



# 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 ...

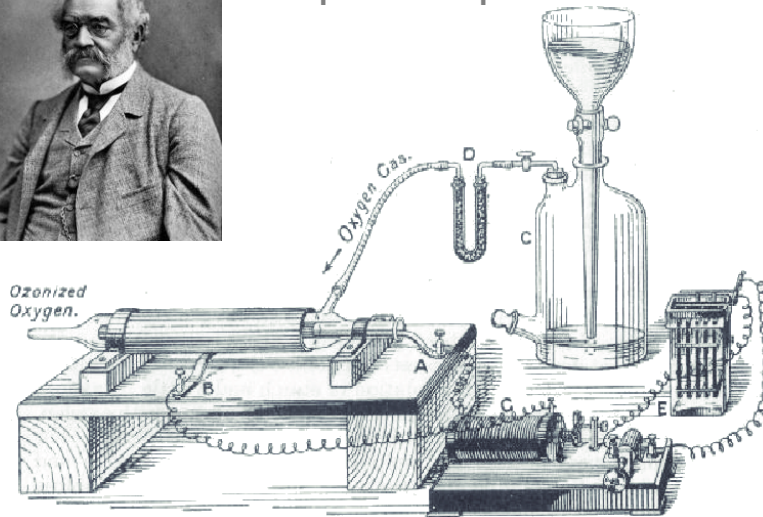


## 1857 — Découverte par Werner von Siemens (Allemagne)

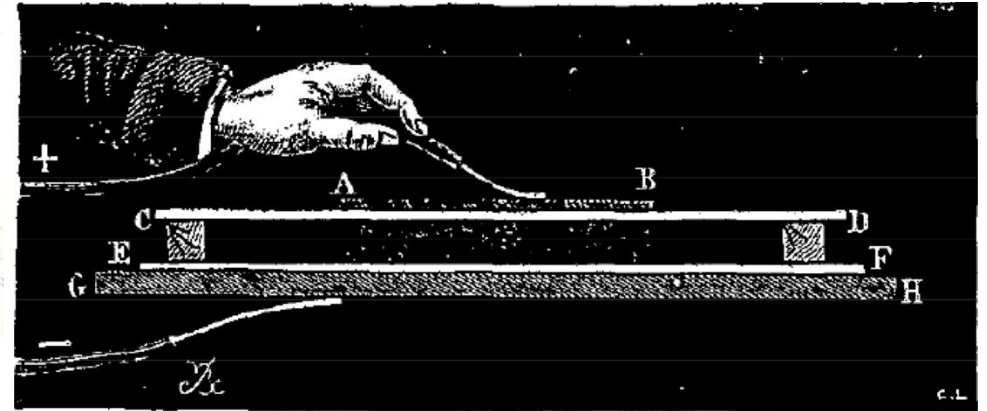
Siemens met au point un dispositif et observe une décharge lumineuse non étincelante produisant de l'ozone efficacement à température ambiante !



Dispositif de Werner von Siemens pour la production d'ozone



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



## 1855 : Expérience de Théodose 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



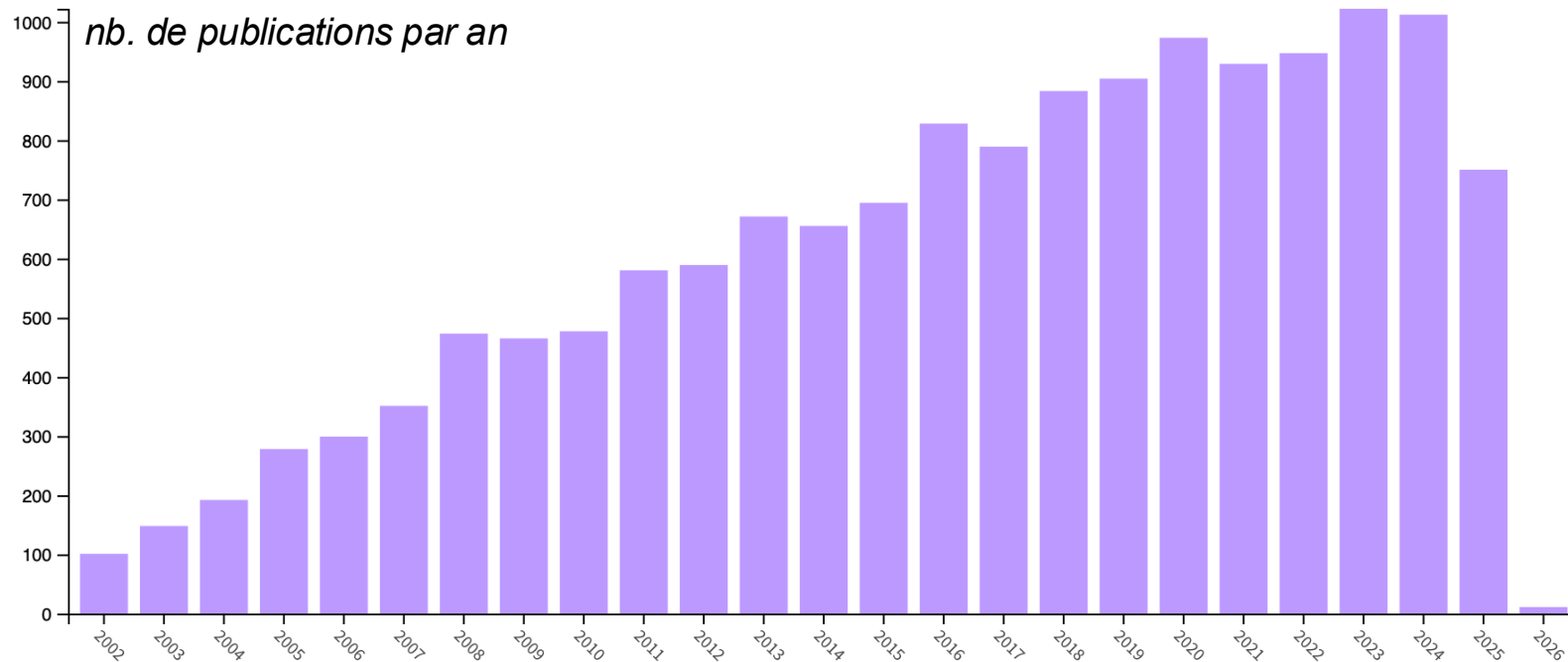
# Introduction

Une histoire ancienne ... mais pas que !



**170 ans d'histoire**

**+ de 15000 résultats depuis 1978 ...**



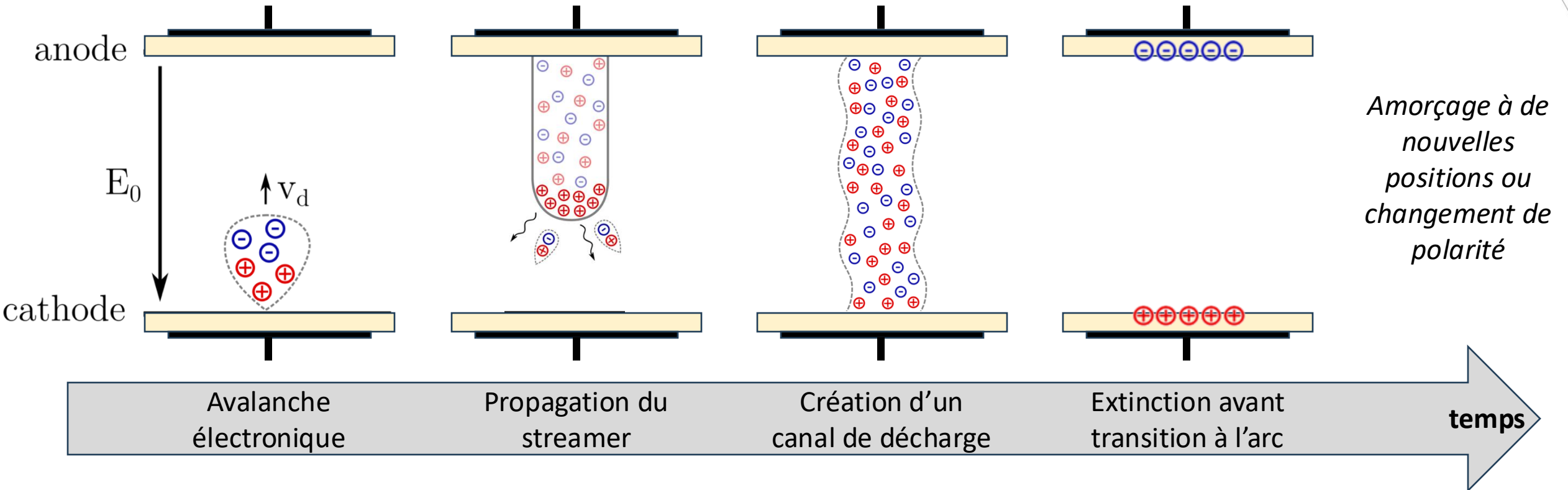
**→ Pourquoi est-ce qu'il y a toujours autant de travaux sur les DBD ?**

*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**

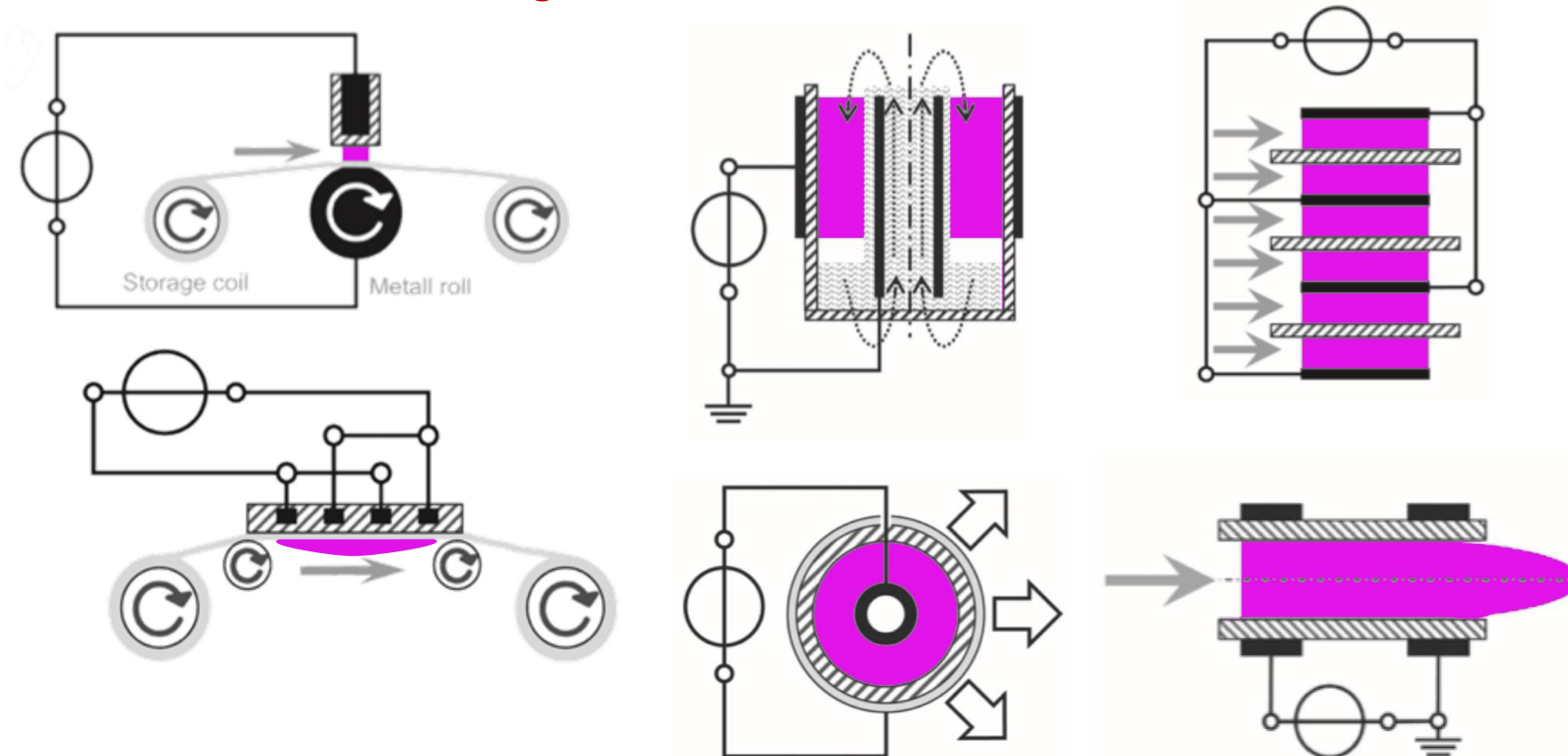


# Introduction

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 Surfactive*

→ **Flexibilité / Adaptabilité ...**

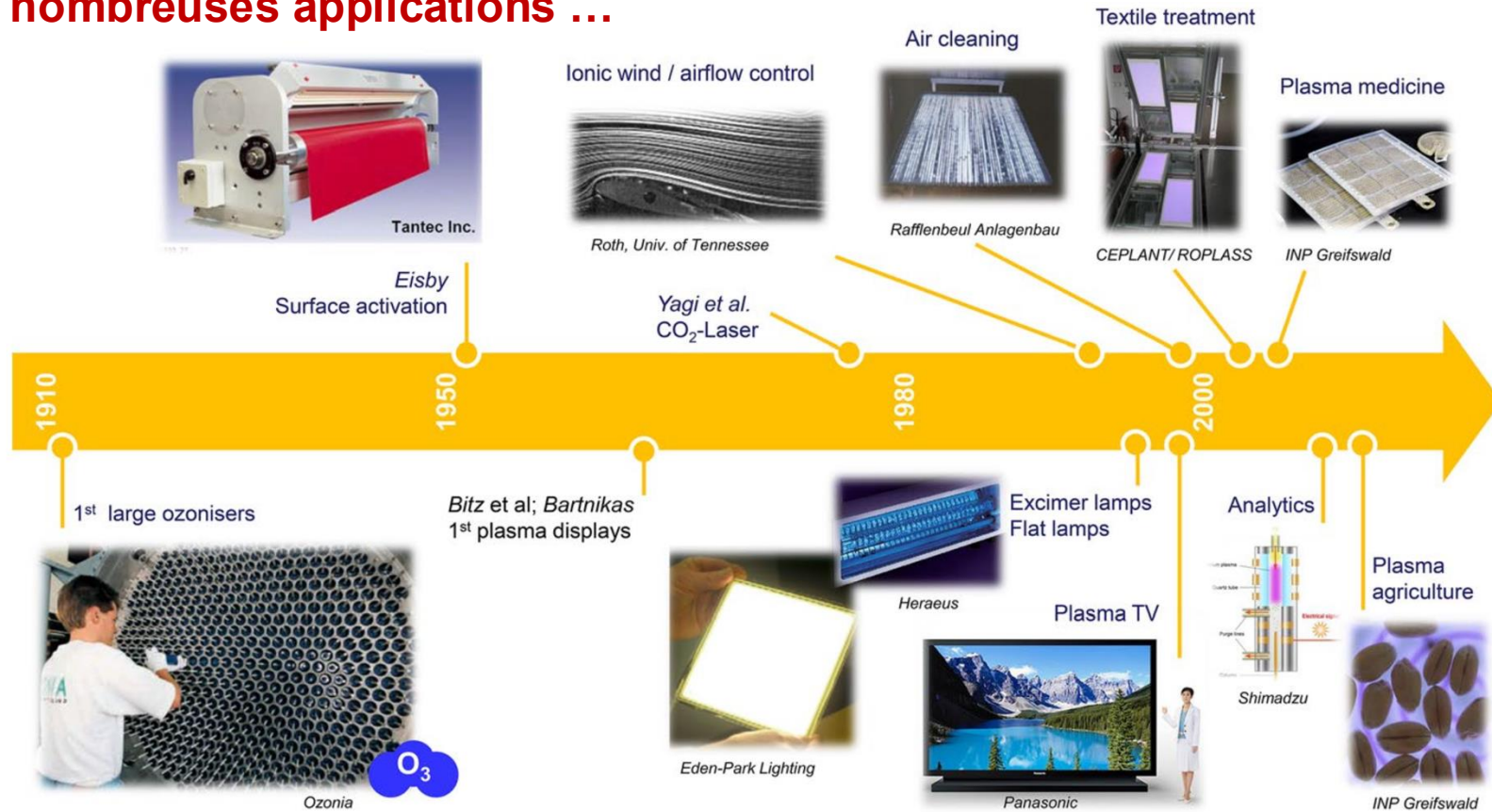
# Introduction

Secret(s) de longévité ?

