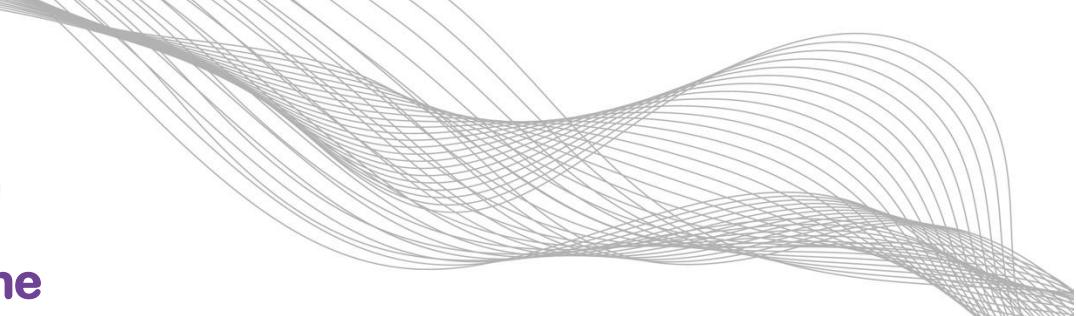


Journées 2025 – Saint-Etienne



Décharges à Barrières Diélectriques : plus d'un siècle d'histoire et toujours de nouvelles perspectives ...

A. Belinger, H. Caquineau, S. Dap, N. Gherardi, N. Naudé

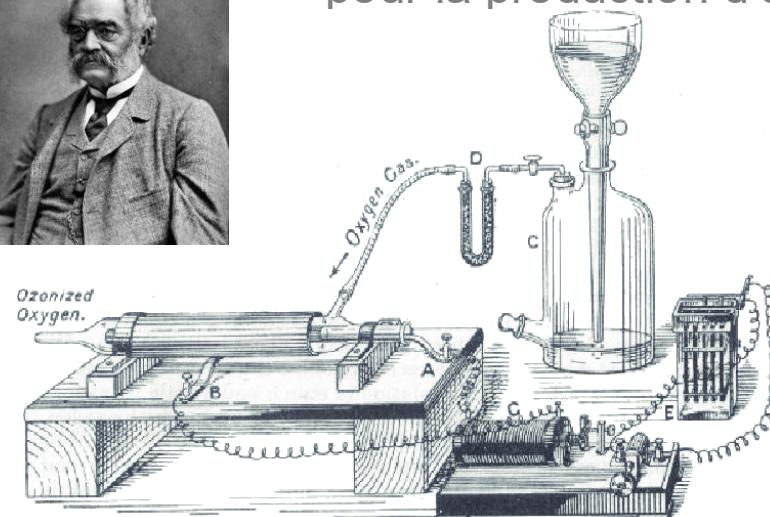
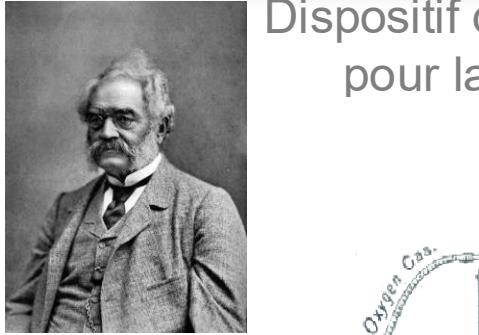
Introduction

Une histoire ancienne ...



ChatGPT

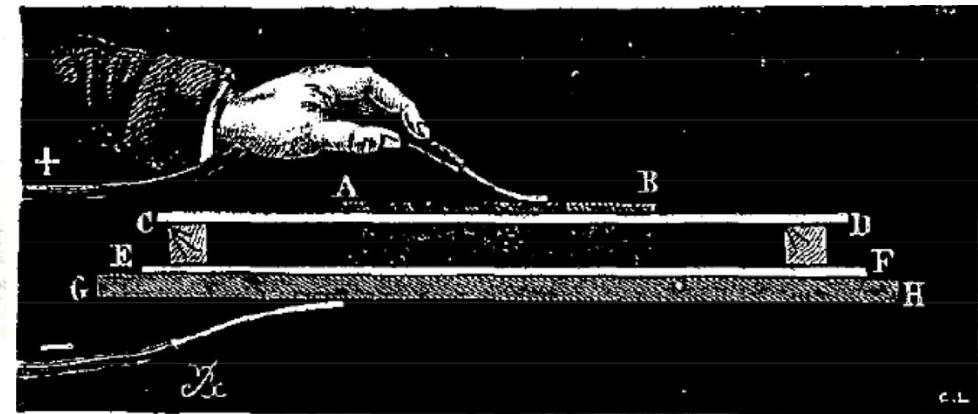
Dispositif de Werner von Siemens pour la production d'ozone



Siemens W, Poggendorff's Ann Phys Chem.
1857. 102(66)

1857 — Découverte par Werner von Siemens (Allemagne)

Siemens met au point un dispositif et observe une décharge lumineuse non étincelante produisant de l'ozone efficacement à température ambiante !



1855 : Expérience de Théodore Du Moncel
La décharge produite fut décrite comme un « flux lumineux bleuâtre », ou encore une « pluie de feu de couleur bleue »

Du Moncel T (1855) Notice sur l'appareil d'induction électrique de Ruhmkorff et sur les expériences que l'on peut faire avec cet instrument
Hachette et Cie publishers, Paris

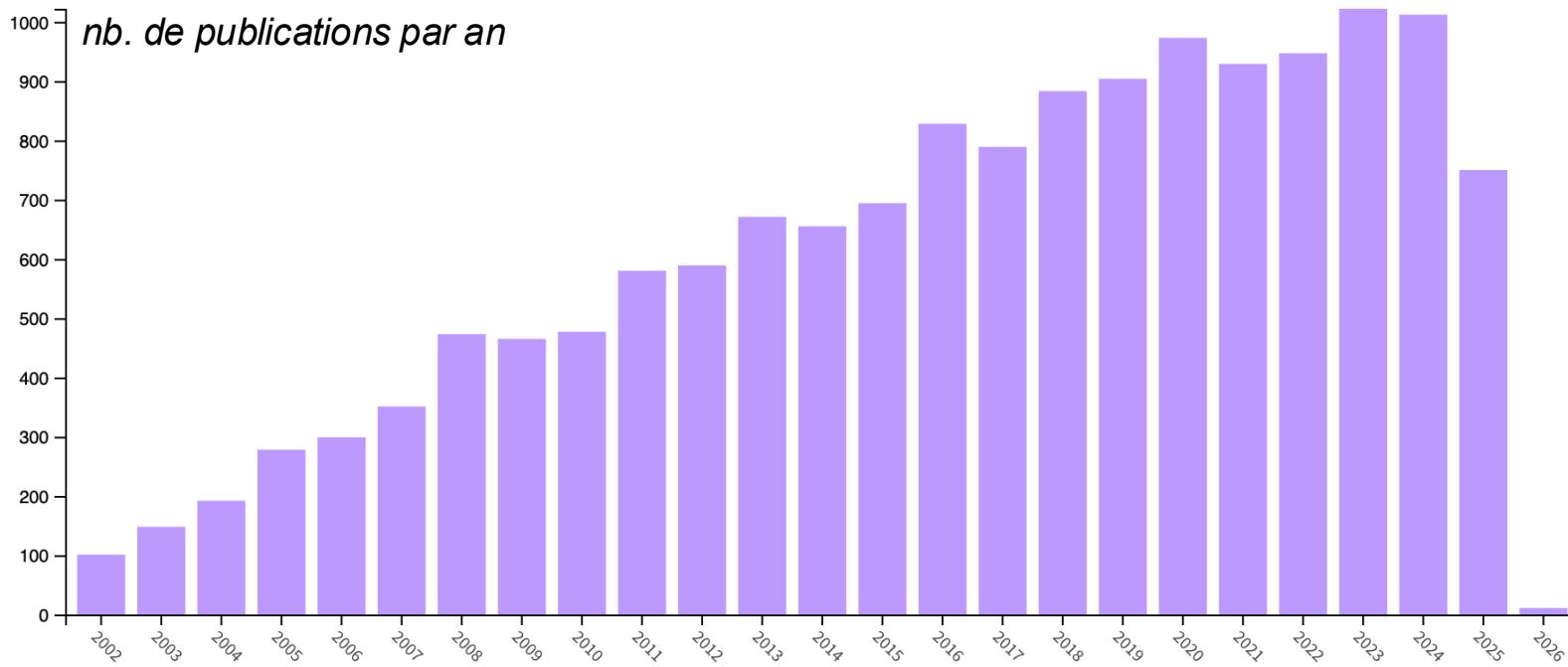
Introduction

Une histoire ancienne ... mais pas que !



170 ans d'histoire

+ de 15000 résultats depuis 1978 ...



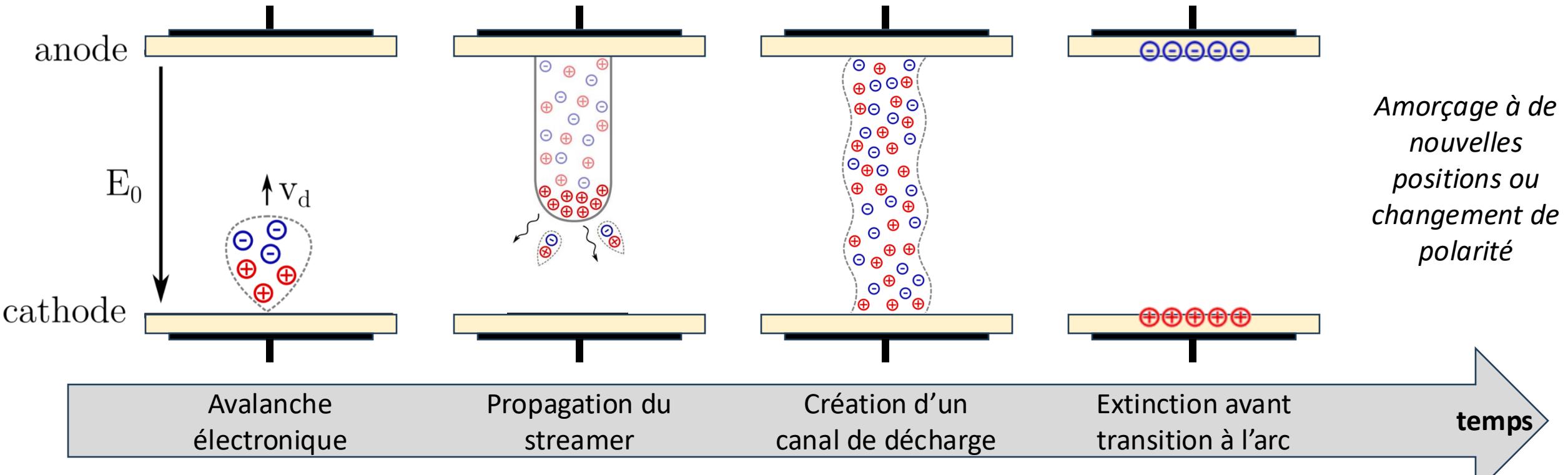
→ Pourquoi est-ce qu'il y a toujours autant de travaux sur les DBD ?

Mots clés : DBD, dielectric barrier discharge, ...

Introduction

Secret(s) de longévité ?

→ Solution simple et robuste pour éviter la transition à l'arc



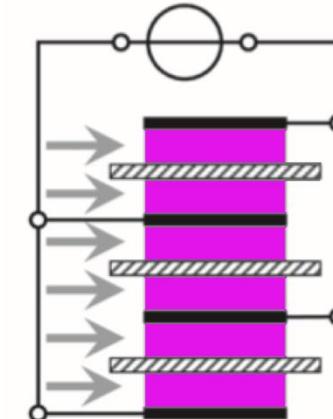
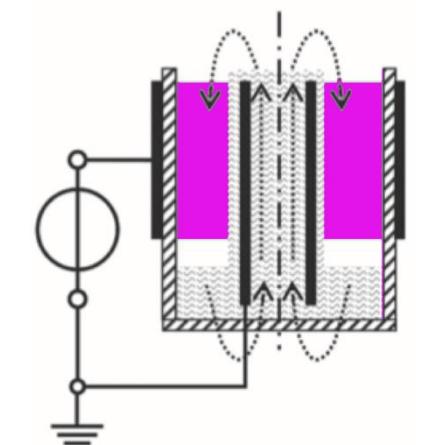
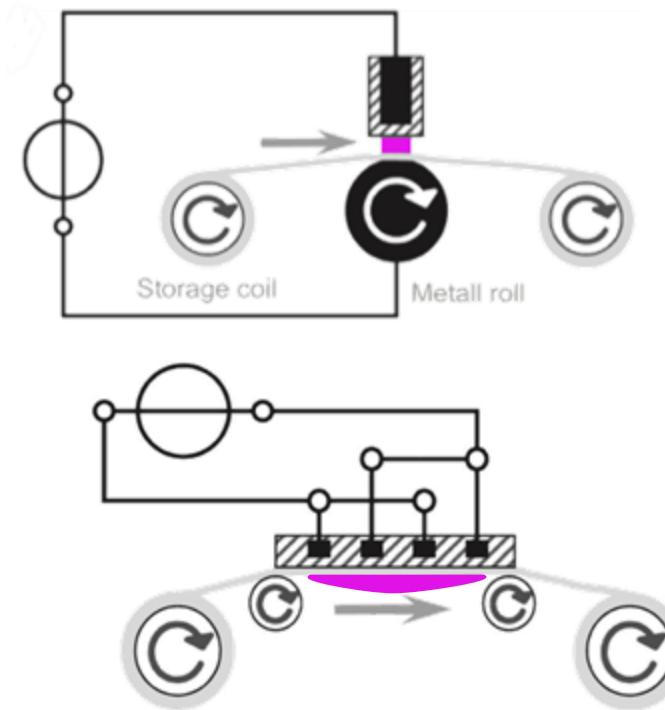
→ Alimentation AC, décharge impulsionnelle

Introduction

Secret(s) de longévité ?

→ Solution simple et robuste pour éviter la transition à l'arc

→ Des configurations variées !

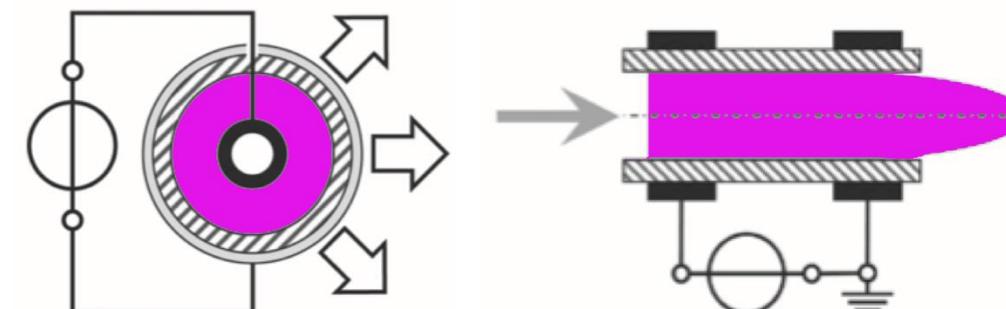


Plan / plan, cylindrique, jet, ...

En contact avec des liquides, des matériaux en défilement, ...

