

Soutenance de Thèse

Étude électrique de la physique d'une décharge de Townsend à
la pression atmosphérique et de son interaction avec un
générateur : Modèle et Expérience

Par Nicolas Naudé

Sous la direction de F. Massines & J-P Cambronne



Microélectronique

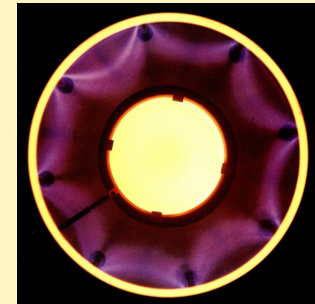
Applications : gravure, dépôts de couches minces ...

→ Basse pression

- ⊕ Plasma homogène
- ⊕ $T \approx T_{\text{ambiante}}$
- ⊖ Basse pression = Réacteur étanche + groupe de pompage
- ⊖ Traitement en ligne et taille des surfaces traitées



Réacteur micro-onde pour gravure et dépôt sur wafer de Si (LGET)



Traitement de films polymères

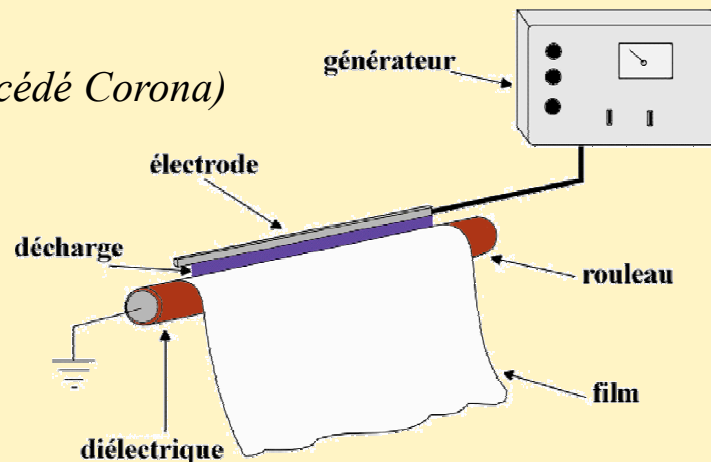
Application : activation de surface (Procédé Corona)

→ Pression atmosphérique

- ⊕ Traitement en ligne
- ⊕ $T \approx T_{\text{ambiante}}$
- ⊖ Décharge non homogène



Traitement non homogène



Traitement en ligne de film polymère par procédé Corona

➔ Plasma homogène à pression atmosphérique ?

Rupture d'un gaz dépend du produit *pression × distance*

Pour un gaz non excité si $p \times d > \text{qq dizaines de Torr.cm}$

→ claquage de type streamer

Le faible libre parcours moyen conduit à une mise à l'équilibre thermodynamique

⇒ transition à l'arc !

➔ $T \approx \text{qq dizaines de milliers de K}$

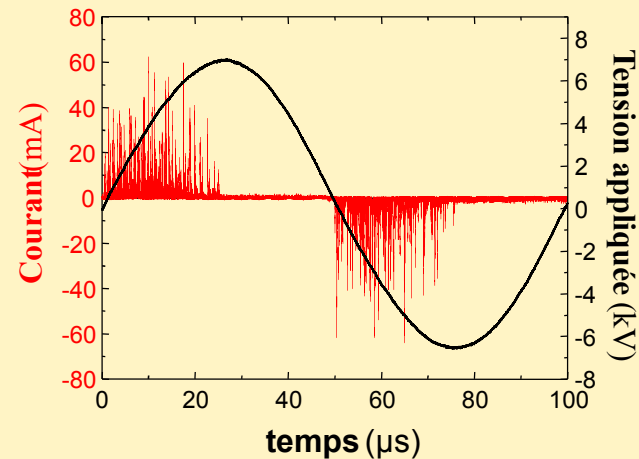
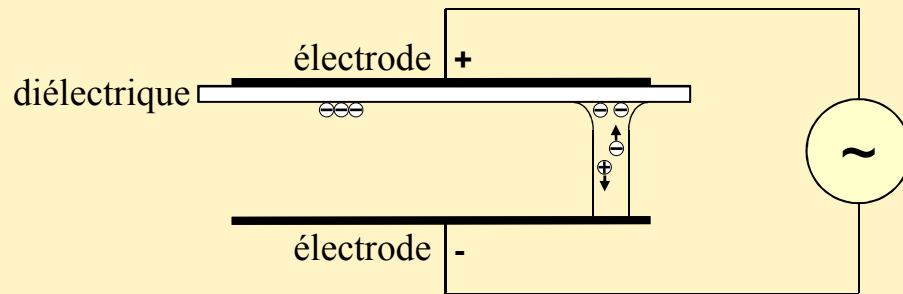
➔ Risque de destruction du matériau



Comment éviter la transition à l'arc ?