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

→ Des configurations variées !

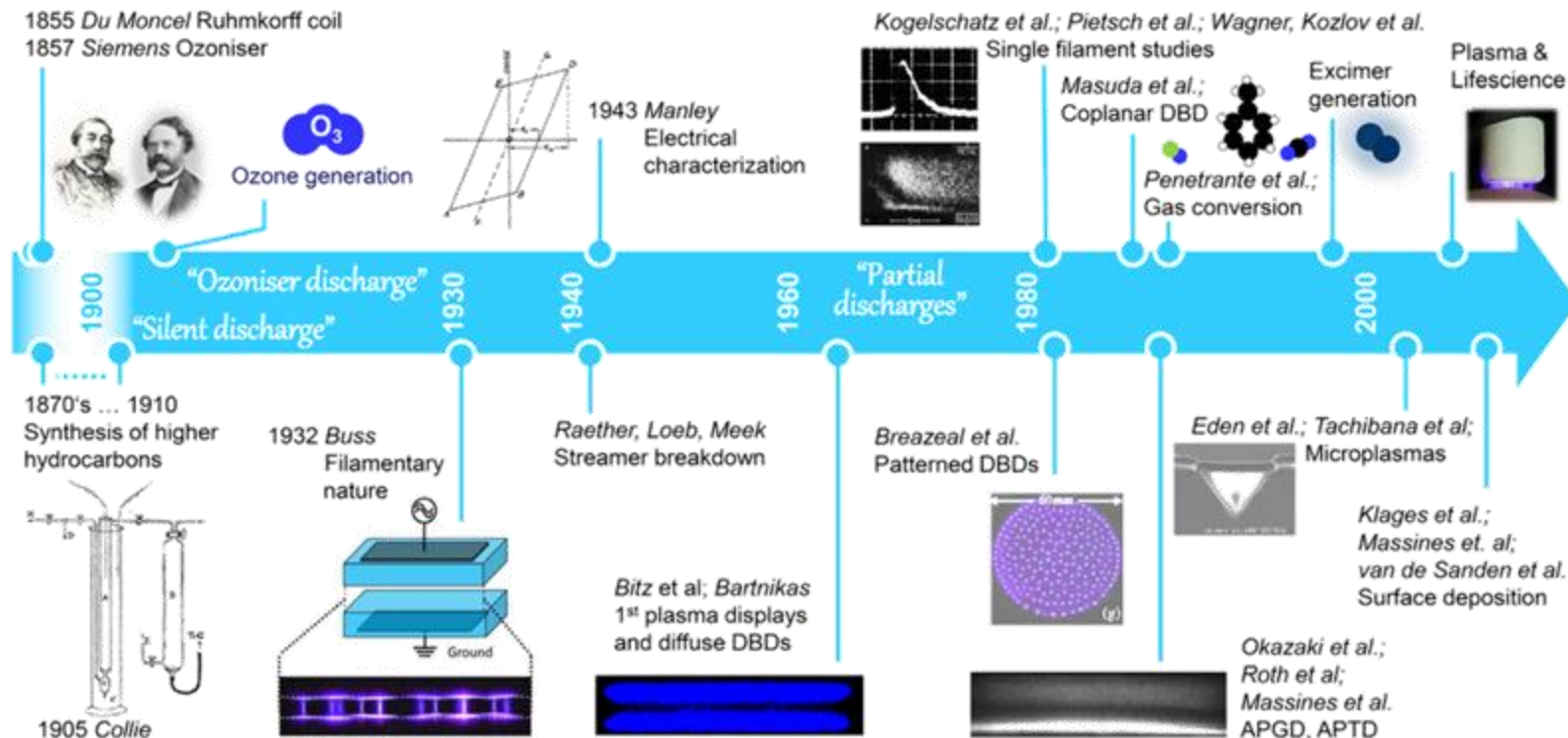
→ De nombreuses applications ...



# Introduction

Secret(s) de longévité ?

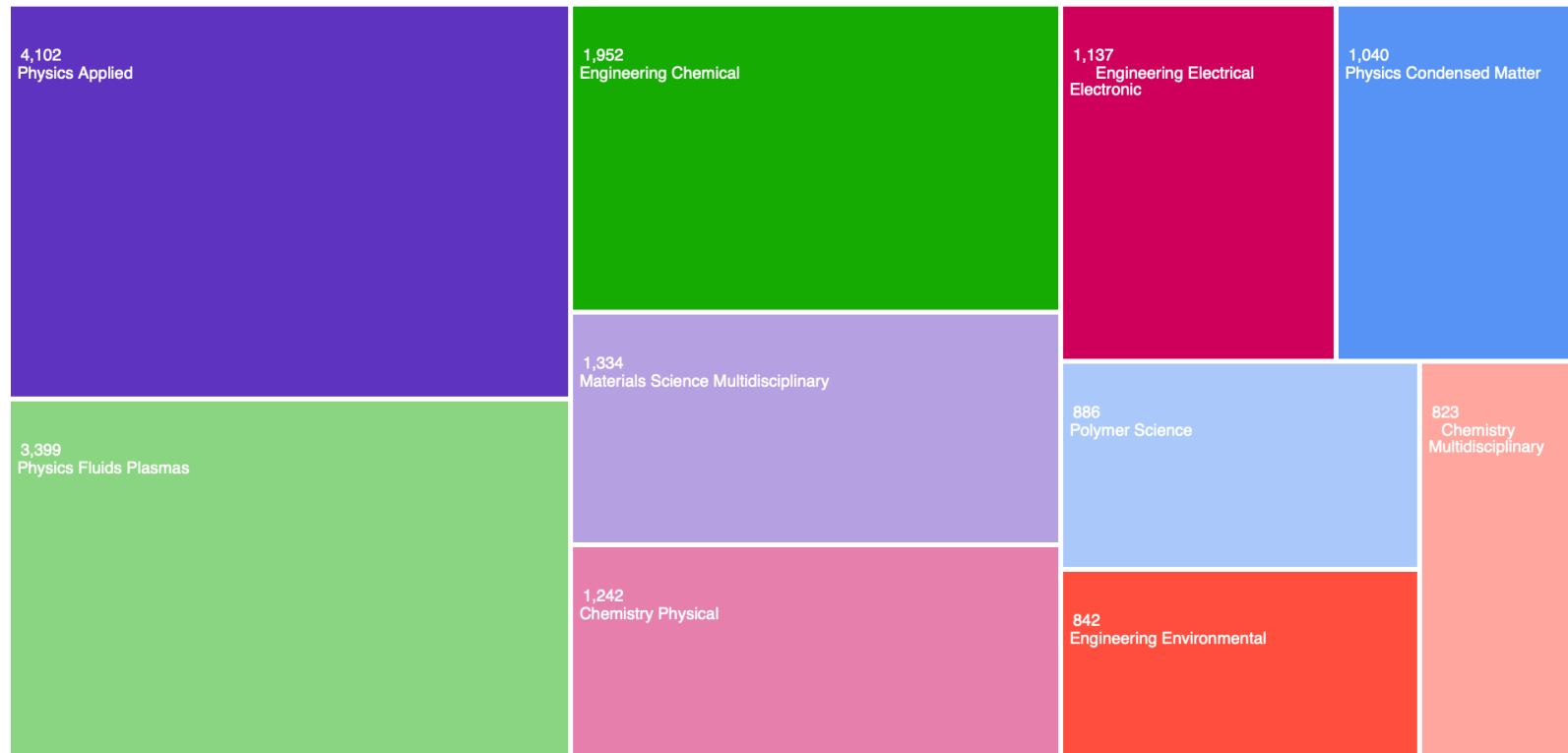
- Solution simple et robuste pour éviter la transition à l'arc
- Des configurations variées !
- De nombreuses applications ...
- De nombreux sujets de recherche !



# 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. Efficiency ... Show more

Full Text at Publisher

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

Full Text at Publisher

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 ... Show more

Free Full Text From Publisher

2,781  
Citations  
308  
References

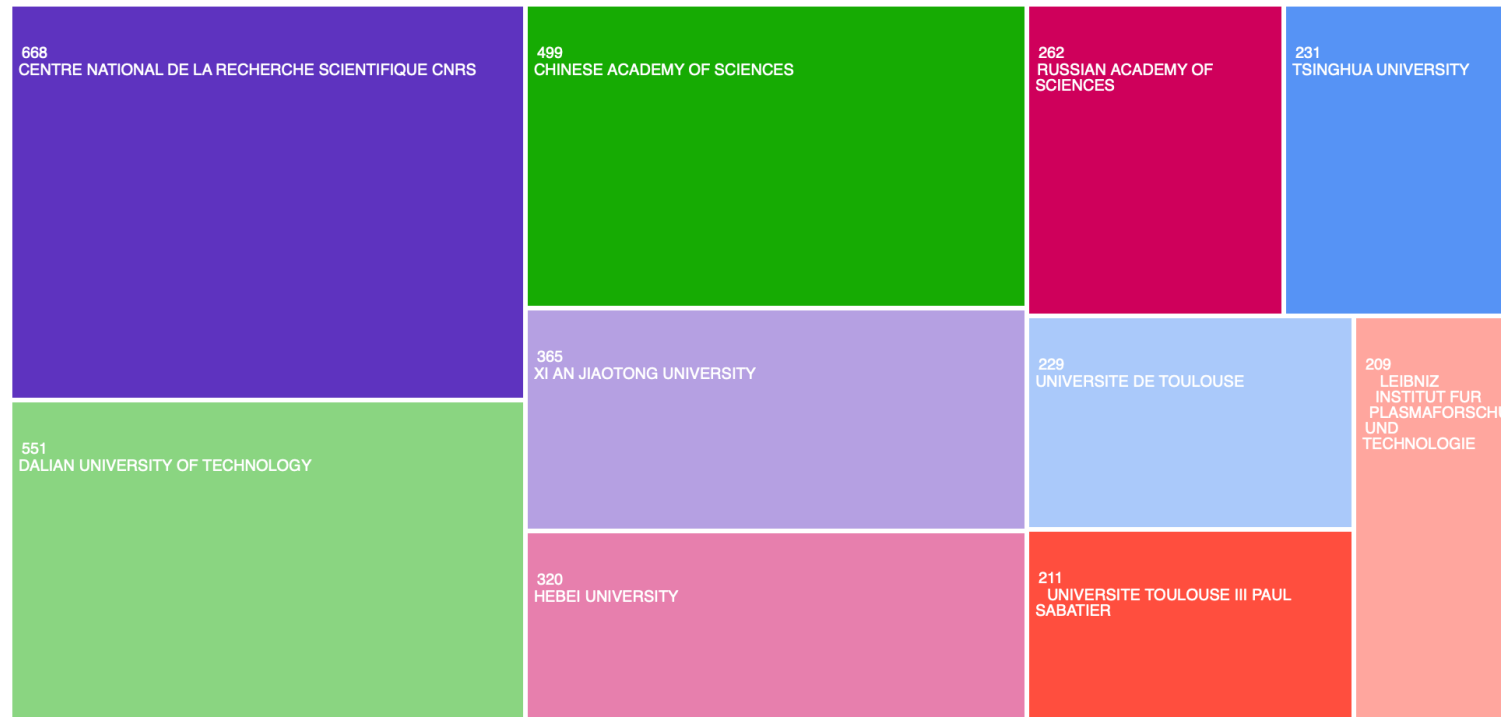
Related records

1,103  
Citations  
151  
References

Related records

821  
Citations  
26  
References

Related records

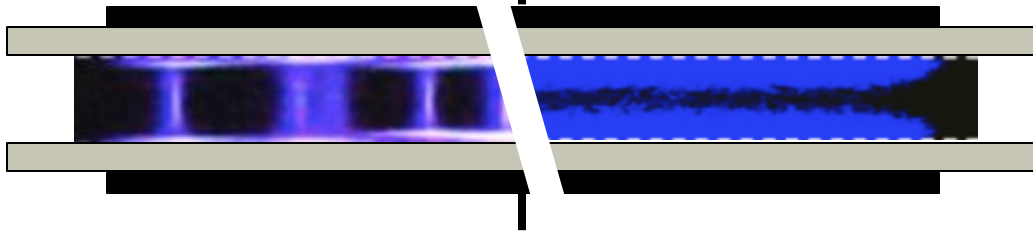


# Plan

## *DBD plan-plan*

Filamentaire

Homogène



→ DBD Filamentaire

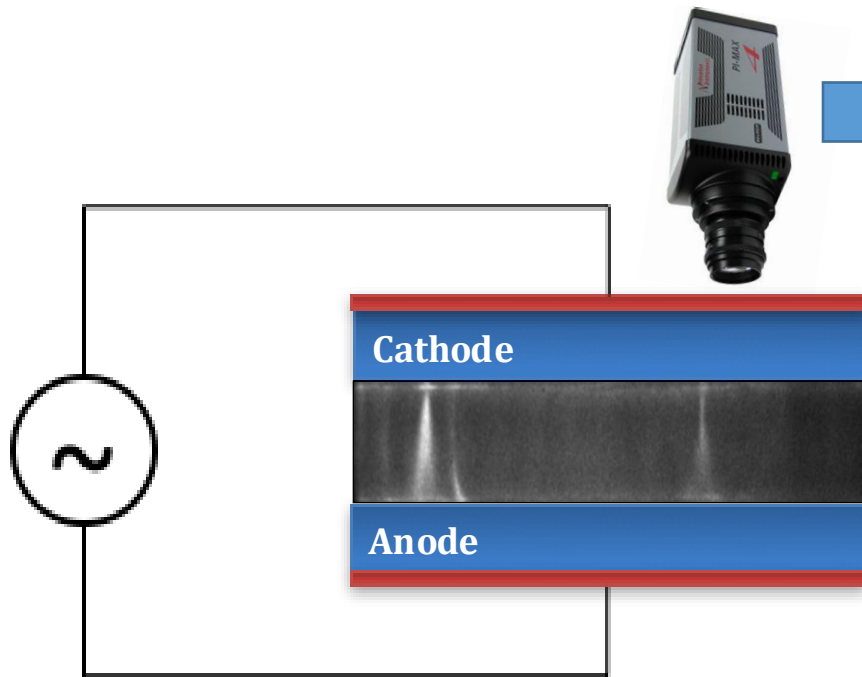
→ DBD Homogène ?