1 ou plusieurs diélectriques

Volumique vs Surfacique

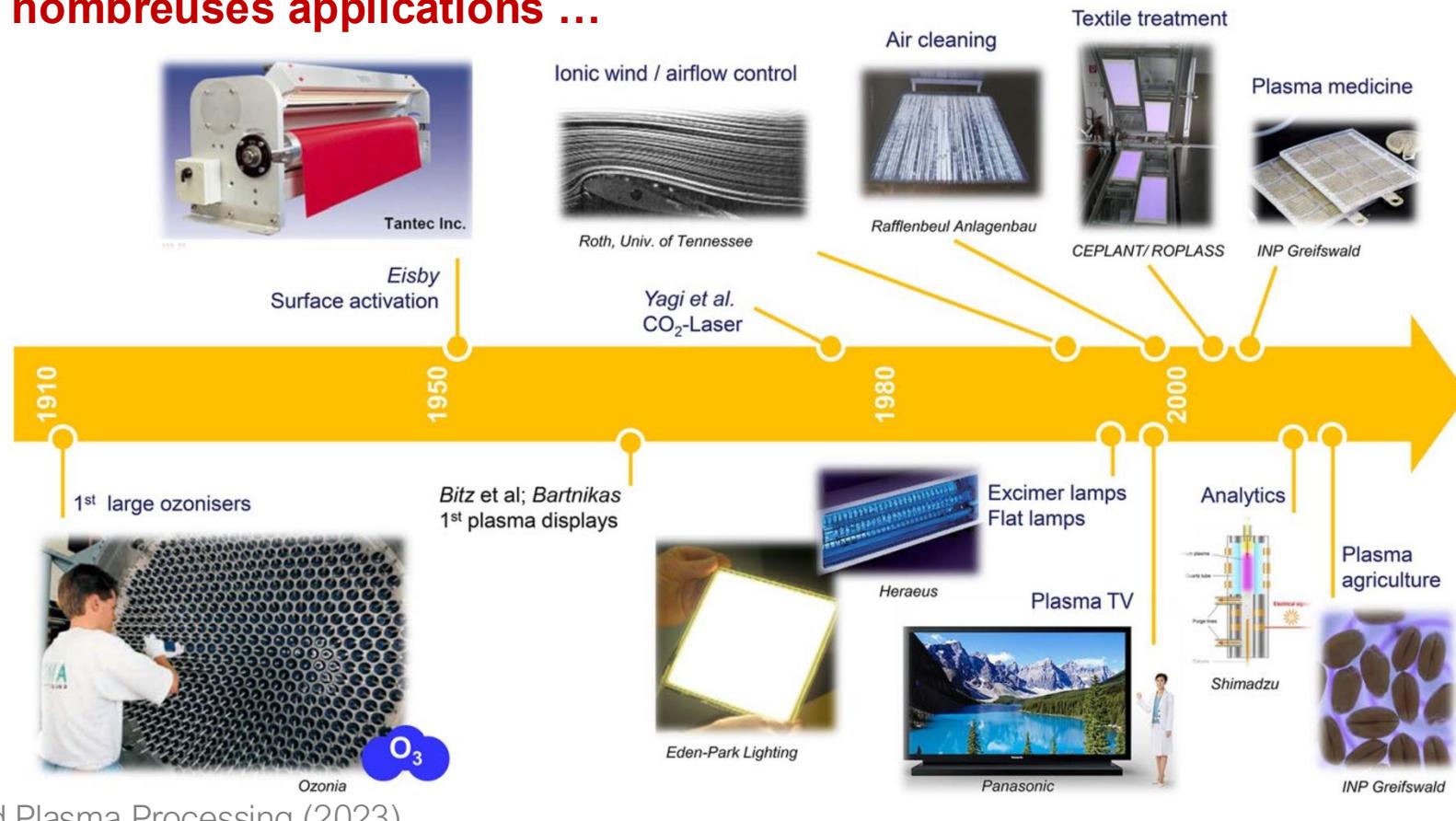


→ Flexibilité / Adaptabilité ...

Introduction

Secret(s) de longévité ?

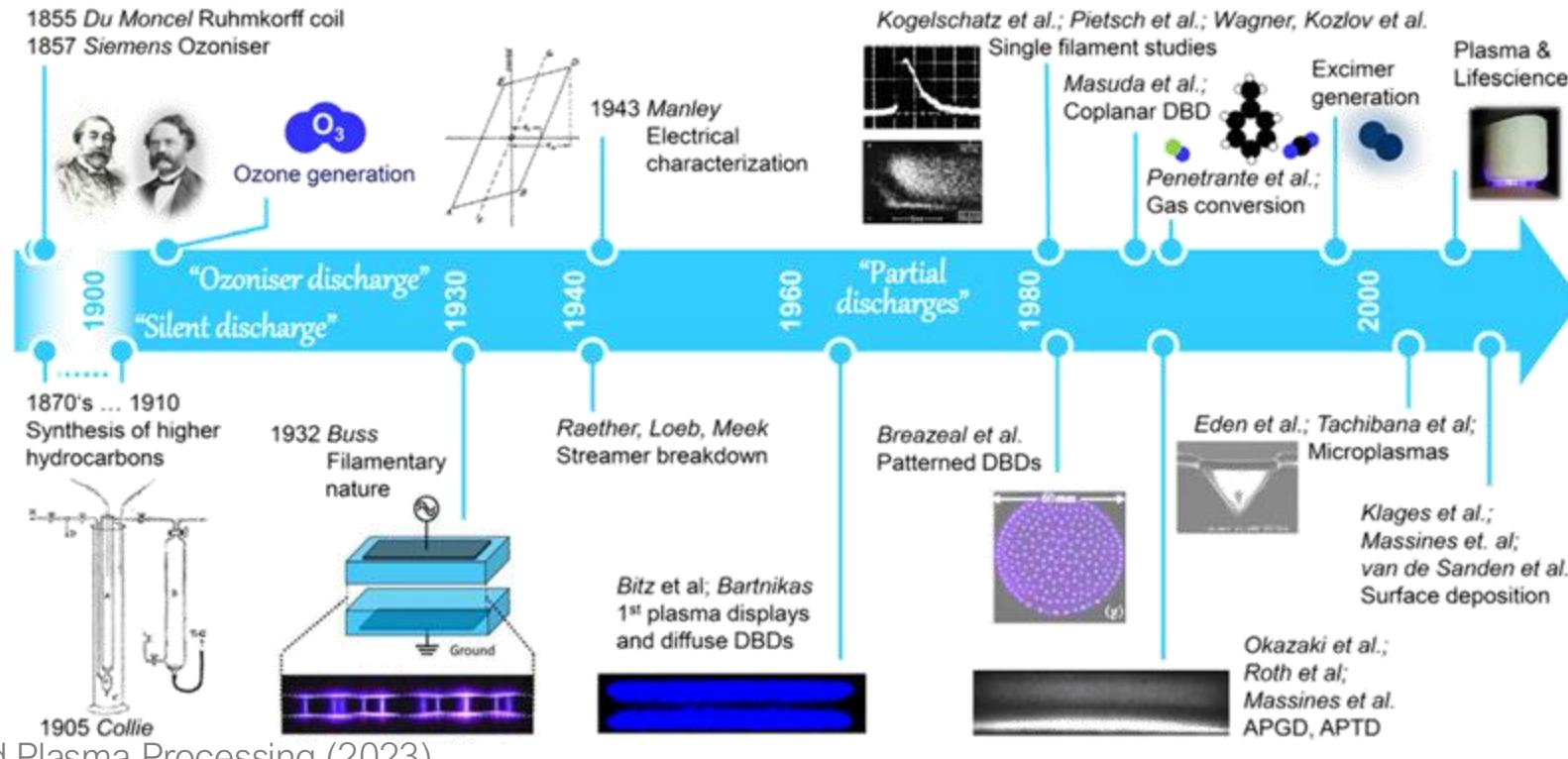
- Solution simple et robuste pour éviter la transition à l'arc
- Des configurations variées !
- De nombreuses applications ...



Introduction

Secret(s) de longévité ?

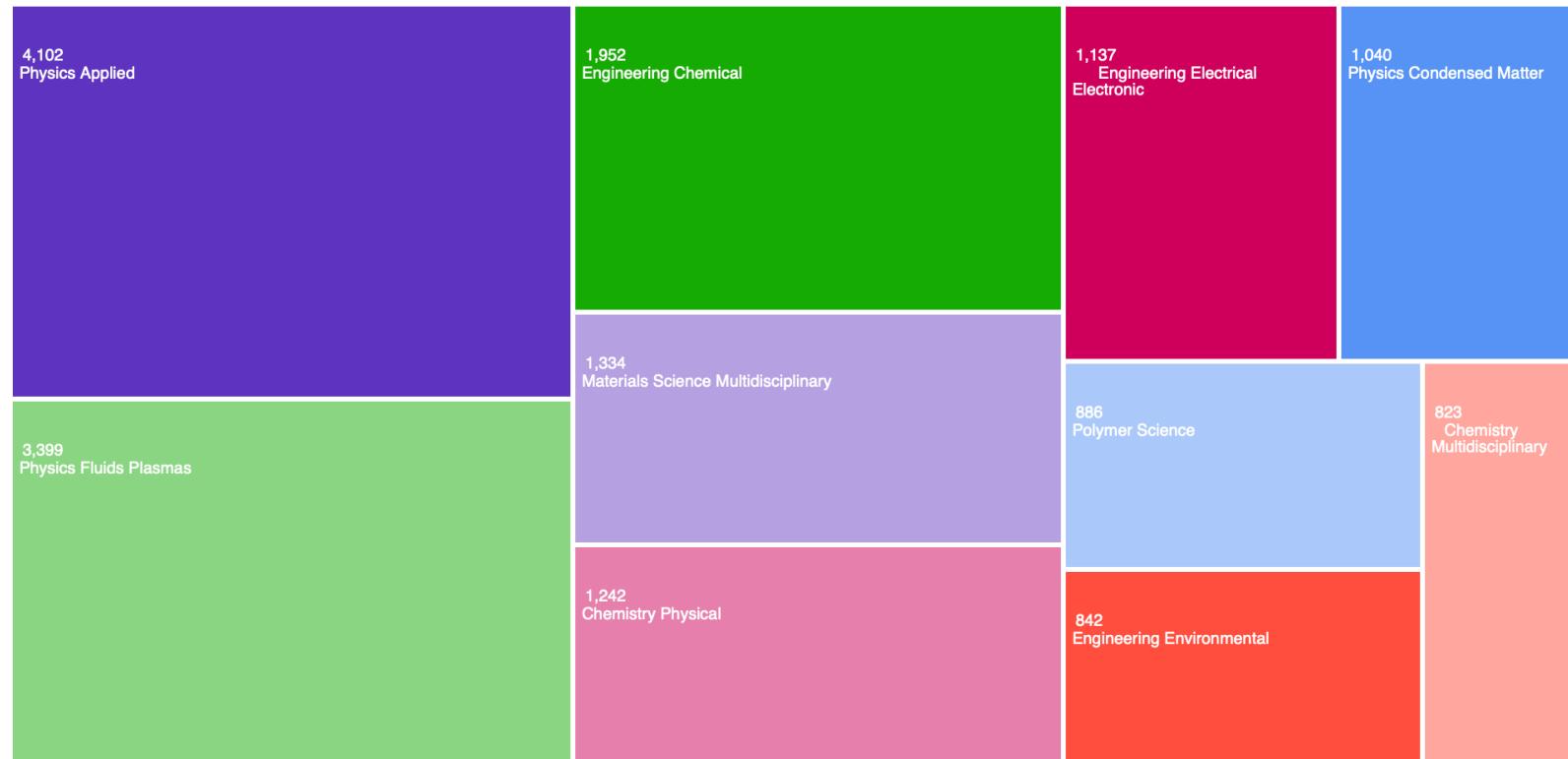
- Solution simple et robuste pour éviter la transition à l'arc
- Des configurations variées !
- De nombreuses applications ...
- De nombreux sujets de recherche !



Introduction

Secret(s) de longévité ?

- Solution simple et robuste pour éviter la transition à l'arc
- Des configurations variées !
- De nombreuses applications ...
- De nombreux sujets de recherche !



Introduction

Secret(s) de longévité ?

- Solution simple et robuste pour éviter la transition à l'arc
- Des configurations variées !
- De nombreuses applications ...
- De nombreux sujets de recherche !

□ 1 Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications

Kogelschatz, U
Mar 2003 | PLASMA CHEMISTRY AND PLASMA PROCESSING ▾ 23 (1), pp.1-46

Dielectric-barrier discharges (silent discharges) are used on a large industrial scale. They combine the advantages of non-equilibrium plasma properties with the ease of atmospheric-pressure operation. A prominent feature is the simple scalability from small laboratory reactors to large industrial installations with megawatt input powers. Efficient ... Show more ▾

ACCÈS AU DOCUMENT Full Text at Publisher  ...

2,781
Citations

308
References

Related records

668
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS

499
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

262
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

231
TSINGHUA UNIVERSITY

□ 7 Airflow control by non-thermal plasma actuators

Moreau, E
Feb 7 2007 | JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS ▾ 40 (3), pp.605-636

Active flow control is a topic in full expansion due to associated industrial applications of huge importance, particularly for aeronautics. Among all flow control methods, such as the use of mechanical flaps, wall synthetic jets or MEMS, plasma-based devices are very promising. The main advantages of such systems are their robustness, simplicity, low ... Show more ▾

ACCÈS AU DOCUMENT Full Text at Publisher  ...

1,103
Citations

151
References

Related records

365
XI AN JIAOTONG UNIVERSITY

229
UNIVERSITE DE TOULOUSE

209
LEIBNIZ INSTITUT FÜR PLASMAFORSCHUNG UND TECHNOLOGIE

□ 13 Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmospheric pressure controlled by dielectric barrier

Massines, F; Rabehi, A; (...); Mayoux, C
Mar 15 1998 | JOURNAL OF APPLIED PHYSICS ▾ 83 (6), pp.2950-2957

The aim of this paper is to confirm the existence of atmospheric pressure dielectric controlled glow discharge and to describe its main behavior. Electrical measurements, short time exposure photographs, and numerical modeling were used to achieve this task. Experimental observations and numerical simulation are in good agreement. Therefore, the a ... Show more ▾

ACCÈS AU DOCUMENT Free Full Text From Publisher  ...