Solution robuste et facile : Décharge contrôlée par Barrière Diélectrique (DBD)

Siemens – 1857



Formation d'un canal de décharge

Accumulation de charges sur le diélectrique (V_{ds} ↗)

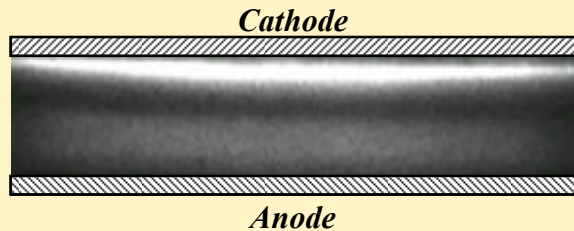
✓ Décharges bloquées

✓ Répartition plus uniforme des micro-décharges

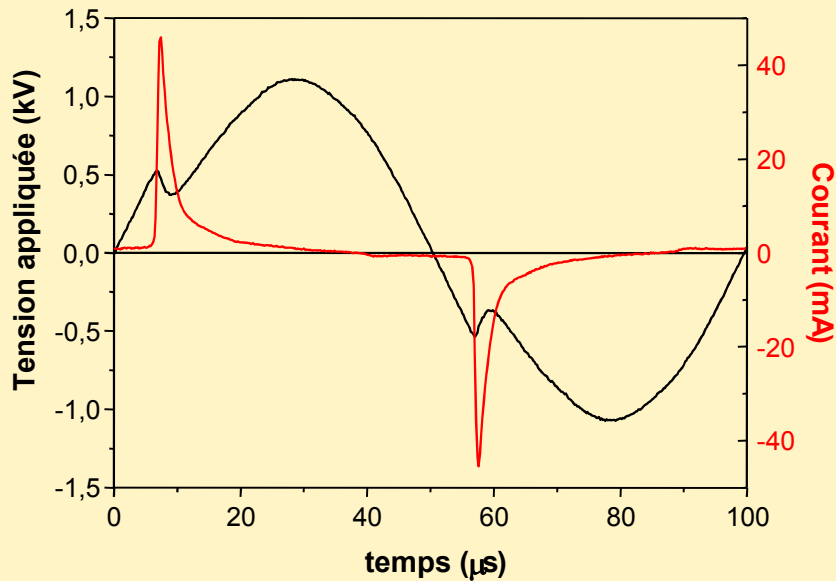
*Bartnikas (1969) puis Okazaki (1988),
Massines et Roth (1992)*



Décharge Luminescente à la Pression Atmosphérique (DLPA) obtenue en Hélium



Décharge homogène radialement

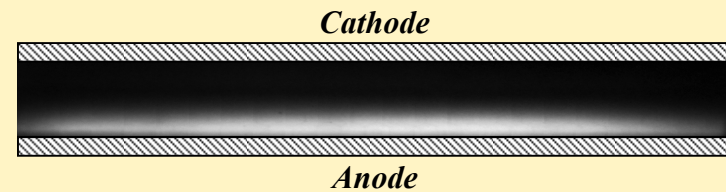


Périodicité du courant et durée du pic

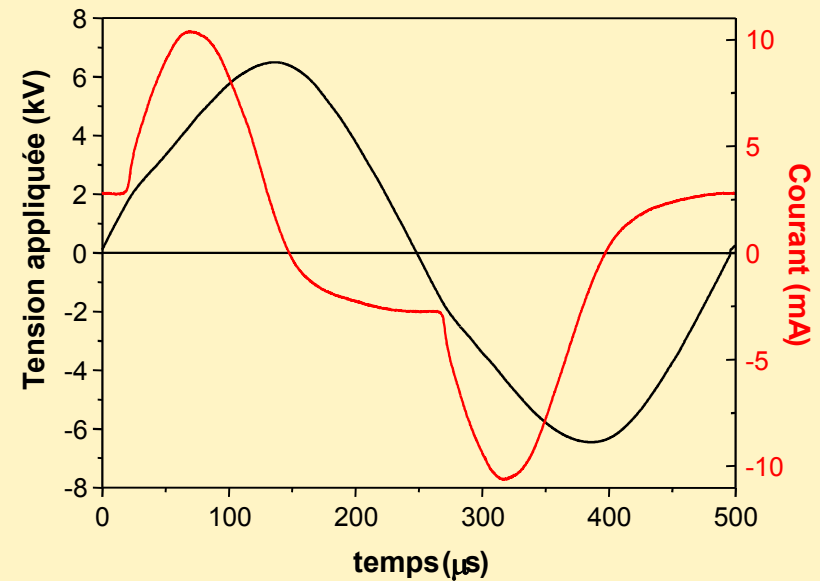
Massines (1996)