→ Obtention d'une APTD

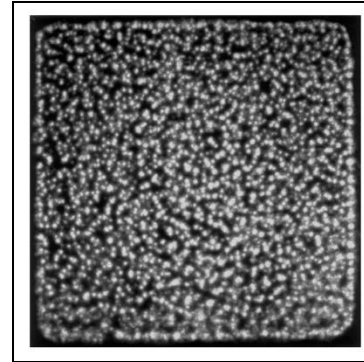
→ APTD, quel intérêt ?

# DBD Filamentaire

Régime normal de fonctionnement d'une DBD

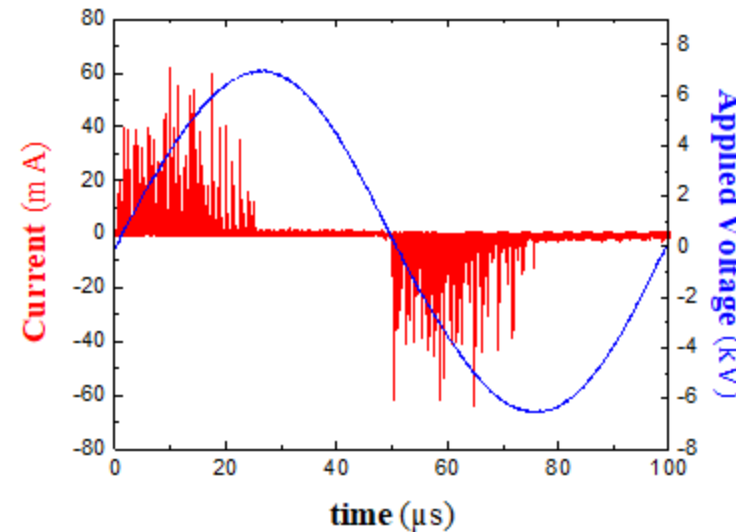


Photographie rapide avec un temps de pose de 10 ns  
d'une décharge filamentaire



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

U. Kogelschatz,  
Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003



→ **Claquage streamer**

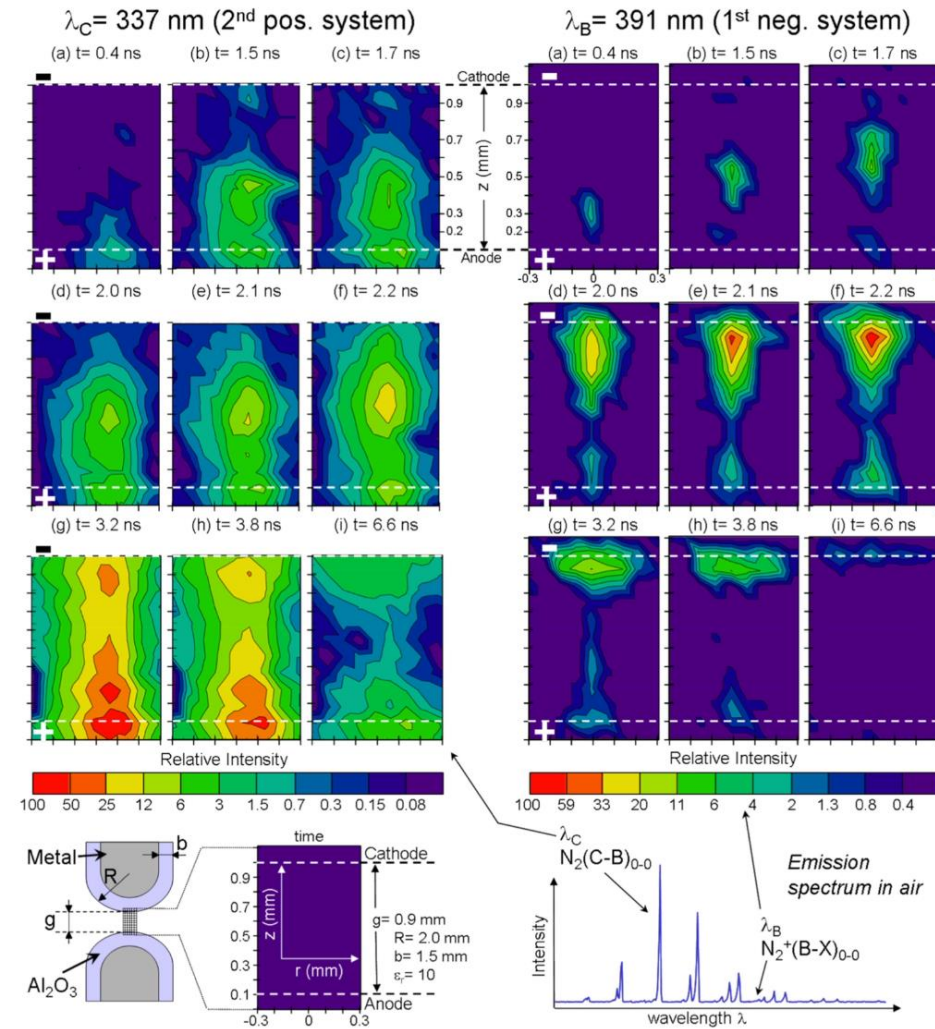
Décharge localisée ( $r \approx 100 \mu\text{m}$ ),  
courte durée (1 - 10 ns) et  $n_e$   
élevée ( $10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ )

Thèse N. Gherardi, Université Toulouse III, 2000



# DBD Filamentaire

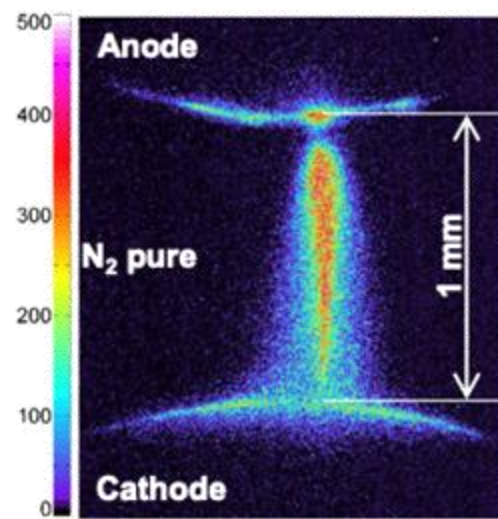
## Etude des microdécharges



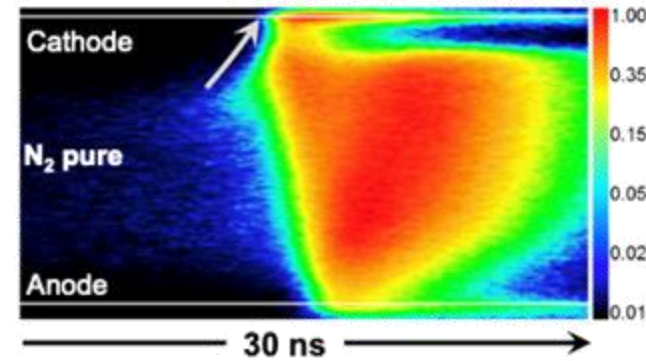
R. Brandenburg

12 Plasma Sources Sci. Technol. 26 (2017)

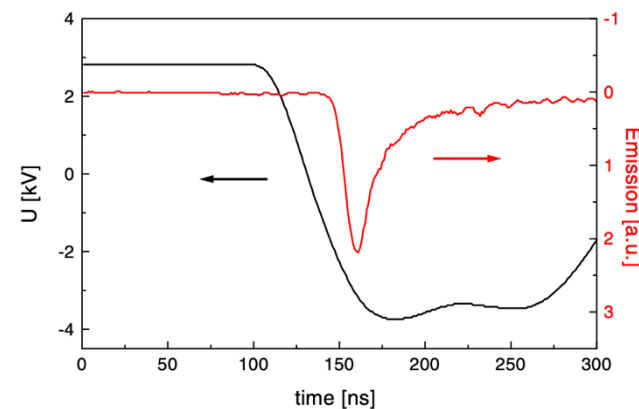
## Negative half cycle (ICCD)



## Negative half cycle (streak)

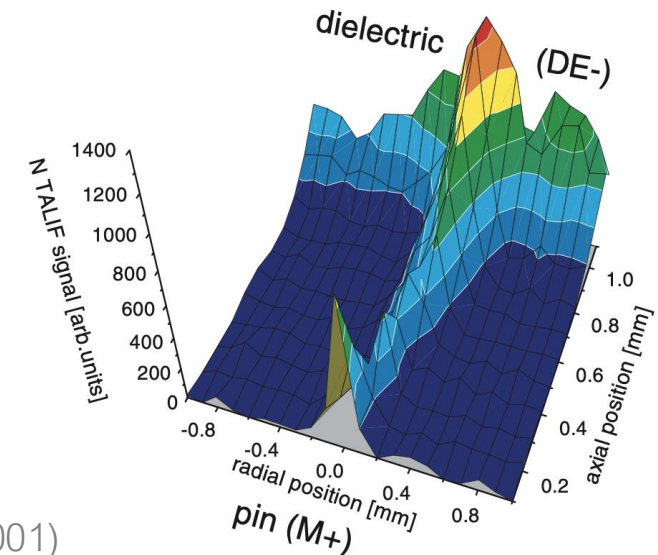


H. Höft *et al.*  
Eur. Phys. J. D (2023)



C Lukas *et al.* 2001

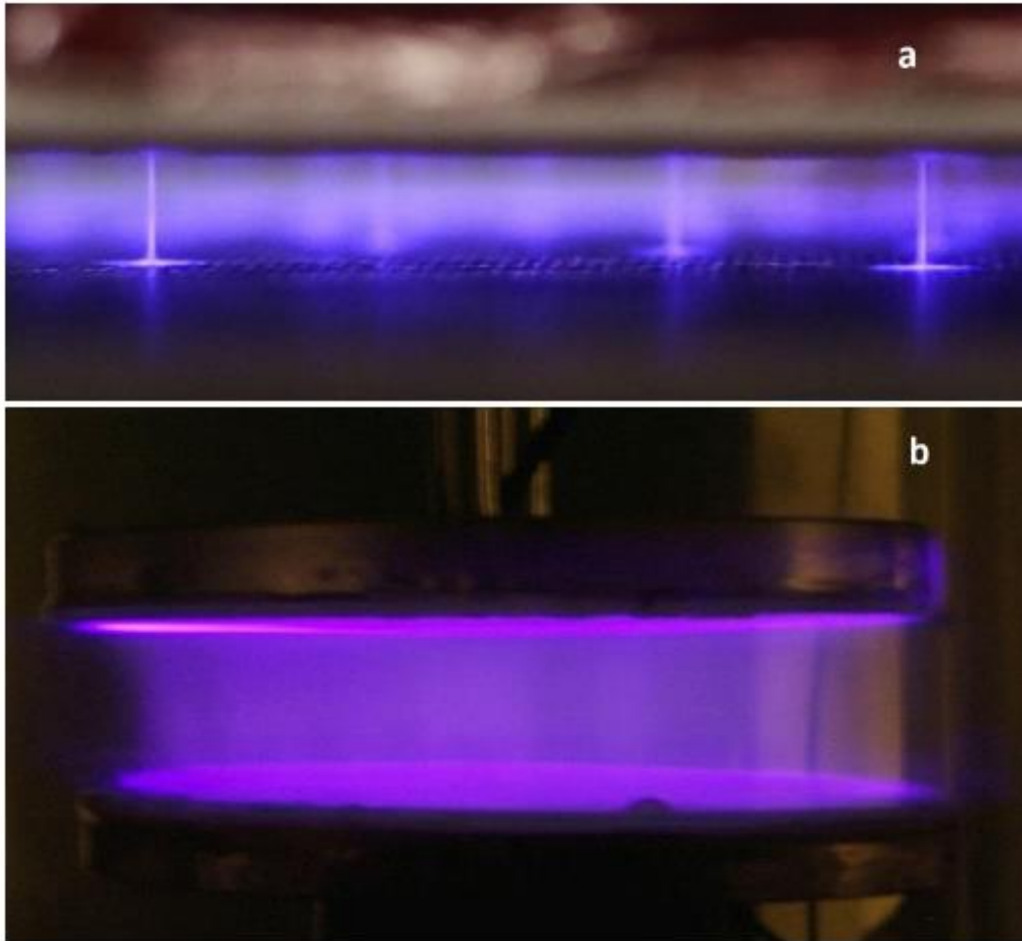
Plasma Sources Sci. Technol. 10 445 (2001)