821
Citations

26
References

Related records

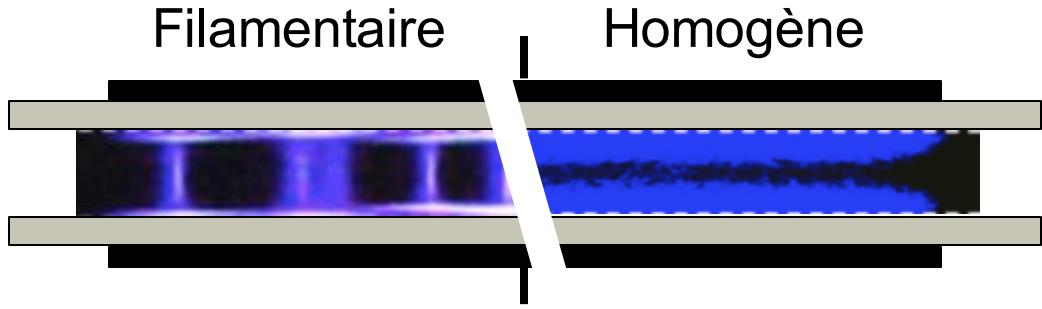
551
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

320
HEBEI UNIVERSITY

211
UNIVERSITE TOULOUSE III PAUL SABATIER

Plan

DBD plan-plan



→ DBD Filamentaire

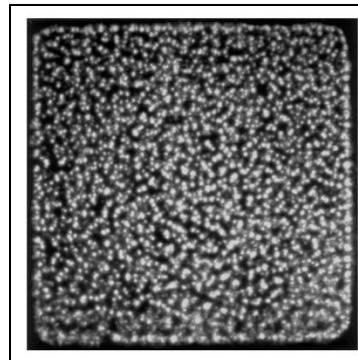
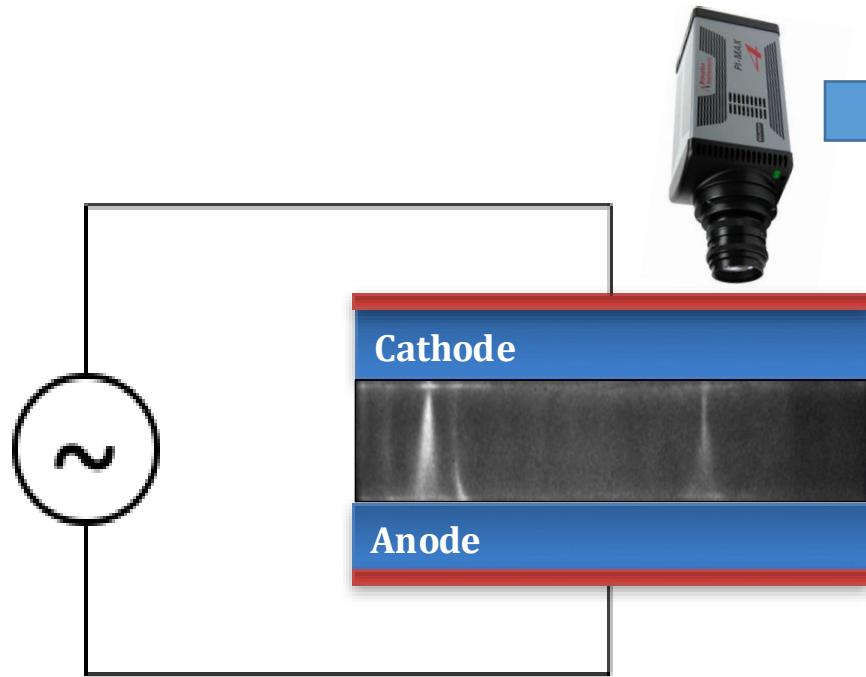
→ DBD Homogène ?

→ Obtention d'une APTD

→ APTD, quel intérêt ?

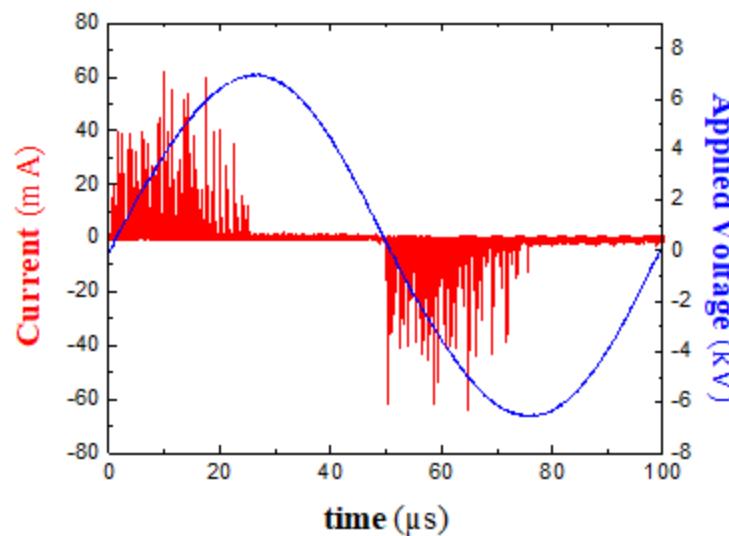
DBD Filamentaire

Régime normal de fonctionnement d'une DBD



Photographie vue de dessus à travers un diélectrique et une électrode transparente

U. Kogelschatz,
Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003



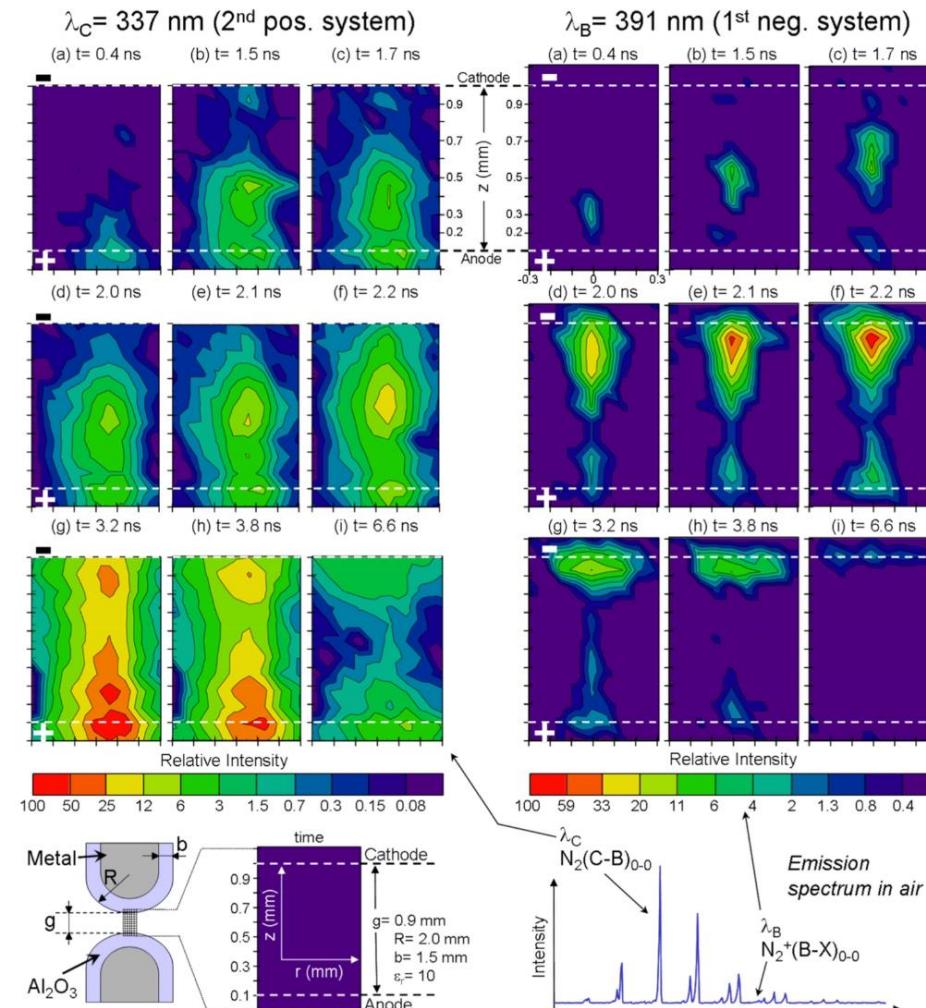
→ **Claquage streamer**

Décharge localisée ($r \approx 100 \mu\text{m}$), courte durée (1 - 10 ns) et n_e élevée ($10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)

Thèse N. Gherardi, Université Toulouse III, 2000

DBD Filamentaire

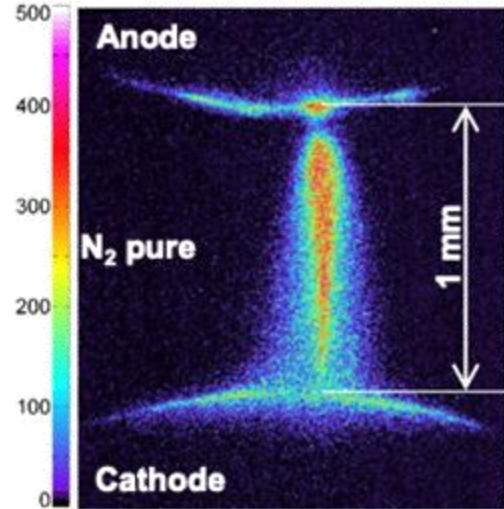
Etude des microdécharges



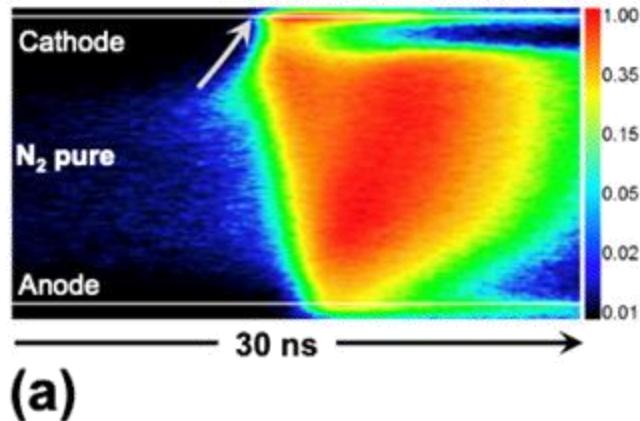
R. Brandenburg

12 Plasma Sources Sci. Technol. 26 (2017)

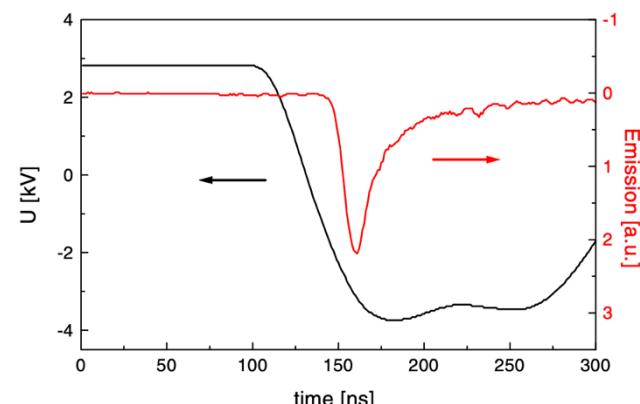
Negative half cycle (ICCD)



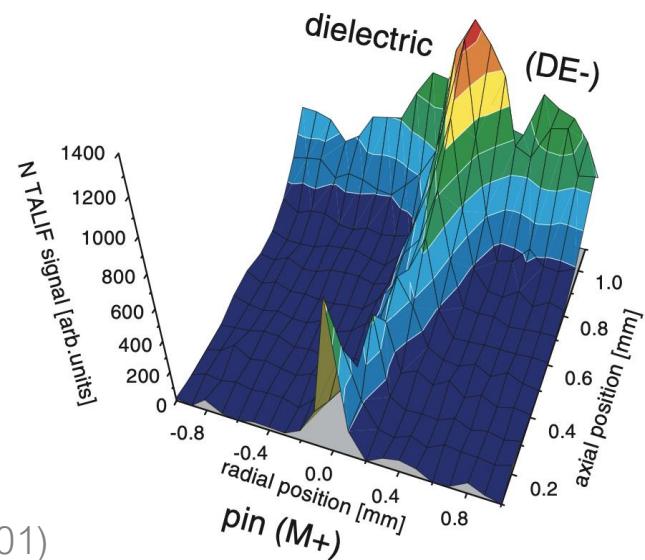
Negative half cycle (streak)



H. Höft et al.
Eur. Phys. J. D (2023)

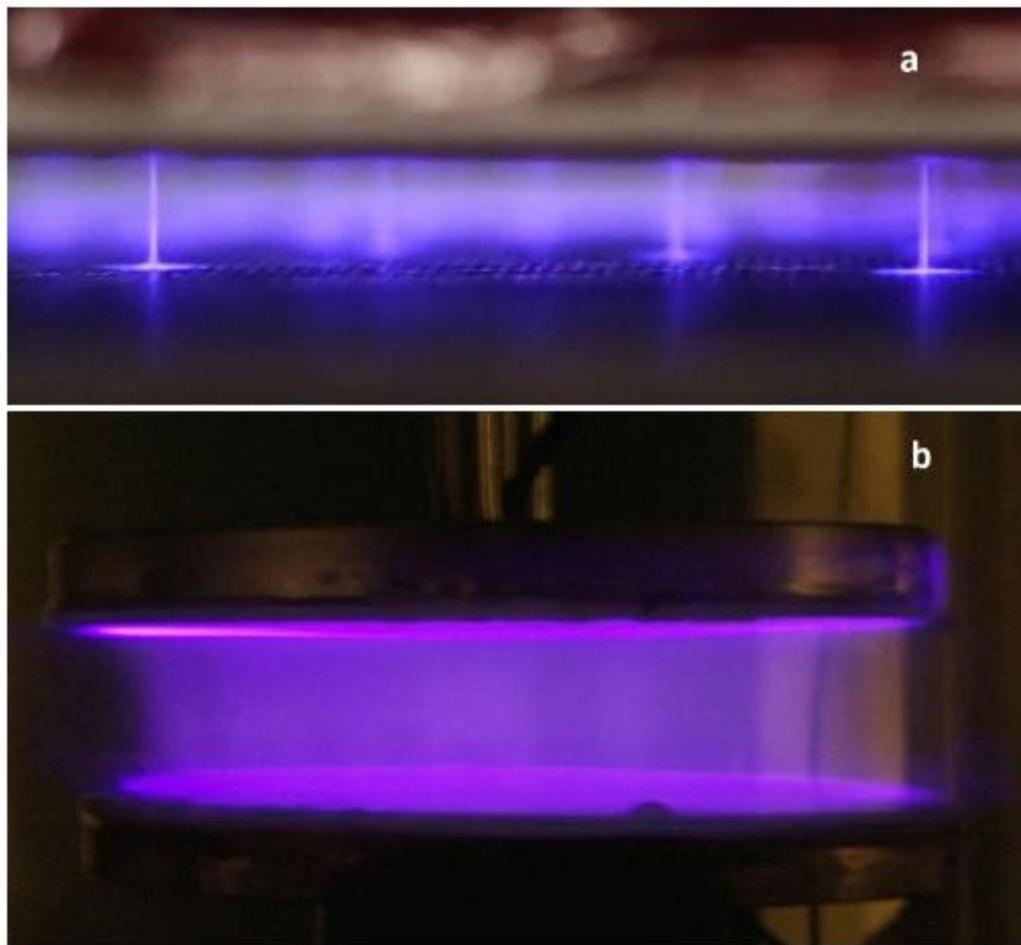


C Lukas et al. 2001
Plasma Sources Sci. Technol. 10 445 (2001)

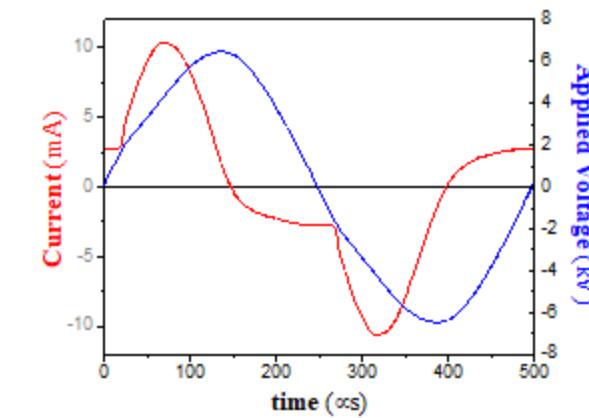
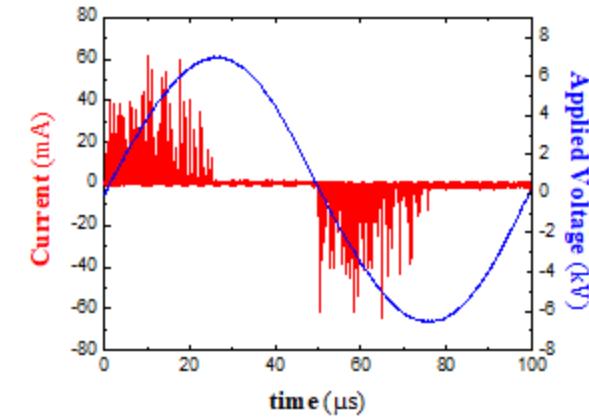


DBD Homogène ?

