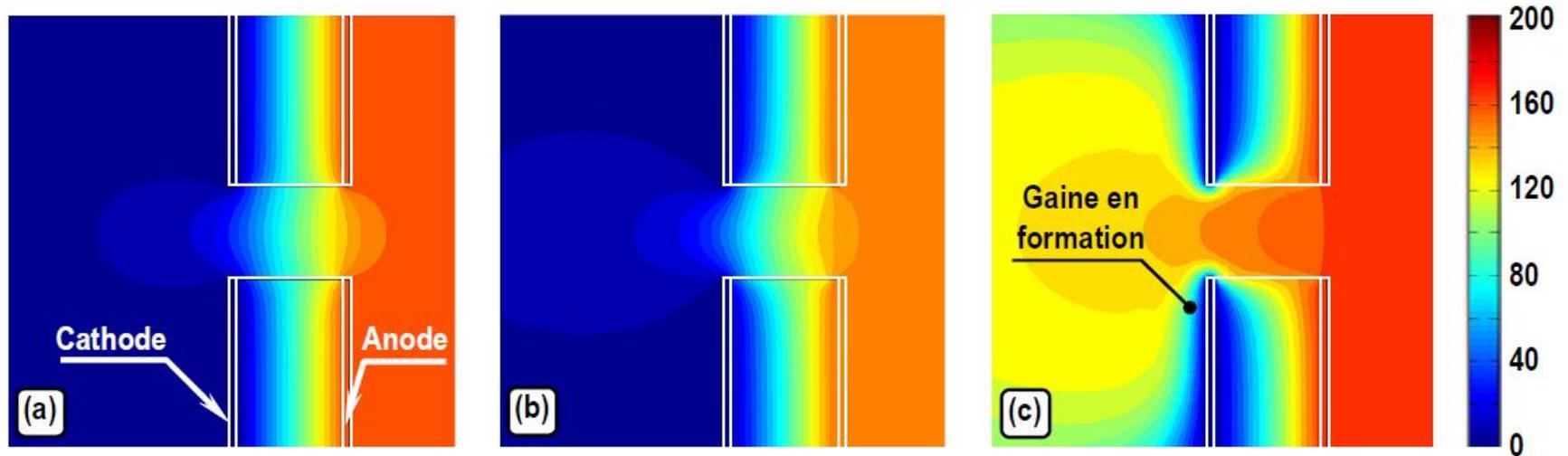
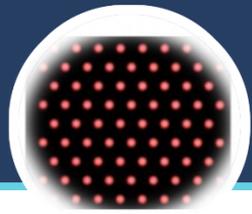


Figure 3.7 – Formation du champ électrique dans la cavité d'une micro-cathode creuse ouverte fonctionnant dans l'hélium à 100 Torr, aux instants : (a) 207 ns, (b) 1 μ s, (c) 2 μ s. Les potentiels sont exprimés en volts.

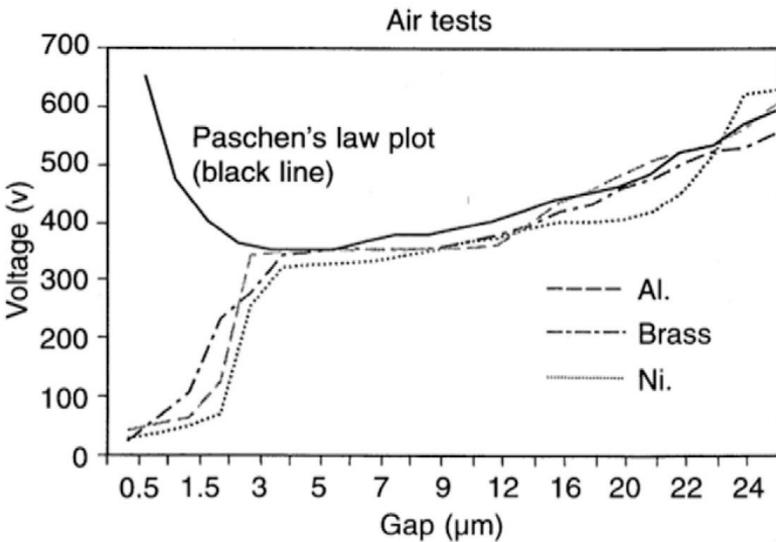


T. Dufour, Thèse, Nov 2009



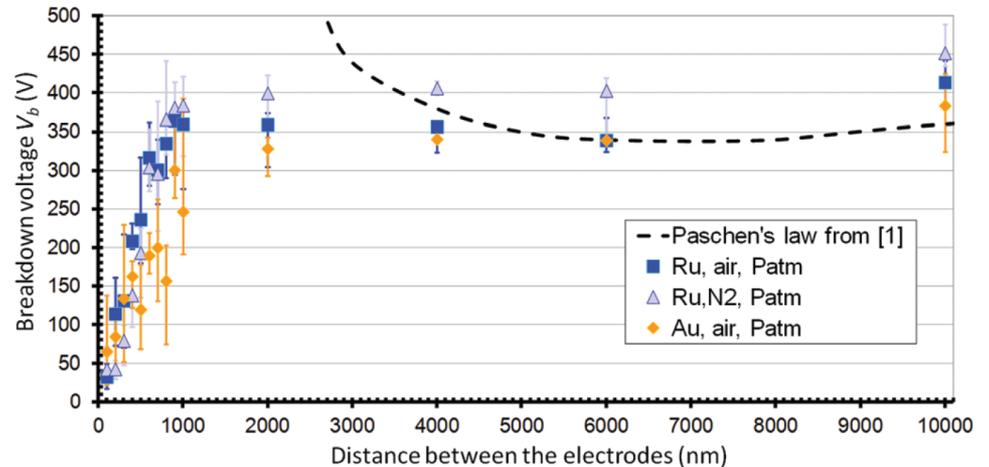
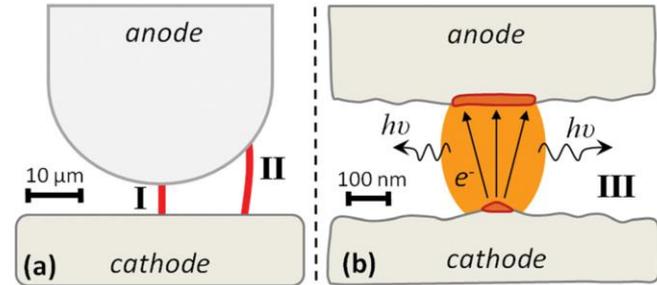
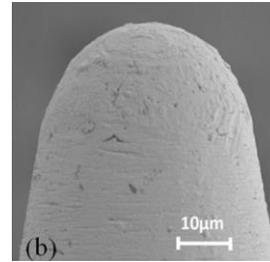
Field effect in the ignition mechanism

D. Go and A Venkatraman J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014) 503001



Breakdown voltage deviates from the classic Paschen's Law for dimensions in the range of 1–10 μm : modified Paschen curve by field effect electron emission

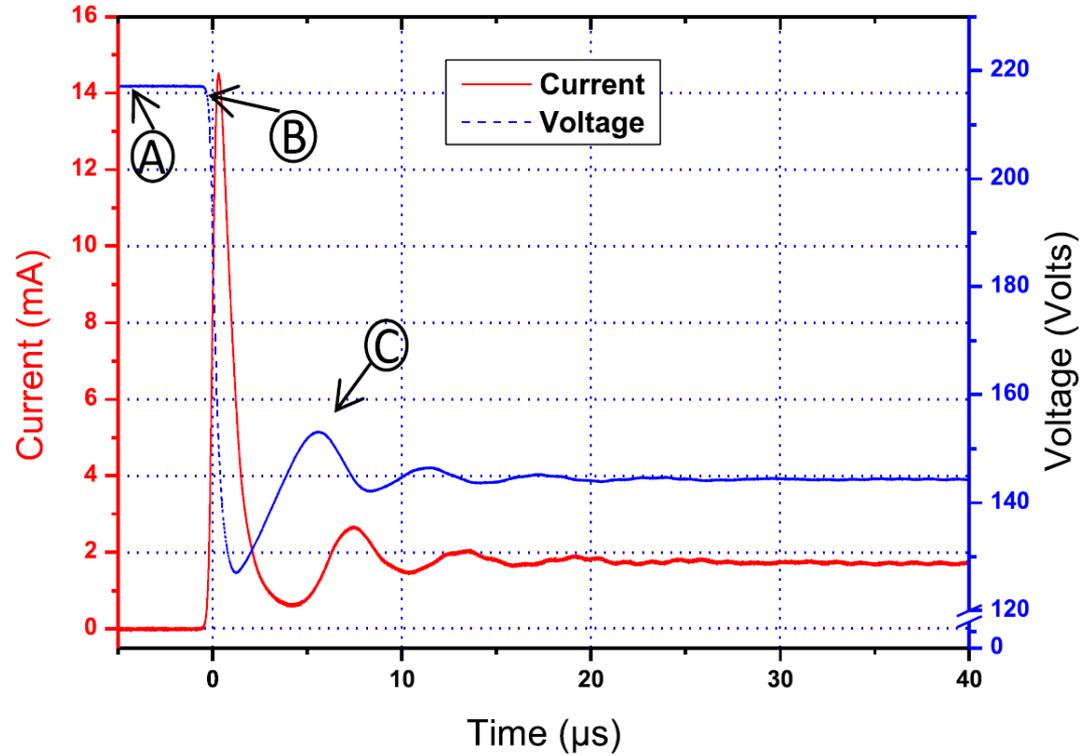
Low breakdown field : 70V/μm in the 250 nm - 2.5 μm gap range



A. Peschot, Appl. Phys. Lett. 105, 123109 (2014)



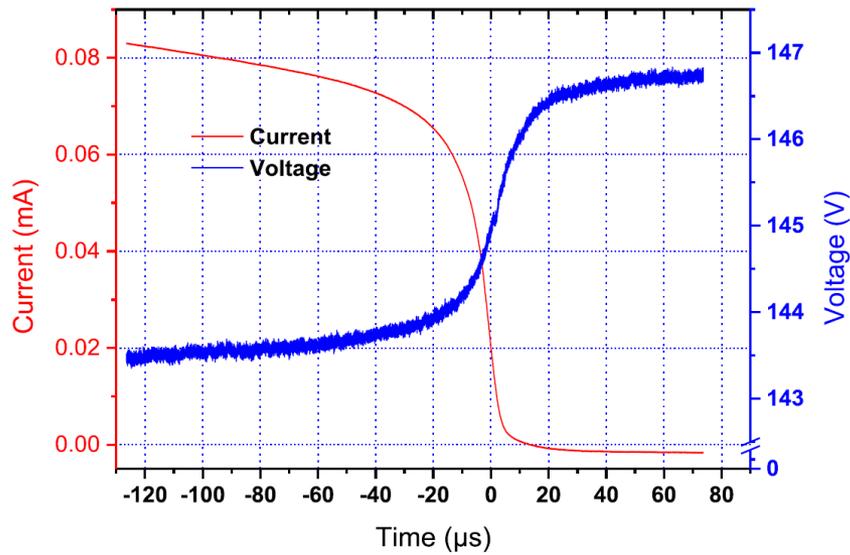
Allumage



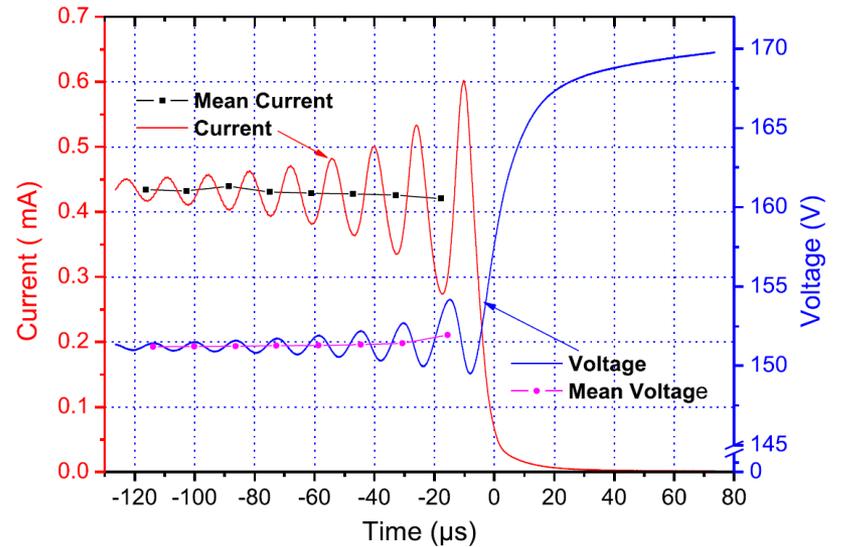
Kulsreshath et al. J. Appl. Phys. 114, 243303 (2013)



Extinction



He, 350 Torr



He, 750 Torr

Kulsreshath et al. J. Appl. Phys. 114, 243303 (2013)



Tunable Diode Laser Absorption

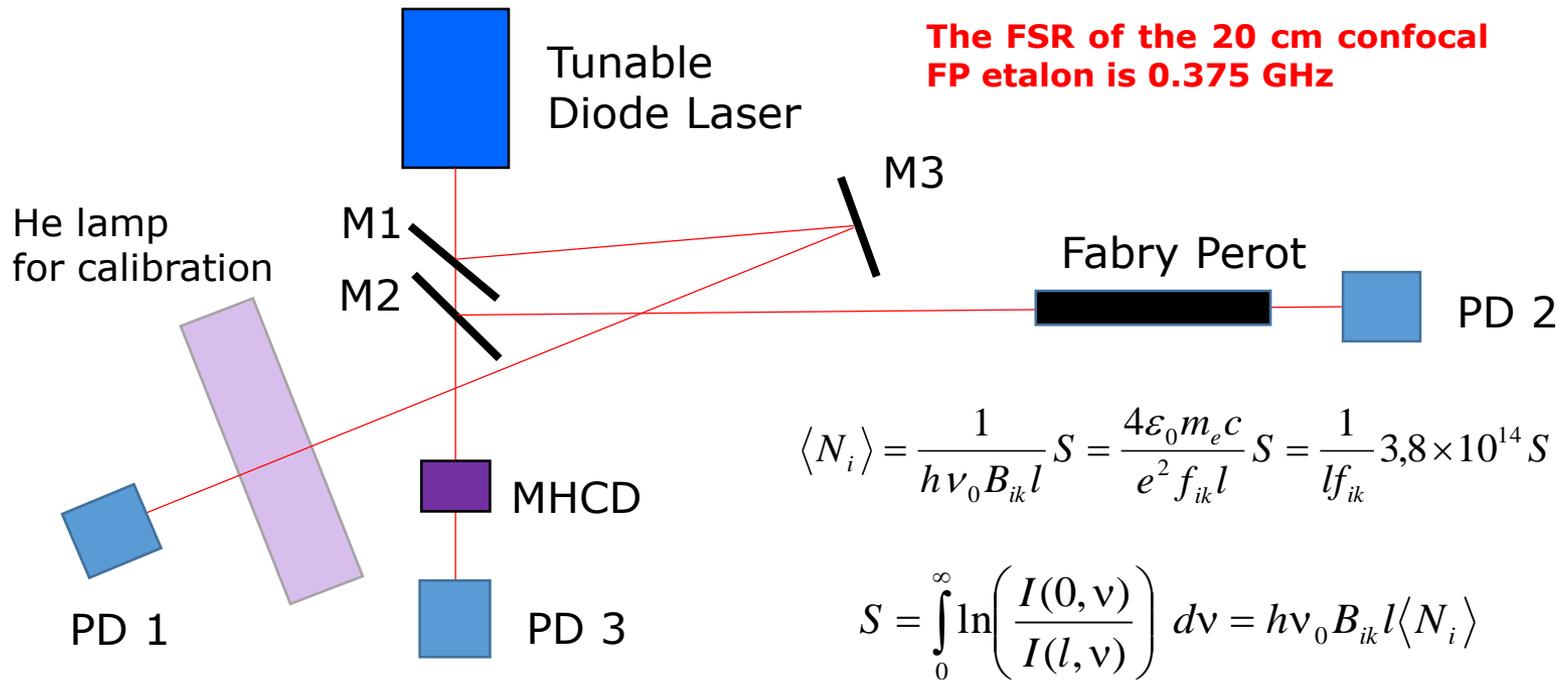
1083 nm lines absorbed by He*(³S₁) atoms

Kulsreshath et al. J. Appl. Phys. 114, 243303 (2013)

1082.909 nm ³S₁ – ³P₀ line

1083.025 nm ³S₁ – ³P₁ line

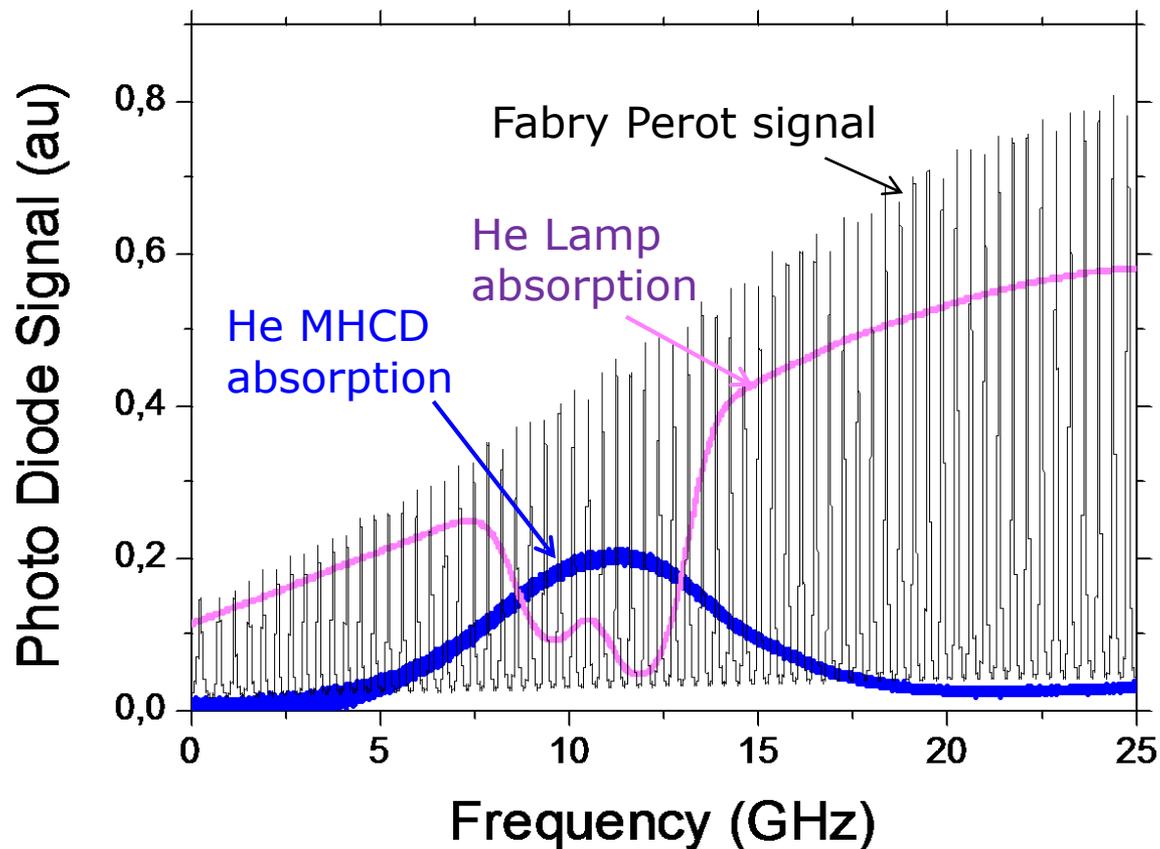
1083.034 nm ³S₁ – ³P₂ line





Exemple de signal d'absorption dans l'He à 500 Torr

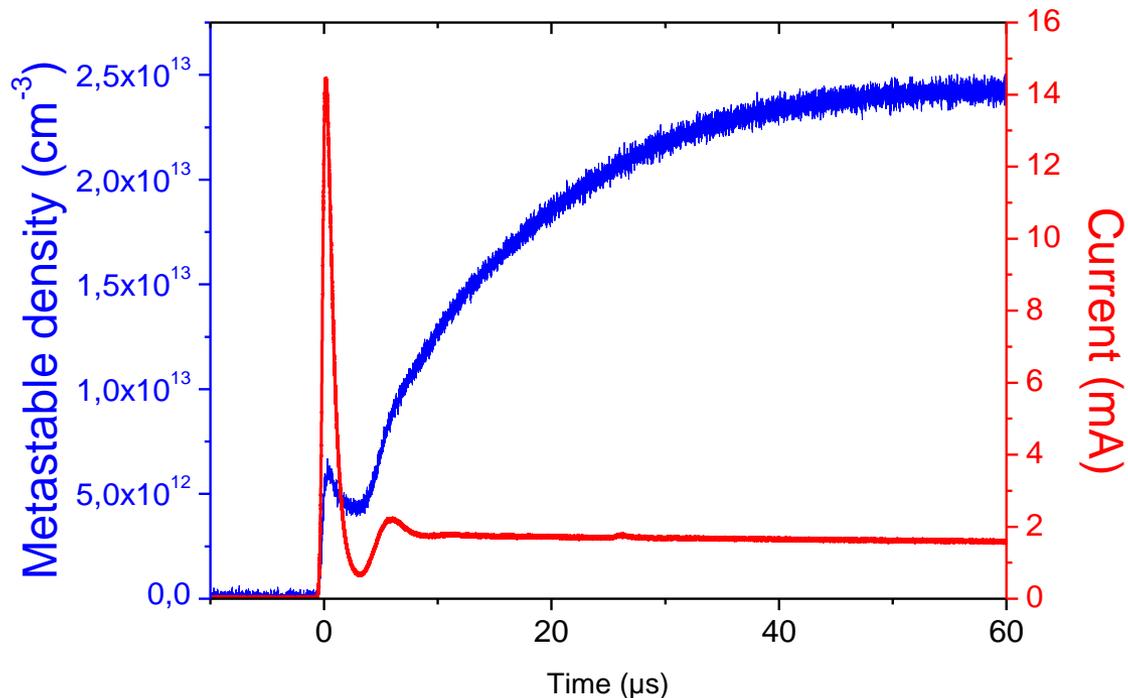
Example of absorption signal in He at 500 Torr