Décharge de Townsend à la Pression Atmosphérique (DTPA) obtenue en Azote

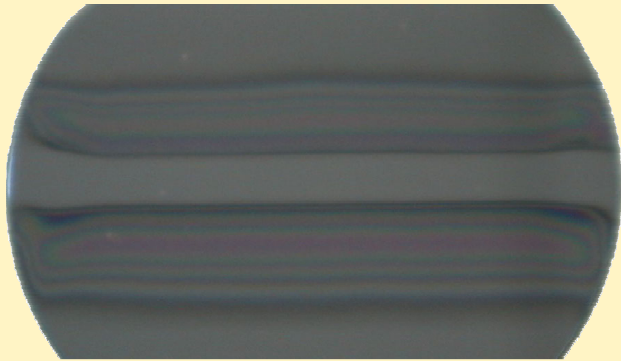


Décharge homogène radialement



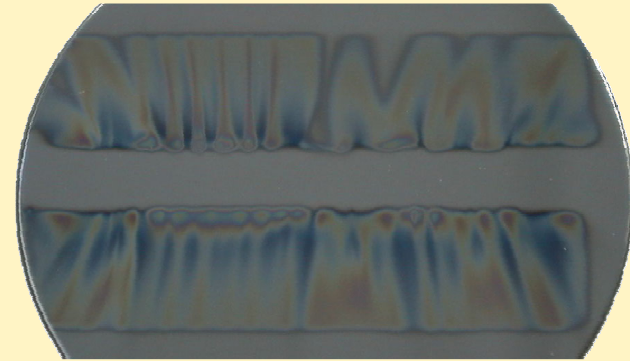
1 pic de courant par alternance

DTPA compatible avec les procédés de traitement en ligne de matériaux (activation de surface, dépôts de couches minces, ...).



DTPA

*Dépôts réalisés
en $N_2-N_2O-SiH_4$
(S. Carré)*

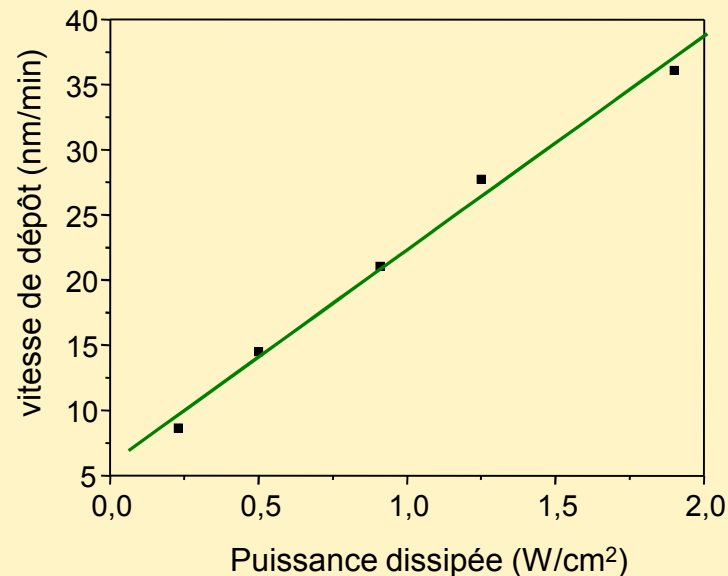


Filamentaire

Néanmoins : – les conditions d'obtention de la DTPA sont encore trop limitées

– temps de traitement ($\propto P$) trop long pour des applications industrielles