Autre régime que filamentaire ?



Possibilité d'obtenir un régime de décharge différent dans des conditions spécifiques



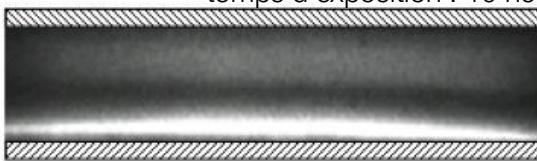
DBD Homogène ?

Toute une zoologie de décharges !

sinus kHz - ...

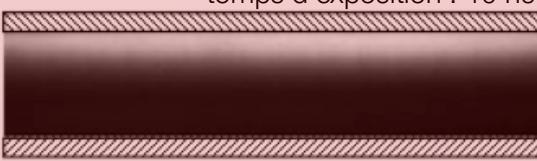
Hélium → Luminescent

temps d'exposition : 10 ns



Azote → Townsend

temps d'exposition : 10 ns

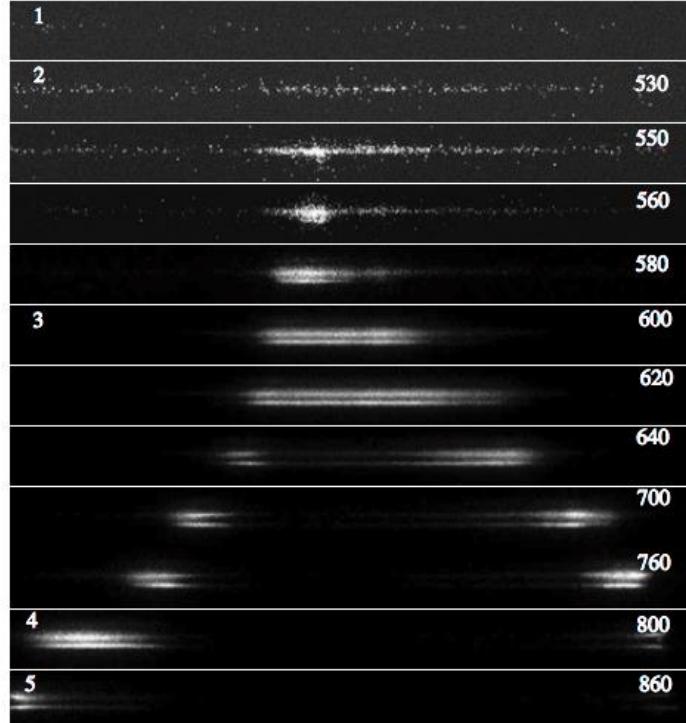


F. Massines et al.
Surface and Coatings Technology
(2003)

sinus 120 – 140 kHz

Ar/N₂/O₂ + HMDSO → glow-like

temps d'exposition : 10 ns

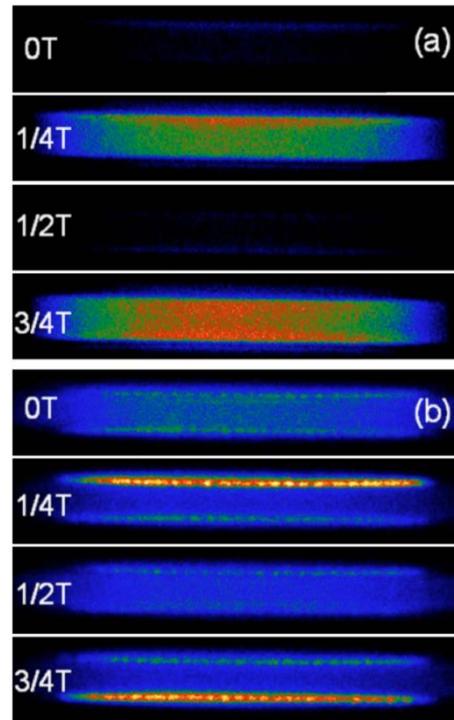


S. A. Starostin et al.
Plasma Sources Sci. Technol. 18 (2009)

RF

Argon

temps d'exposition : 1 ns

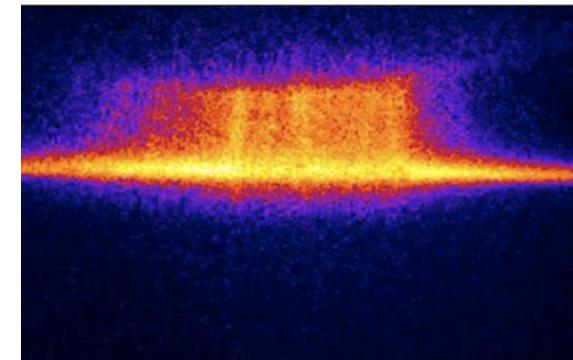


J. J. Shi et al.
Appl. Phys. Lett. 90, 111502 2007

pulsé ns

Air

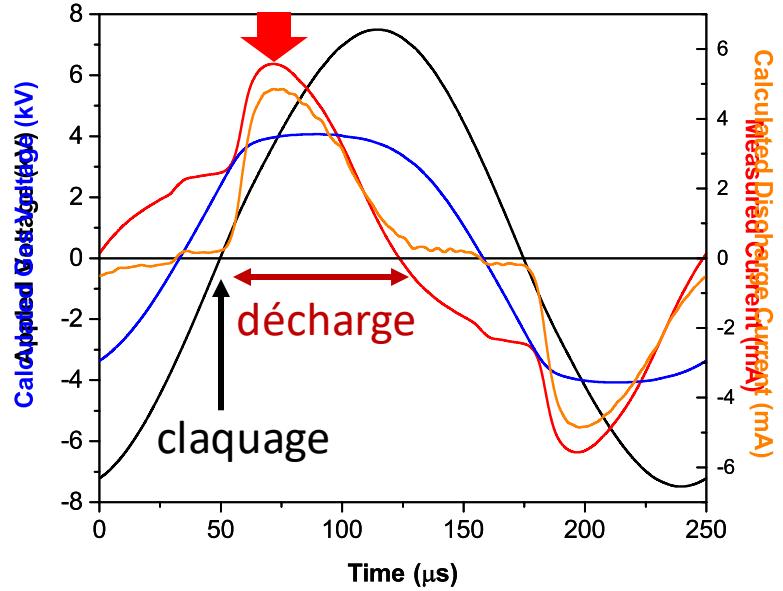
temps d'exposition : 20 ns



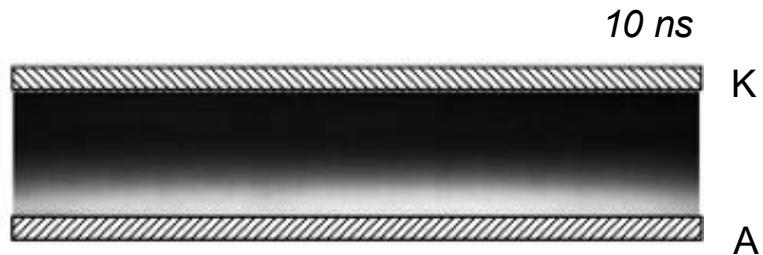
A. Fridman et al.
J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014)

DBD Homogène ?

Exemple N₂ sinus BF

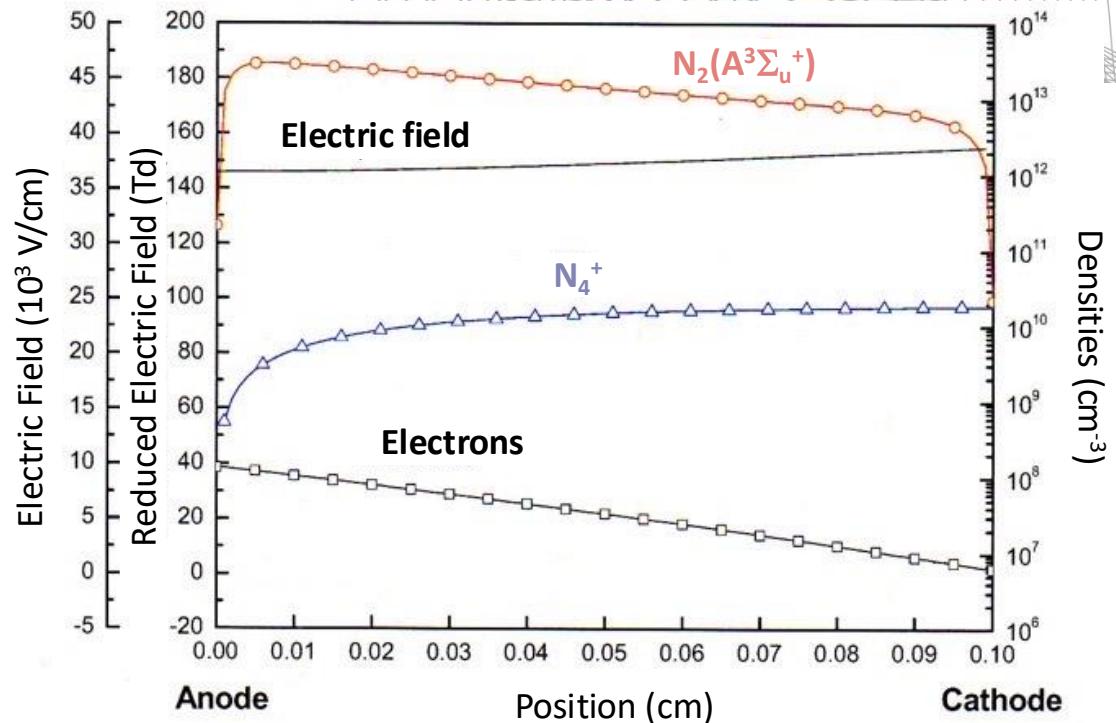


4 kHz – 15 kV_{PP} – S=9 cm² - 1 slm N₂



Numerical modeling

F. Massines et al.
Surface and Coatings
Technology 174–175
(2003) 8–14



$$n_e \approx 10^7\text{--}10^8 / \text{cm}^3$$

$$E/N_{\max} \approx 150 \text{ Td}$$

Energie des électrons ≈ 4 eV

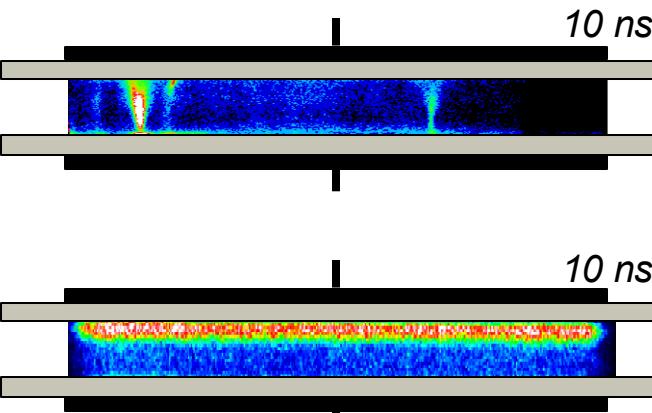
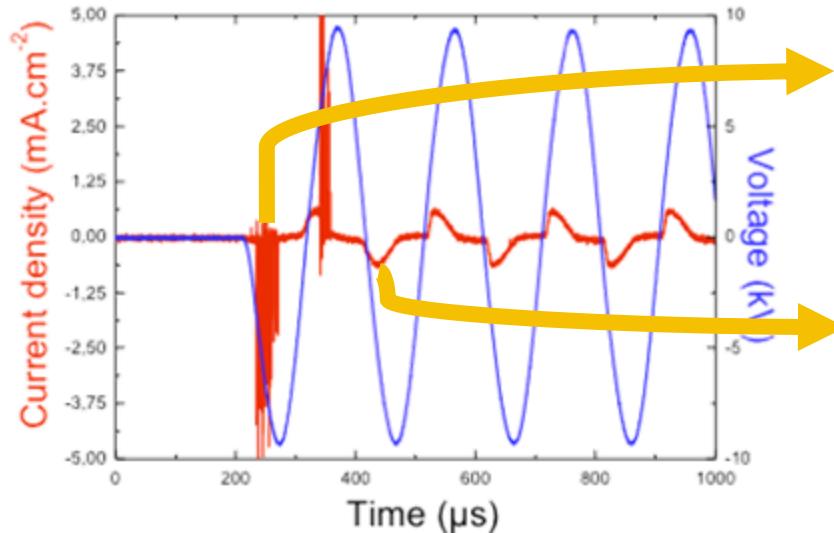
$$n_i \approx 10^{10} / \text{cm}^3$$

Pas de zone plasma - N₂(A³Σ_u⁺) principale espèce

→ Atmospheric Pressure Townsend Discharge (APTD)

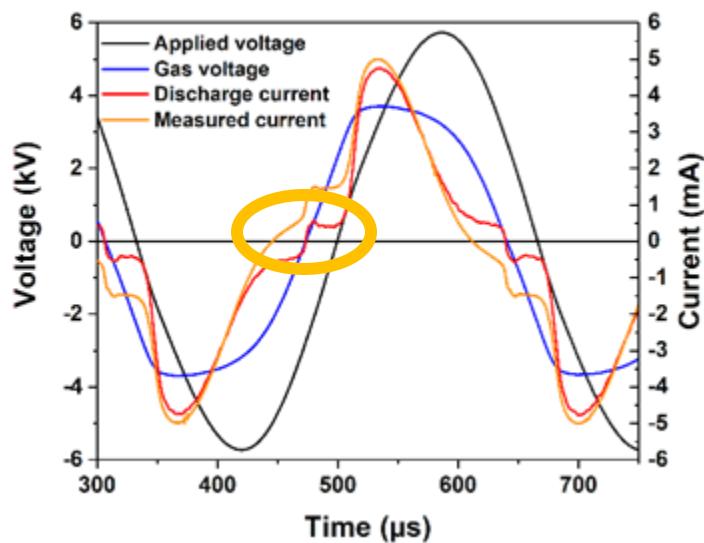
Obtention d'une APTD

Premières décharges



Claquage de Townsend obtenu uniquement après plusieurs décharges

→ Effet mémoire d'une décharge à la suivante



Présence d'un “saut de courant” à $V_g = 0$
→ Source continues d'électrons entre 2 décharges

→ Production d'électrons germes à faible E

Obtention d'une APTD

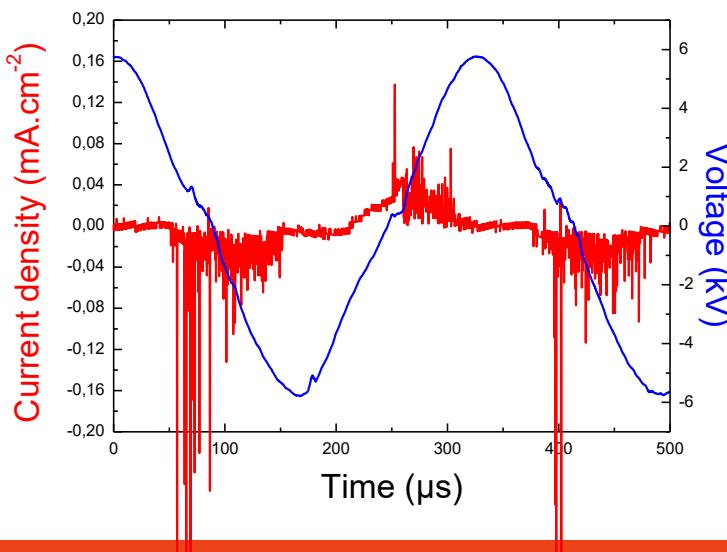
Production d'électrons germes

Dépend des conditions expérimentales : gaz, fréquence, tension, matériaux, ...