Kulsreshath et al. J. Appl. Phys. 114, 243303 (2013)

Evolution des métastables pendant l'allumage

Allumage, He, 750 Torr



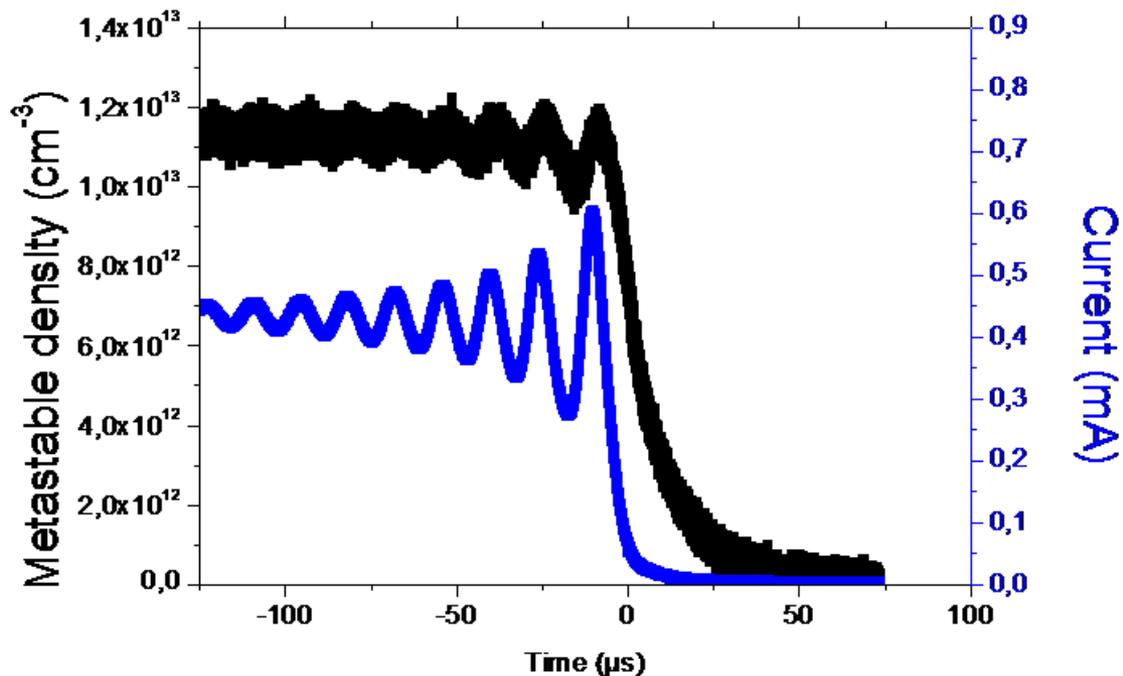
L'évolution de la densité de métastables suit d'abord le pic de courant, et décroît avant de croître de nouveau avec un temps caractéristique d'environ 30 μs .
Effet thermique : le gaz chauffe, la densité de gaz diminue et moins de métastables sont perdus par collision.

Kulsreshath et al. J. Appl. Phys. 114, 243303 (2013)



Evolution des métastables pendant l'extinction

Extinction, He, 750 Torr



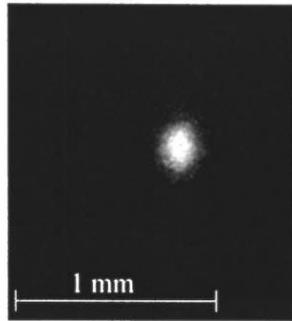
La variation de densité des métastables suit le courant sinusoïdal amplifié juste avant l'extinction. Il y a un petit retard d'environ 5 μs entre le signal du courant et celui des métastables.

Kulsreshath et al. J. Appl. Phys. 114, 243303 (2013)

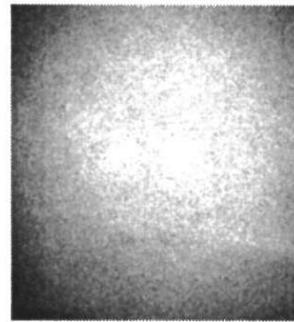


Y a-t-il vraiment un effet cathode creuse dans les MHCD ?

K.H. Schoenbach J. Vac. Sci. Technol. A 21(4) 2003



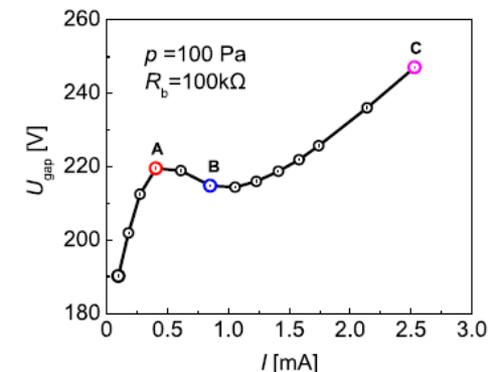
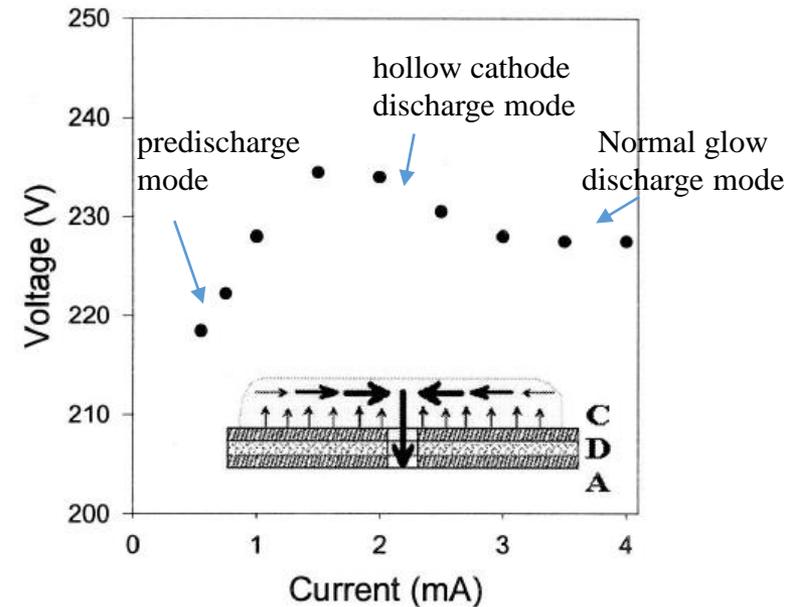
0.55 mA



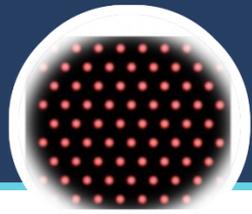
2.5 mA

« For low current, the plasma is located in the center of the hole (0.55 mA). It fills the hollow when the discharge is operated in the hollow cathode discharge mode (negative differential conductance), and for higher currents, expands into the area outside the hole »

La caractéristique V-I ressemble à celle présentée par Fu et al.

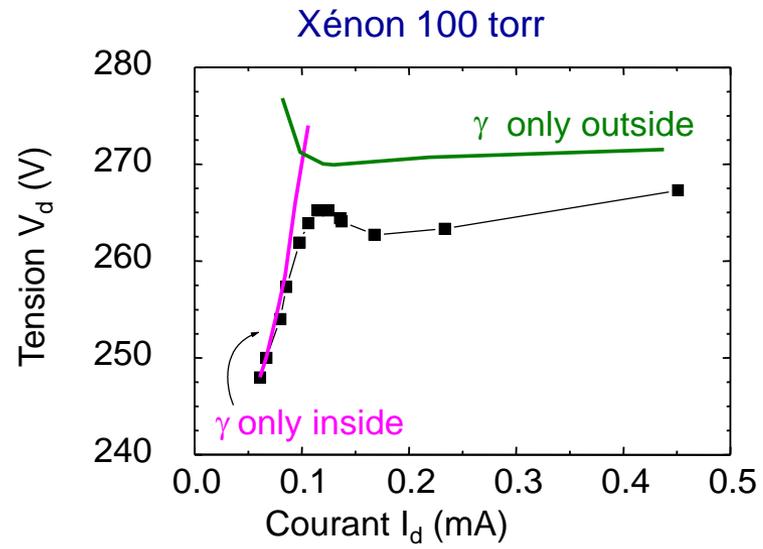


Fu et al. Phys. Plasmas 24, 083516 (2017)



Y a-t-il vraiment un effet cathode creuse dans les MHCD ?

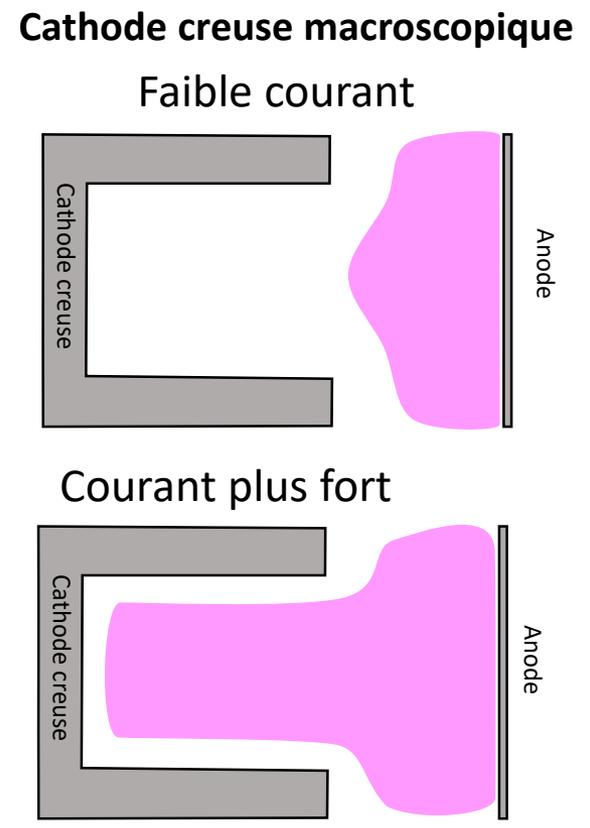
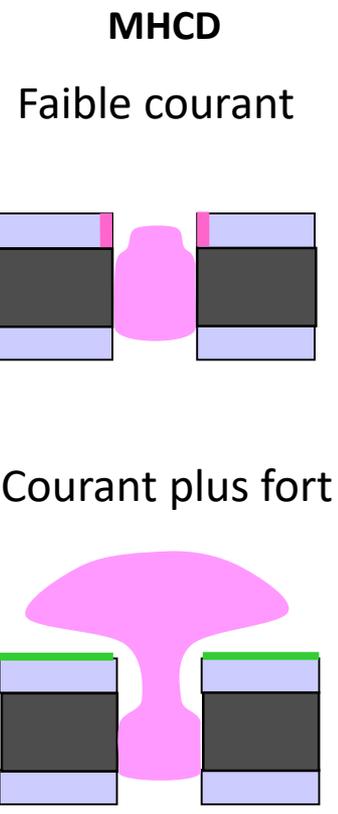
J. P. Bœuf, L. Pitchford, and Schoenbach, APL, 2005



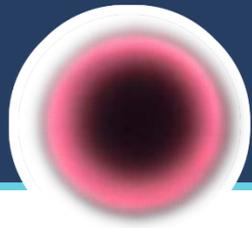
Prédécharge -régime anormal (plasma à l'intérieur du trou) ⇒ régime normal à plus fort courant (le plasma s'étend sur la surface externe de la cathode).

⇒ Dans les MHCD, pas d'effet de cathode creuse, pas d'effet pendulaire

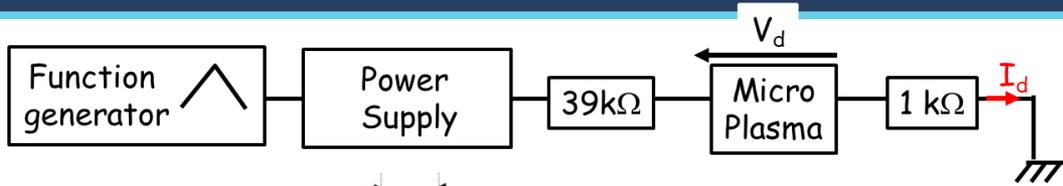
Dans cette géométrie et cette pression, le libre parcours moyen est trop petit.



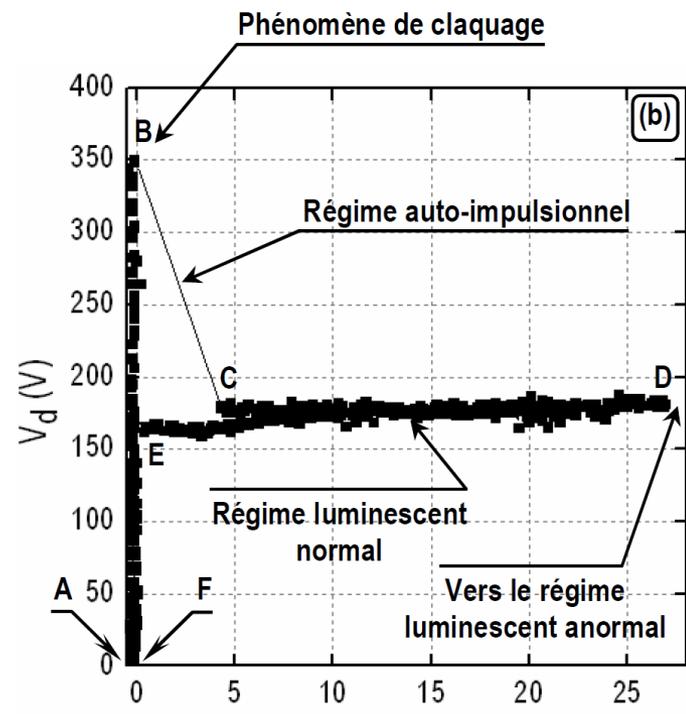
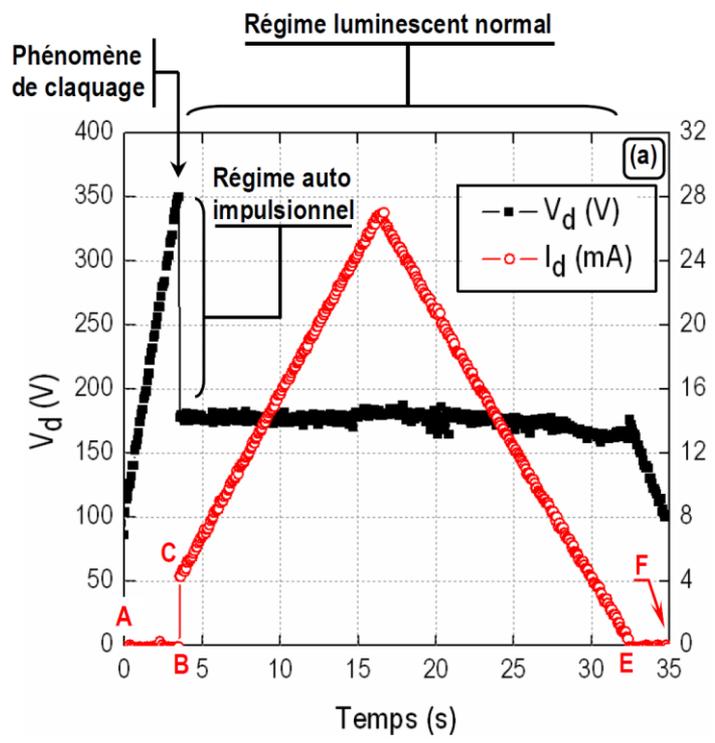
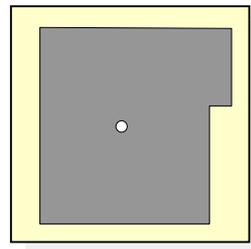
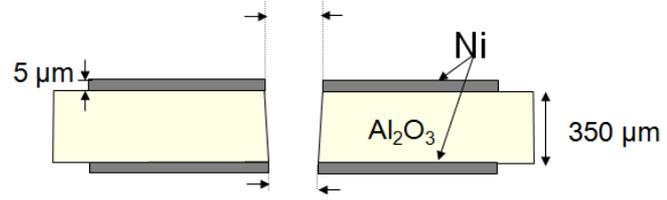
Prédécharge (plasma localisé) à l'extérieur de la cath. creuse ⇒ régime de cathode creuse à plus fort courant lorsque le plasma entre dans la cath. creuse