*Exemple de
vitesse de dépôt
en $N_2 - N_2O -$
 $HMDSO$
(A. Fornelli)*



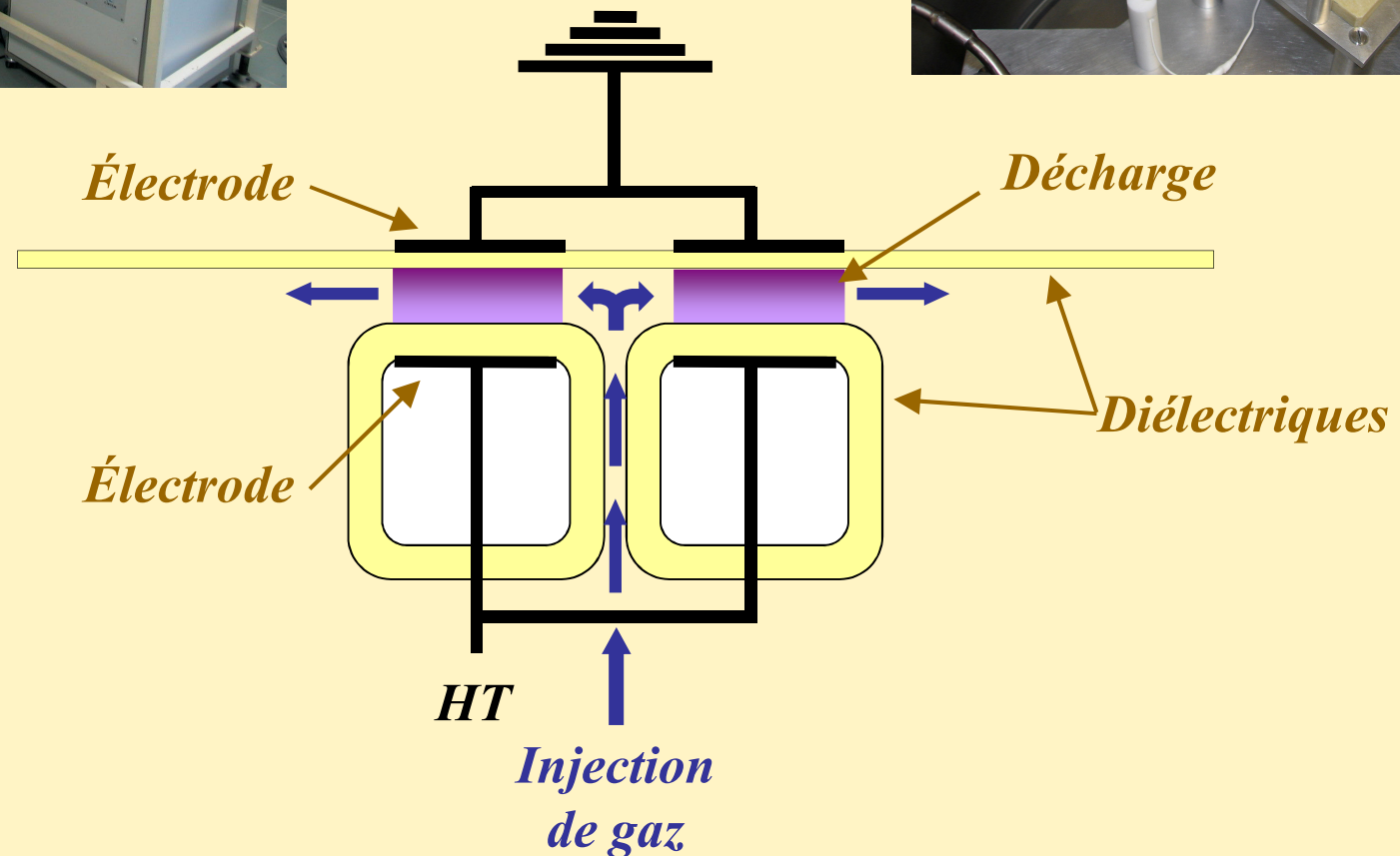
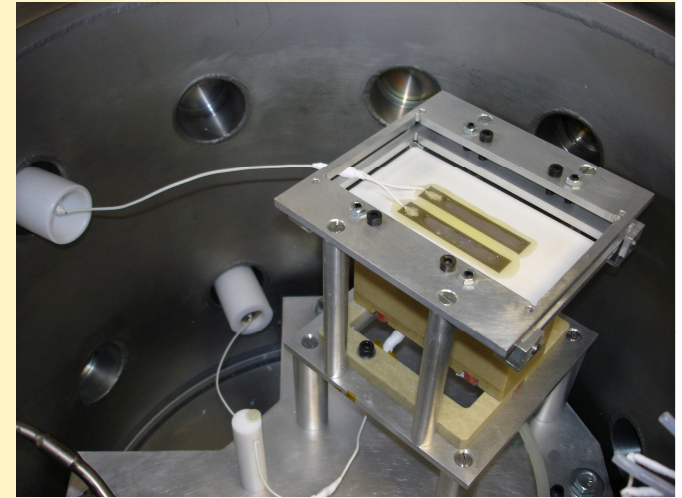
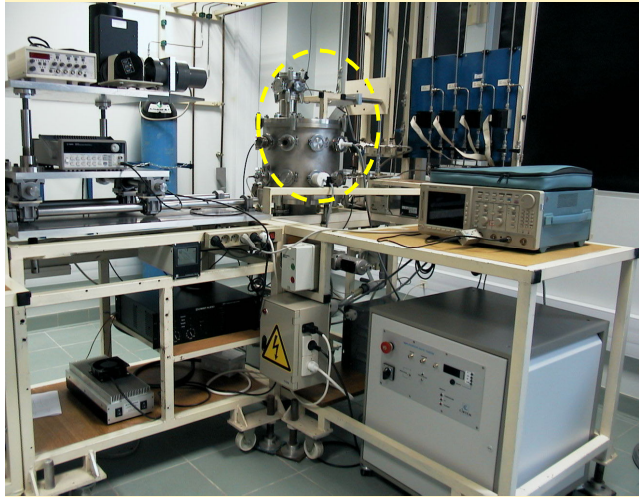
**D'où l'intérêt d'augmenter
la puissance transmise**