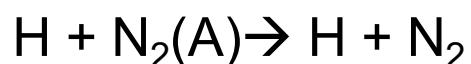
APTD N₂ = candidat parfait pour étudier ces mécanismes, APTD peut être obtenue :

- sur une large plage de fréquences (qq Hz à 10-20 kHz),
- avec différents mélanges de gaz N₂ + O₂ / N₂O / NO / H₂ ...
- et avec différents matériaux diélectriques.

Pendant longtemps, l'effet mémoire était basé exclusivement sur N₂(A) car espèce énergétique majoritaire (10¹³ /cm³) et durée de vie supérieure au temps entre 2 décharges.



N₂ + 200 ppm NH₃ → Décharge filamentaire



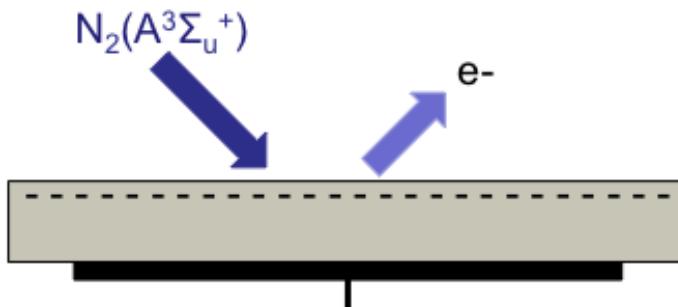
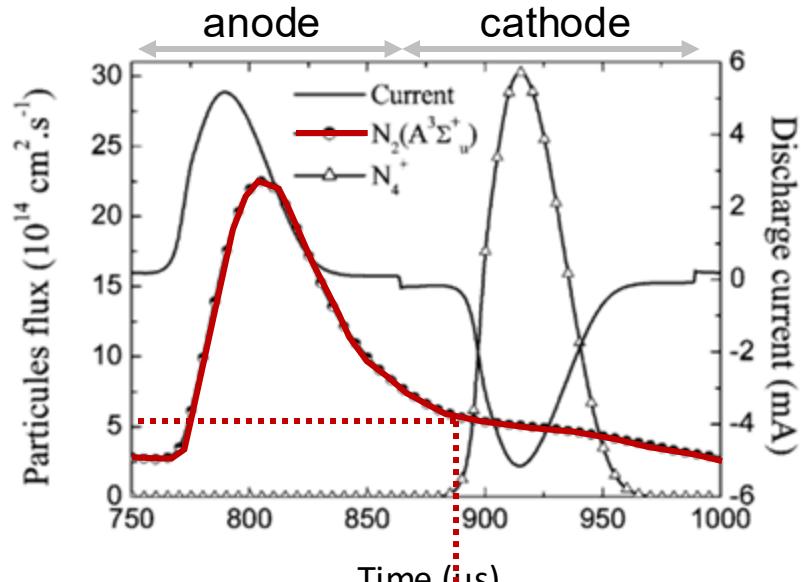
→ Mécanismes de production d'électrons germes ?

→ 3 mécanismes identifiés

Obtention d'une APTD

Production d'électrons germes

1^{er} mécanisme



→ Fort flux de $N_2(A)$ sur la cathode avant le claquage

→ Émission secondaire liée au flux de $N_2(A)$ sur la cathode chargée durant la décharge précédente ...

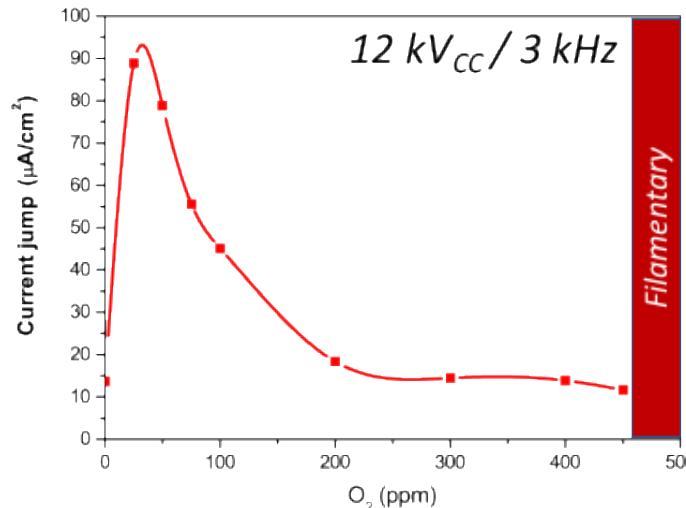
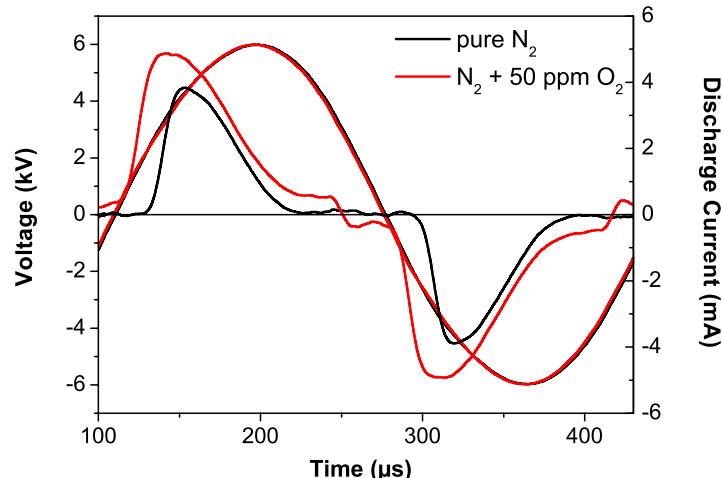
F. Massines et al., Plasma Phys. Control. Fusion 47 (2005) B577–B588
F. Massines et al., Surface and Coatings Technology 174–175 (2003) 8–14

Pendant longtemps, c'était la principale hypothèse pour expliquer la pré-ionisation ...

Obtention d'une APTD

Production d'électrons germes

Cependant, si on ajoute qq ppm de O₂ (ou NO, N₂O) ...

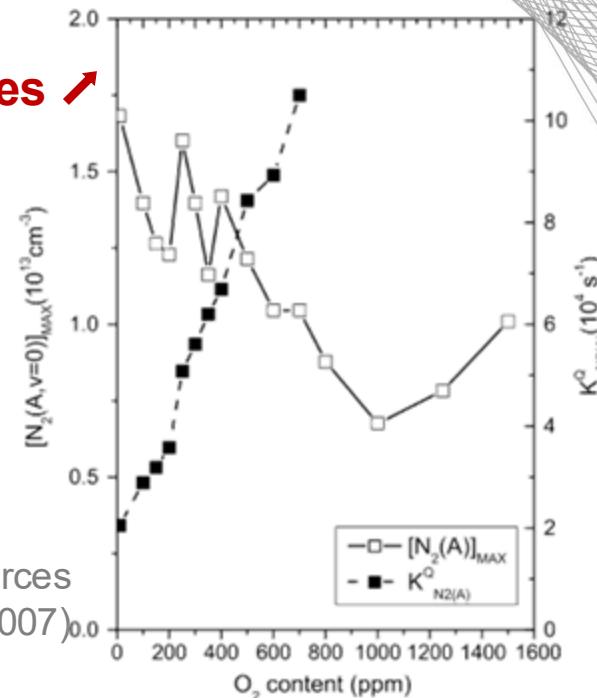


→ Saut de courant ↗ donc production e- germes ↗
→ Tension de claquage ↘

→ Quenching par O₂ et O, [N₂(A)] ↘

→ L'augmentation du saut de courant ne peut pas être liée à l'émission secondaire liée au flux de N₂(A)

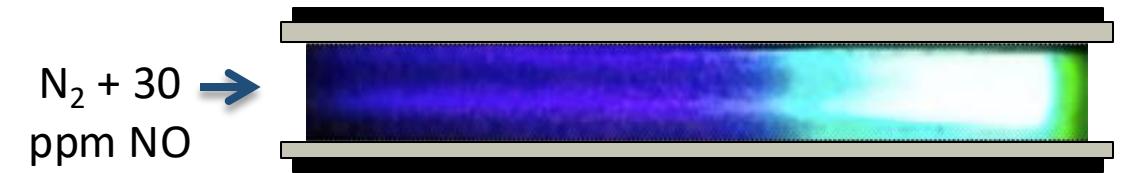
G. Dilecce *et al.*, Plasma Sources Sci. Technol. 16, 511 (2007)



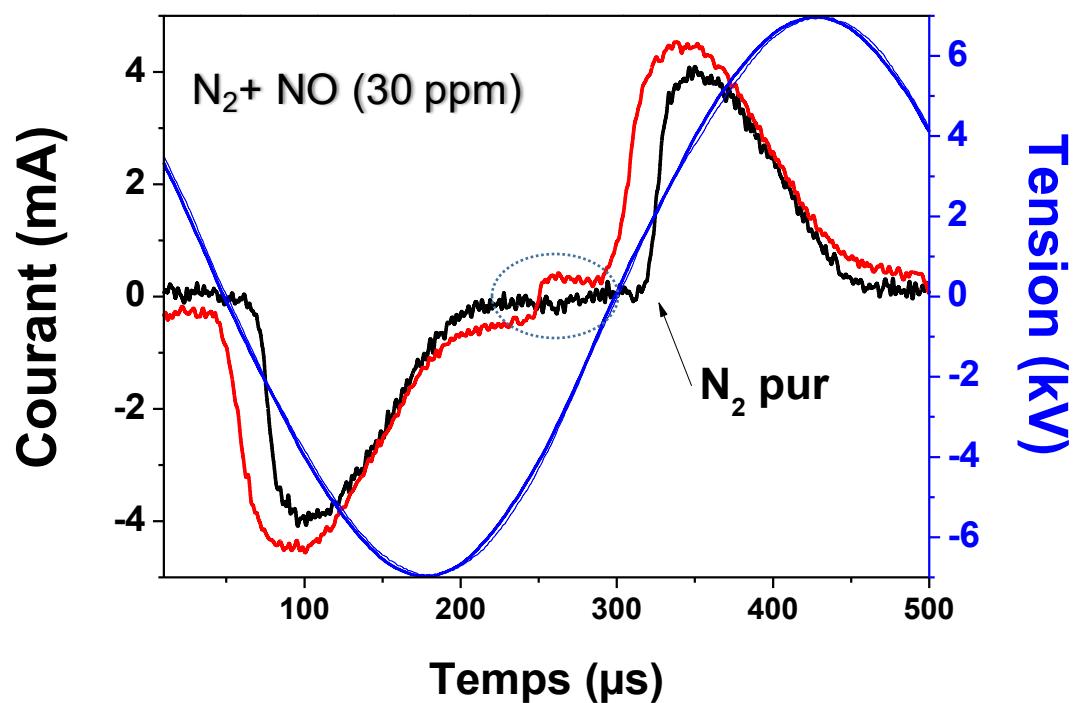
→ Saut de courant ↗ à faible concentration avant de ↘
→ Optimum pour 25-50 ppm de O₂

Obtention d'une APTD

Homogène ? Vraiment ?



C Tyl *et al.*
J. Phys. D: Appl. Phys. 51 (2018)



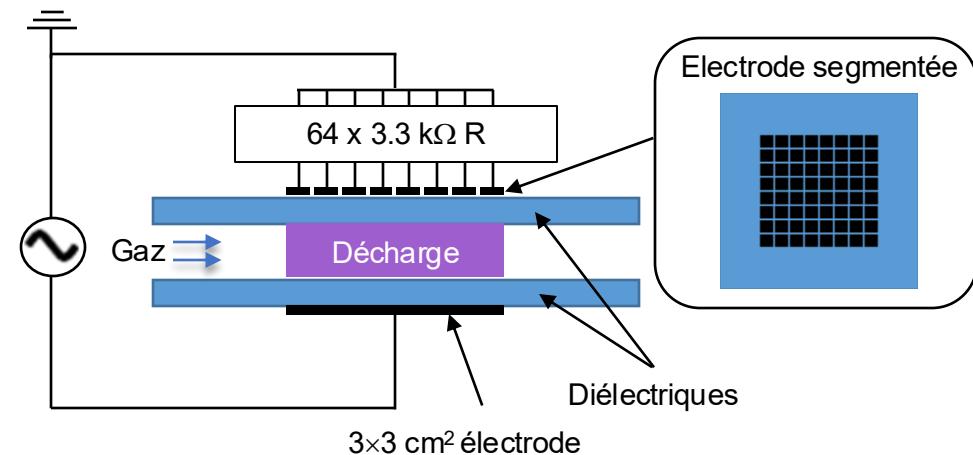
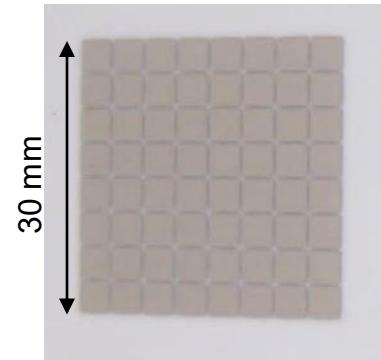
→ Décharge homogène ? Diffuse ?