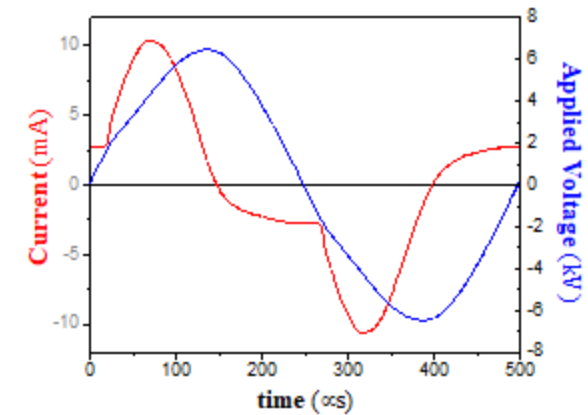
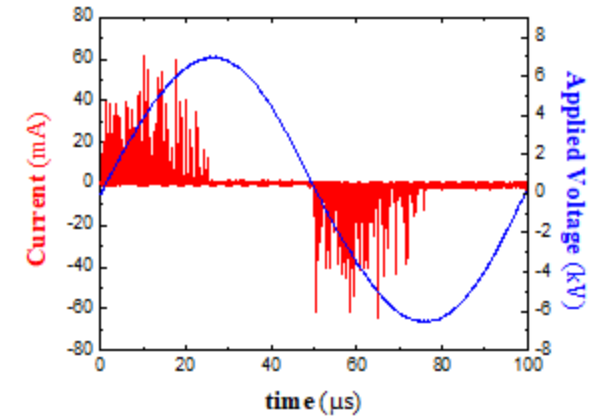


# DBD Homogène ?

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 - ...*

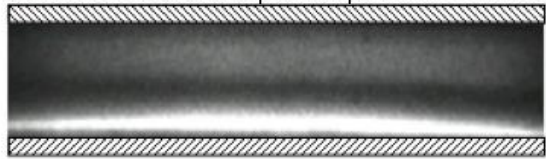
*sinus 120 – 140 kHz*

*RF*

*pulsé ns*

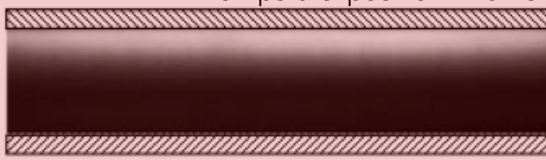
Hélium → Luminescent

temps d'exposition : 10 ns



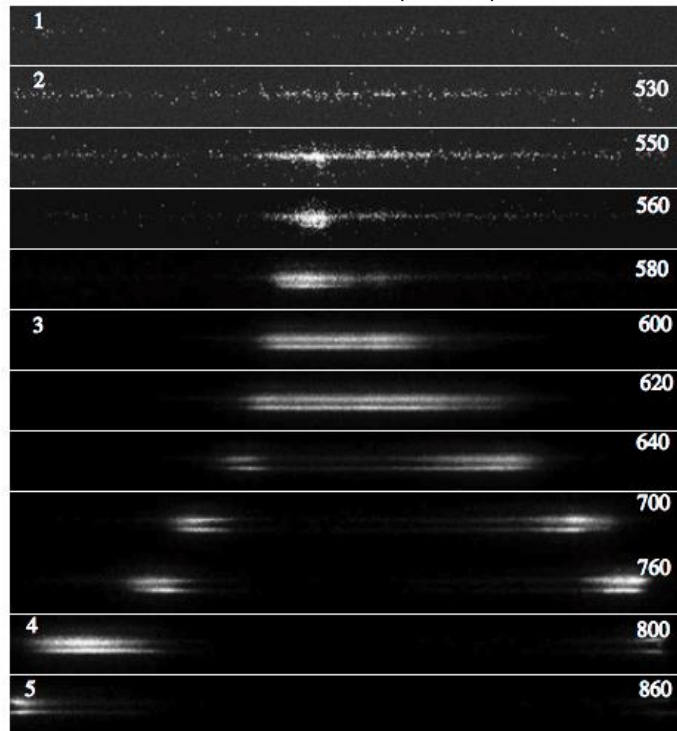
Azote → Townsend

temps d'exposition : 10 ns



Ar/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> + HMDSO → glow-like

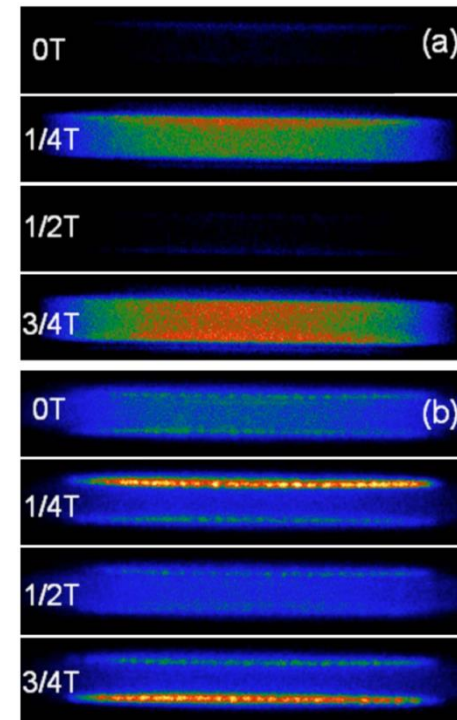
temps d'exposition : 10 ns



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

Argon

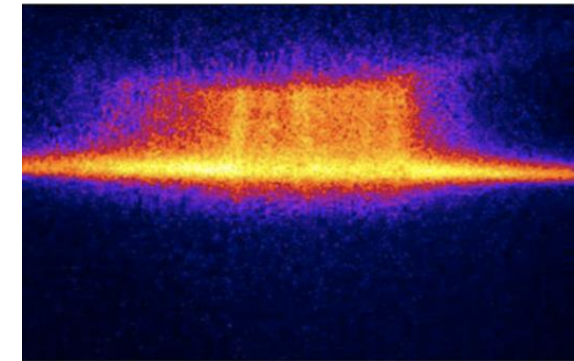
temps d'exposition : 1 ns



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

Air

temps d'exposition : 20 ns

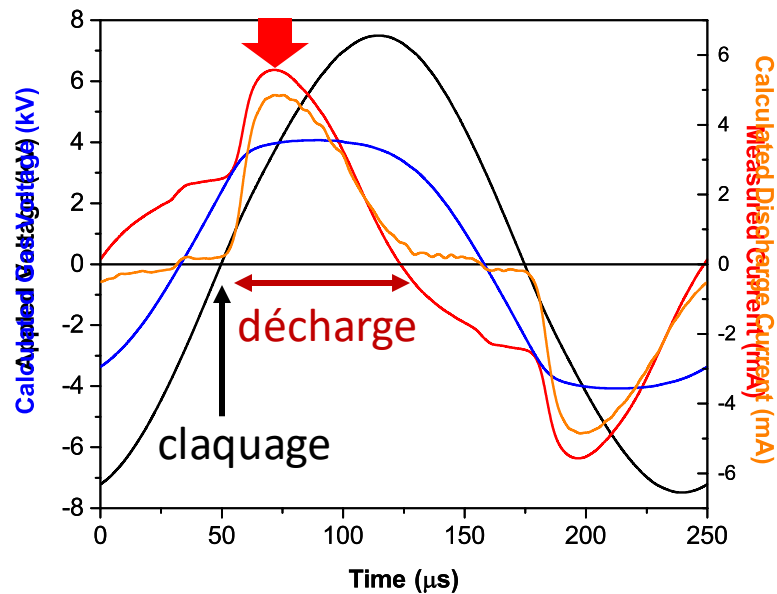


A. Fridman *et al.*  
J. Phys. D: Appl. Phys. 47 (2014)

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

# DBD Homogène ?

Exemple N<sub>2</sub> sinus BF

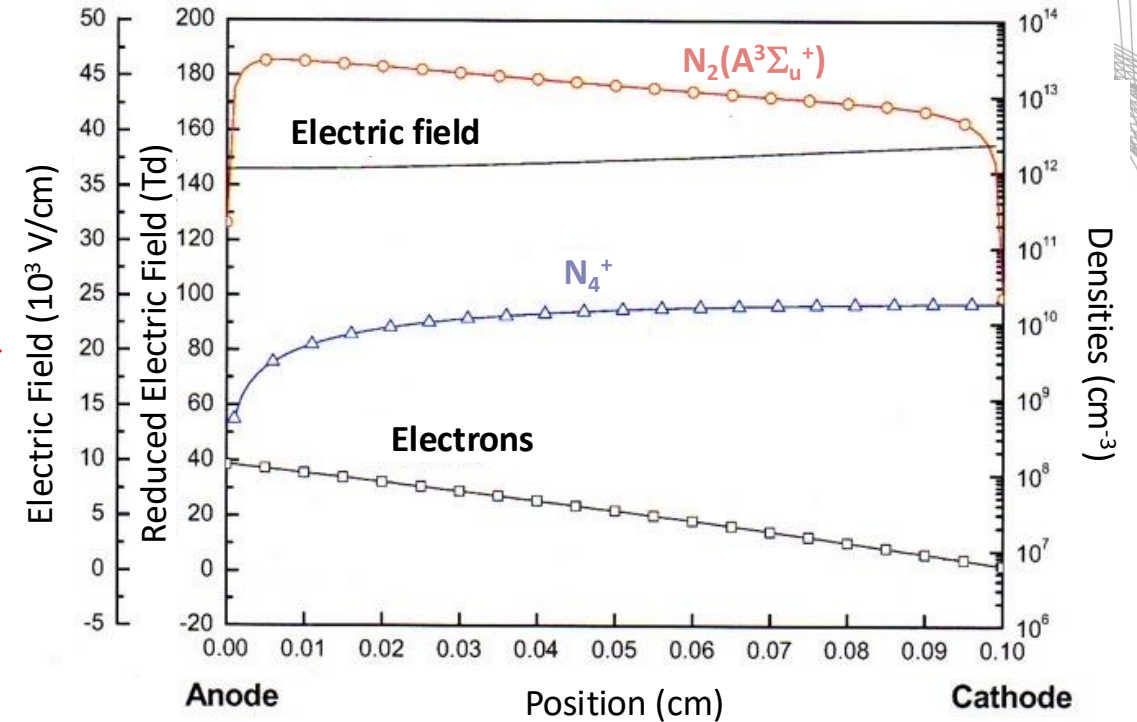


4 kHz – 15 kV<sub>pp</sub> – S=9 cm<sup>2</sup> – 1 slm N<sub>2</sub>



Numerical modeling

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



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

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

Energie des électrons  $\approx 4 \text{ eV}$

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

Pas de zone plasma - N<sub>2</sub>(A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>) principale espèce

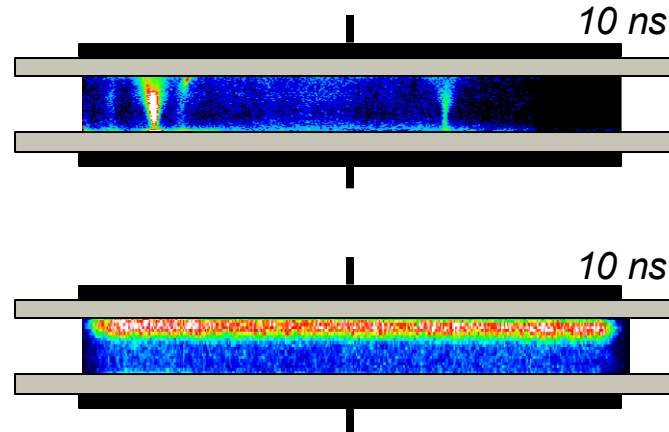
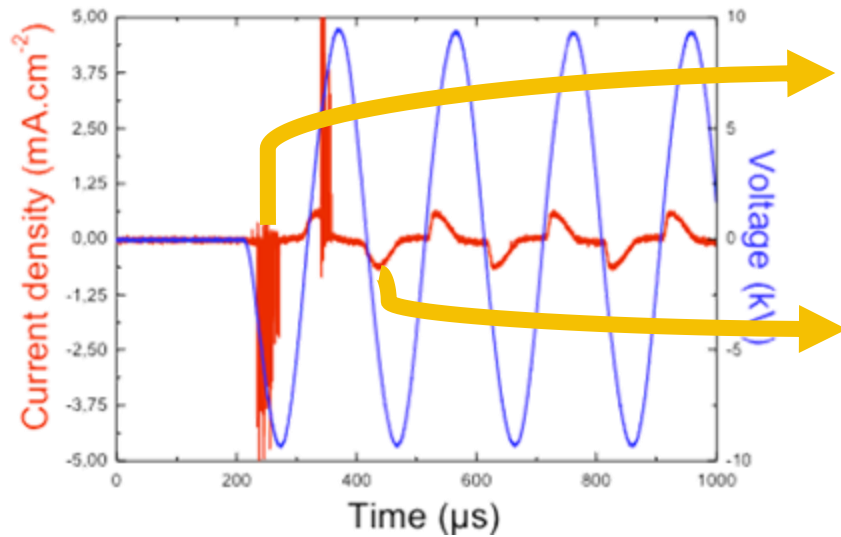
→ Atmospheric Pressure Townsend Discharge (APT<sub>D</sub>)

~~Laplace~~



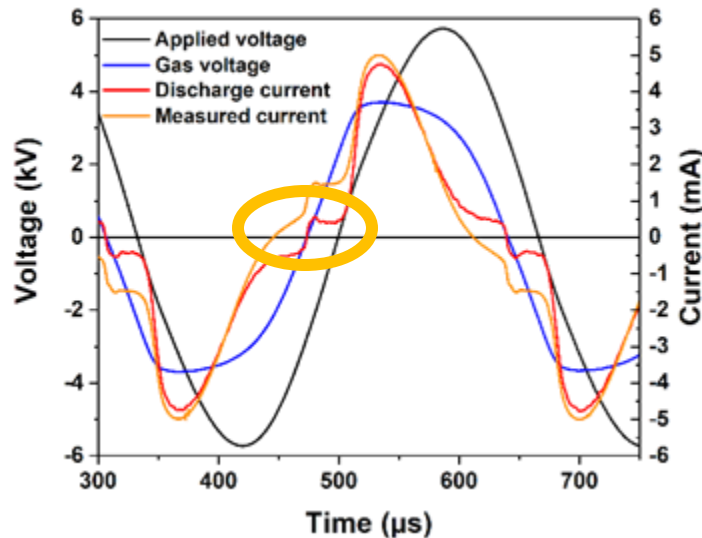
# Obtention d'une APTD

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

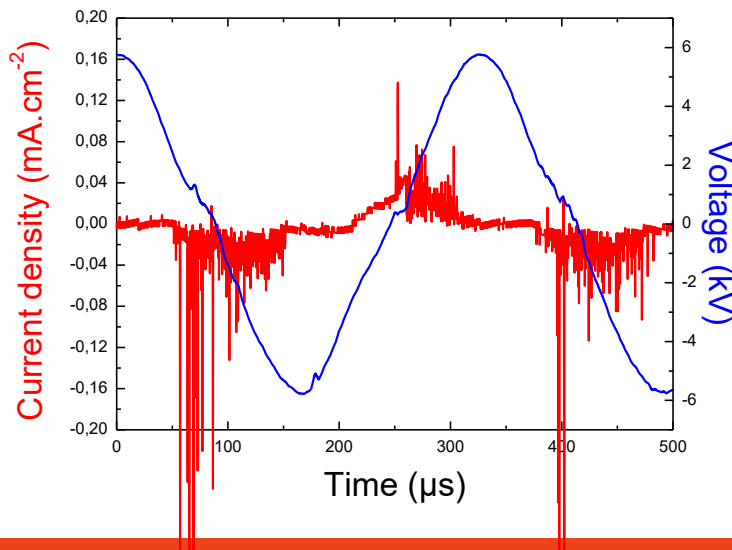
## Production d'électrons germes

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

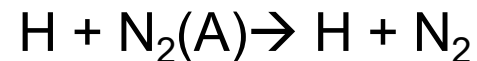
**APTD N<sub>2</sub> = candidat parfait pour étudier ces mécanismes, APTD peut être obtenue :**

- sur une large plage de fréquences (qq Hz à 10-20 kHz),
- avec différents mélanges de gaz N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> / N<sub>2</sub>O / NO / H<sub>2</sub> ...
- et avec différents matériaux diélectriques.