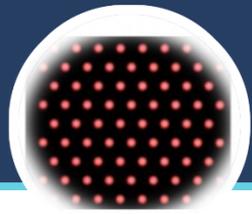
Le régime normal



He, 400 Torr



I_d (mA) T. Dufour, Thèse, Nov 2009



Répartition des densités électroniques et ioniques dans l'He et équipotentielles

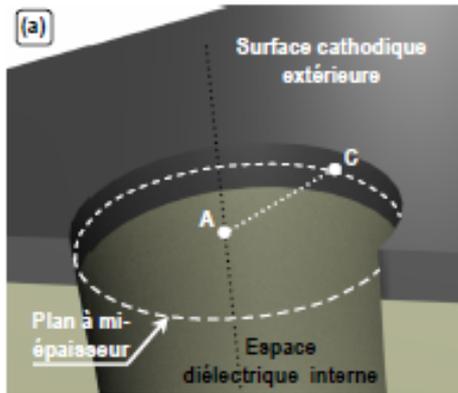
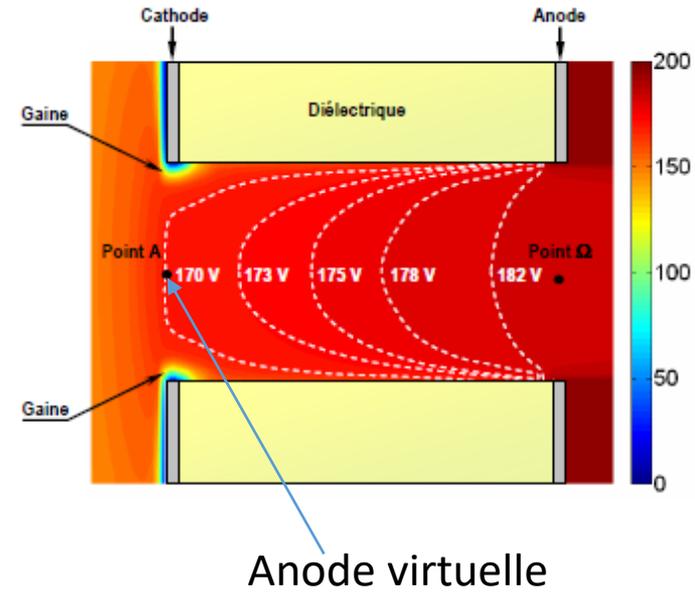
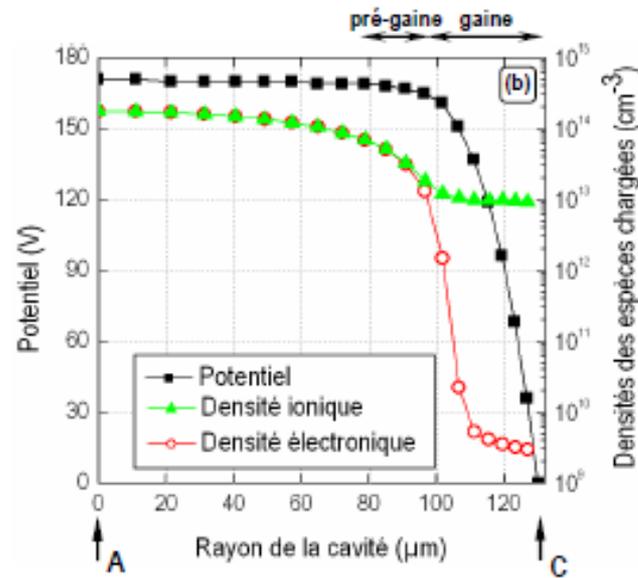


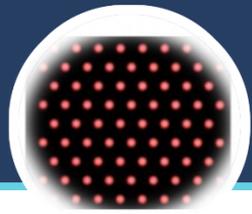
Figure 3.12 - (a) Représentation du plan situé à mi-épaisseur de la couche cathodique, et dans lequel (b) les profils du potentiel et des densités sont tracés pour un courant de 20 mA, dans 100 Torr d'hélium.



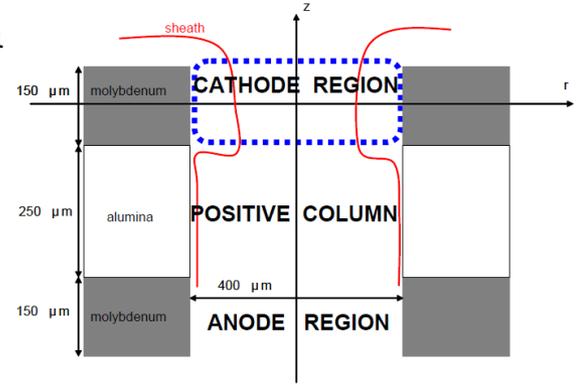
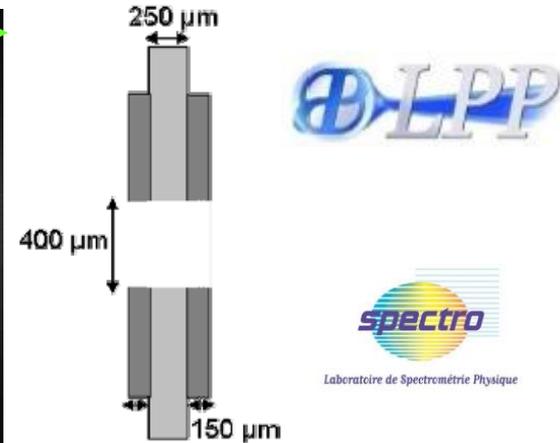
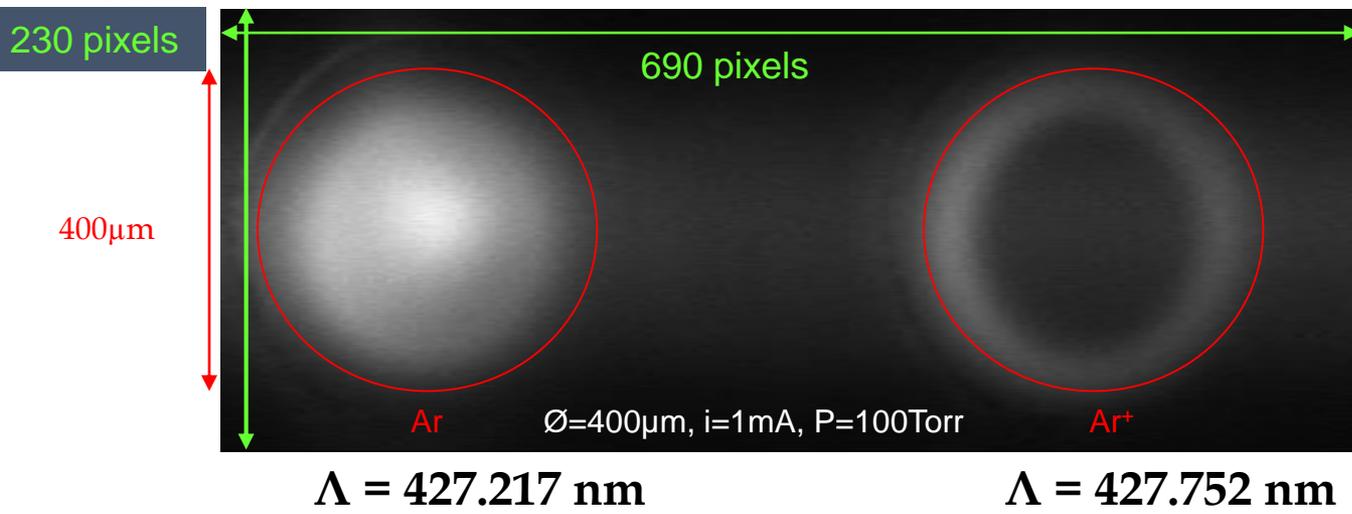
Gaine de 20-30 µm d'épaisseur environ à 100 Torr



T. Dufour, Thèse, Nov 2009



Identification de la gaine de charge sur la cathode



Fente du spectro complètement ouvertes

- Ar⁺: forme annulaire, maximum proche de la cathode
- Ar: maximum au centre de la MHCD

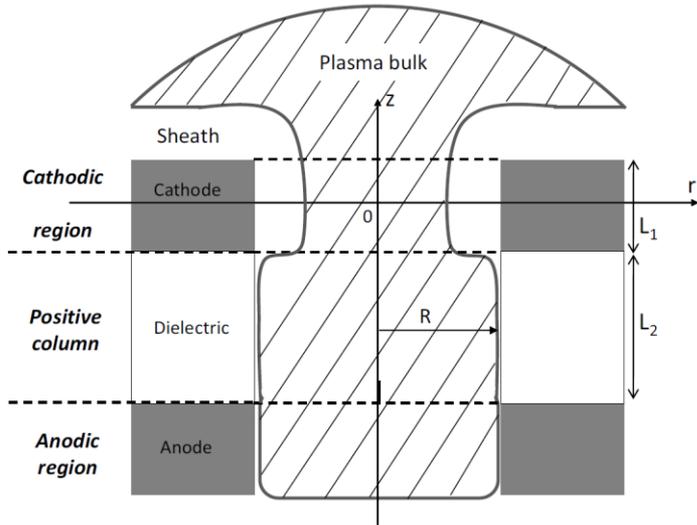
Pas de forme annulaire observée dans le cas des microdispositifs du GREMI car l'épaisseur des électrodes est inférieure à 10 μm

C. Lazzaroni, A. Rousseau, P. Chabert, N. Sadeghi, J. Phys. D, 43, 124008, 2010



Modèle global pour les MHCD

C Lazzaroni and P Chabert, J. Phys. D: Appl. Phys. **44** (2011) 445202



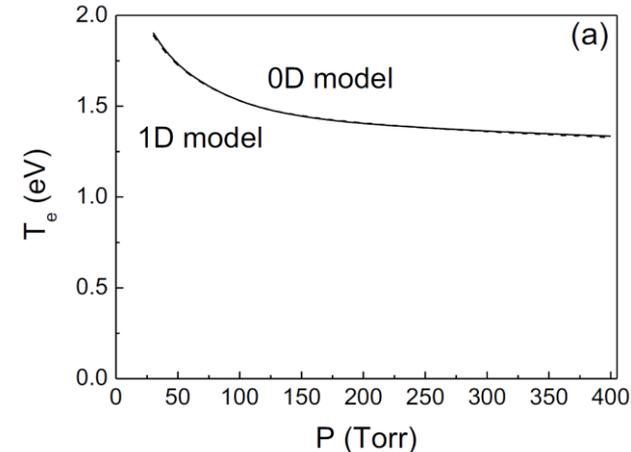
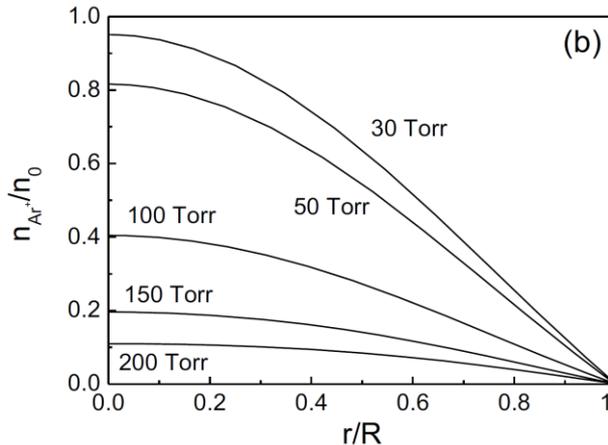
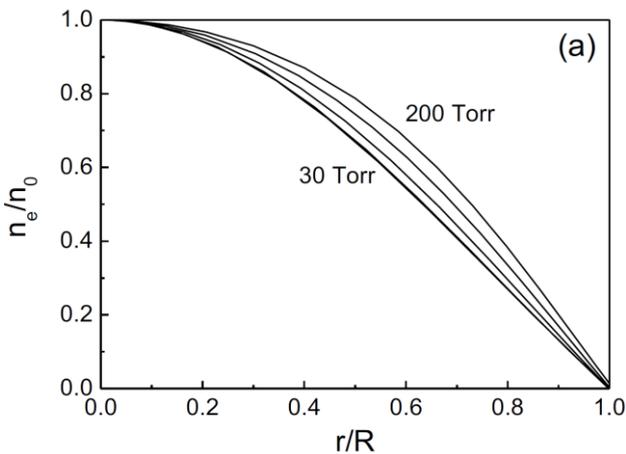
2 régions étudiées :

- la région cathodique
- la colonne positive (le transport axial du plasma est négligé)

Modèle à une dimension, en coordonnées cylindriques, basé sur les équations de transport de particules chargées dans la région quasi-neutre du plasma, donnant les profils radiaux de T_e et n_e

n_e dans la région cathodique est 10 fois plus importante que dans la colonne positive. Quasiment toute la puissance est déposée dans la gaine cathodique.

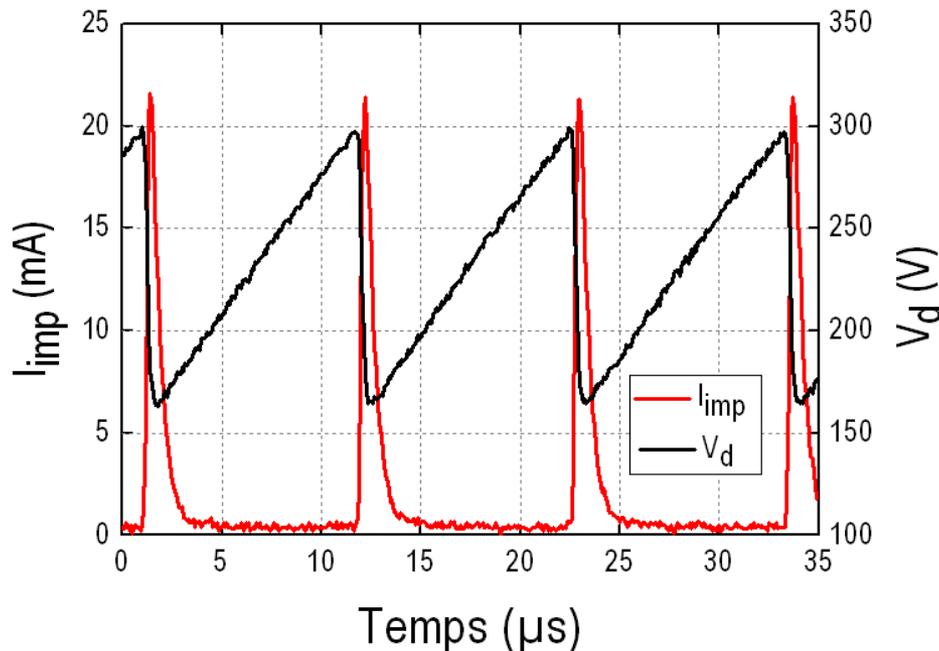
Ar, $n_0 = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$



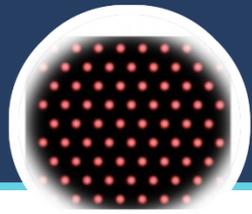


Le régime auto impulsionnel

- A faible valeur de $\langle I_d \rangle$, succession de claquages (décharges) et d'extinctions (charges) de la micro-décharge à une fréquence très stable.
- Génération d'impulsions de courant élevées



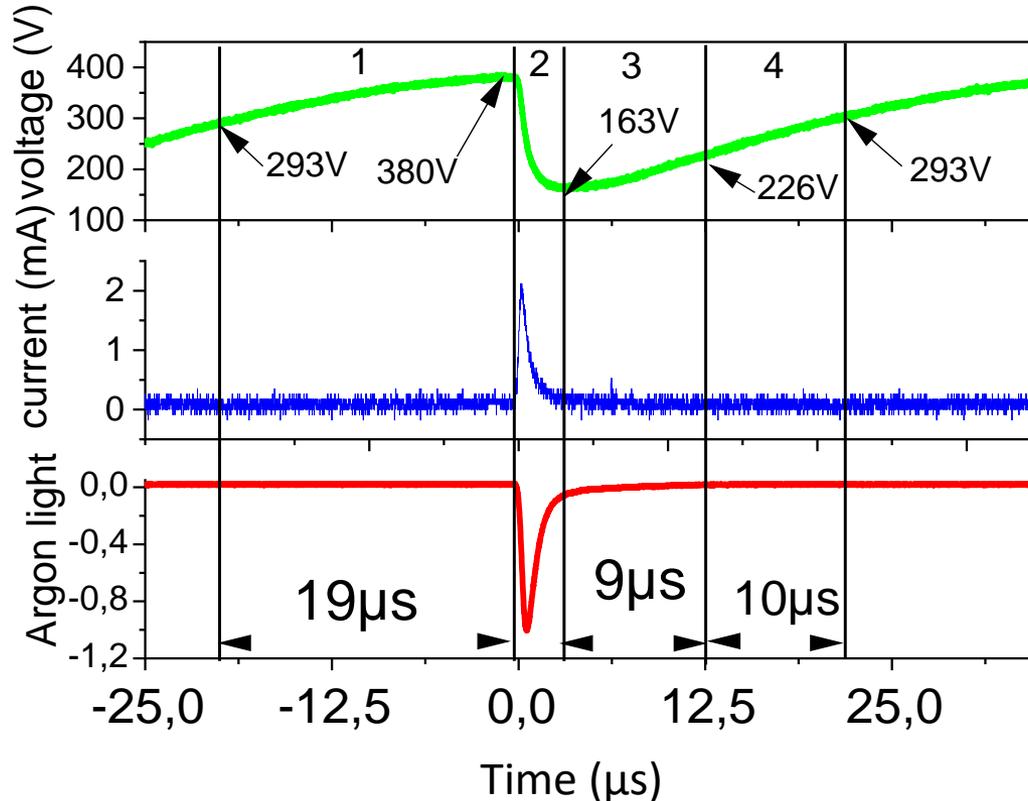
T. Dufour, Thèse, Nov 2009



Le régime auto impulsionnel

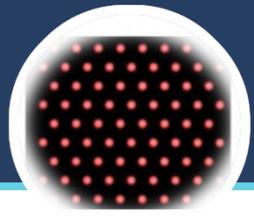
X. Aubert et al. Plasma Sources Sci. Technol. **16** (2007) 23–32

Argon; $p = 40$ Torr; $D = 200 \mu\text{m}$; $f = 25$ kHz; $\lambda = 800.6\text{nm}$