- ➔ **Amélioration de la compréhension de la physique de la DTPA**
- ➔ **Compréhension des causes de déstabilisation de la DTPA**
- ➔ **Définir des solutions permettant d'augmenter la puissance transmise**

 **Étude du couplage générateur – décharge**
Réalisation d'un modèle Alim + DTPA

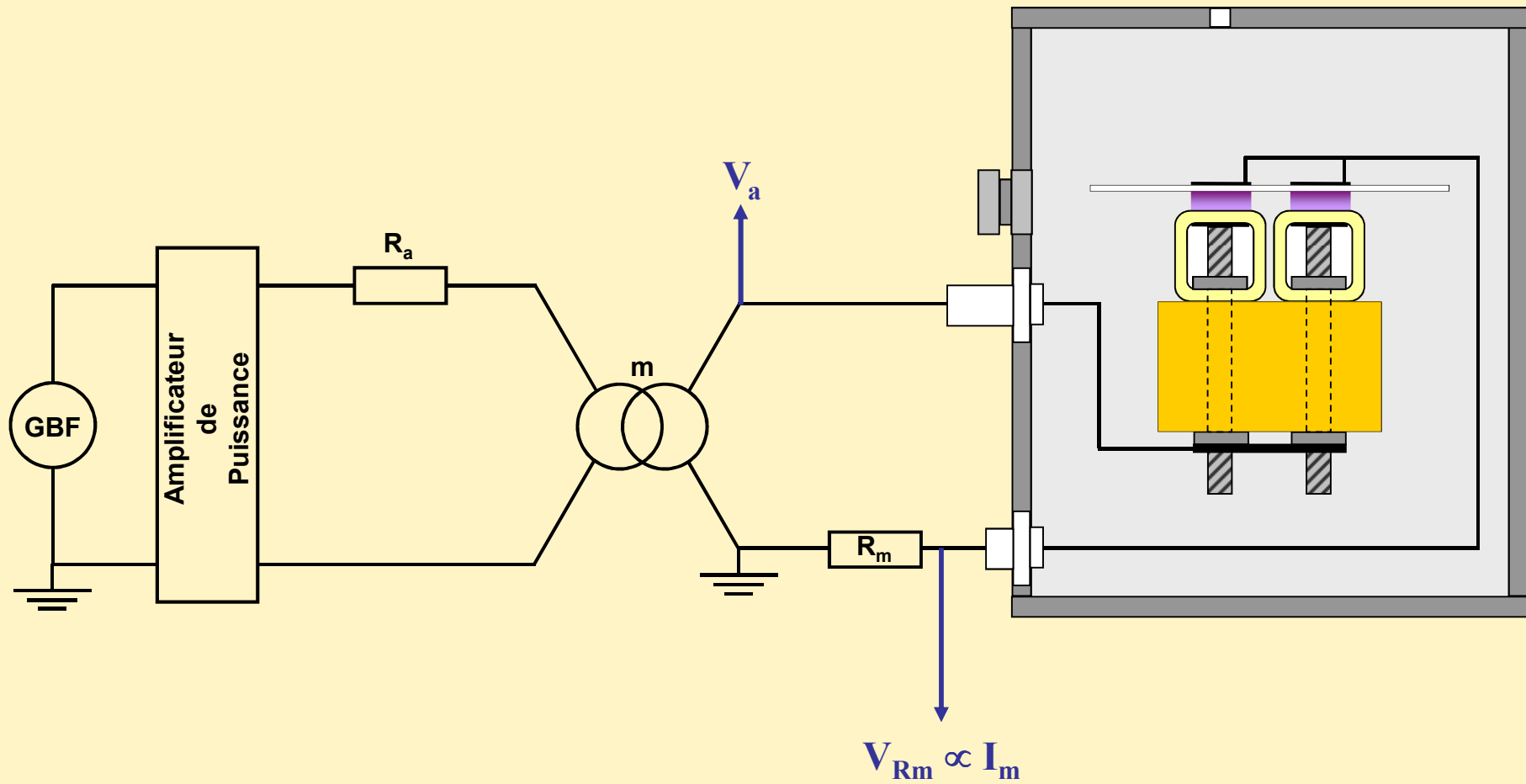
- **Dispositif expérimental**
- **Caractéristiques de la Décharge de Townsend à la Pression Atmosphérique (DTPA)**
- **Modélisation de la DTPA**
- **Augmentation de la puissance transmise à la DTPA**
- **Conclusion et perspectives**

A l'intérieur de l'enceinte se trouve la cellule de décharge ...