**Pendant longtemps, l'effet mémoire était basé exclusivement sur N<sub>2</sub>(A) car espèce énergétique majoritaire (10<sup>13</sup> /cm<sup>3</sup>) et durée de vie supérieure au temps entre 2 décharges.**



**N<sub>2</sub> + 200 ppm NH<sub>3</sub> → Décharge filamentaire**



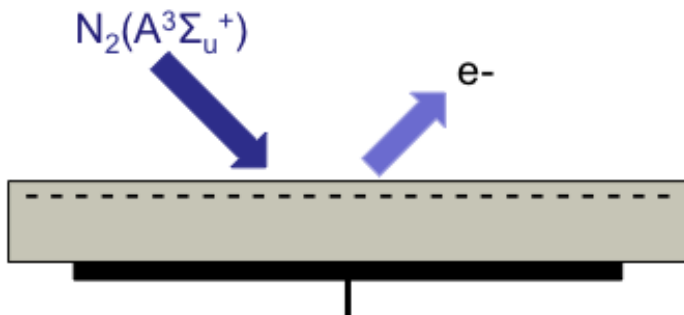
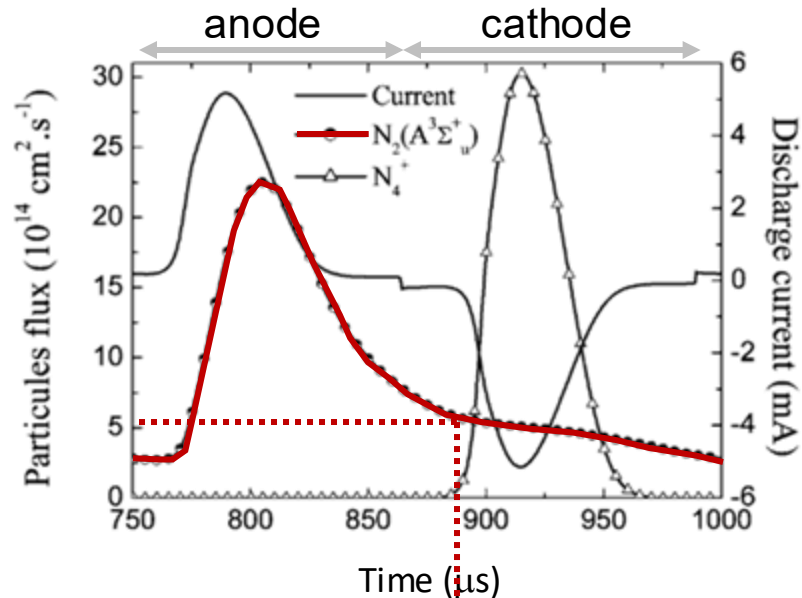
→ Mécanismes de production d'électrons germes ?

→ **3 mécanismes identifiés**

# Obtention d'une APTD

Production d'électrons germes

## 1<sup>er</sup> mécanisme



→ Fort flux de  $\text{N}_2(\text{A})$  sur la cathode avant le claquage

→ Émission secondaire liée au flux de  $\text{N}_2(\text{A})$  sur la cathode chargée durant la décharge précédente ...

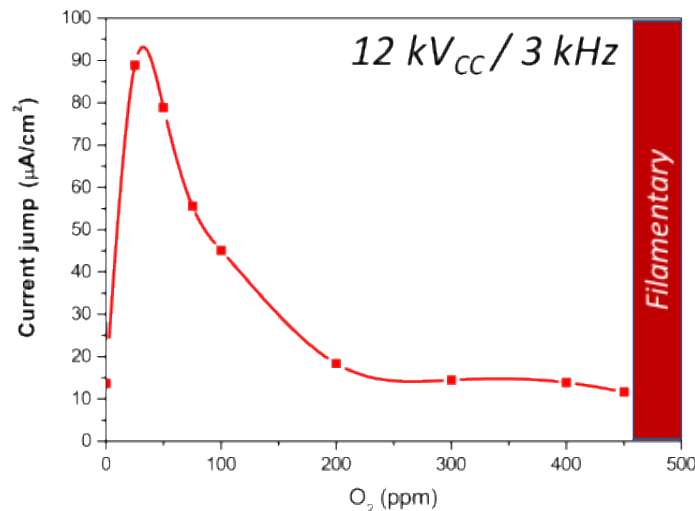
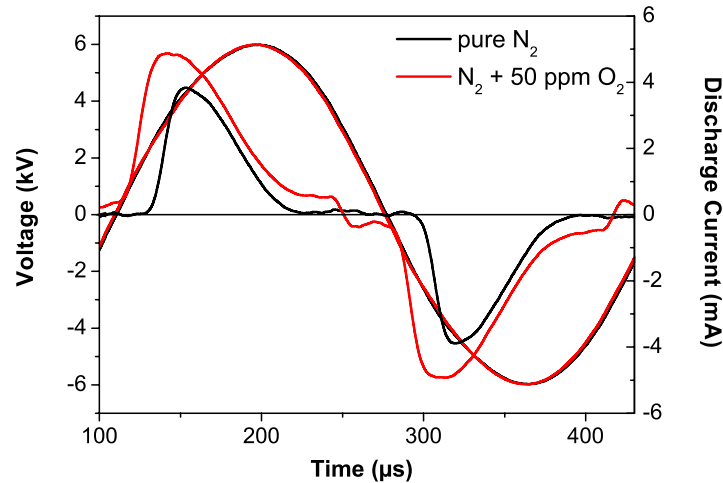
F. Massines *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 47 (2005) B577–B588  
F. Massines *et al.*, Surface and Coatings Technology 174–175 (2003) 8–14

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

# Obtention d'une APTD

Production d'électrons germes

Cependant, si on ajout qq ppm de  $O_2$  (ou  $NO$ ,  $N_2O$ ) ...



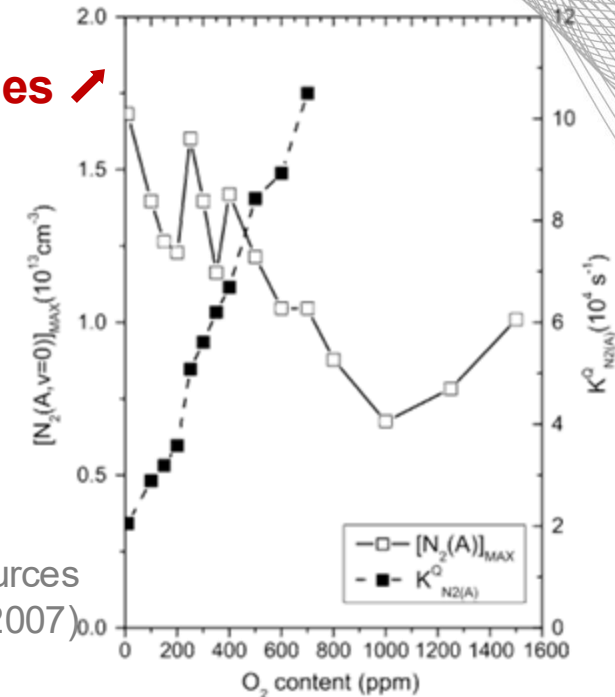
→ Saut de courant ↗ donc production e- germes ↗

→ Tension de claquage ↘

→ Quenching par  $O_2$  et  $O$ ,  $[N_2(A)]$  ↘

→ L'augmentation du saut de courant ne peut pas être liée à l'émission secondaire liée au flux de  $N_2(A)$

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



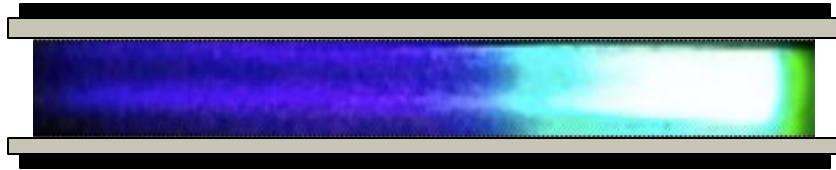
→ Saut de courant ↗ à faible concentration avant de ↘

→ Optimum pour 25-50 ppm de  $O_2$

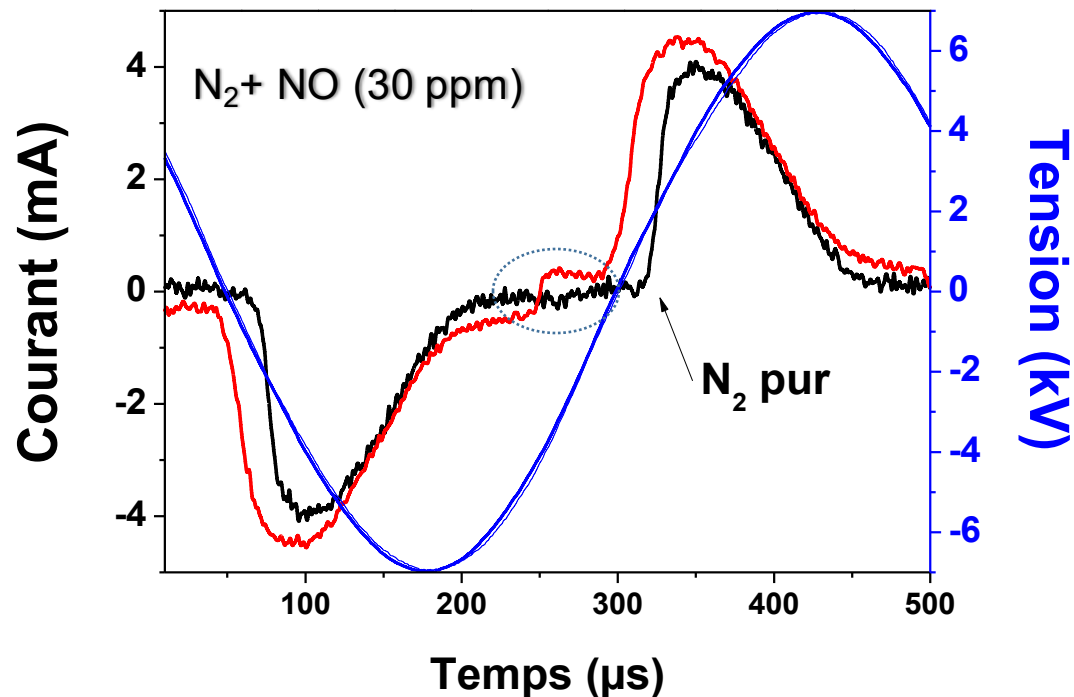
# Obtention d'une APTD

Homogène ? Vraiment ?

$N_2 + 30$   
ppm NO →



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



→ Décharge homogène ? Diffuse ?

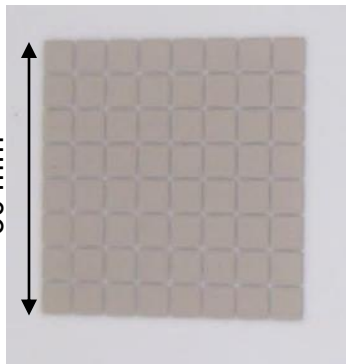
→ Besoin de résolution spatiale (en fonction du temps de résidence du gaz) sur les mesures OES et électriques



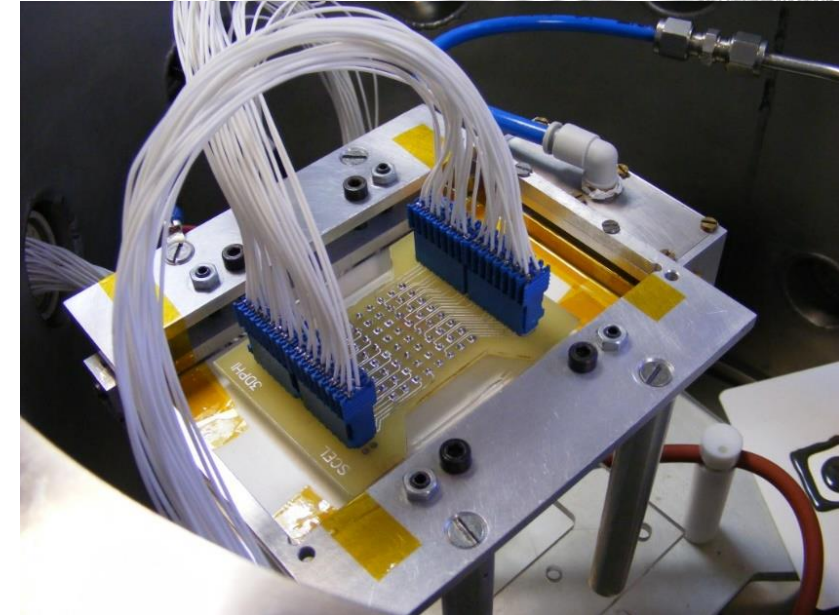
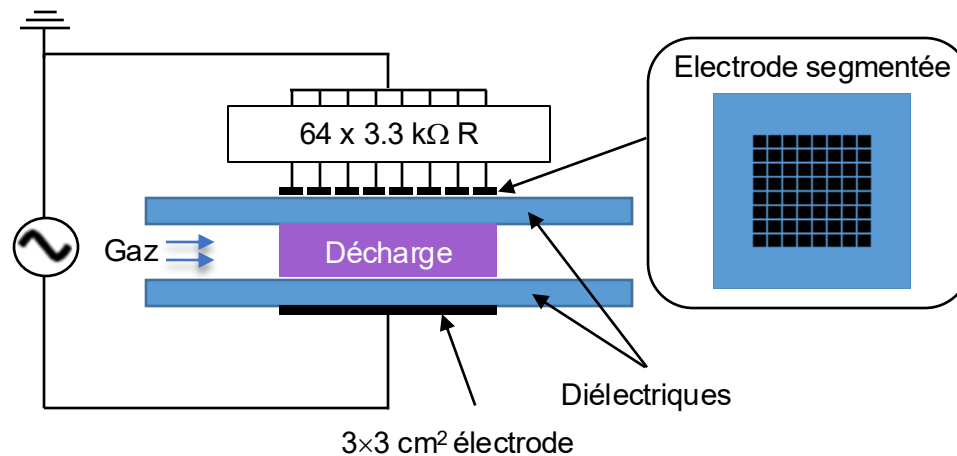
# Obtention d'une APTD