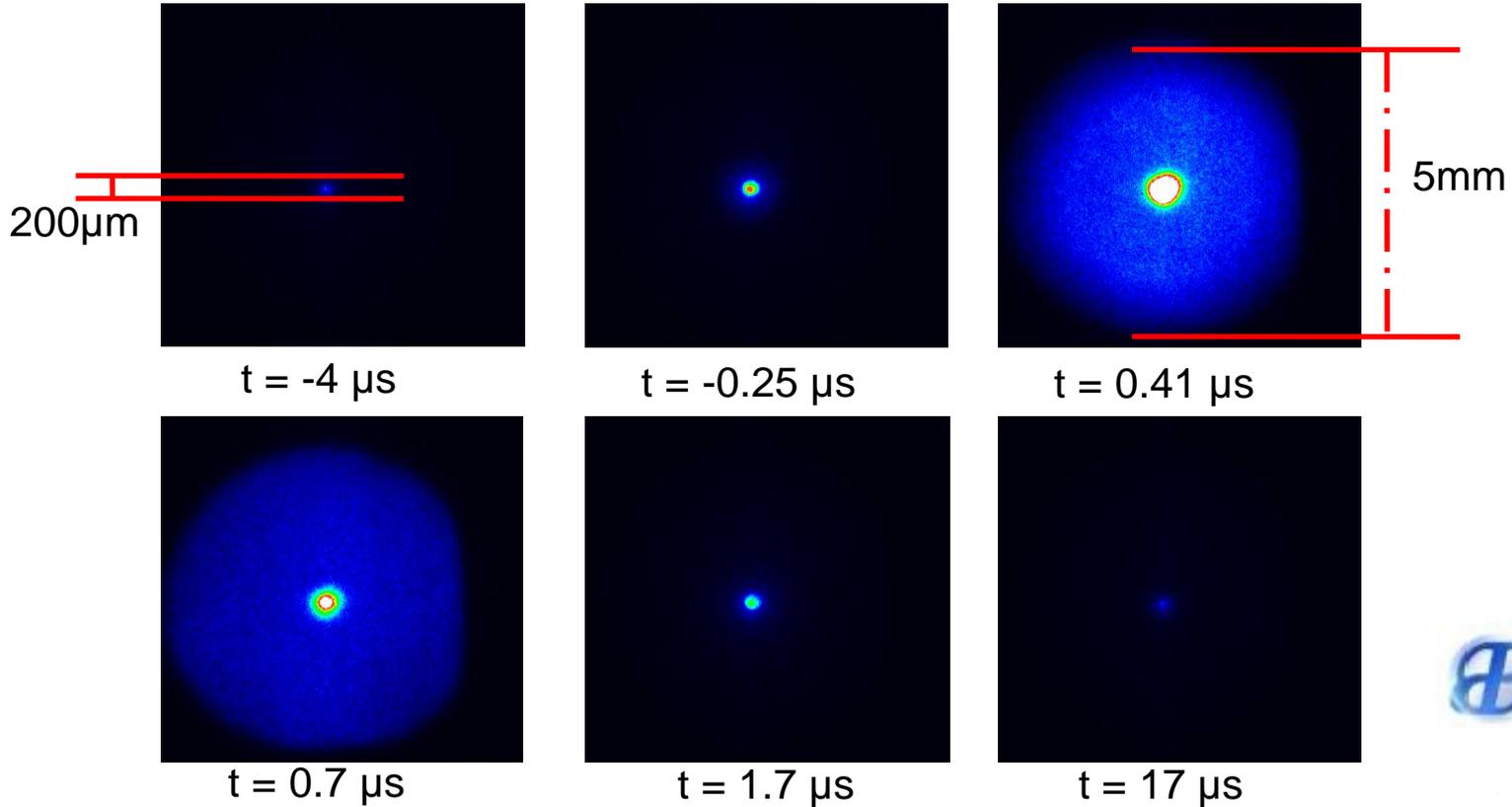
Expansion impulsionnelle de la cathode

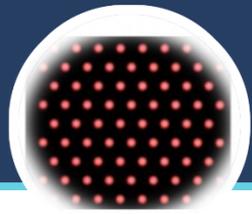
Fréquence : 5-100 kHz ; durée des impulsions : 0.1 -1 μs



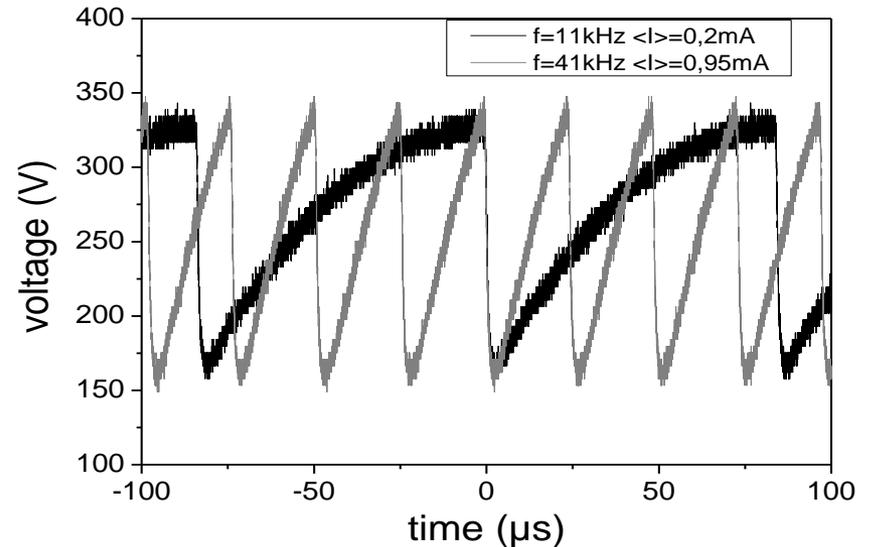
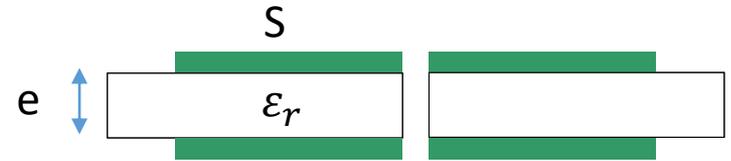
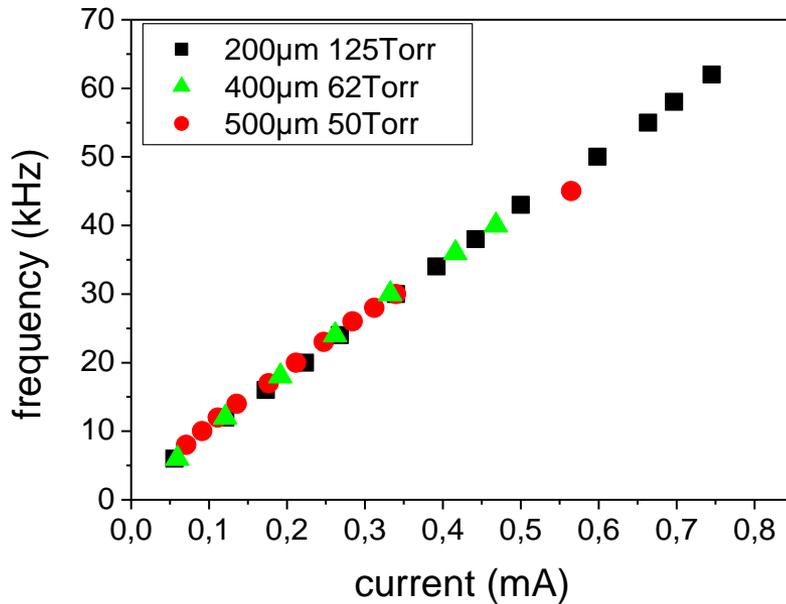
Le régime auto impulsif

$p = 40$ Torr; $D = 200 \mu\text{m}$; $f = 45$ kHz





Le régime auto impulsif



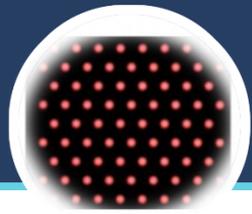
Fréquence proportionnelle à $\langle I \rangle$

ΔU ne dépend pas de f .

=> Importance de la capacité du microréacteur :

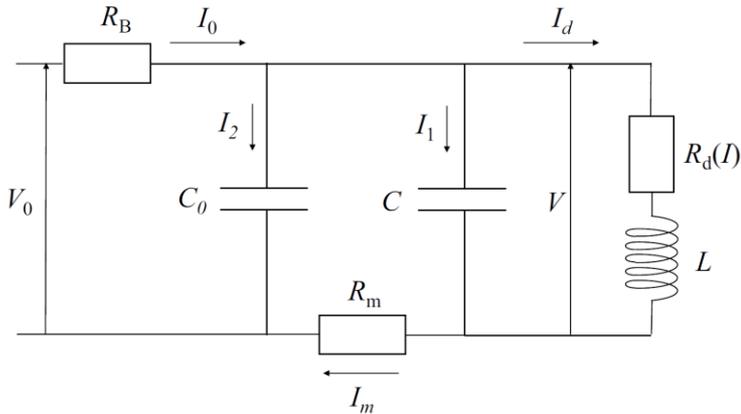
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{e}$$





Modélisation des instabilités

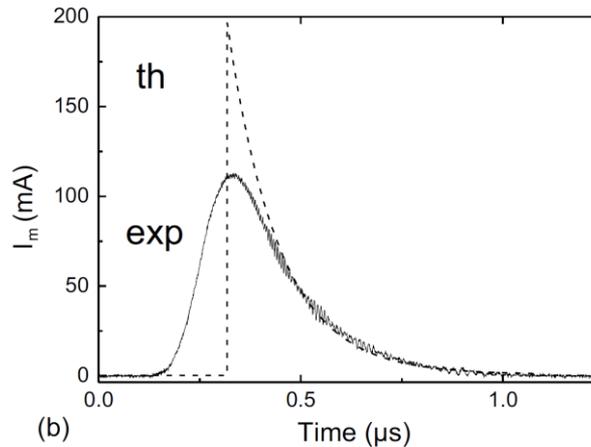
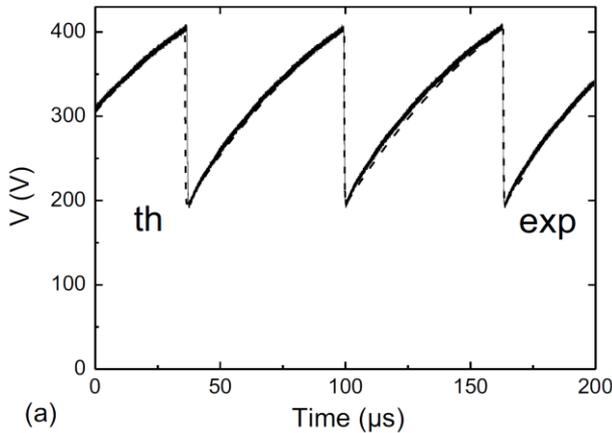
P. Chabert, C. Lazzaroni, and A. Rousseau, J. Appl. Phys. 108, 113307 (2010)
 C Lazzaroni and P Chabert, Plasma Sources Sci. Technol. 20 (2011) 055004



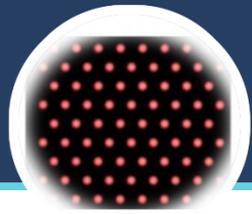
$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_0 - V}{\tau} - \frac{I_d}{C + C_0}$$

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{V - R_d(I_d)I_d}{L}$$

$$R_d = -A_2 \tanh\left(\frac{I_d - I_{lim}}{p}\right) + A_1 + \frac{A_3}{I_d} = R_{d0} + \frac{A_3}{I_d}$$

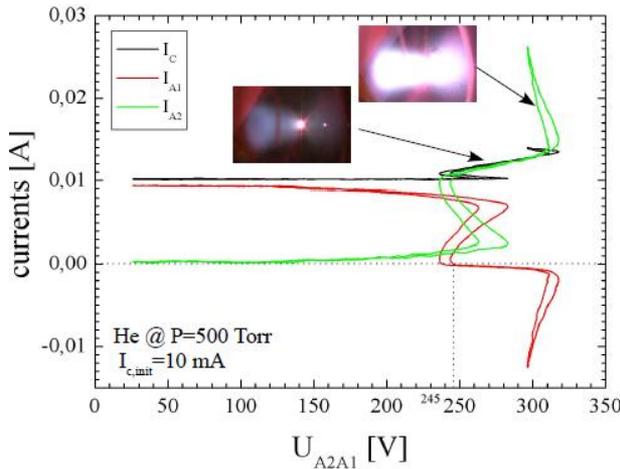
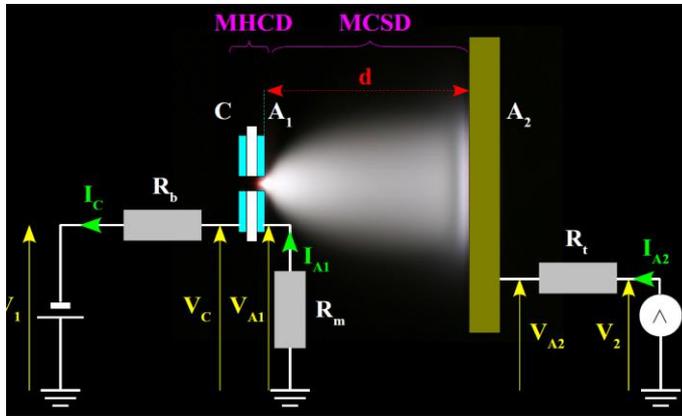


$C = 85 \text{ pF}$
 $C_0 = 120 \text{ pF}$
 $\tau = 127 \text{ ns}$

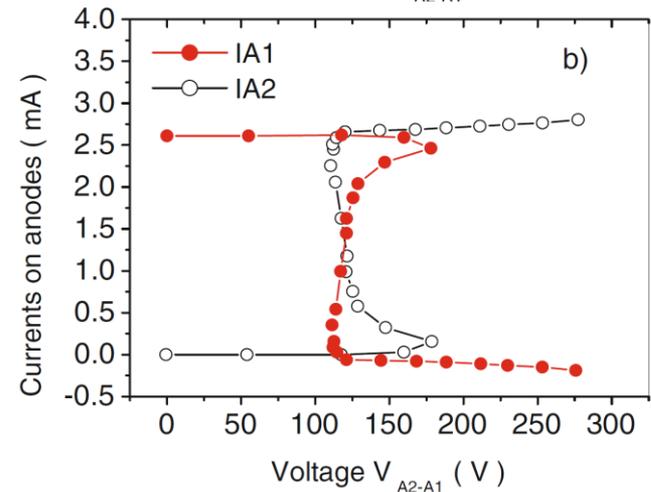
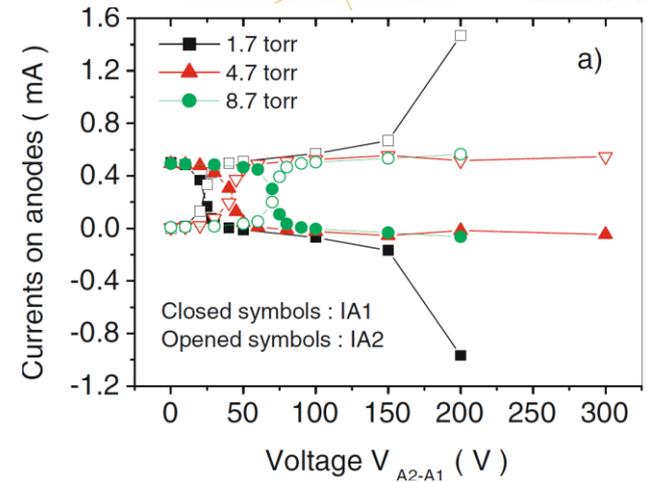


Etendre le volume des microplasmas : les MCSD

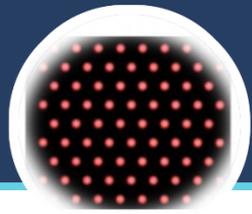
MCSD : Micro Cathode Sustained Discharge



L. Schwaederle, GREMI



Th. Callegari, « Microhollow cathode sustained discharges » Eur. Phys. J. D (2010)

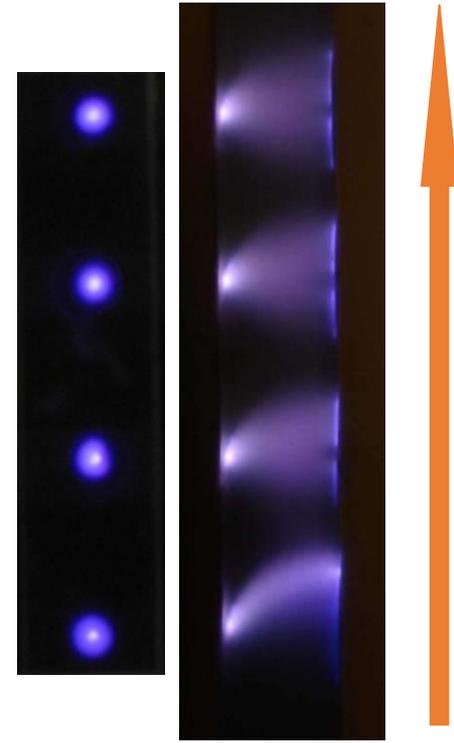
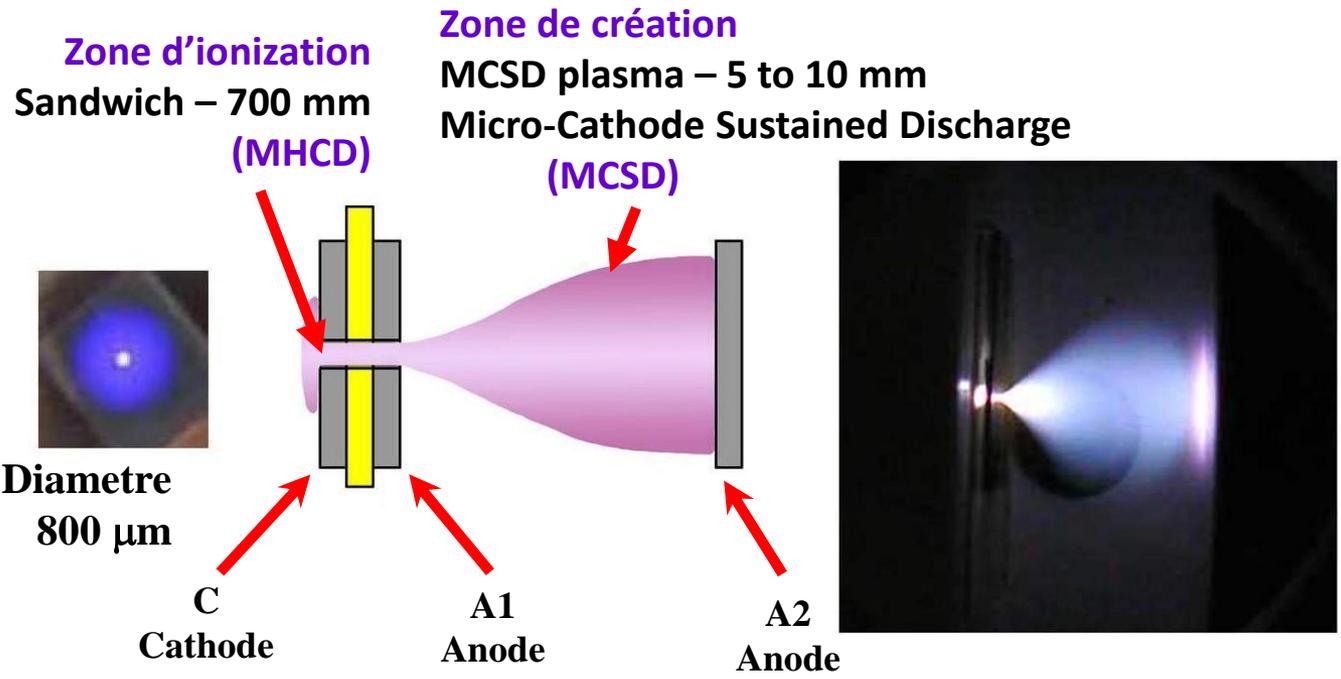


Les MCSD



Production d'O₂(a¹Δ_g) à pression atmosphérique in He/O₂ /NO mixtures

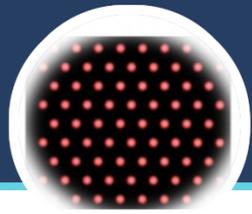
Flux de gaz
30 l.min⁻¹



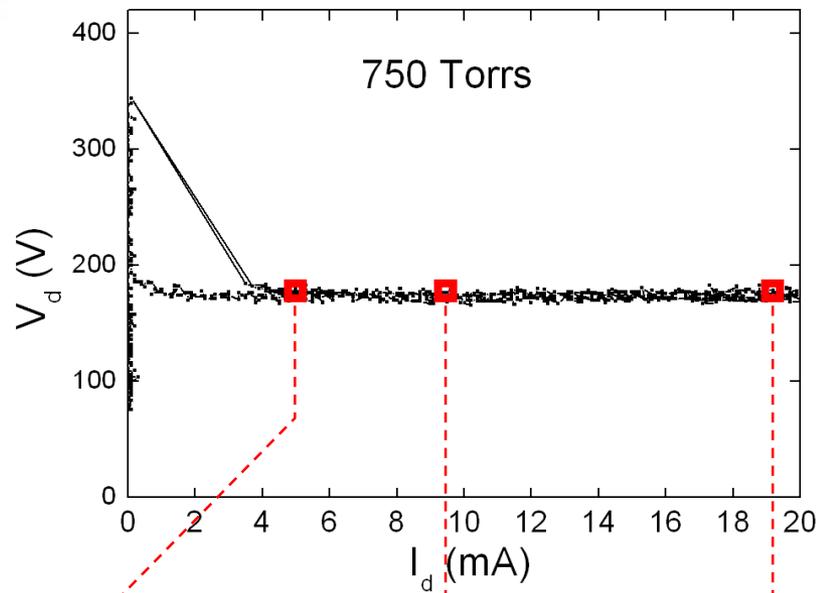
J.S. Sousa et al., Appl. Phys. Lett. **93**, 011502 (2008)