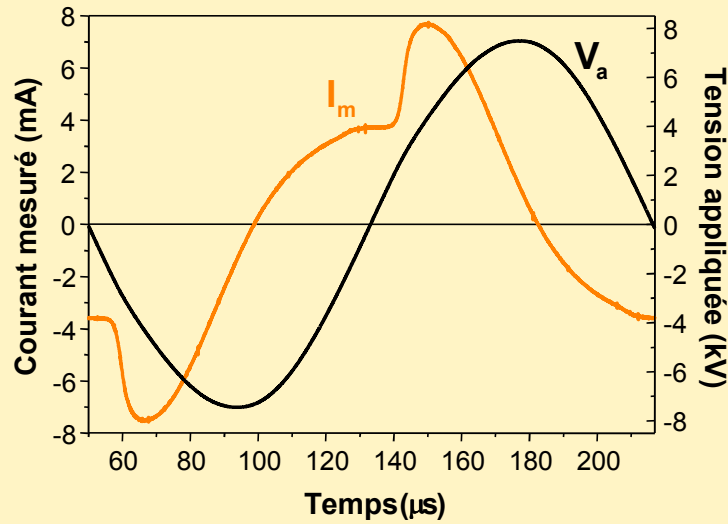


Amplificateur : 2800 VA

Transformateur : 600 VA, 60 V / 9 kV



- **Dispositif expérimental**
- **Caractéristiques de la Décharge de Townsend à la Pression Atmosphérique (DTPA)**
- **Modélisation de la DTPA**
- **Augmentation de la puissance transmise à la DTPA**
- **Conclusion et perspectives**



Pour modéliser la DTPA, il faut déterminer sa caractéristique courant - tension

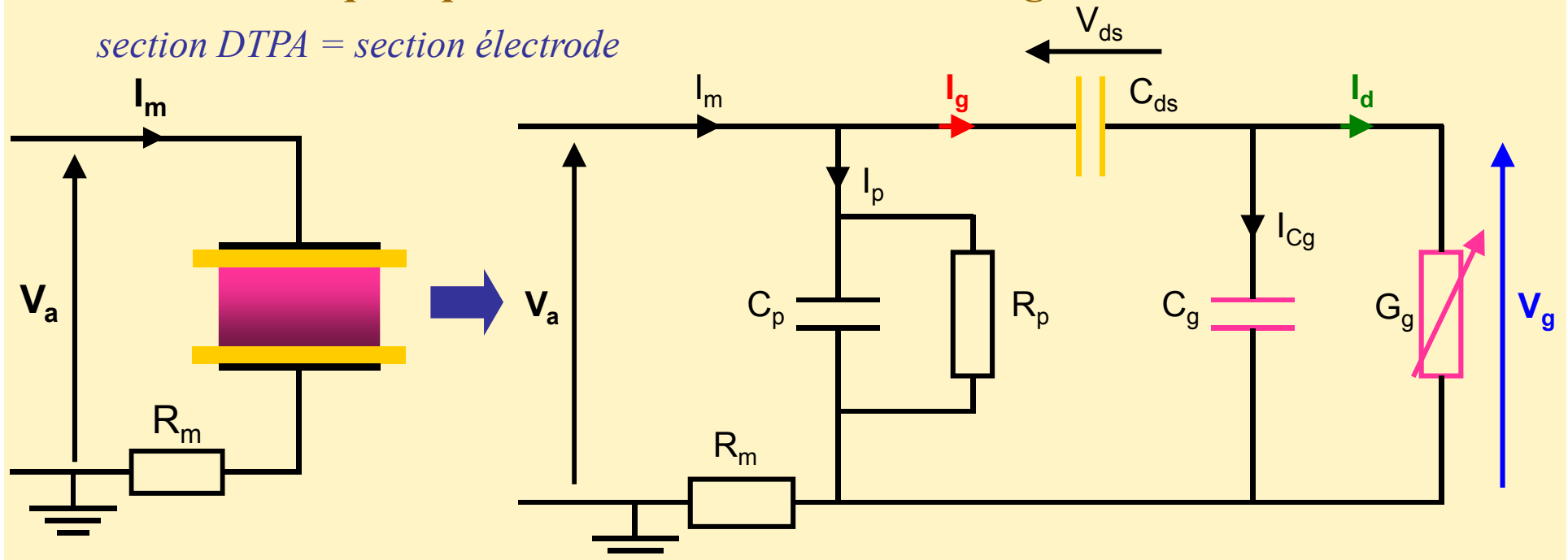
Or pour les DBD, la tension appliquée sur le gaz et le courant de décharge ne peuvent être mesurés ...