## Mesures électriques résolues spatialement

- Electrode de masse divisée en 64 zones ( $11.56 \text{ mm}^2$ )
- $350 \text{ }\mu\text{m}$  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 :

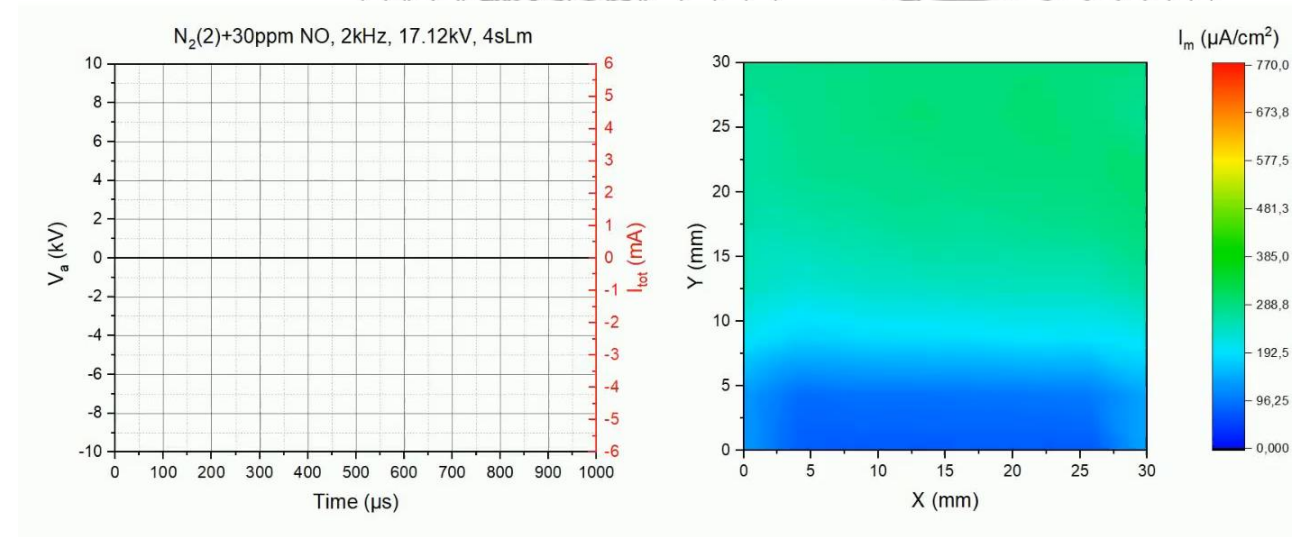
- 66 signaux analogiques simultanément (64 courants, V et I)
- Echantillonnage ( $24 \text{ MS/channel/s}$ )
- Profondeur mémoire 4096 points



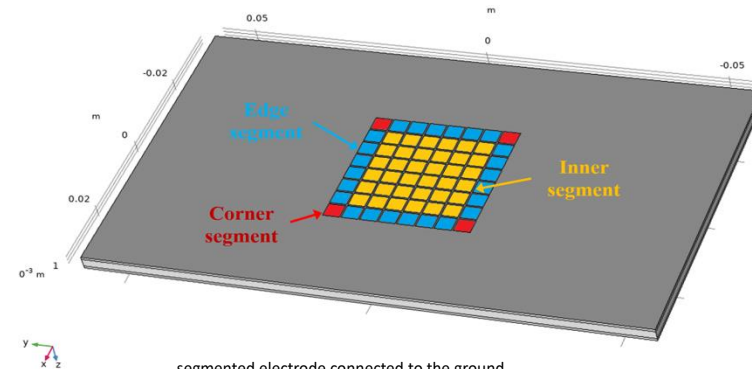
# Obtention d'une APTD

Mesures électriques résolues spatialement

Mesure simultanée des courants sur les 64 zones :



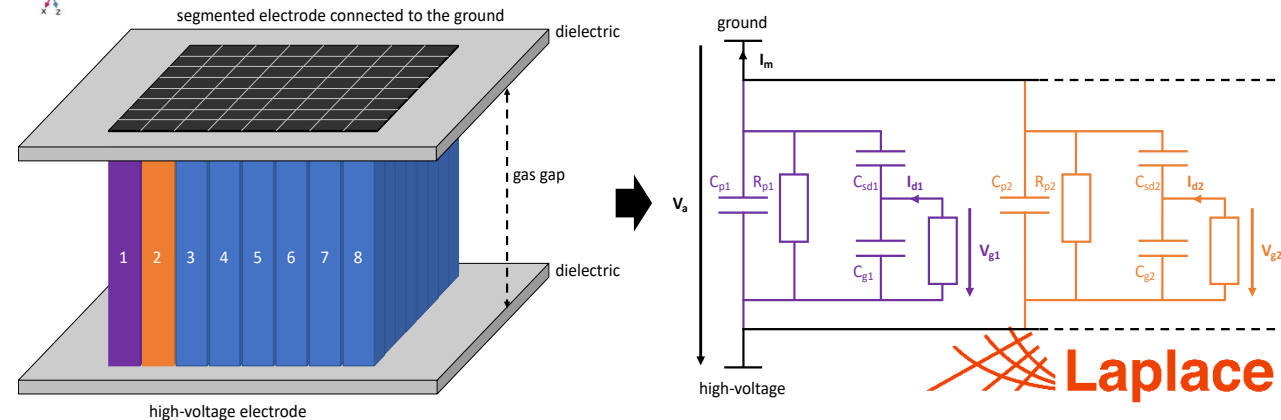
Détermination des capacités gaz et diélectrique :  
COMSOL + mesure



Détermination Tension gaz et courant de décharge :

→ Tension appliquée

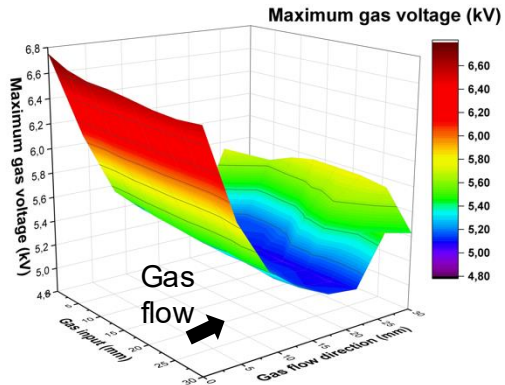
→ Modèle électrique équivalent sur chaque zone



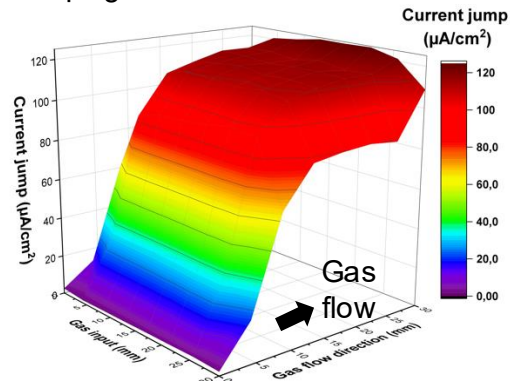
# Obtention d'une APTD

Production d'électrons germes

## Mesures électriques résolues spatialement



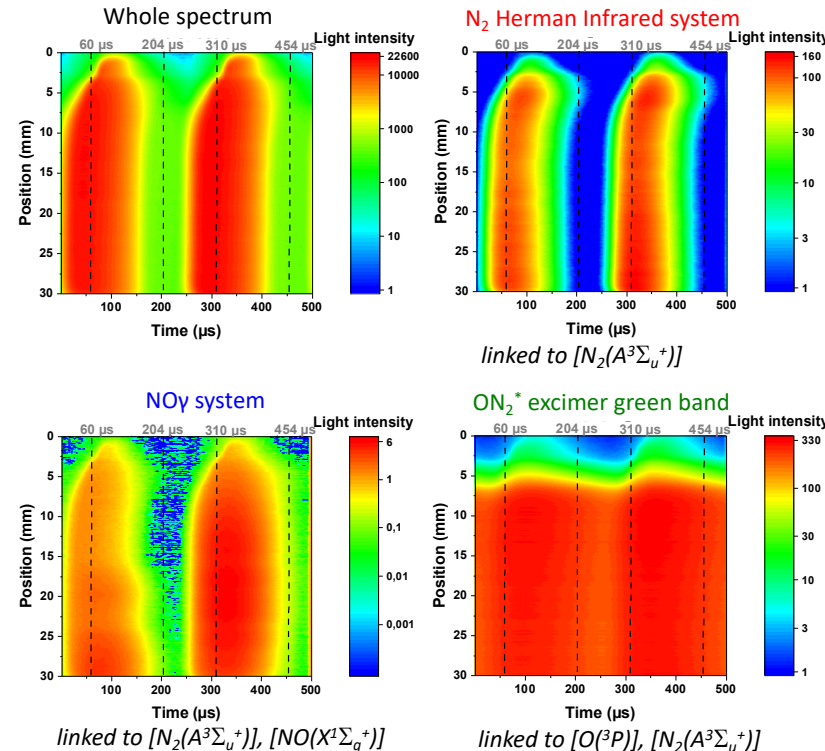
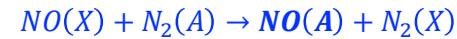
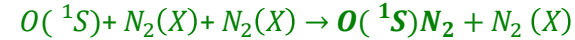
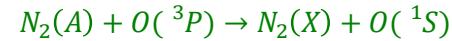
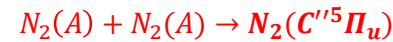
Tension de claquage



Production d'e- germes entre 2 décharges

## OES résolues spatialement

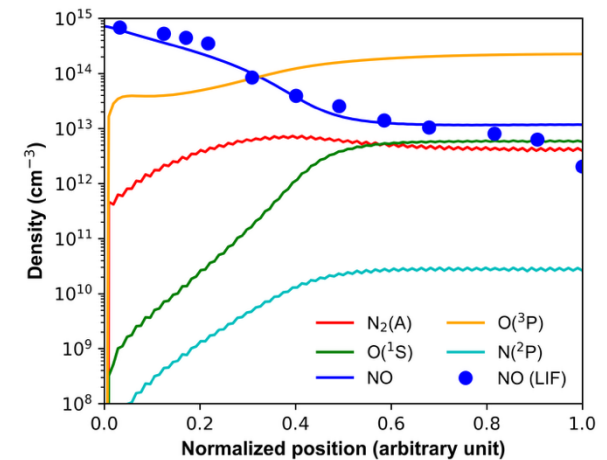
Entre 2 décharges  
(pas d'excitation électronique) :



## Mesures LIF et modélisation 0D de la cinétique chimique

LIF : densités  $N(^4S)$ ,  $O(^3P)$ ,  $NO$

Modélisation 0D avec calcul du saut de courant



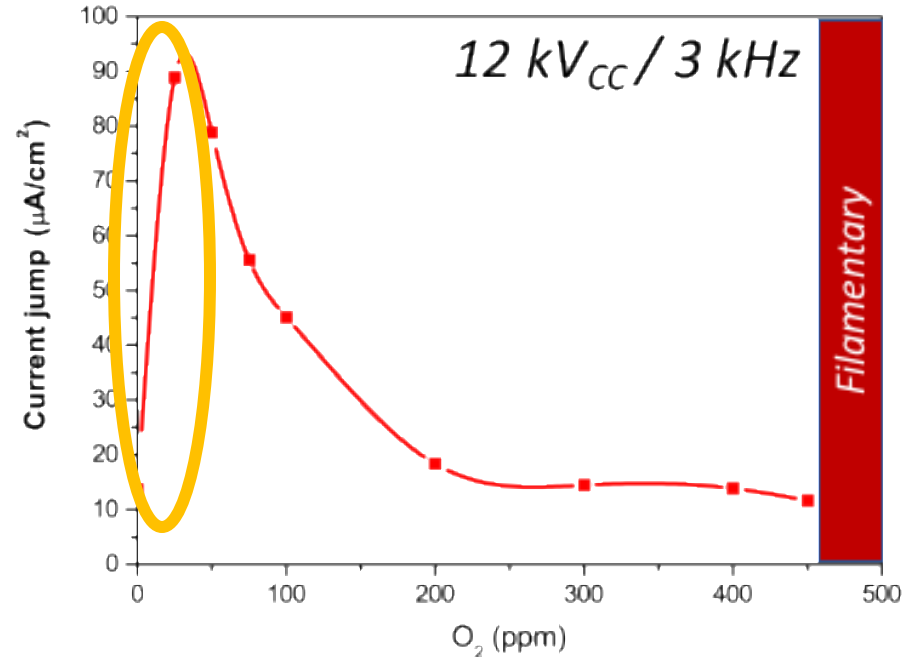
$N_2 + 30 \text{ ppm } NO, 4 \text{ slm}$   
 gap = 2 mm  
 $f = 2 \text{ kHz}, V_a = 17.12 \text{ kV}_{pp}$