J.S. Sousa et al., Eur. Phys. J. Appl. Phys., **47**, 2, 22807 (2009)

[O₂(a¹Δ_g)] > 10¹⁶ cm⁻³



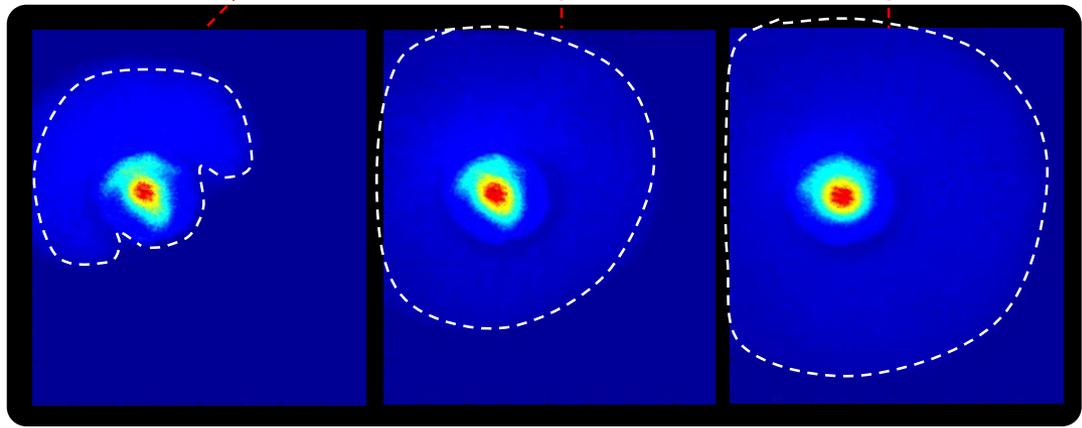
Allumages des MHCD en parallèle



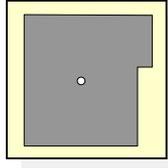
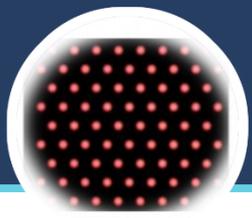
- $V_d = Cte$, quelle que soit la valeur de I_d .
- I_d augmente \Rightarrow L'étalement augmente proportionnellement pour maintenir J_d constante (à la cathode).

Phénomène limitatif pour l'allumage en parallèle : une fois une microdécharge allumée, la tension de décharge devient trop faible pour initier les autres MHCDs.

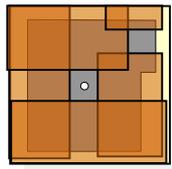
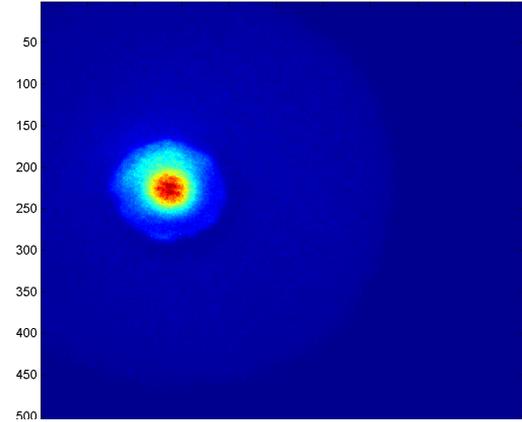
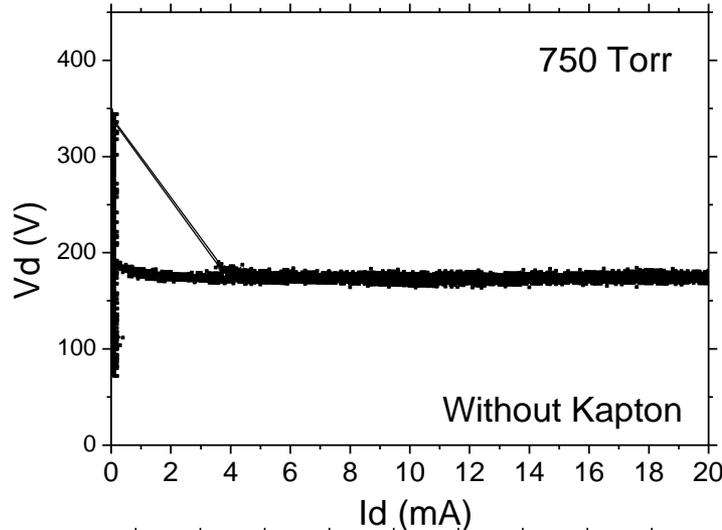
Comment faire pour provoquer un régime de décharge lumineuse anormale ?



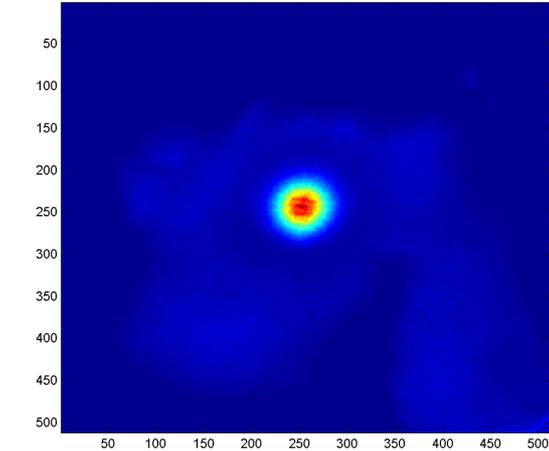
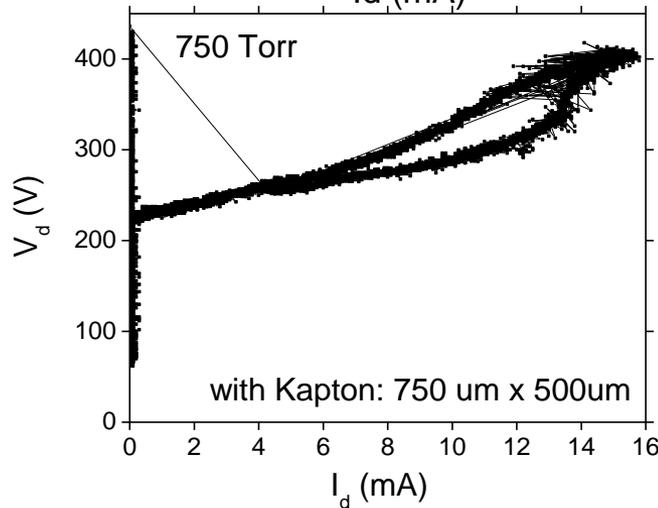
Thèse de T. Dufour, GREMI



Without Kapton

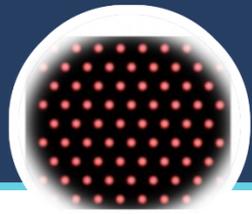


Kapton
(Surface not covered:
750 x 500 μm)

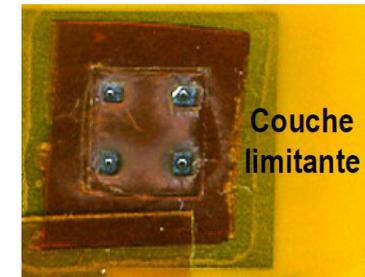
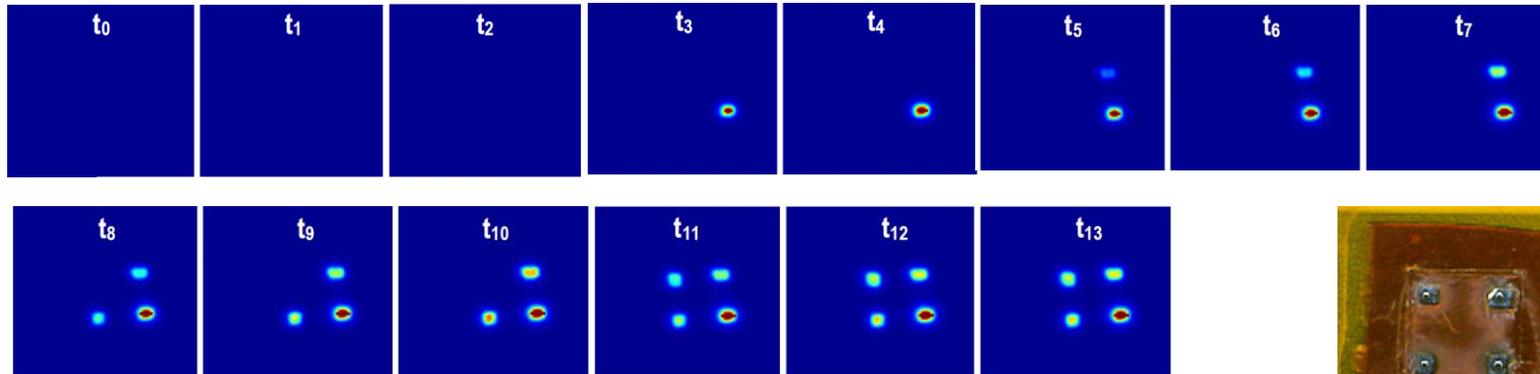
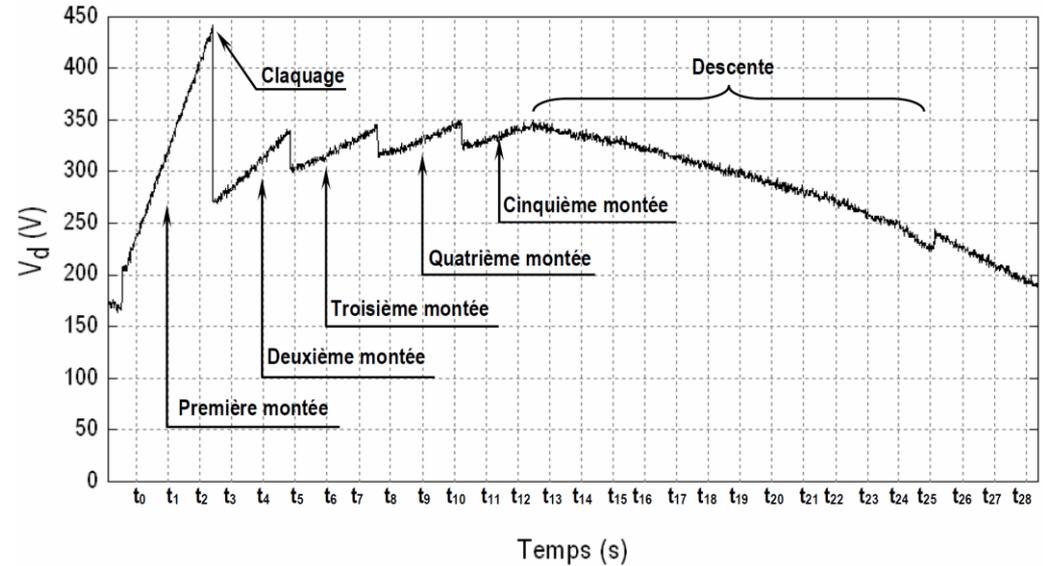
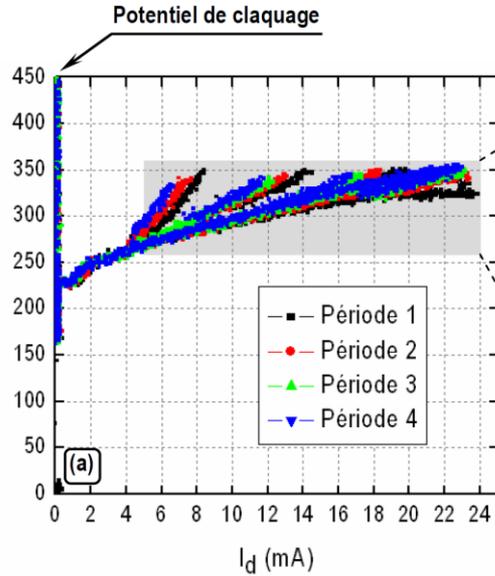


Thèse de T. Dufour, GREMI

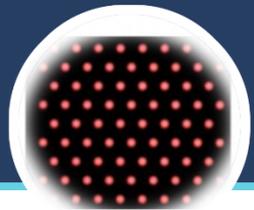
By limiting the cathode surface, we obtain the **abnormal glow** regime: I_d is limited because **secondary electrons are not provided in sufficient quantity** to keep I_d increasing. At 15 mA, V_d reaches the **breakdown voltage** again.



Allumage de matrices



Thèse de T. Dufour, GREMI

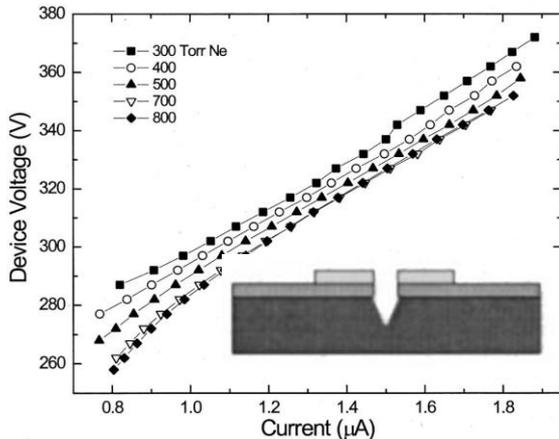
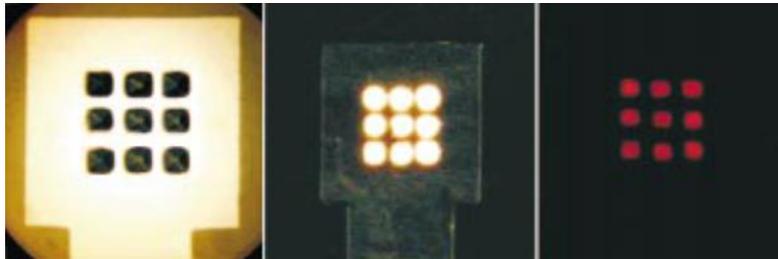


Microplasmas sur silicium

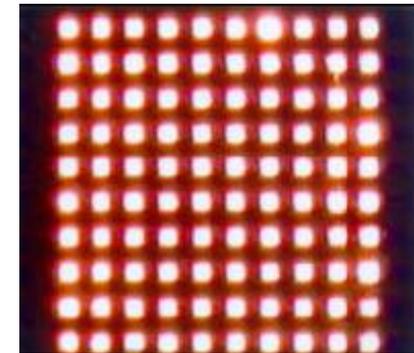
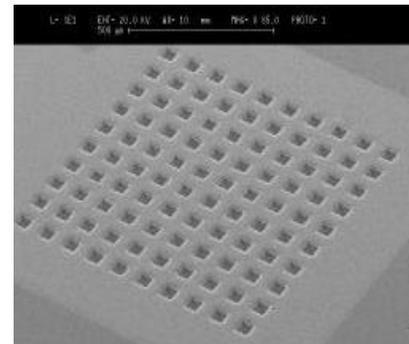
Introduites par G. J. Eden (University of Illinois)

Matrices de pyramides inversées en silicium

Moyens de la microelectronique (lithographie, dépôt de couches minces, gravure...)



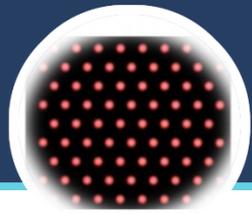
10 x 10 devices with dimensions 50 µm x 50 µm



Currents of the order of 1 µA per cavity.
Operation in Neon
La surface cathodique est limitée.

S.-J. Park, J. Chen, C. Liu and J. G. Eden, "Silicon microdischarge devices having inverted pyramidal cathodes: fabrication and performance of arrays," Applied Physics Letters, vol. 78, p. No. 4, 2001.

Chen J., Park S.-J., Eden J. G., Liu C., 2001, Proceedings of Transducers '01 Eurosensors XV: The 11th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Munich 2001,



LA salle blanche C2P2L du GREMI

Photolithography



Metal deposition

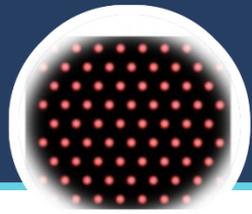


Etching



Characterization

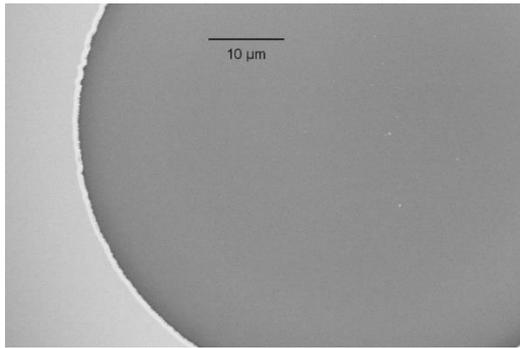
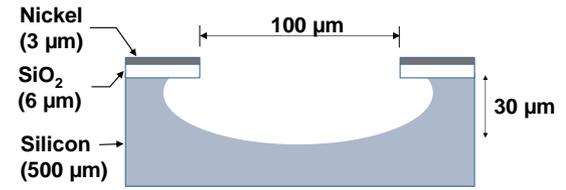
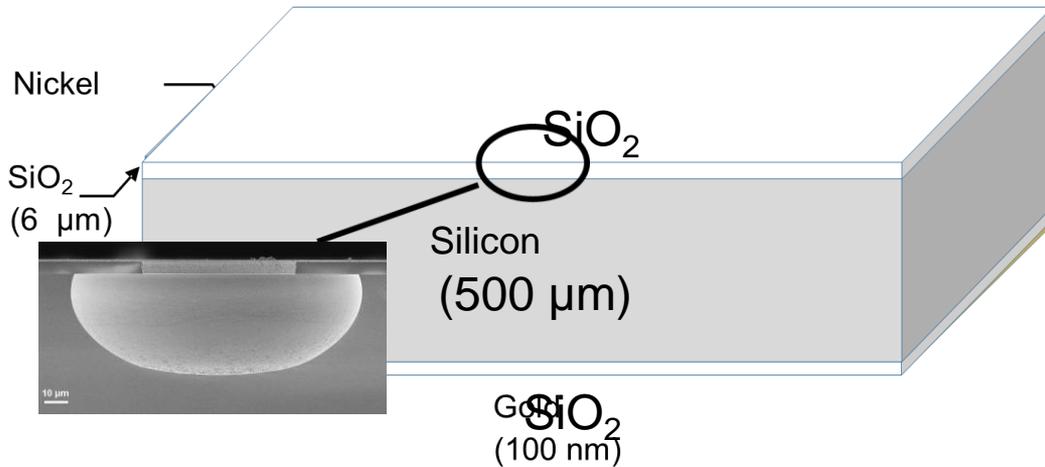