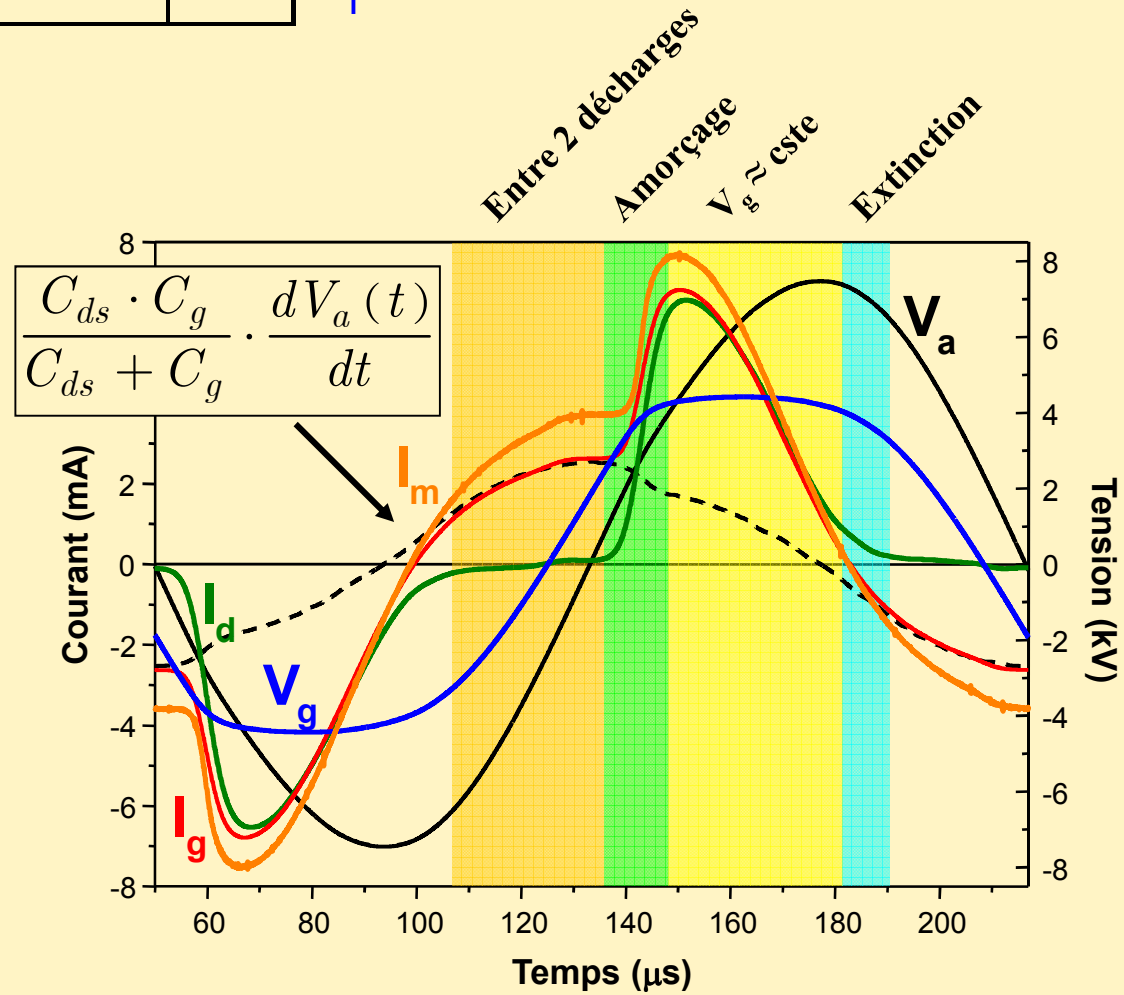
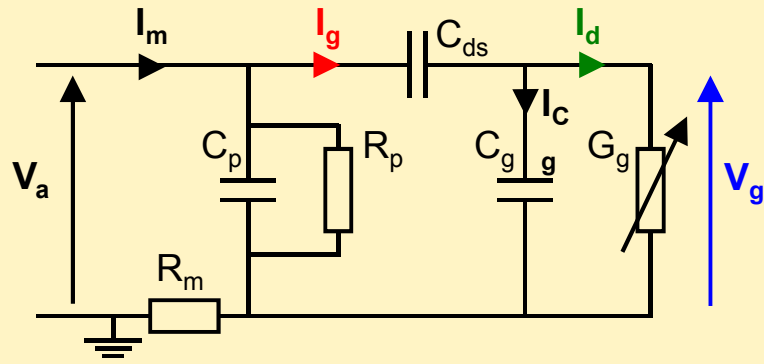
Comment les calculer ?