→ Besoin de résolution spatiale (en fonction du temps de résidence du gaz) sur les mesures OES et électriques

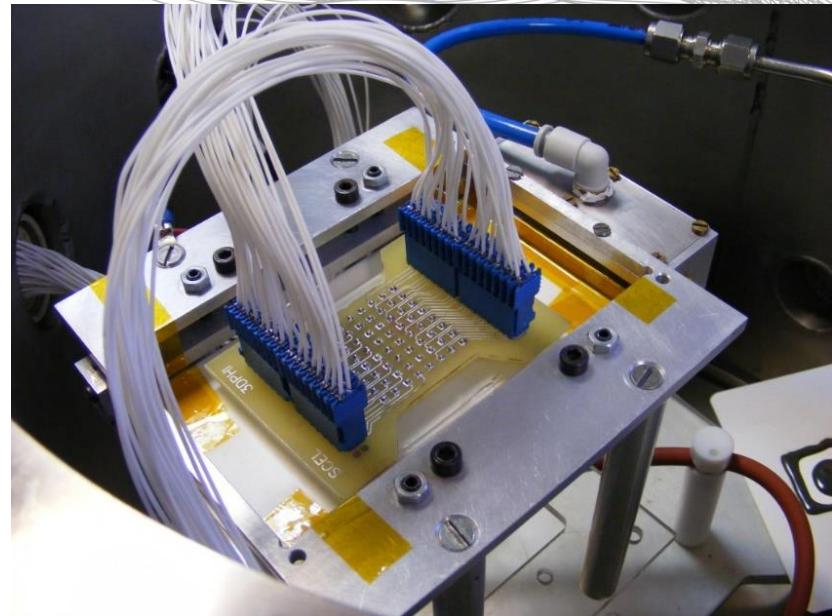
Obtention d'une APTD

Mesures électriques résolues spatialement

- Electrode de masse divisée en 64 zones (11.56 mm^2)
- $350 \mu\text{m}$ entre chaque électrode
- Mesure du courant à l'aide de 64 shunt résistifs
- **Décharge non impactée par le fractionnement ...**



Electrode réalisée par sérigraphie



Développement d'un système d'acquisition :

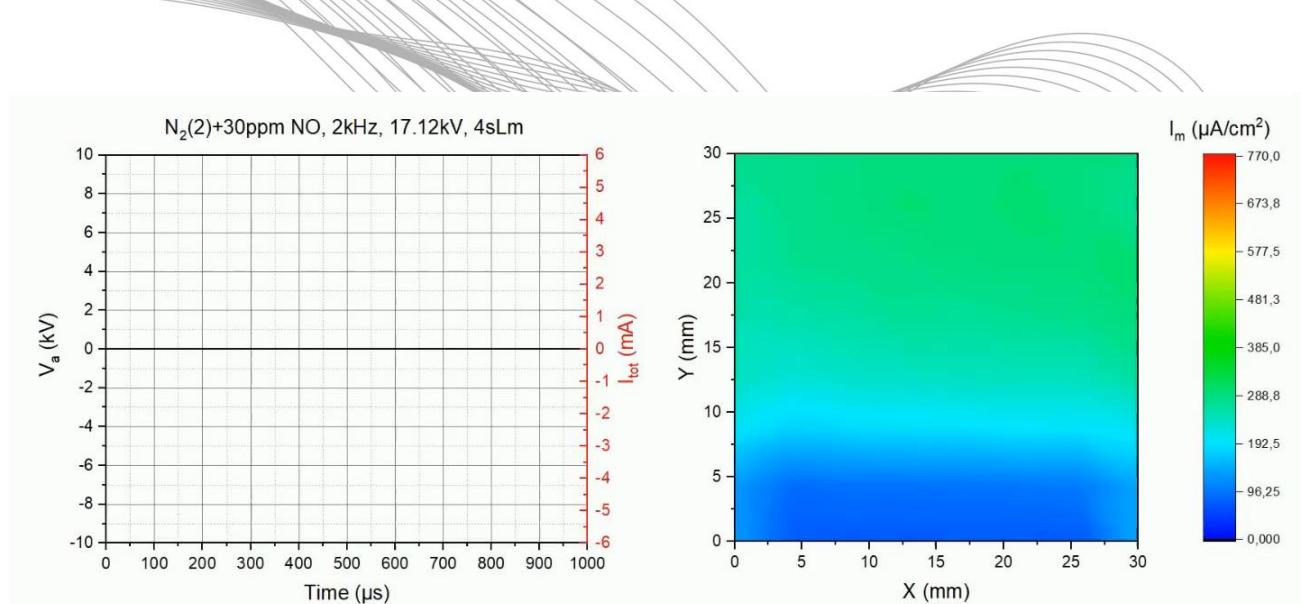
- 66 signaux analogiques simultanément (64 courants, V et I)
- Echantillonage (24 MS/channel/s)
- Profondeur mémoire 4096 points



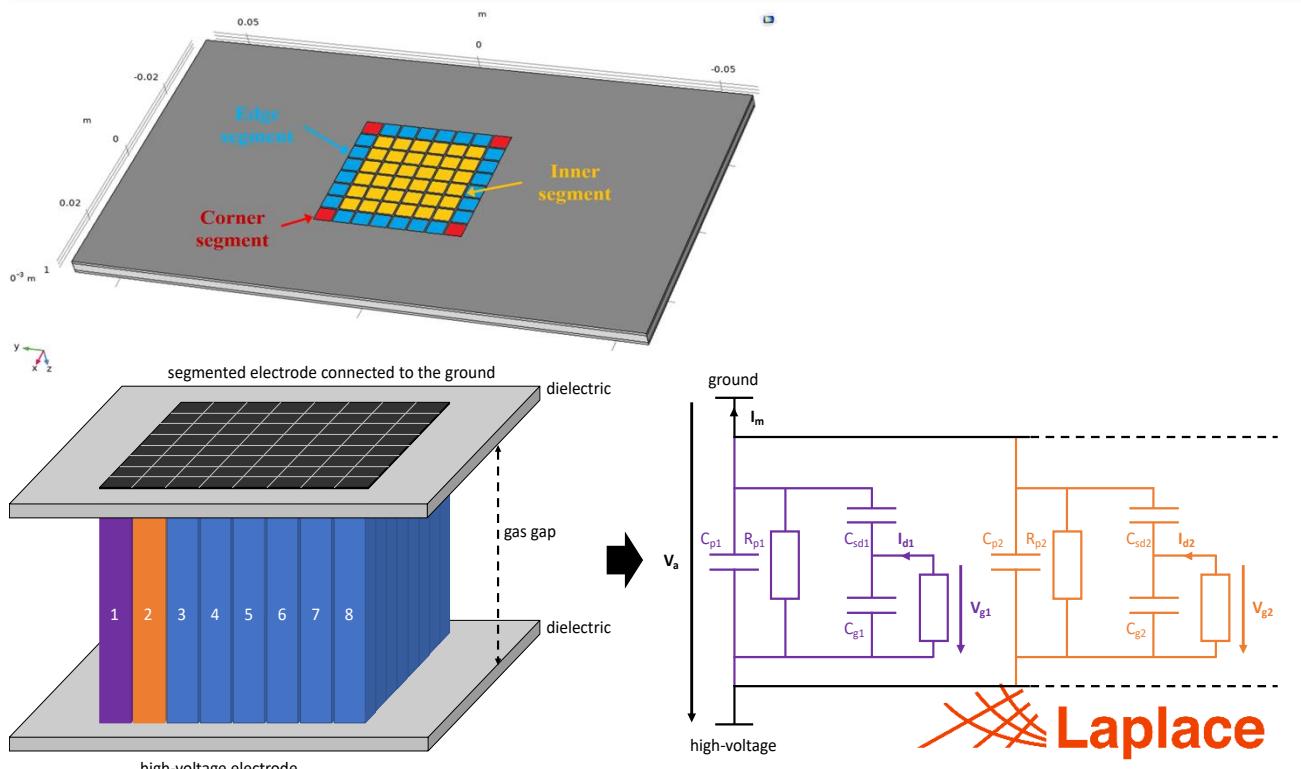
Obtention d'une APTD

Mesures électriques résolues spatialement

Mesure simultanée des courants sur les 64 zones :



**Détermination des capacités gaz et diélectrique :
COMSOL + mesure**



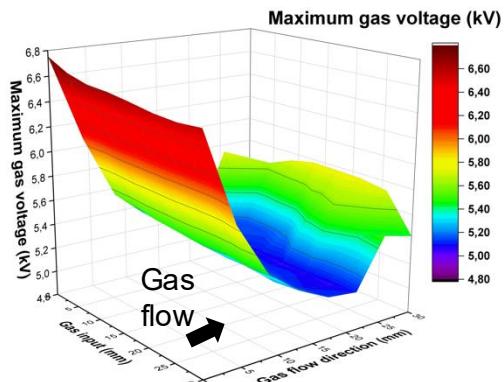
Détermination Tension gaz et courant de décharge :

- Tension appliquée
- Modèle électrique équivalent sur chaque zone

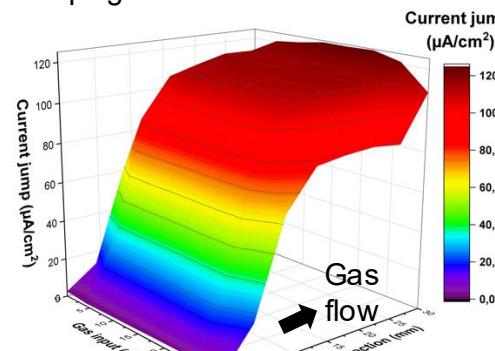
Obtention d'une APTD

Production d'électrons germes

Mesures électriques résolues spatialement



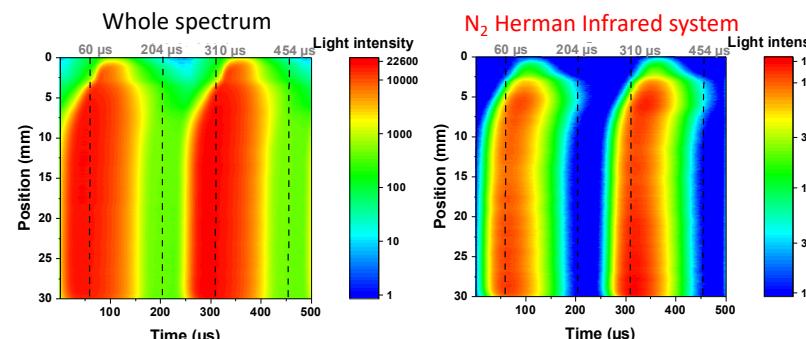
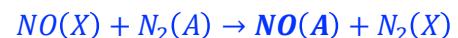
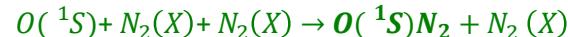
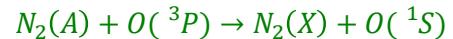
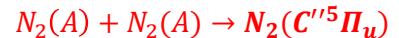
Tension de claquage



Production d'e- germes entre 2 décharges

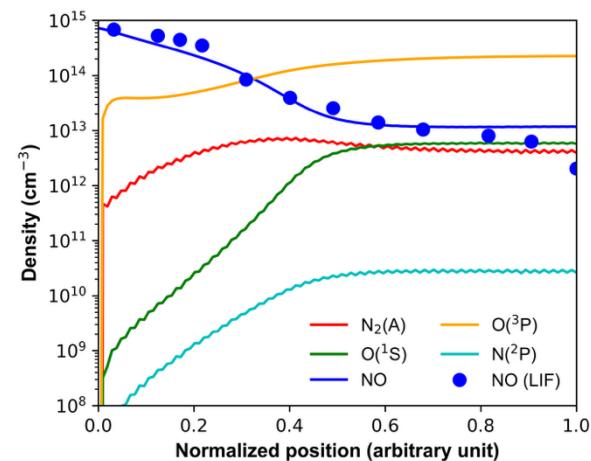
OES résolues spatialement

Entre 2 décharges
(pas d'excitation électronique) :



Mesures LIF et modélisation 0D de la cinétique chimique

LIF : densités $N(^4S)$, $O(^3P)$, NO
Modélisation 0D avec calcul du saut de courant

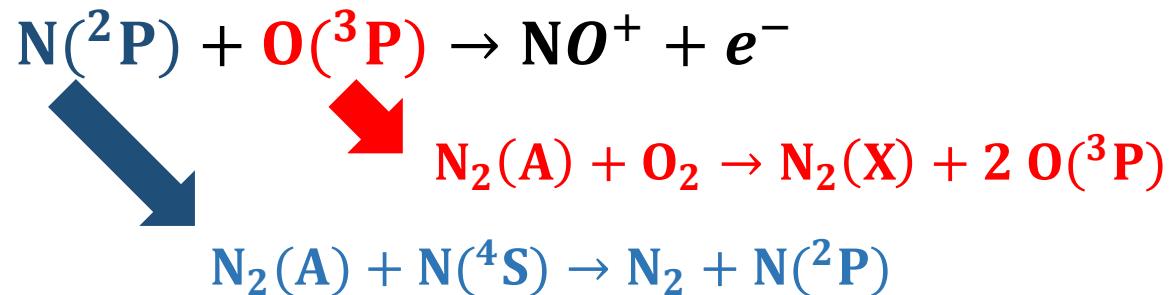
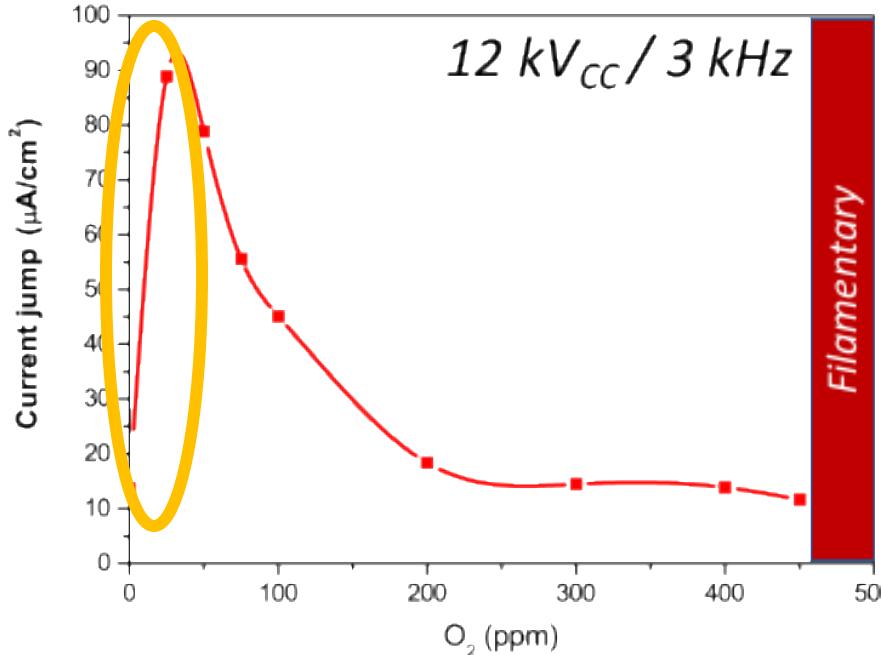


$N_2 + 30 \text{ ppm NO}, 4 \text{ slm}$
 $\text{gap} = 2 \text{ mm}$
 $f = 2 \text{ kHz}, V_a = 17.12 \text{ kV}_{pp}$

Obtention d'une APTD

Production d'électrons germes

2^{ème} mécanisme : en présence d'un gaz oxydant (O_2 , N_2O , NO) en faible concentration, la production d'électrons germes augmente du fait de l'**ionisation associative** en phase gaz :



- Métastables $N_2(A)$ nécessaires
- Optimum entre la production de $N(^2P)$ et $O(^3P)$ et le quenching de $N_2(A)$
- Production de NO^+ et e^- à faible E
- Probablement le mécanisme principal en N_2