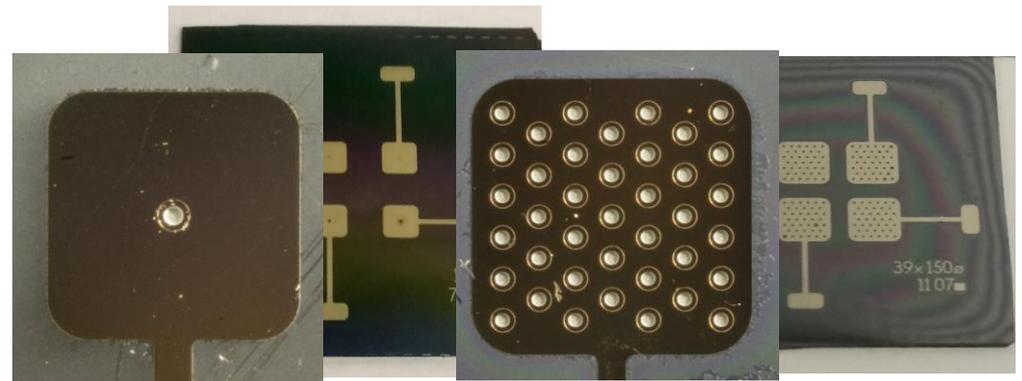
Microdispositifs du GREMI

About 15 steps from Si wafer to microreactor

- Oxidation
- Wet etching
- Dry etching
- Photolithography
- PVD processes

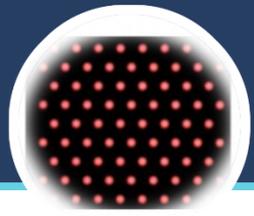


Top view



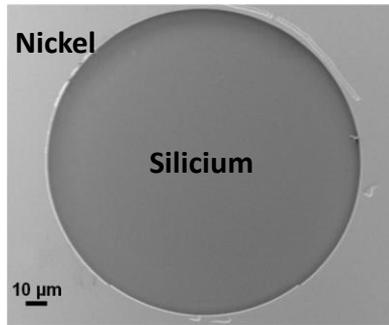
Single Hole

Array of 39 holes



Endommagement des cavités

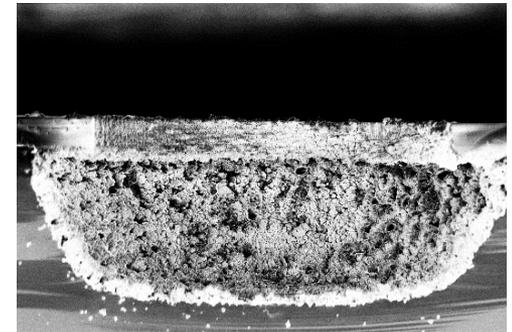
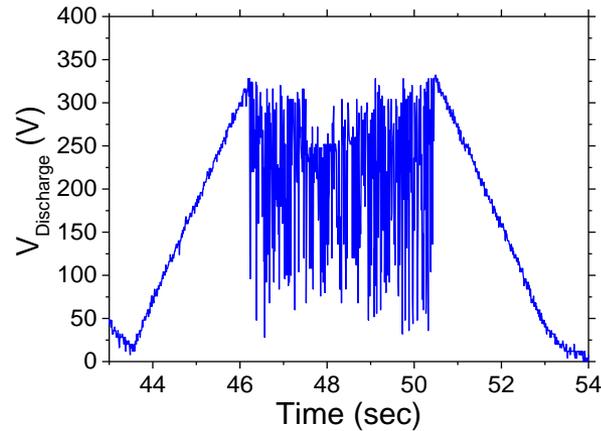
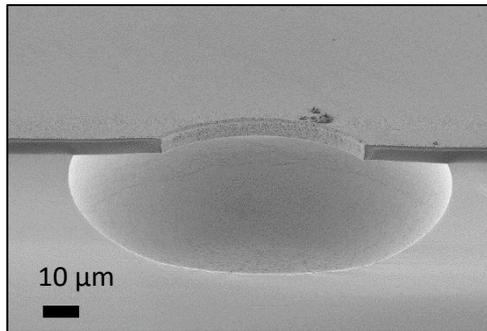
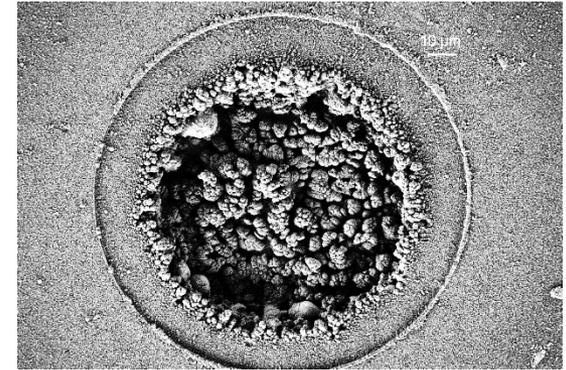
Avant décharge

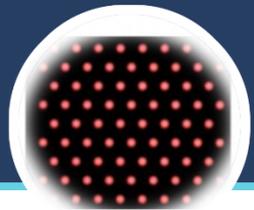


Pendant la décharge

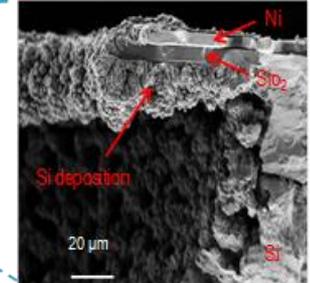
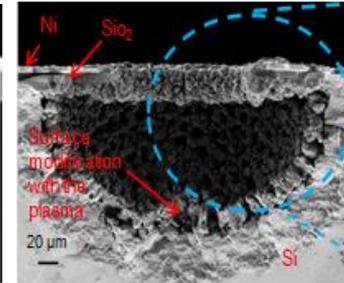
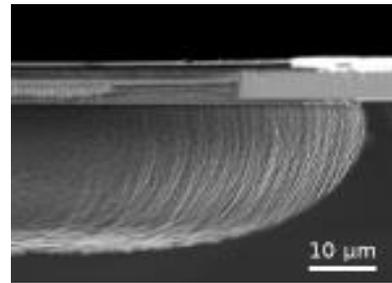
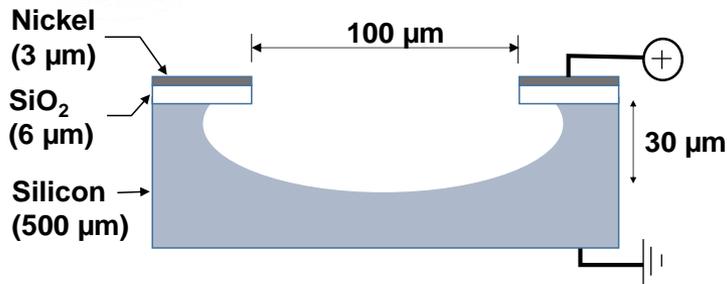


Après décharge

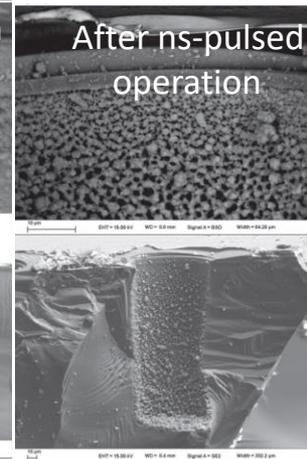
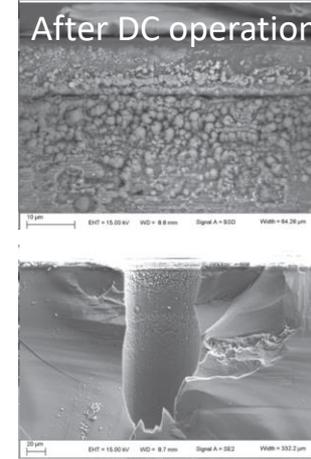
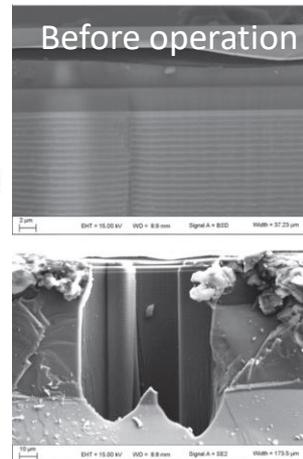
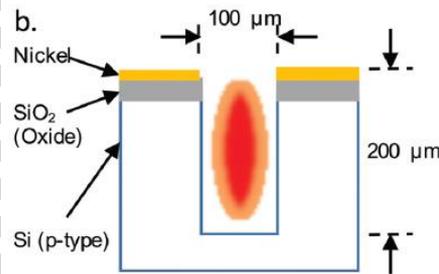
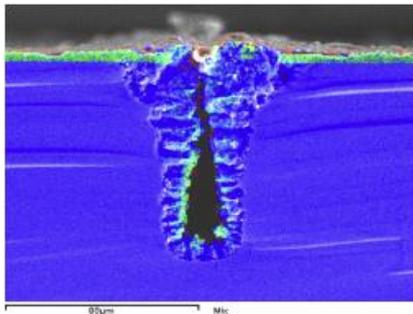
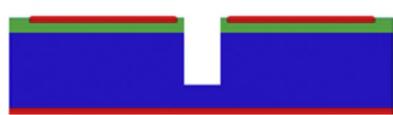




Endommagement des cavités



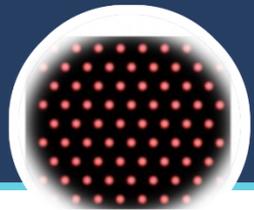
M. Kulsreshath et al. J. Phys. D: Appl. Phys. 33 285202 (2012)
 V. Felix et al., PSST, 25, 025021(2016)



P. J. Lindner et al., Int. Journ. Hyd. En. 39 (31) -18084-18091 (2014)

C. H. Sillerud et al., Physics of Plasmas, vol. 24, no. 3, p. 33502, (2017)

- Severe degradation of the cavities in DC microdischarges
- Very rough surface after operation
- Typical current is 1 mA per cavity

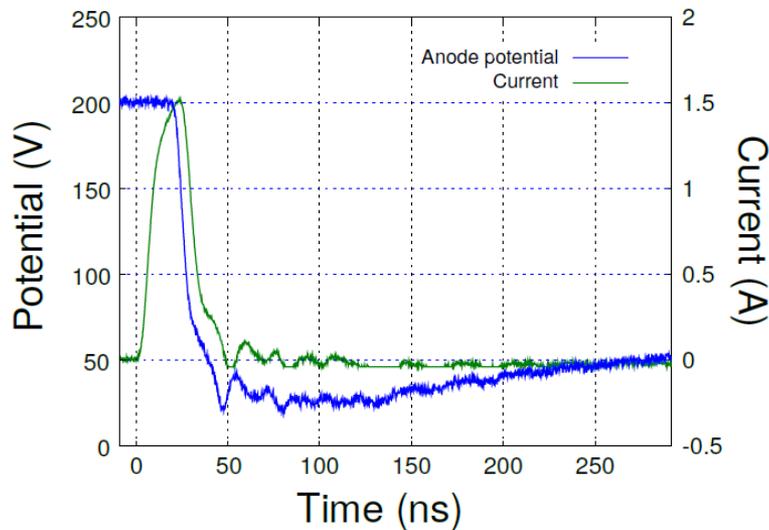


Endommagement des cavités

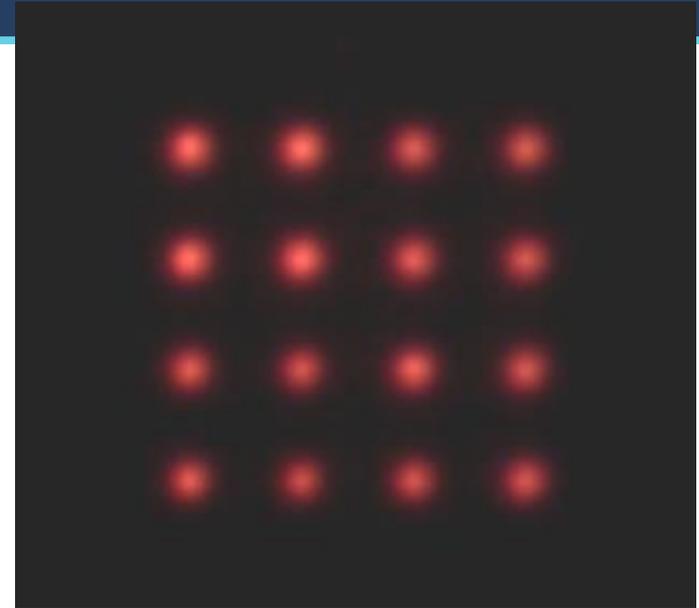
When operating, some bright spots (spikes) are detected by the high speed camera.

Real duration of the movie : 22 ms

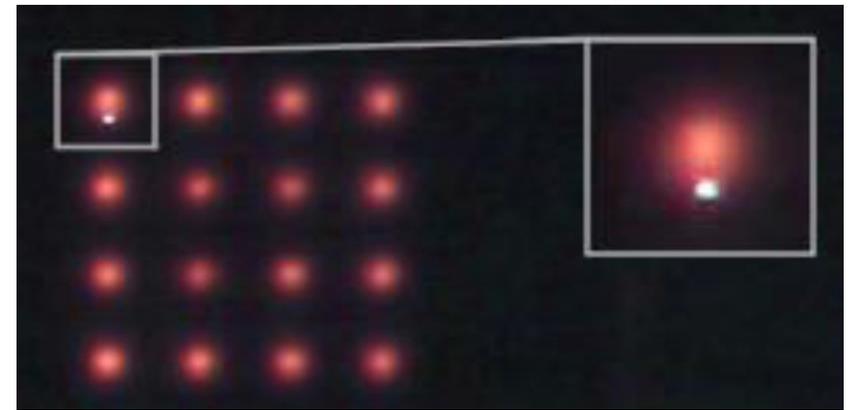
16 MHCD operating : 30 μm deep, 100 μm diam, He, 350 mbar



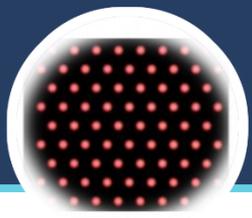
Lifetime < 1min



Spikes appear one by one.



Each spot corresponds to a high current peak

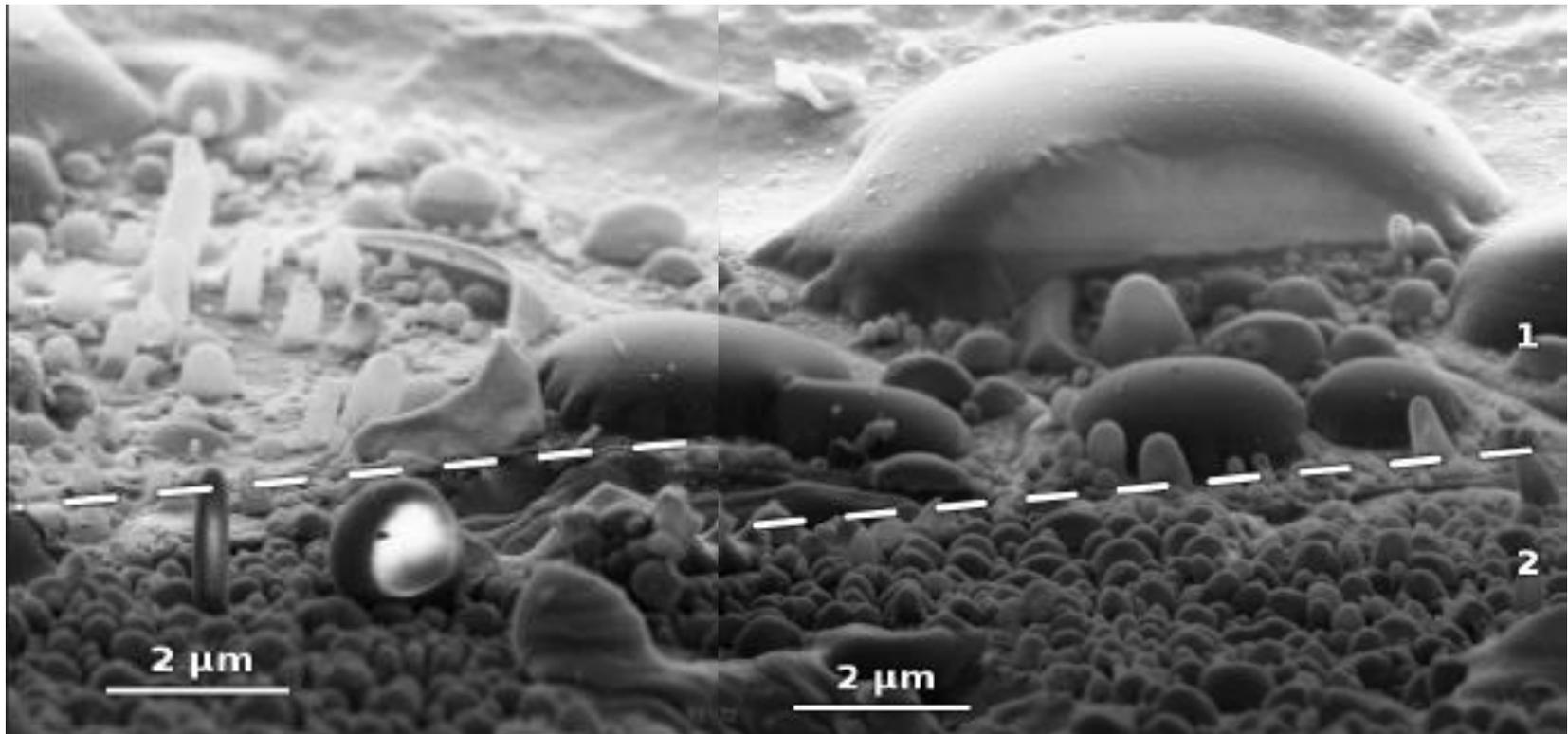


Instabilities in DC microdischarges on Si

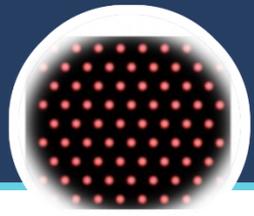
Silicon surface of one cavity in a 16 MHCD array after plasma operation of 30 sec at 0.2 mA in 350 mbar of He.

Formation of blisters of different size.