# Obtention d'une APTD

## Production d'électrons germes

**2<sup>ème</sup> 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

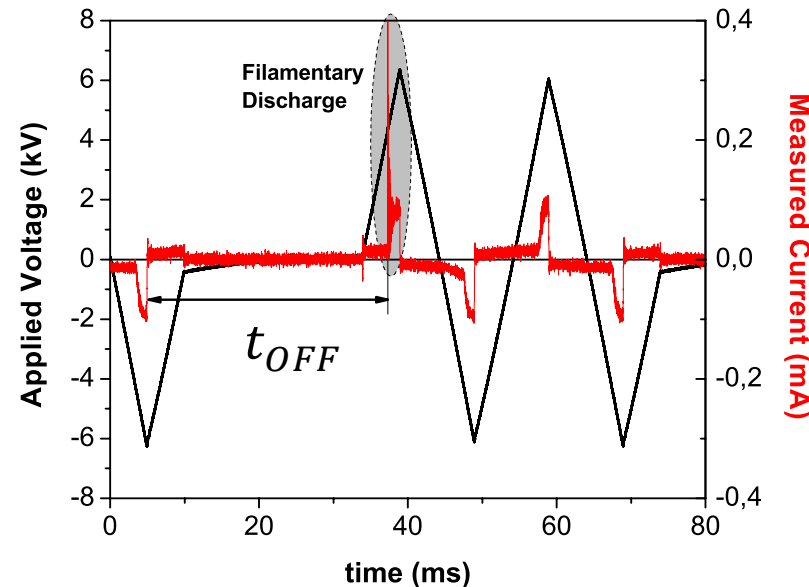
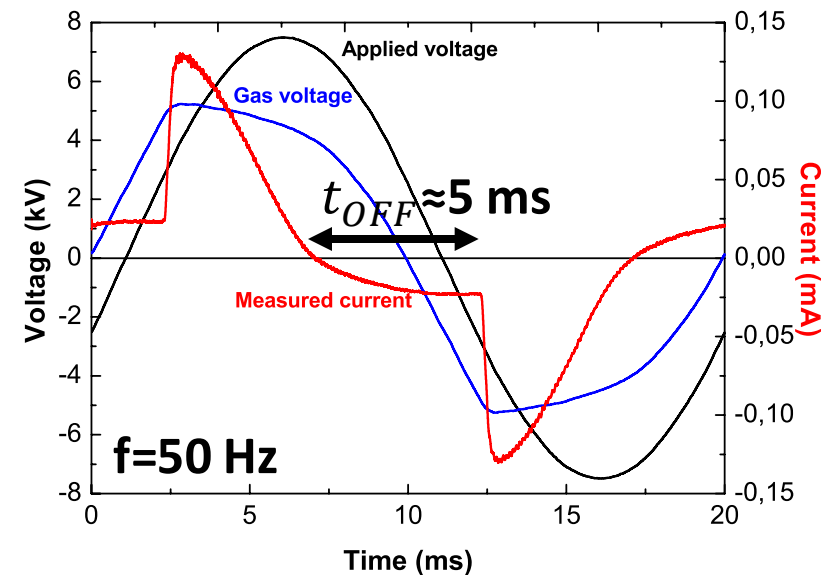
X. Lin *et al.*, 2020 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** 205201



# 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 (1<sup>ères</sup> décharges filamenteuses)

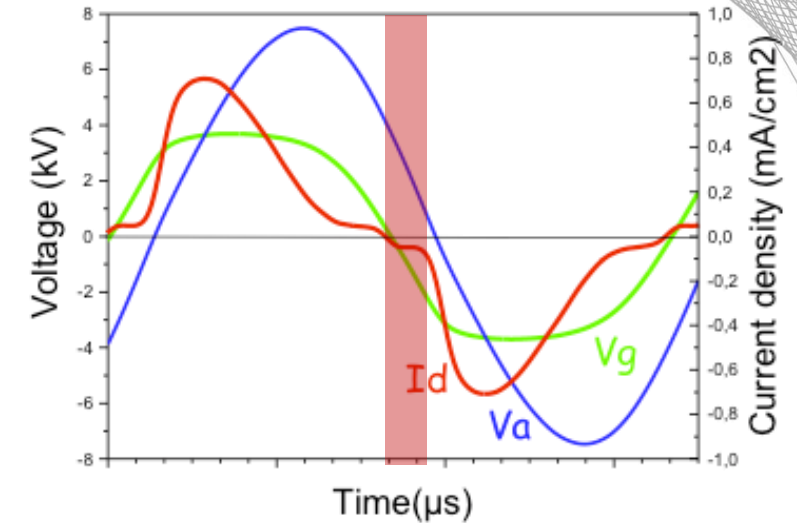
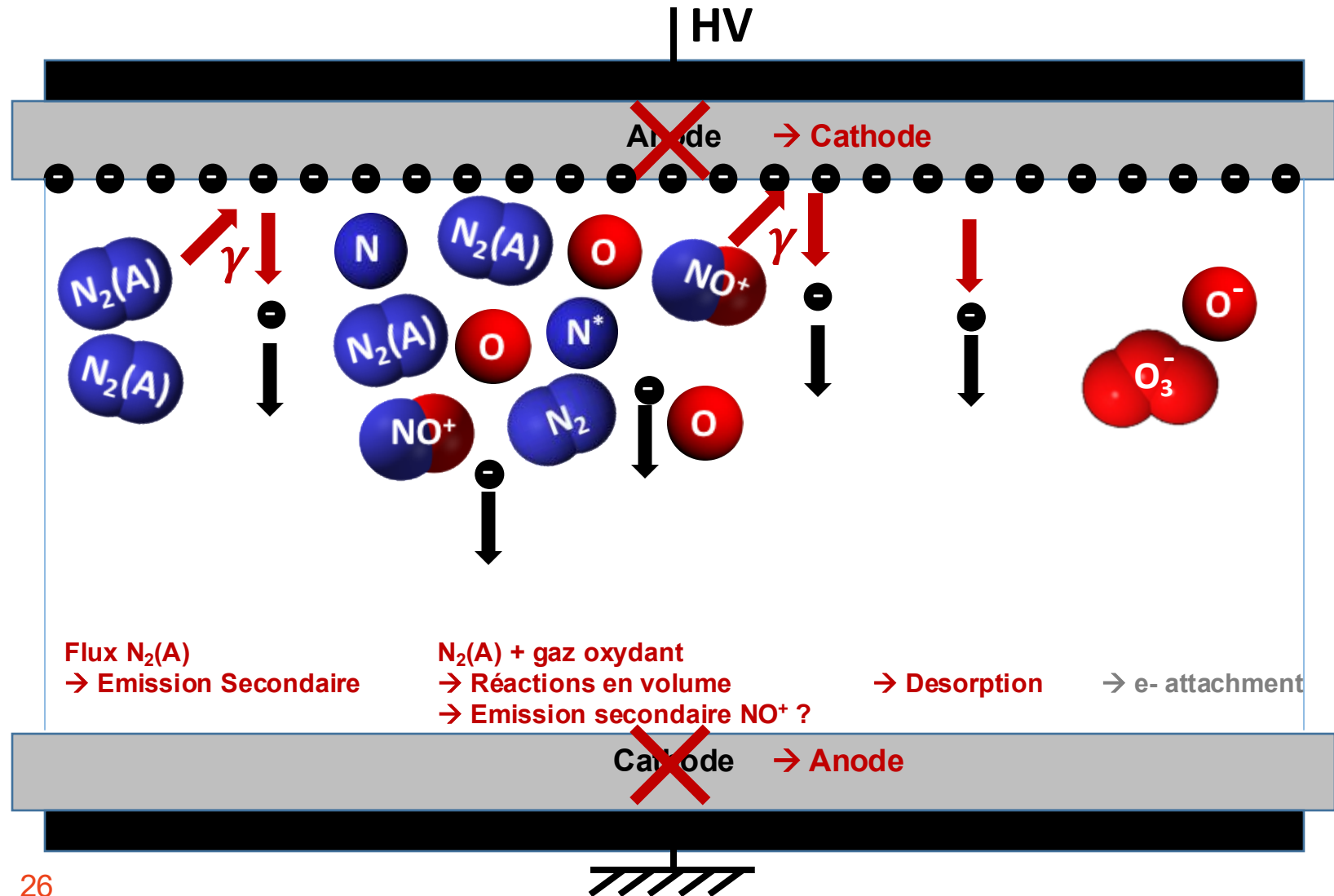
→ Effet mémoire pour APTD  $N_2$  ne peut pas être basé exclusivement sur  $N_2(A)$  !

→ 3<sup>ème</sup> 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**

**Attachement Electronique**

# Obtention d'une APTD

Production d'électrons germes : Synthèse

Décharges en  $N_2$  et mélanges  $N_2 + "O"$  :

→ Effet mémoire fortement lié à  $N_2(A)$

→ **L'ionisation associative semble être le principal mécanisme**

*ex: production d'électrons germes au passage  $N_2$  Alphagaz 1 à Alphagaz 2 (1 ppm à 0,1 ppm de  $O_2$ )*

→ A faible  $f$ , temps entre 2 décharges trop long compare à la durée de vie de  $N_2(A)$  → **desorption**

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

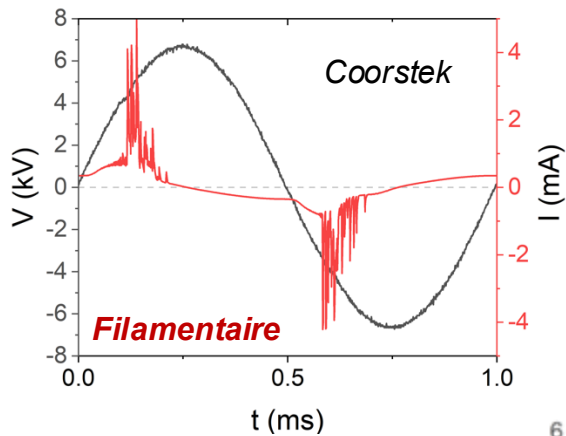


# Obtention d'une APTD

Dans d'autres gaz moléculaires ?

Effet mémoire nécessaire ... si il n'est pas basé sur  $N_2(A)$  alors :

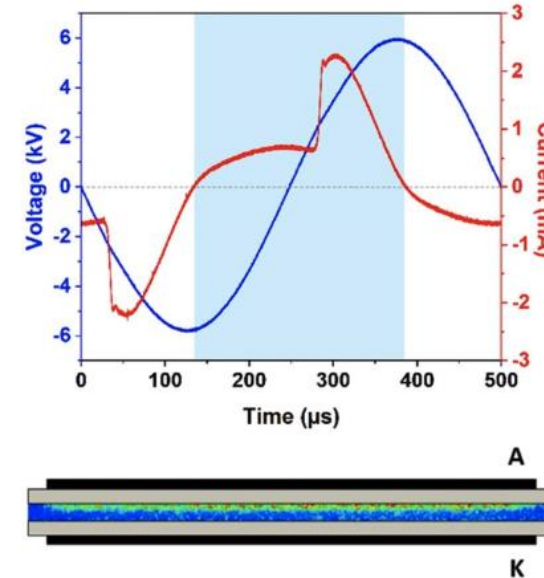
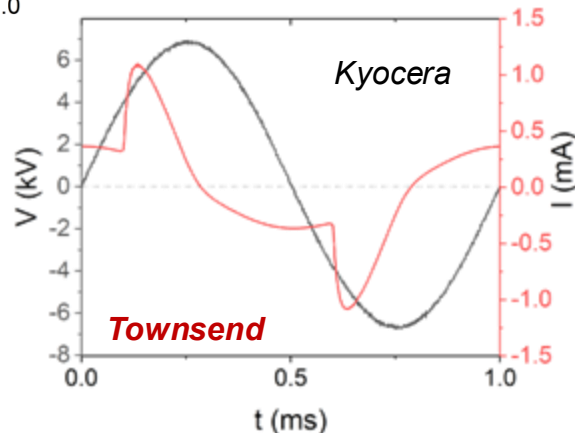
- Faible production d'électrons germes → **fonctionnement à faible fréquence (Hz → qq kHz)**
- Désorption électronique → **fortement dépendant des matériaux diélectriques !**



Exemple Air

Conditions identiques (V, f, gap,  $\epsilon_r$ , épaisseur et pureté des diélectriques)

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



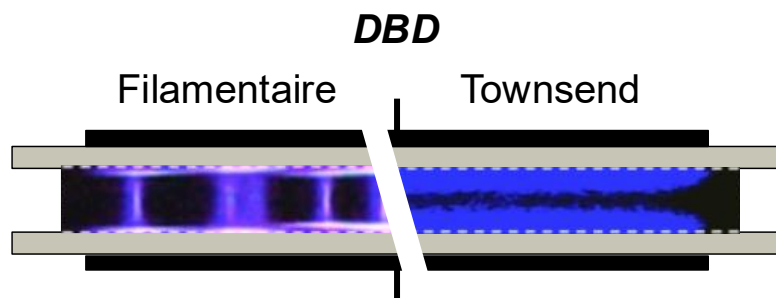
C. Bajon *et al.*  
Plasma Sources Sci. Technol. 32 (2023)

Avec le "bon" diélectrique → on peut obtenir une APTD dans différents gaz (Air,  $N_2O$ ,  $CO_2$ )



# APTD, quel intérêt ?

Pour l'étude des décharges



?

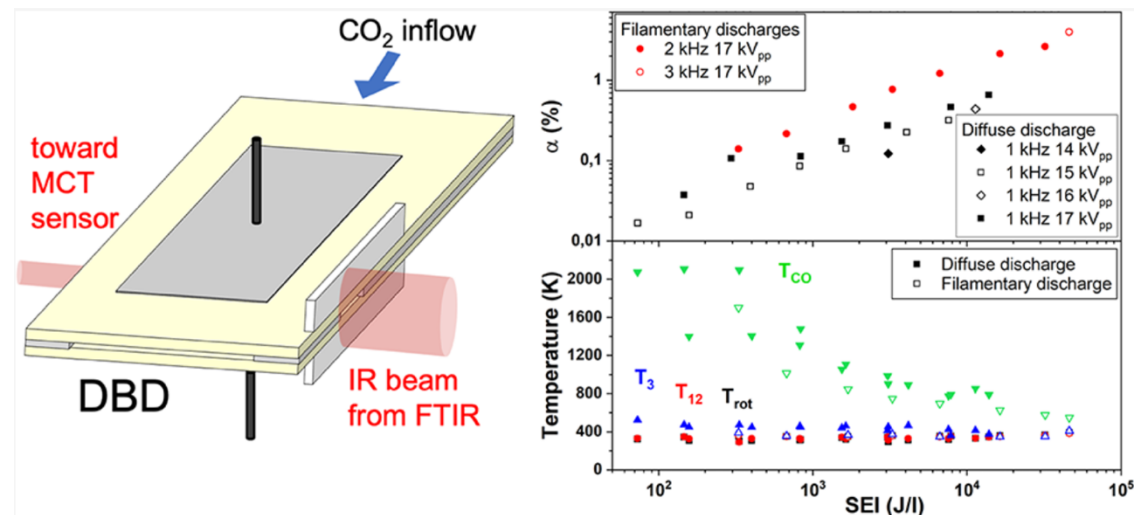
## Étude de la physique des décharges :

- 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

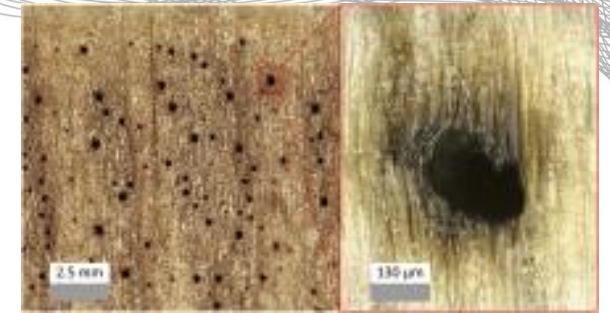
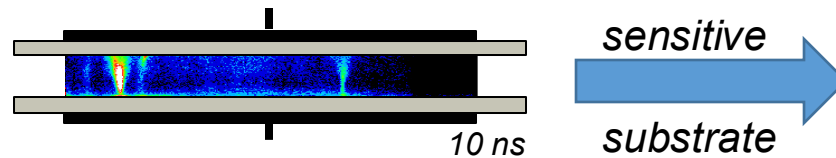
cf. présentation Simon Dap ce matin



# APTD, quel intérêt ?

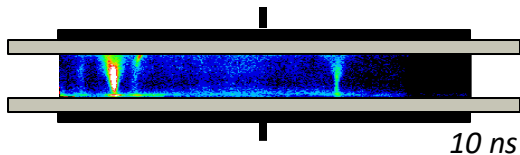
Pour le dépôt de couches minces

→ Permet de limiter les dommages sur les surfaces sensibles par rapport aux décharges filamenteuses ...