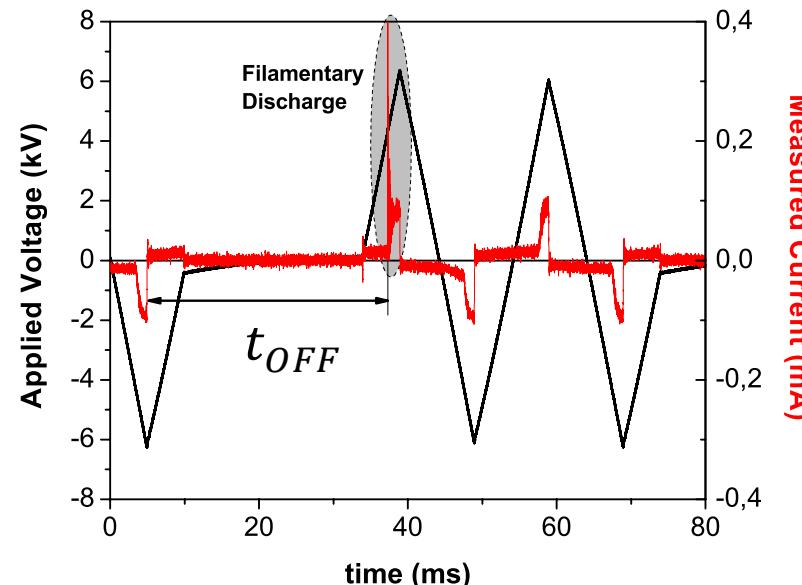
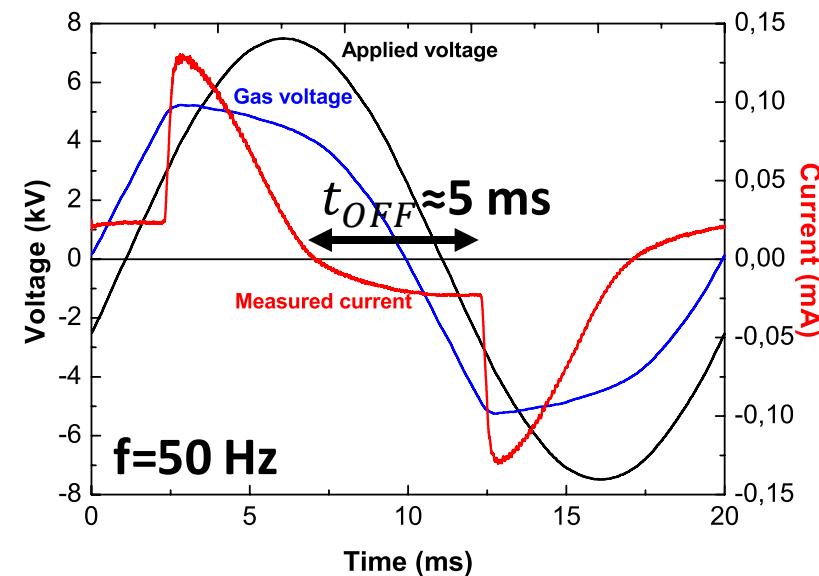
C. Tyl *et al.*, 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 354001

X. Lin *et al.*, 2020 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** 205201

Obtention d'une APTD

Production d'électrons germes

Pour les mécanismes précédents les $N_2(A)$ sont nécessaires. Cependant, une APTD peut être obtenue en N_2 à faible fréquence ...

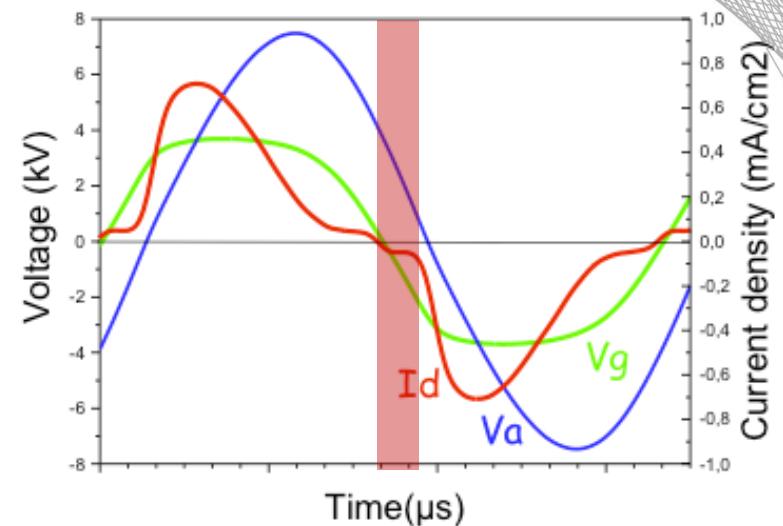
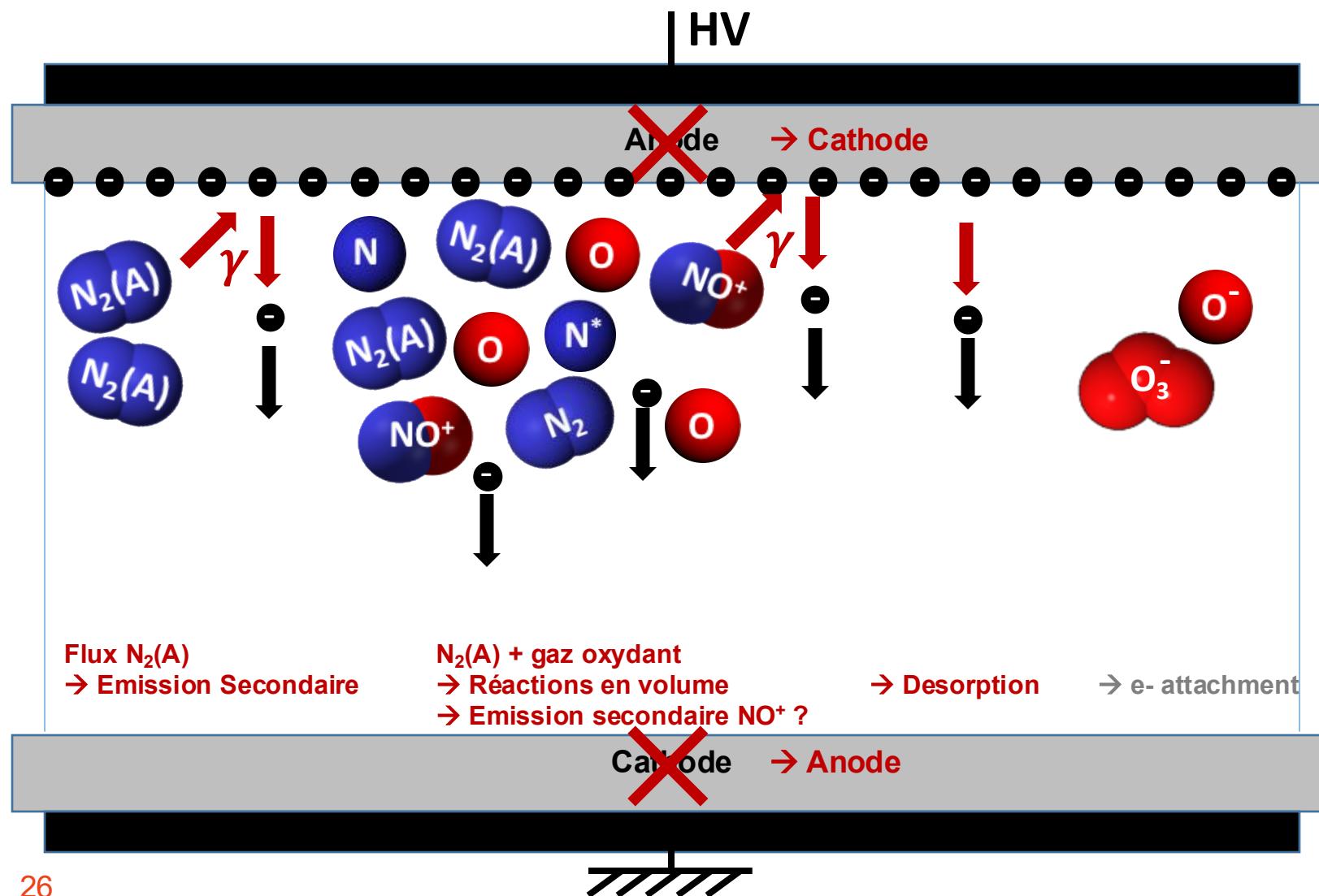


- À "très" faible fréquence
- Décharge de Townsend
 - Pas de $N_2(A)$ avant le claquage
 - Effet mémoire toujours présent (1ères décharges filamentaires)

- Effet mémoire pour APTD N_2 ne peut pas être basé exclusivement sur $N_2(A)$!
- 3^{ème} mécanisme lié aux surfaces → désorption
- Émission d'électrons piégés à la surface du diélectrique lors de la décharge précédente ...

Obtention d'une APTD

Production d'électrons germes : Synthèse



Emission secondaire
+
Ionisation Associative
+
Désorption

Attachment Electronique

Laplace

Obtention d'une APTD

Production d'électrons germes : Synthèse

Décharges en N₂ et mélanges N₂+”O” :

→ Effet mémoire fortement lié à N₂(A)

→ L'ionisation associative semble être le principal mécanisme

ex: production d'électrons germes au passage N₂ Alphagaz 1 à Alphagaz 2 (1 ppm à 0,1 ppm de O₂)

→ A faible f, temps entre 2 décharges trop long compare à la durée de vie de N₂(A) → desorption



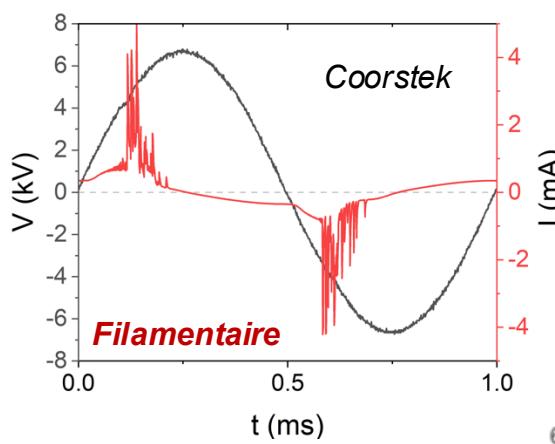
A venir : modélisation pour déterminer
l'importance relative de chaque mécanisme ...

Obtention d'une APTD

Dans d'autres gaz moléculaires ?

Effet mémoire nécessaire ... si il n'est pas basé sur N₂(A) alors :

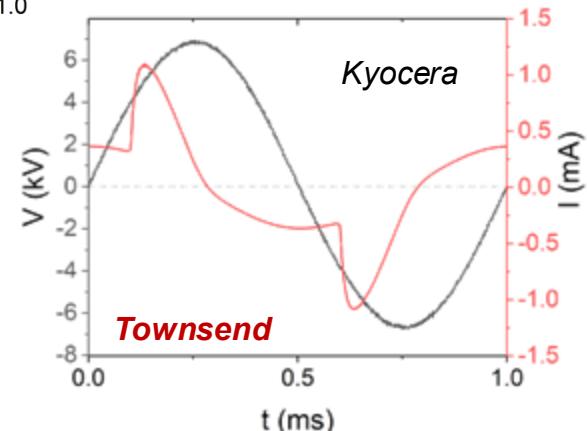
- Faible production d'électrons germes → **fonctionnement à faible fréquence** (Hz → qq kHz)
- Désorption électronique → **fortement dépendant des matériaux diélectriques !**



J. Haton et al.
J. Phys. D: Appl. Phys. in press (2025)
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/ae148f>

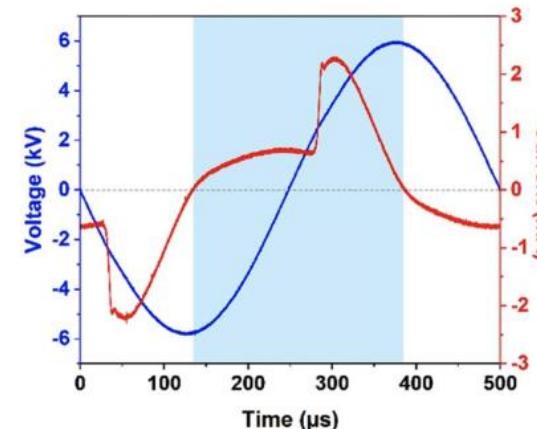
Exemple Air

Conditions identiques (V , f , gap, ε_r , épaisseur et pureté des diélectriques)

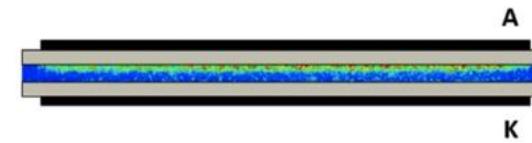


Kyocera

Townsend



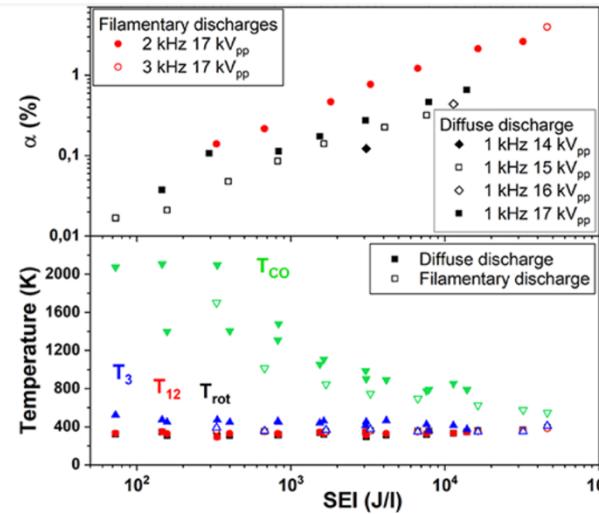
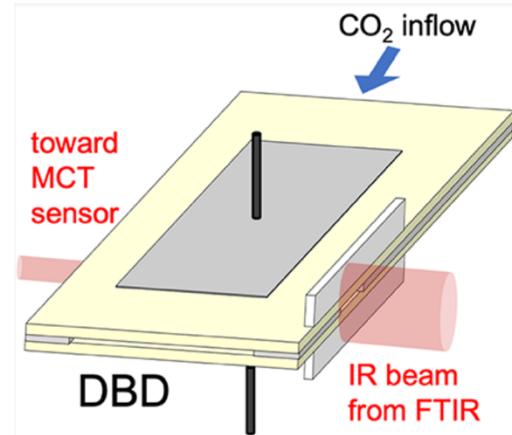
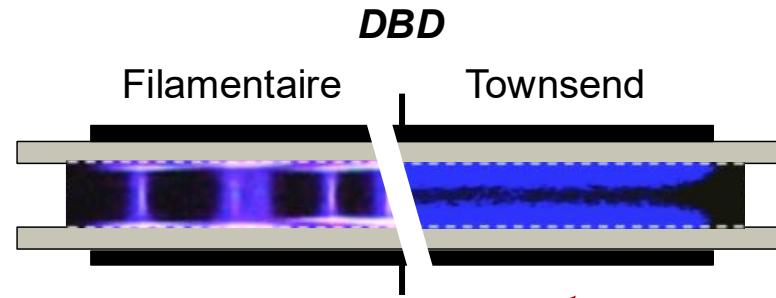
C. Bajon et al.
Plasma Sources Sci. Technol. 32 (2023)



Avec le "bon" diélectrique → on peut obtenir une APTD dans différents gaz (Air, N₂O, CO₂)

APTD, quel intérêt ?