Some of the blisters popped

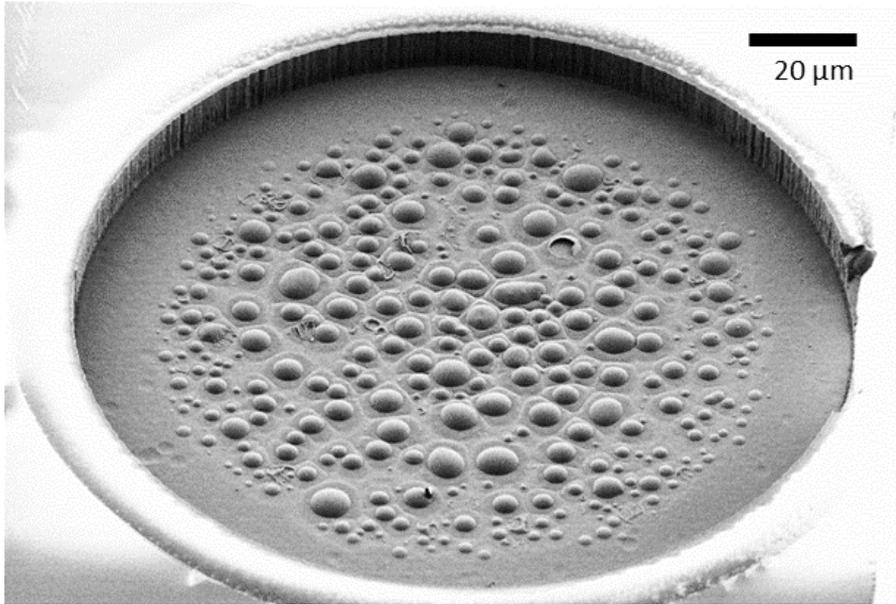


V. Felix, Plasma Sources Sci. Technol. **25** (2016) 025021

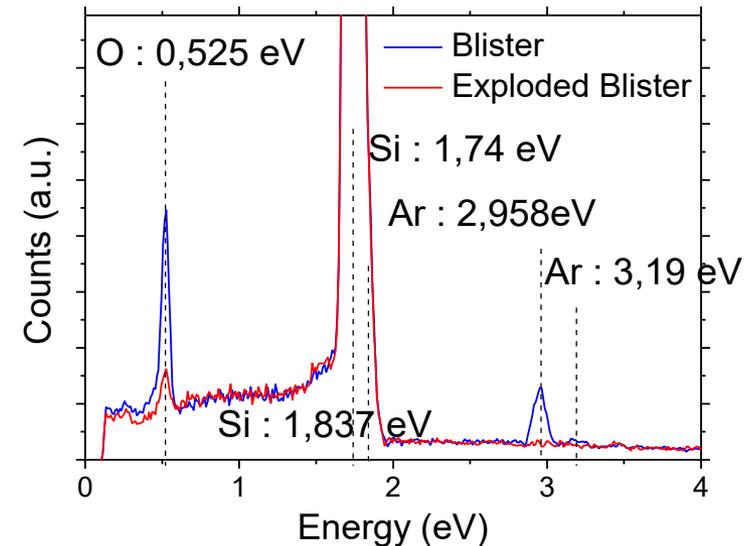
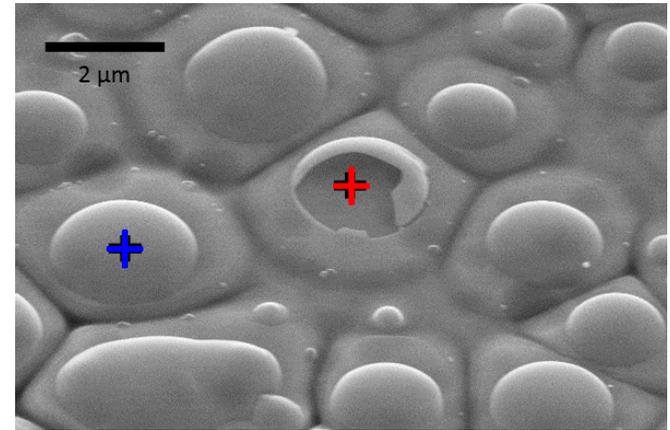


Analyse EDX des cloques

- Analysis at two different positions : on a **blister** and on a **popped blister**

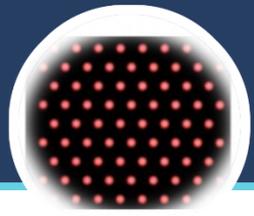


Obtained surface after 20 sec of operation in Ar at Patm

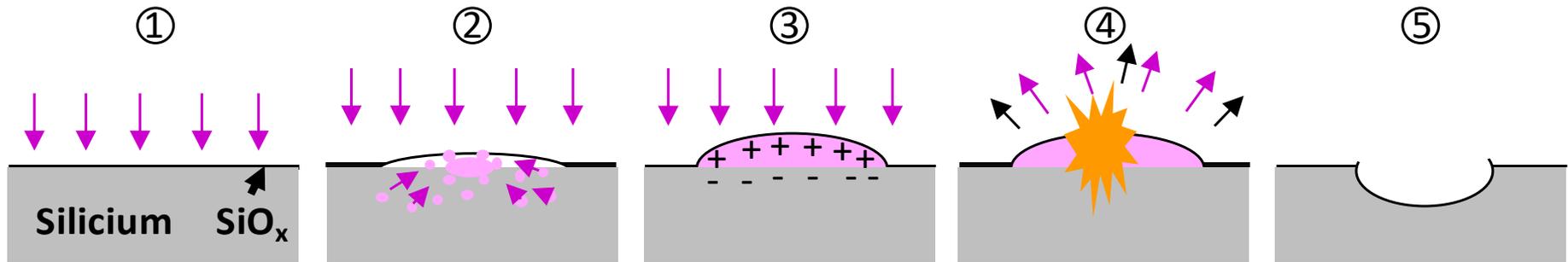


- // **Implantation mechanism** of argon ions at the very near surface of the silicon or silicon dioxide

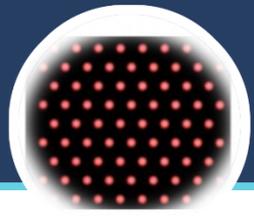
R Michaud et al Plasma Sources Sci. Technol. 27 (2018) 025005



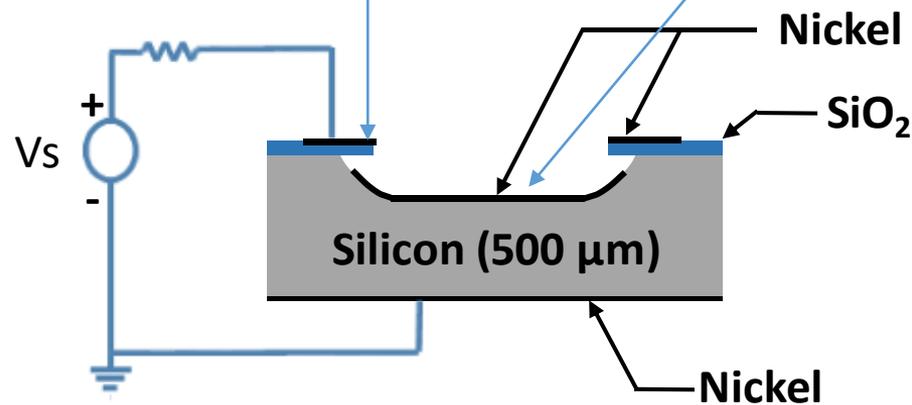
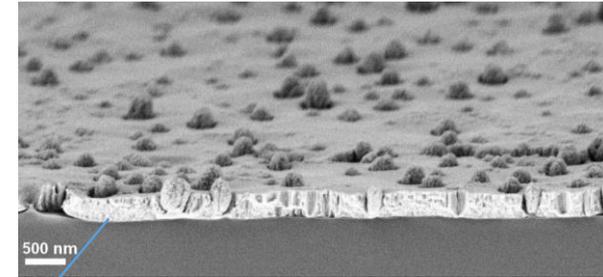
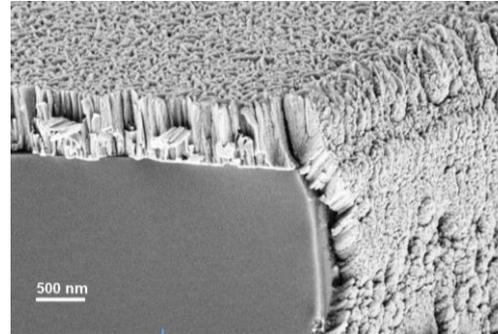
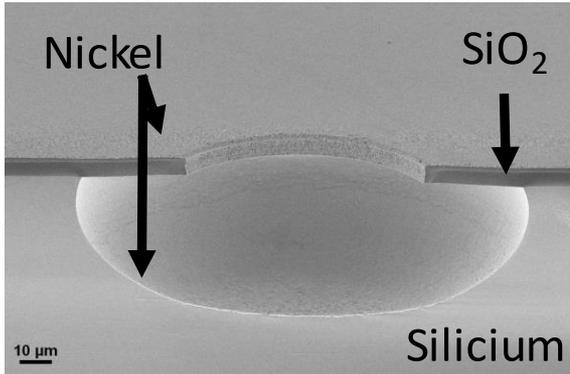
Mécanisme de défaillance



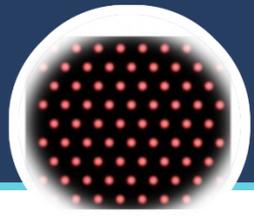
1. Implantation sous oxyde
2. Formation de bulles en surface
3. Charge de la partie supérieure de la bulle.
4. Micro arc
5. Formation du cratère



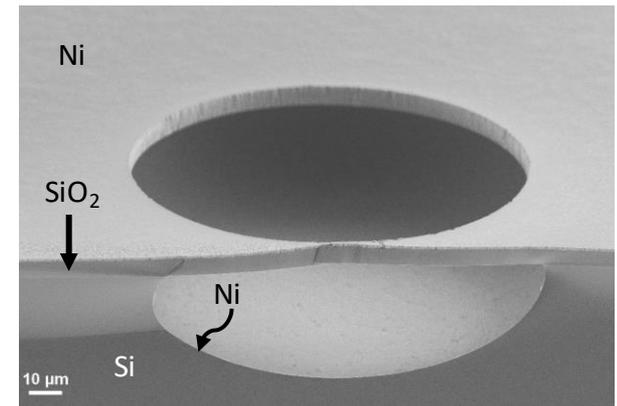
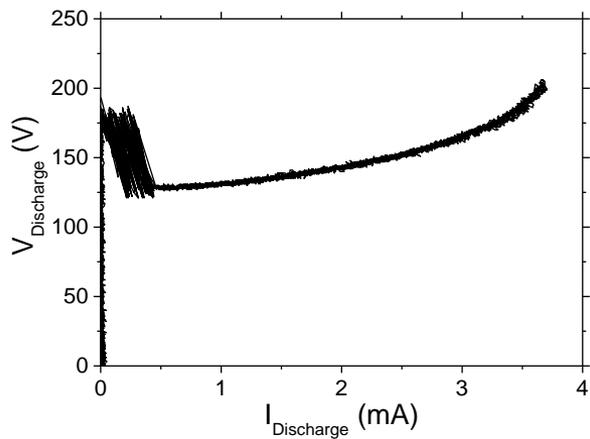
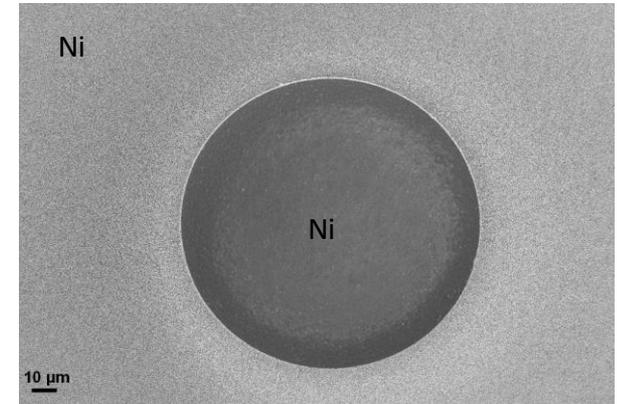
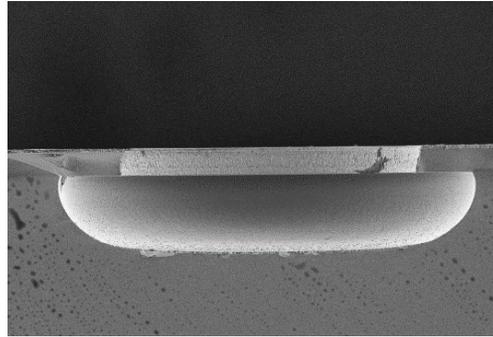
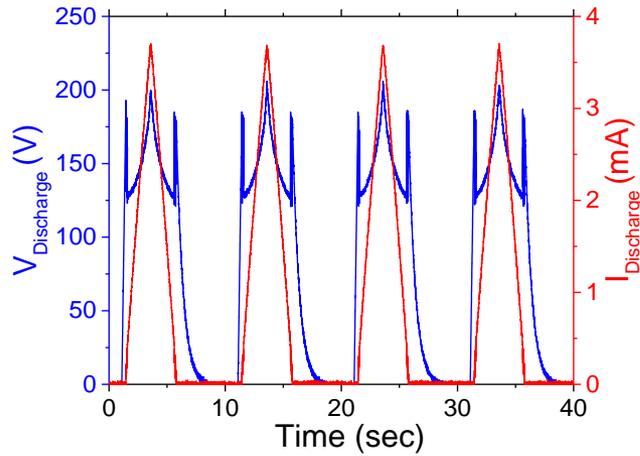
Dépôt de nickel en fond de cavité



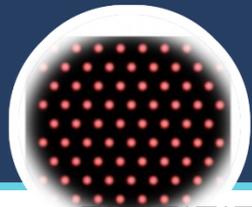
R Michaud , Thèse 2019



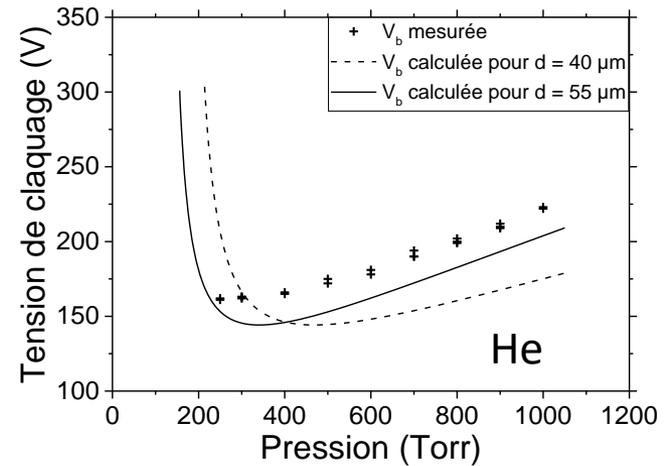
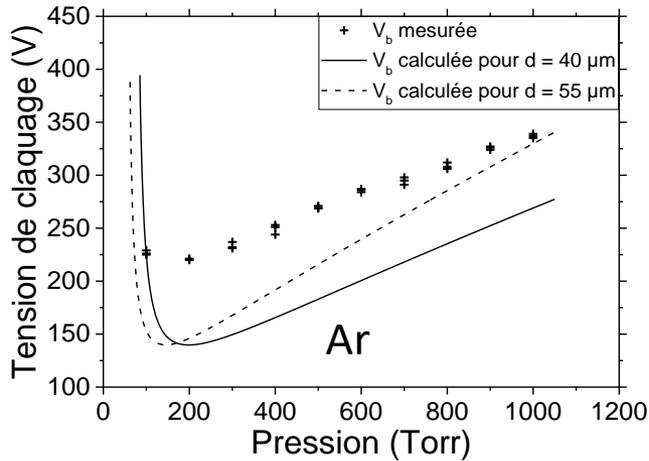
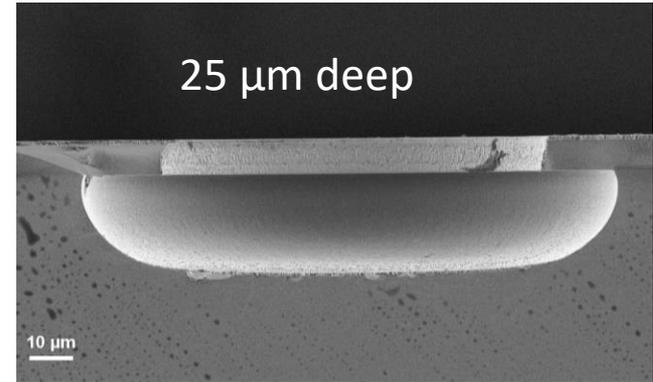
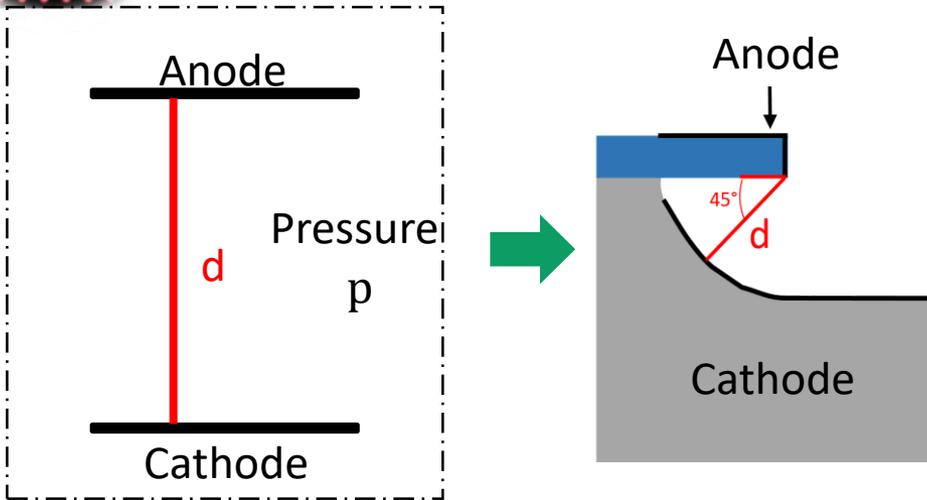
Résultats avec cathode recouverte de Ni

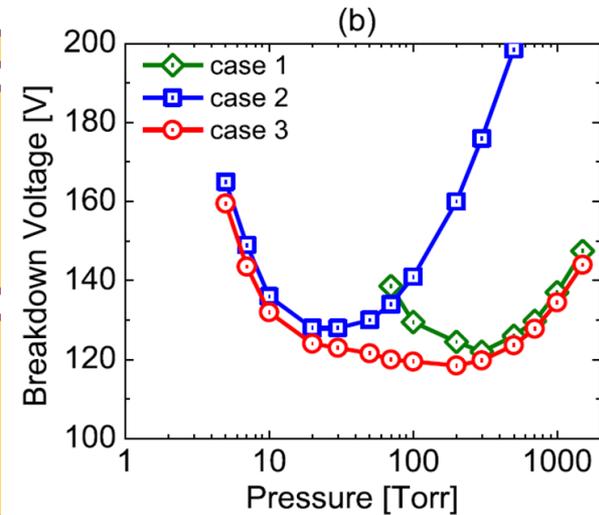
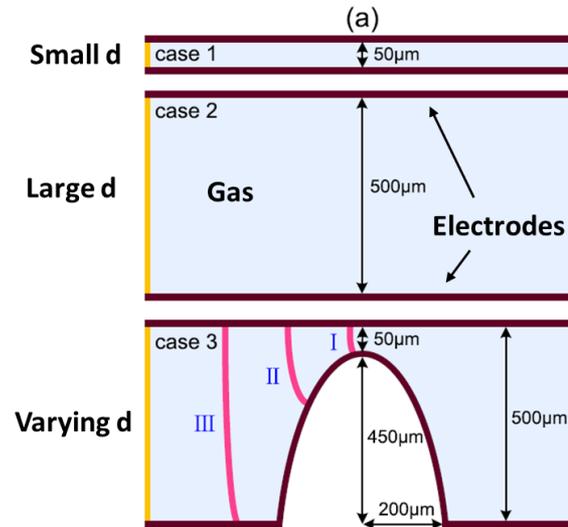
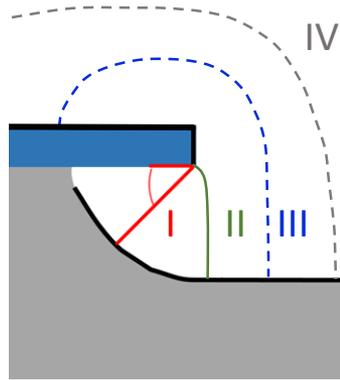