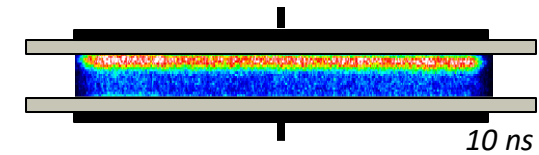
J. Profili, Surf. Coat. Technol. **309** 729 (2017)

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



VS

Même puissance ( $\sim 10 \text{ W/cm}^2$ )  
Même gaz ( $\text{SiO}_x$  film)



Energie localisée  
(10 ns,  $r=100 \mu\text{m}$ )



$n_e$  élevée ( $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ )  
forte dissociation du précurseur



Beaucoup de radicaux  
produits dans les  
microdécharges

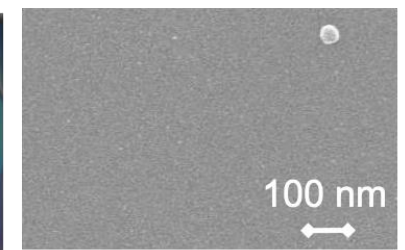
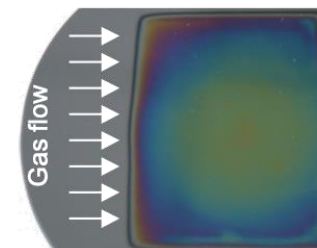
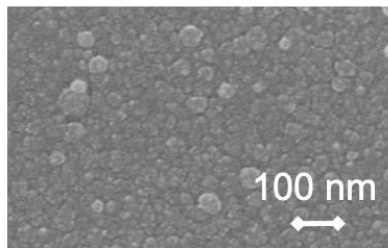
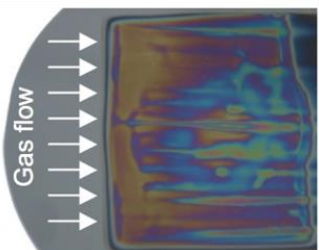
Energie distribuée de  
manière homogène  
(100  $\mu\text{s}$ , toute la surface)



Dissociation du  
précurseur plus  
lente

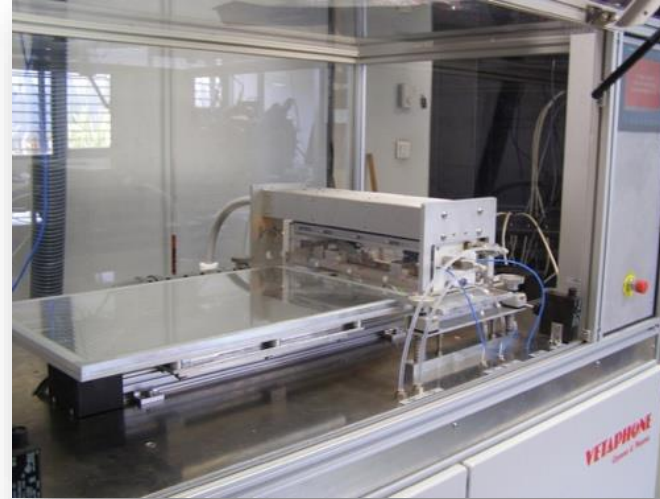
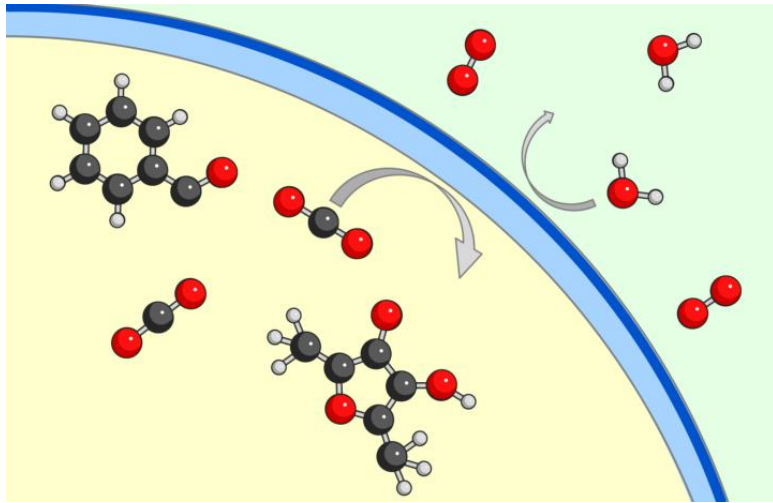


Plus de temps pour  
que les radicaux  
atteignent la surface



# APTD, quel intérêt ?

Pour le dépôt de couches minces : Exemple couche barrière

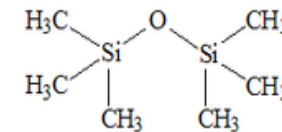


- DBD N<sub>2</sub> avec contrôle de l'atmosphère
- Electrodes 2 x 25 cm<sup>2</sup>
- Déplacement linéaire du substrat dans la zone de décharge
- Alimentation optimisée (courant carré)
- Injection de gaz optimisée pour le transfert des radicaux vers la surface

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

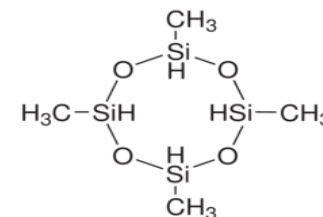
Dépôt SiO<sub>2</sub>  
sur polymère

**Décharge Homogène**  
HMDSO: 88 nm/min for 66 W/cm<sup>3</sup>  
et 6 ppm de précurseur



→ 0.2 - 0.5

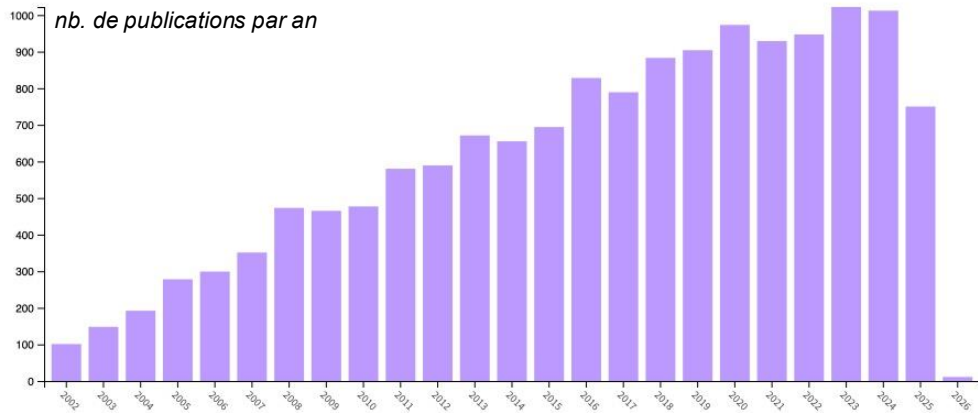
**Décharge Filamentaire**  
TMCTS: 368 nm/min pour 60 W/cm<sup>3</sup>  
et 2 ppm de précurseur



→ 1.5

Oxygen Transmission Rate (OTR)  
cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/24h

# Conclusion



## Décharges à Barrières Diélectriques :

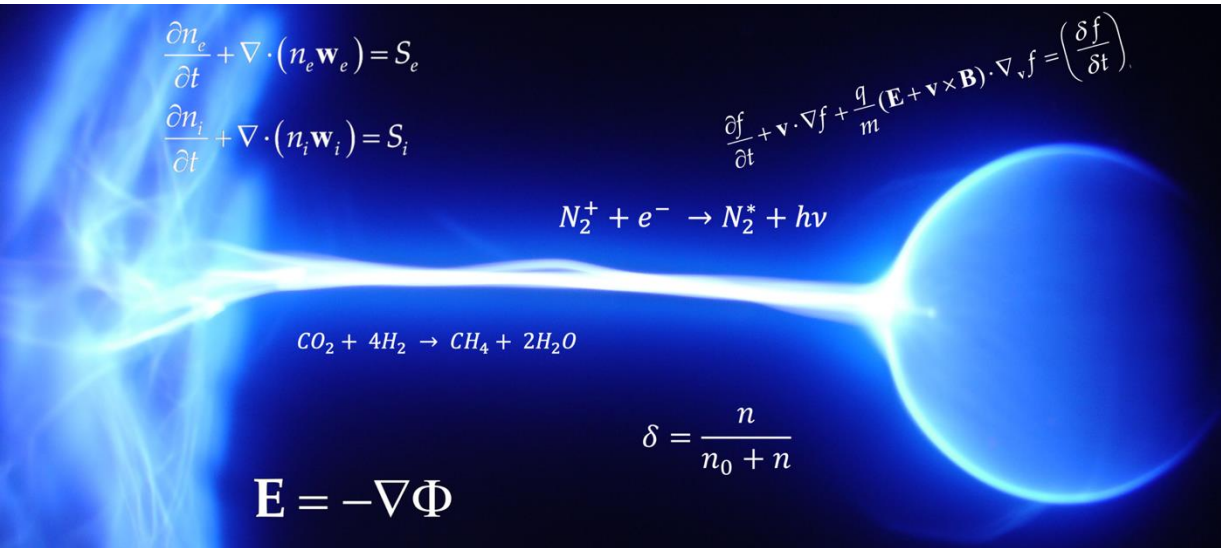
- Domaine de recherche actif
  - nombreuses études
  - nombreuses applications
- Différents régimes de décharges
- Nombreuses configurations
- Nombreux diagnostics mis en oeuvre

## Décharges homogènes / diffuses :

- Peuvent-être obtenues dans différentes configurations et gaz
- APTD :  $N_2$ ,  $N_2-O_2$ , Air,  $N_2O$ ,  $CO_2$ , 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



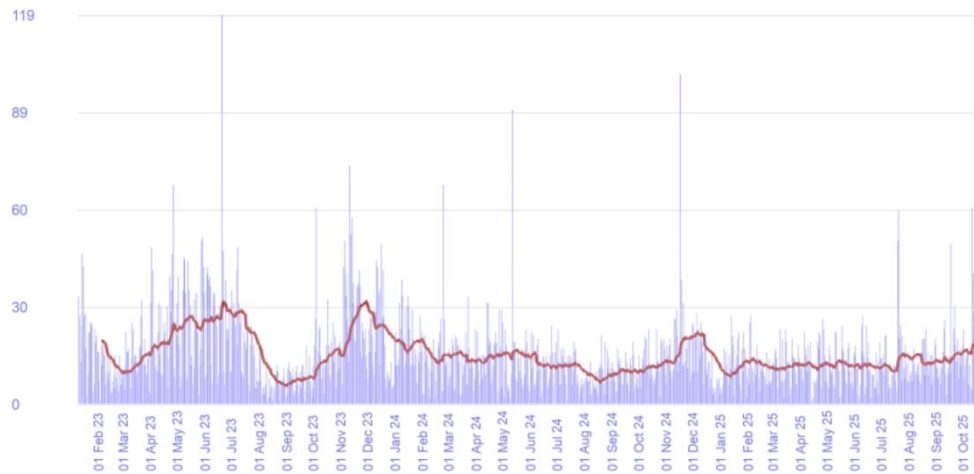
# Offres stages / emplois / thèses ...



<https://formations-plasmas.fr>

NOMBRE TOTAL DE VISITES PAR JOUR

11/01/2023 à 25/10/2025 15,403 total visites pour la période



Mots-clés	Localisation	
Choisissez une catégorie...	<input type="radio"/> Postes en télétravail uniquement	
Rechercher des offres d'emploi		
<input type="checkbox"/> Alternance <input type="checkbox"/> CDD <input type="checkbox"/> CDI <input type="checkbox"/> Doctorat <input type="checkbox"/> Master <input type="checkbox"/> Post-doctorat		Ajouter une alerte
Numerical and Experimental Development of Solar Thermophotovoltaics	Odello (64)	Master Publié le octobre 23, 2025 Nom de l'entreprise / du laboratoire: PROMES-CNRS
Stage Master : Caractérisation in-situ d'un procédé PECVD de dépôt de couches minces pour la photonique	Toulouse	Master Publié le octobre 21, 2025 Nom de l'entreprise / du laboratoire: LAAS-CNRS et LAPLACE
Développement de capteurs pour l'analyse des décharges électrostatiques induites par les irradiations de haute énergie	ONERA, Toulouse	Master Publié le octobre 10, 2025 Nom de l'entreprise / du laboratoire: ONERA
analyse des plasmas micro-onde de méthane	paris	Doctorat Publié le octobre 7, 2025 Nom de l'entreprise / du laboratoire: LSPM - CNRS
caractérisation d'un plasma micro-onde pour la conversion du méthane	paris	Doctorat Master Publié le octobre 7, 2025 Nom de l'entreprise / du laboratoire: LSPM - CNRS
Thèse Cifre Radiat - IQ	Nancy	Doctorat Publié le septembre 26, 2025 Nom de l'entreprise / du laboratoire: Institut Jean Lamour
Researcher in atmospheric plasma deposition of functional coating on textiles	Luxembourg	CDI Publié le septembre 23, 2025 Nom de l'entreprise / du laboratoire: Luxembourg Institute of Science and Technology
PhD offer (funding secured) - Ultra-wide bandgap semiconductors synthesis using low-temperature plasmas: deposition, fundamental aspects and process optimisation through artificial intelligence approach	Palaiseau	Doctorat Publié le septembre 19, 2025 Nom de l'entreprise / du laboratoire: LPICM - CNRS / Ecole Polytechnique
Multiphysics modeling and experimental validation of dielectric barrier discharge in a liquid medium for advanced water treatment	Nancy, France (Institut Jean Lamour)	CDI Doctorat Publié le août 7, 2025 Nom de l'entreprise / du laboratoire: Institut Jean Lamour

- ✓ 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](mailto:sec-ups@laplace.univ-tlse.fr)

ENSEEIH  
2 Rue Camichel,  
31071 Toulouse Cedex 7

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