Pour l'étude des décharges



Étude de la physique des décharges :

- Mécanismes de claquage
- Production d'électrons à faible champ

Étude de la physico-chimie des décharges :

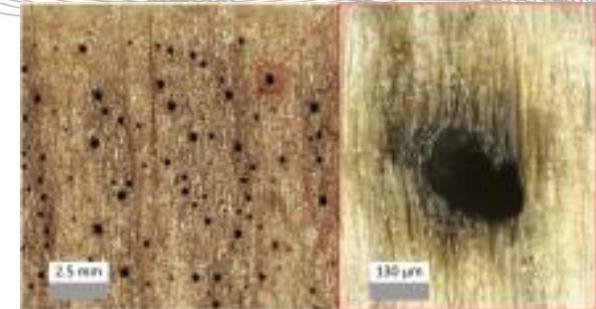
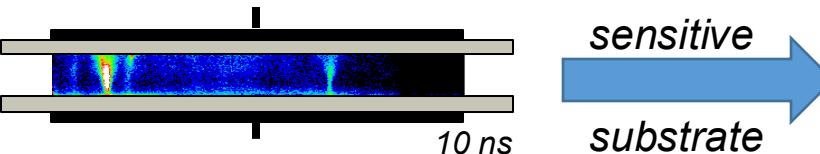
- Cas test étude physico – chimie
- Champ E connu à chaque instant et chaque position
- Couplé à des diagnostics FTIR, LIF, CRDS ...
- Données pour les modèles
 - validation ? simplification ?
 - modèles + robustes

cf. présentation Simon Dap ce matin

APTD, quel intérêt ?

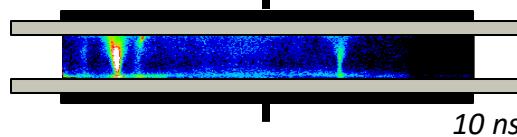
Pour le dépôt de couches minces

- Permet de limiter les dommages sur les surfaces sensibles par rapport aux décharges filamentaires ...



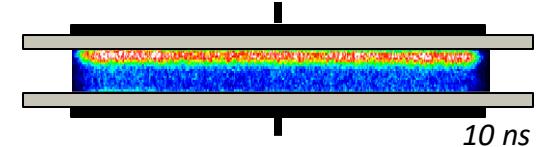
J. Profili, Surf. Coat. Technol. 309
729 (2017)

- Meilleur contrôle de l'énergie déposée : dépôt plus uniforme



VS

Même puissance ($\sim 10W/cm^3$)
Même gaz (SiO_x film)

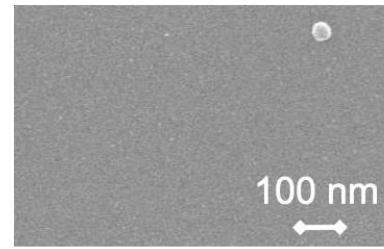
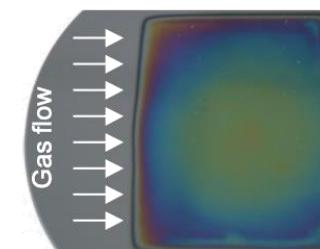
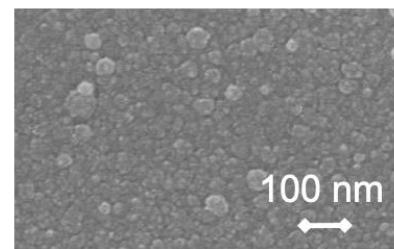
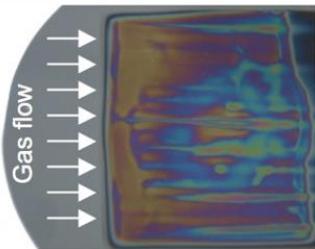


Energie localisée
(10 ns, $r=100 \mu m$) → n_e élevée ($10^{14} cm^{-3}$)
forte dissociation du précurseur

Beaucoup de radicaux
produits dans les
microdécharges

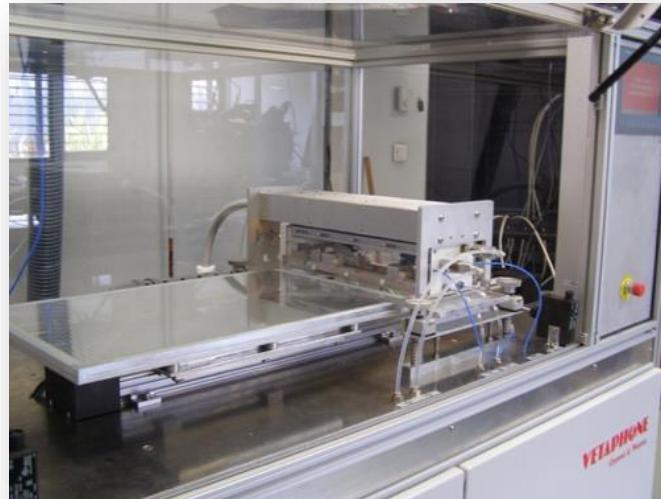
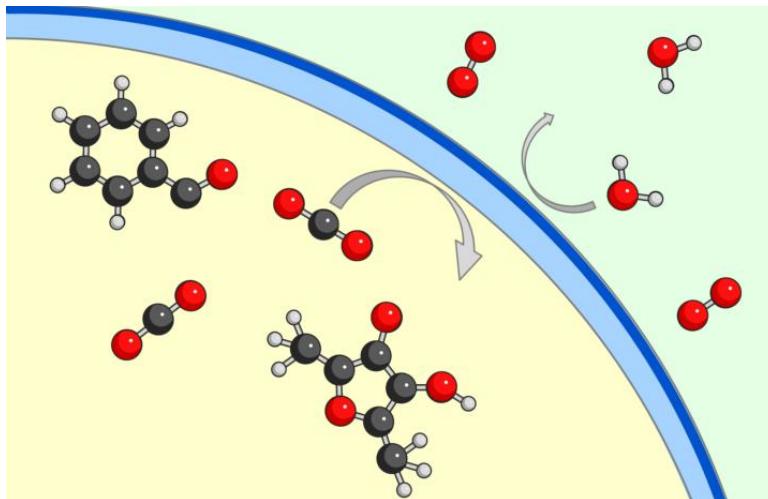
Energie distribuée de
manière homogène
(100 μs , toute la surface)

Dissociation du
précurseur plus
lente → Plus de temps pour
que les radicaux
atteignent la surface



APTD, quel intérêt ?

Pour le dépôt de couches minces : Exemple couche barrière



- DBD N₂ avec contrôle de l'atmosphère
- Electrodes 2 x 25 cm²
- Déplacement linéaire du substrat dans la zone de décharge
- Alimentation optimisée (courant carré)
- Injection de gaz optimisée pour le transfert des radicaux vers la surface

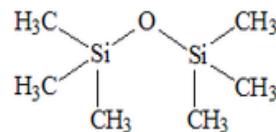
Illustration : <https://www.igvp.uni-stuttgart.de/>

Dépôt SiO₂ sur polymère

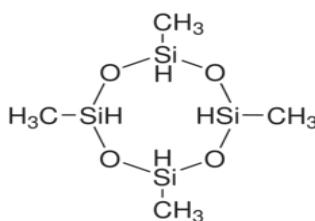
Décharge Homogène
HMDSO: 88 nm/min for 66 W/cm³
et 6 ppm de précurseur

Décharge Filamentaire

TMCTS: 368 nm/min pour 60 W/cm³
et 2 ppm de précurseur



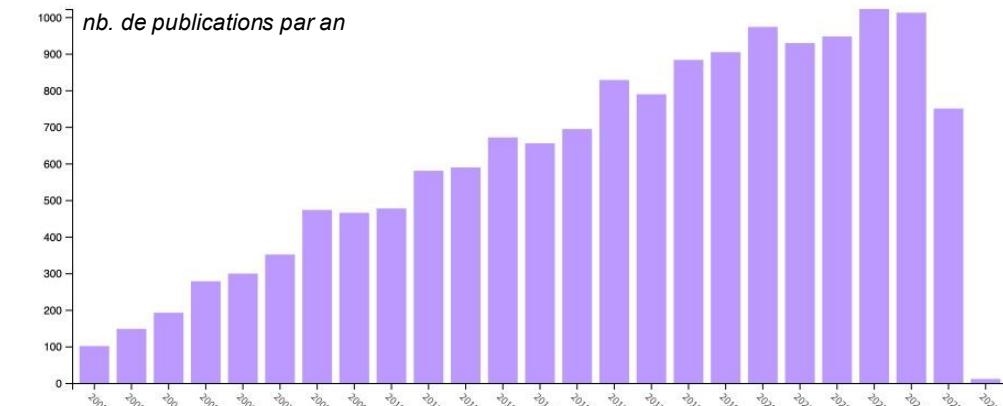
0.2 - 0.5



1.5

Oxygen Transmission Rate (OTR)
cm³/m²/24h

Conclusion



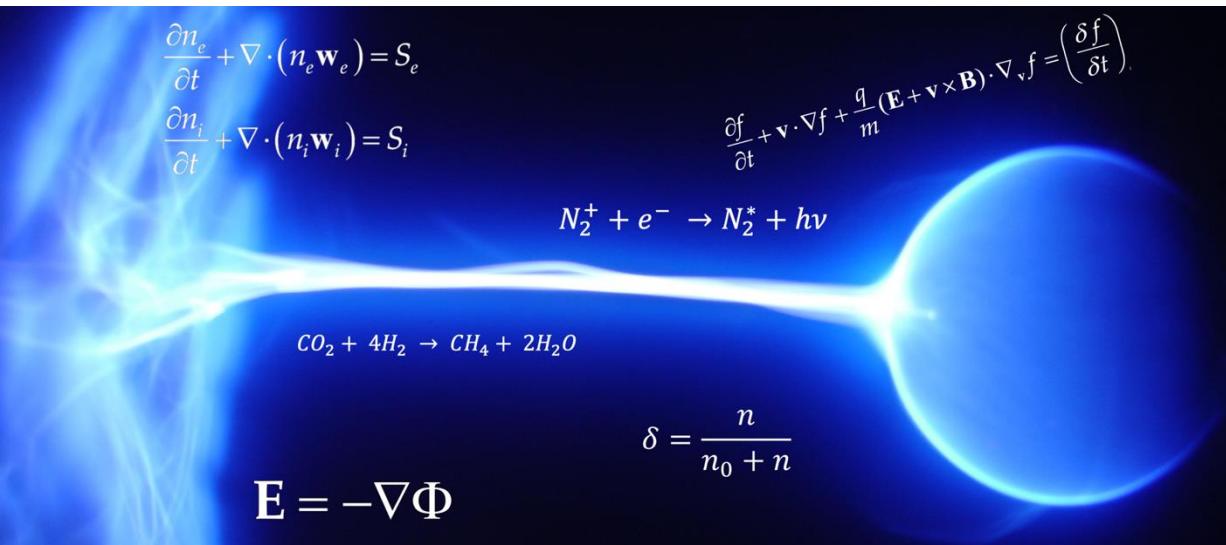
Décharges à Barrières Diélectriques :

- Domaine de recherche actif
 - nombreuses études
 - nombreuses applications
- Différents régimes de décharges
- Nombreuses configurations
- Nombreux diagnostics mis en oeuvre

Décharges homogènes / diffuses :

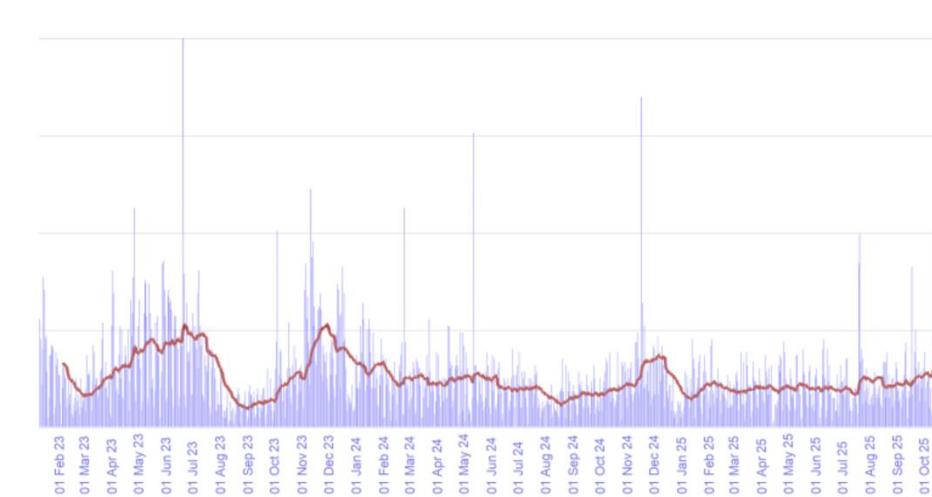
- Peuvent-être obtenues dans différentes configurations et gaz
- APTD : N₂, N₂-O₂, Air, N₂O, CO₂, prochain gaz ou mélange ?
- Possibilité de mesurer « facilement » E
- « Simple » à modéliser
- Outil pour l'étude de la physico-chimie des décharges
- Application pour le dépôt de couches minces

Offres stages / emplois / thèses ...



<https://formations-plasmas.fr>

NOMBRE TOTAL DE VISITES PAR JOUR
11/01/2023 à 25/10/2025 15,403 total visites pour la période



Offre	Lieu	Détail
Numerical and Experimental Development of Solar Thermophovoltaics	Odeillo (66)	Master
Stage Master : Caractérisation in-situ d'un procédé PECVD de dépôt de couches minces pour la photonique	Toulouse	Master
Développement de capteurs pour l'analyse des décharges électrostatiques induites par les irradiations de haute énergie	ONERA, Toulouse	Master
analyse des plasmas micro-onde de méthane	paris	Doctorat
caractérisation d'un plasma micro-onde pour la conversion du méthane	paris	Doctorat
Thèse Cifre Radiall - IJL	Nancy	Doctorat
Researcher in atmospheric plasma deposition of functional coating on textiles	Luxembourg	CDD
PhD offer (funding secured) - Ultra-wide bandgap semiconductors synthesis using low-temperature plasmas: depositions, fundamental aspects and process optimization through artificial intelligence approach	Palaiseau	Doctorat
Multiphysics modeling and experimental validation of dielectric barrier discharge in a liquid medium for advanced water treatment	Nancy, France (Institut Jean Lamour)	CDD

- ✓ 14 offres en ligne actuellement
- ✓ 270 offres déposées depuis 2022
- ✓ Diffusions aux étudiants à Toulouse
- ✓ Diffusions aux responsables de formation plasmas
- ✓ Diffusion LinkedIn et RPF

Merci pour votre attention et ...

rendez-vous en 2195 pour les 2 x 170 ans !

UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
Bât. 3R3, 118 route de Narbonne
31062 Toulouse Cedex 9

+33 (0)5 61 55 67 97
sec-ups@laplace.univ-tlse.fr

ENSEEIHT
2 Rue Camichel,
31071 Toulouse Cedex 7

+33 (0)5 34 32 23 91
sec-n7@laplace.univ-tlse.fr