R Michaud, Thèse 2019

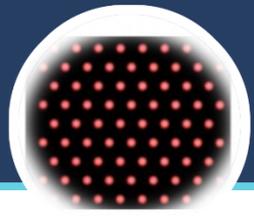


Claquage dans les MHCD



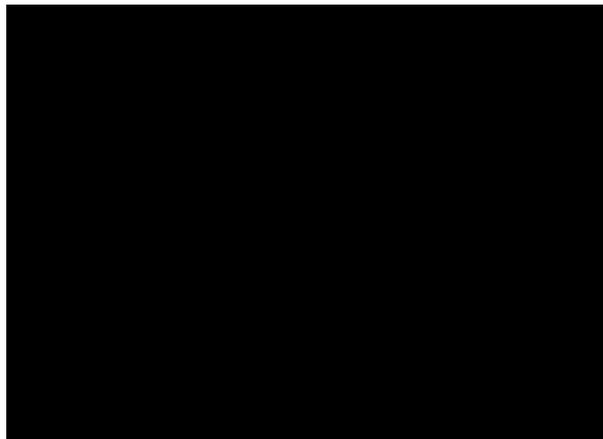
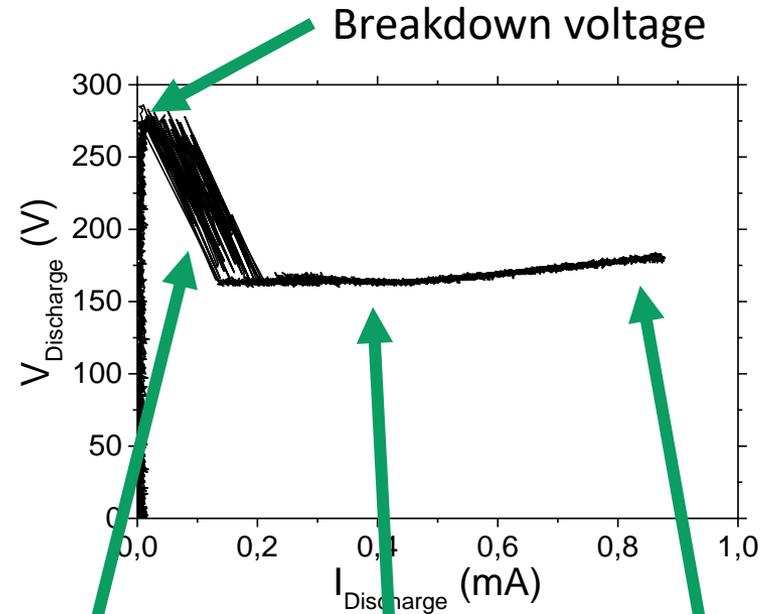
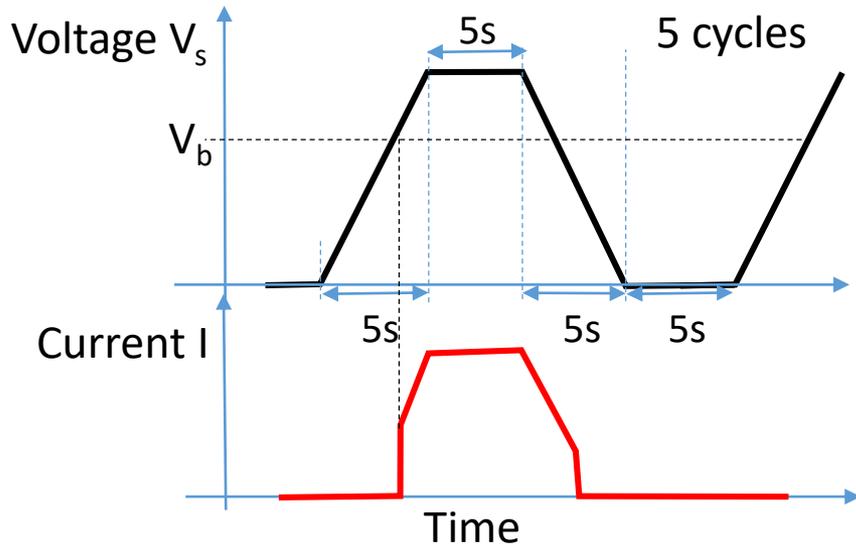


La configuration géométrique est très différente de la configuration plan-plan
 La distance interélectrode de claquage change change selon la pression pour minimizer la tension de claquage.



Single hole: Discharge regime

Thèse R. Michaud, 2019



Intensity x3

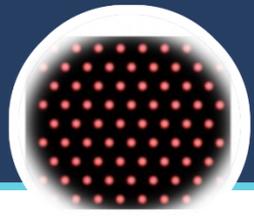
Self pulsing regime



Normal regime

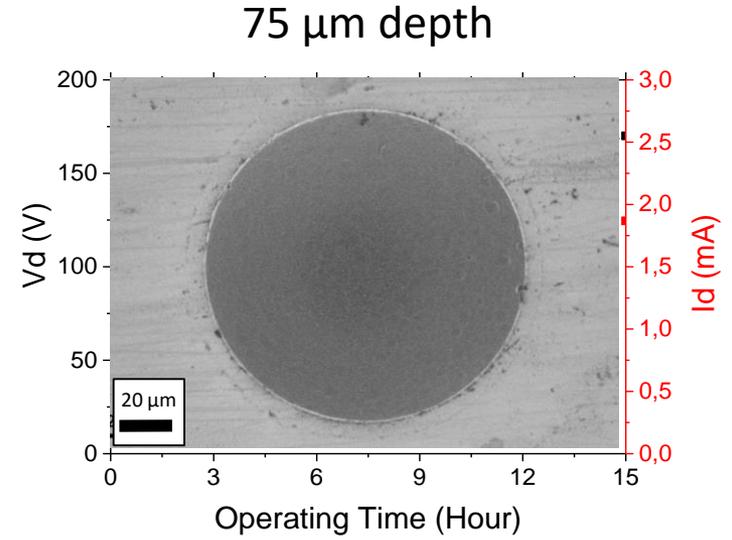
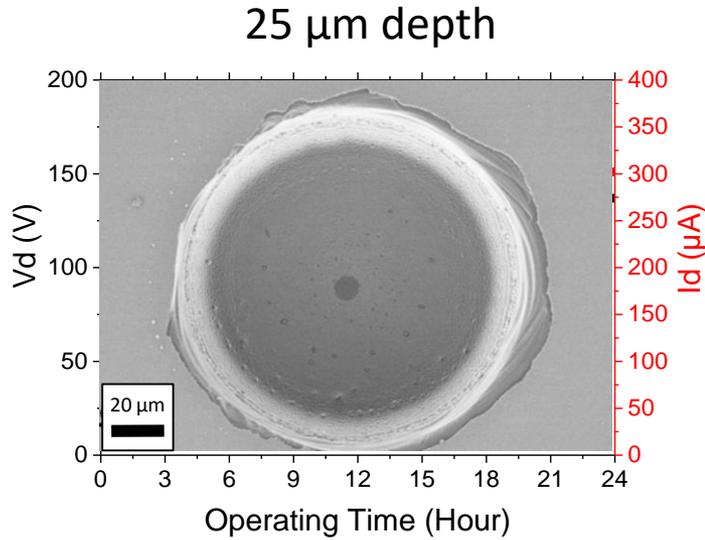


Abnormal regime

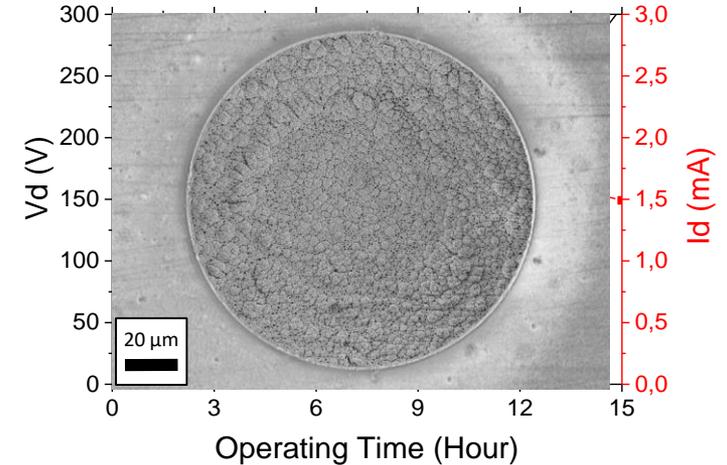
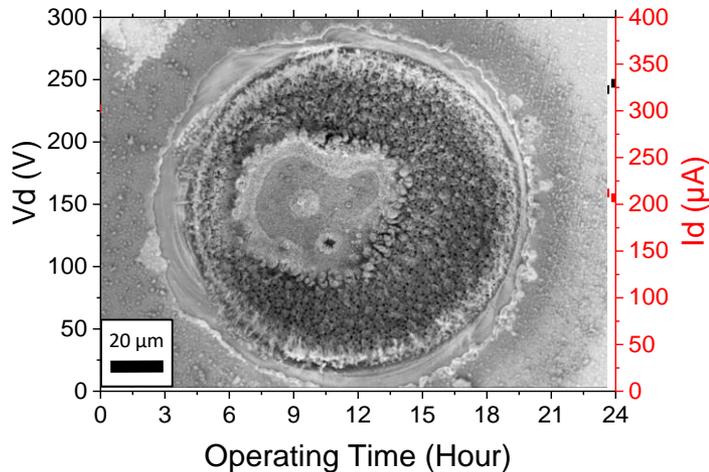


Durée de vie

Operation
in helium



Operation
in argon





Single hole: Temperature of the gas

// Van der Waals broadening

$$w_{vdw} = 8.18 \times 10^{-12} \lambda_0^2 (\bar{\alpha} R^2)^{2/5} \left(\frac{T_g}{\mu} \right)^{3/10} N$$

// Resonance broadening

$$w_R = K(0,1) \frac{r_e}{\pi} \sqrt{\frac{g_G}{g_R}} \lambda_0^2 \lambda_R f_R \frac{p}{k_B T_g}$$

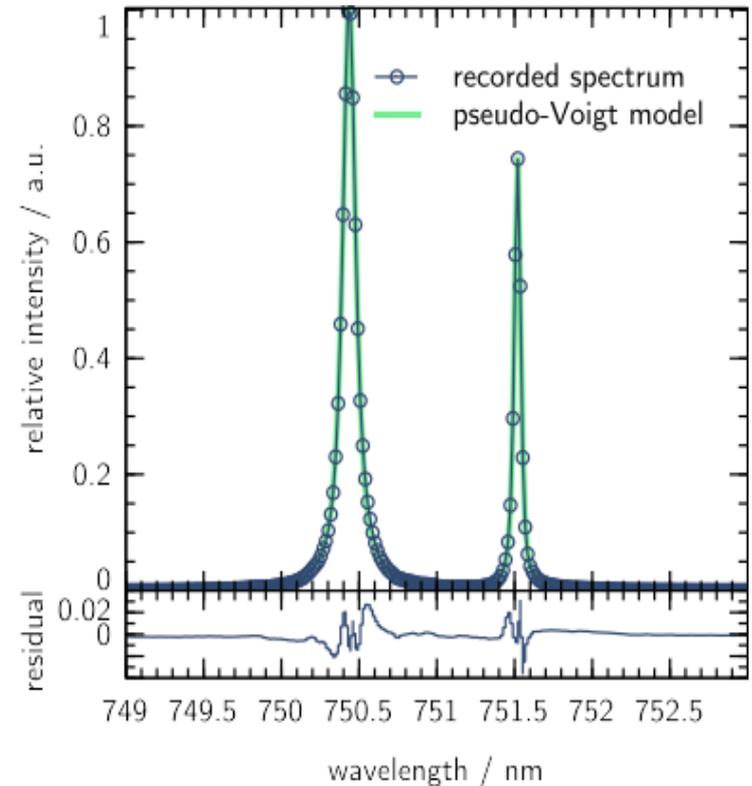
// Line shape $\rightarrow T_g$

$$w_L = \frac{\kappa_R \cdot p}{T_g} + \frac{\kappa_{vdw} \cdot p}{T_g^{0.7}}$$

// Profile of resonance lines of:

Ar ($2p^1 \rightarrow 1s^2 - 750.4 \text{ nm}$)

He ($3^1D \rightarrow 2^1P - 667.82 \text{ nm}$)



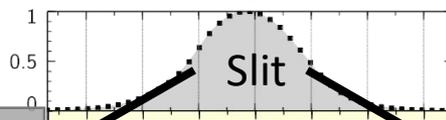
S. Djurović and N. Konjević 2009 *Plasma Sources Sci. Technol.* **18** 035011
A.V. Pipa, et. al. 2015 *Applied Physics Letters* **106** 244104
S. Iseni et al. 2019 *Plasma Sources Sci. Technol.* **28** 065003



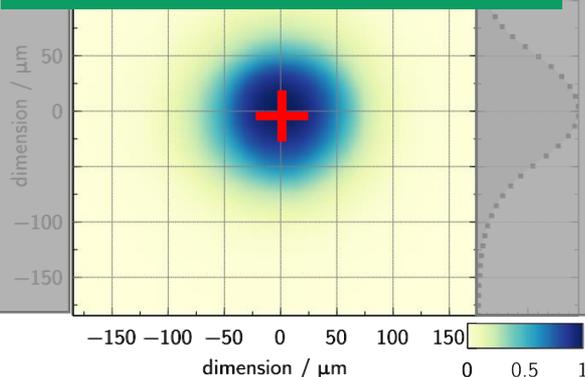
Single hole: Temperature of the gas

Experimental conditions

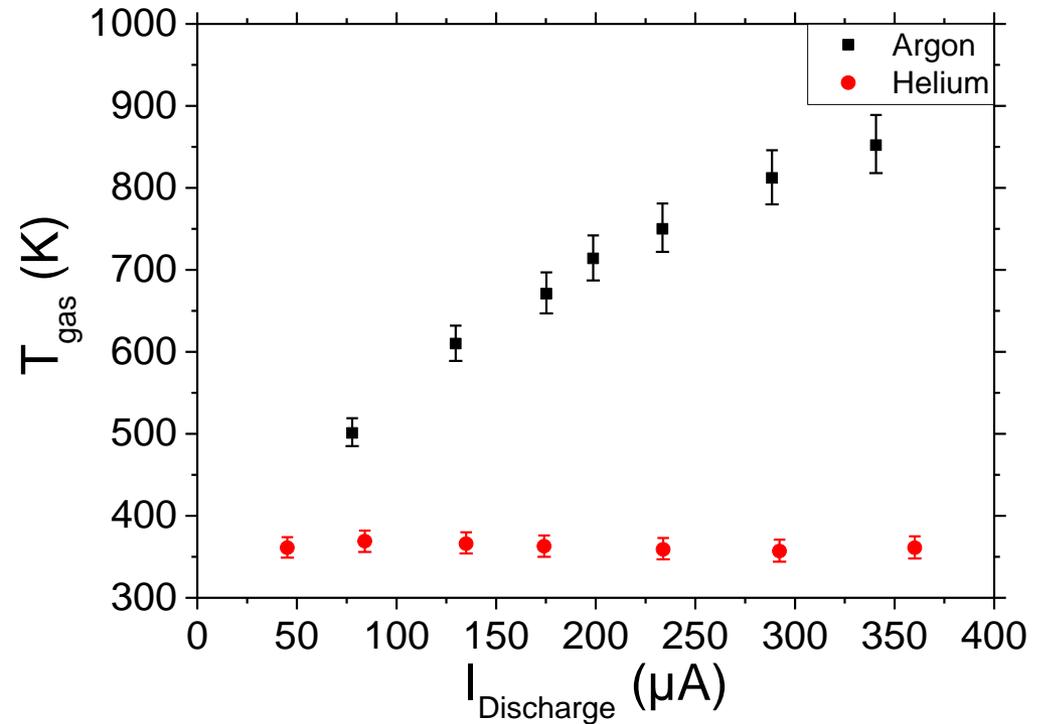
<i>Gas</i>	Argon Helium
<i>Pressure</i>	500 Torr
<i>Depth</i>	30 μm
<i>Diameter</i>	100 μm



Spatial resolution: 9 μm



CCD image of the discharge



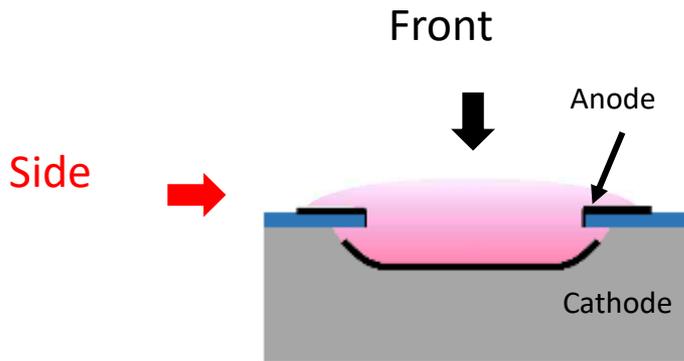
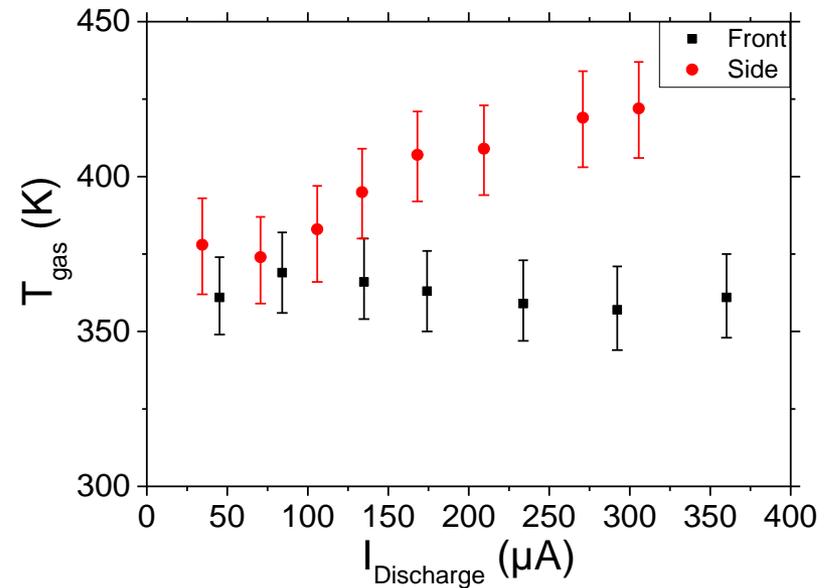
// The higher temperature obtained in argon is attributed to the lower thermal conductivity of this gas



Single hole: Temperature of the gas

Experimental conditions

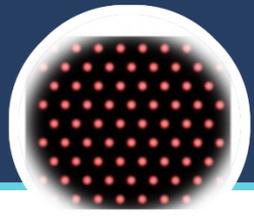
Gas	Helium
Pressure	500 Torr
Depth	30 μm
Diameter	100 μm



// The silicon seems to play a key role in heat dissipation

// A similar behavior is obtained in argon

S. Iseni et al. 2019 *Plasma Sources Sci. Technol.* **28** 065003



Conclusions

// Les microdécharges de type MHDC ont de **nombreux points** communs avec les décharges macroscopiques :

// Le claquage suit la **loi de Paschen**

// Même évolution $V_d = f(I_d)$

// Régime auto-impulsionnel

// Mais aussi des particularités

// Fonctionnement à **pression atmosphérique** en restant **hors ETL**

// **Déviaton de la loi de Paschen** à très **faible espace interélectrode**.

// **pas d'effet cathode creuse**, mais une expansion en dehors de la cavité

// Grande concentration **d'espèces réactives** (réactions en volume)

// Elles peuvent être **étendues** pour traiter des **surfaces macroscopiques** tout en conservant les avantages de leur dimension microscopique.

// Elles peuvent **également être intégrées** à un dispositif **MEMS en silicium**