➔ Schéma électrique équivalent de la cellule de décharge

section DTPA = section électrode



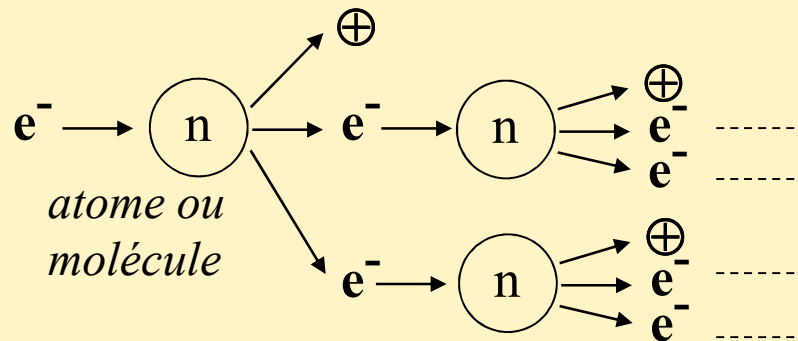
Caractéristiques de la DTPA – Analyse temporelle de l'évolution des grandeurs électriques 11



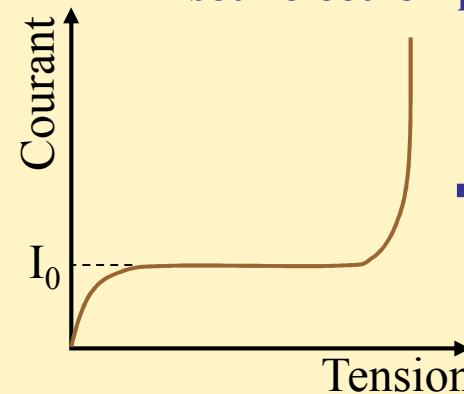
Mécanismes de création de charges dans un gaz

➔ Avalanche électronique

Sous l'effet du champ électrique, les électrons sont accélérés et entraînent l'ionisation des atomes ou des molécules par collision.



α = nombre d'électrons produits sur le trajet d'un seul électron parcourant 1 cm

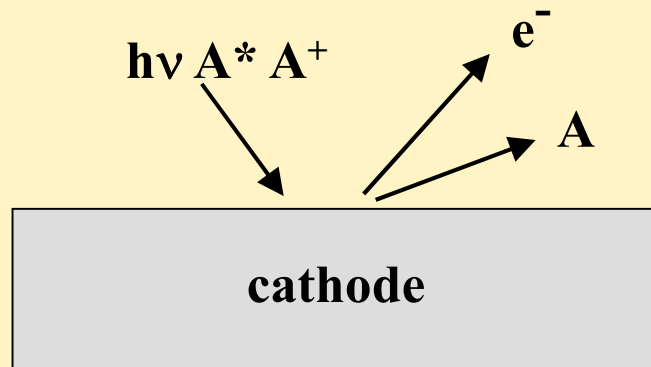


$$\rightarrow I = I_0 \cdot \exp(\alpha \cdot d)$$

d : distance inter-électrodes

➔ Émission secondaire à la cathode

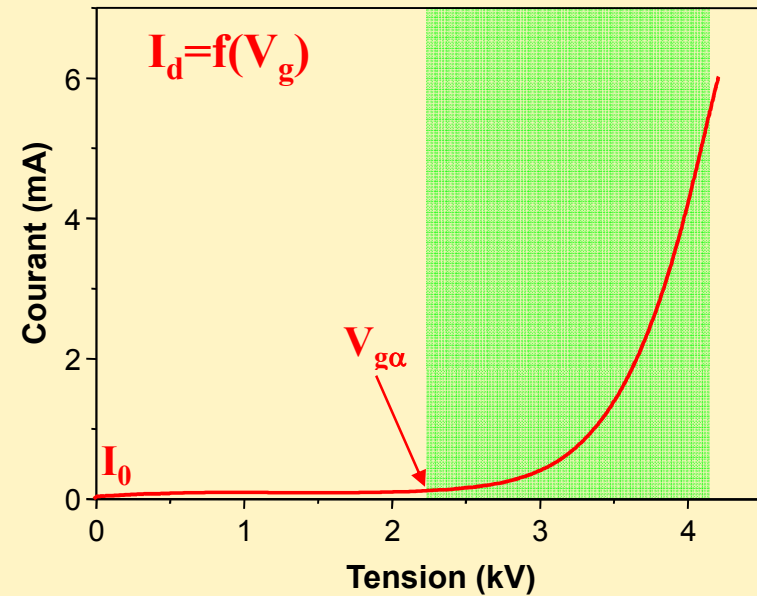
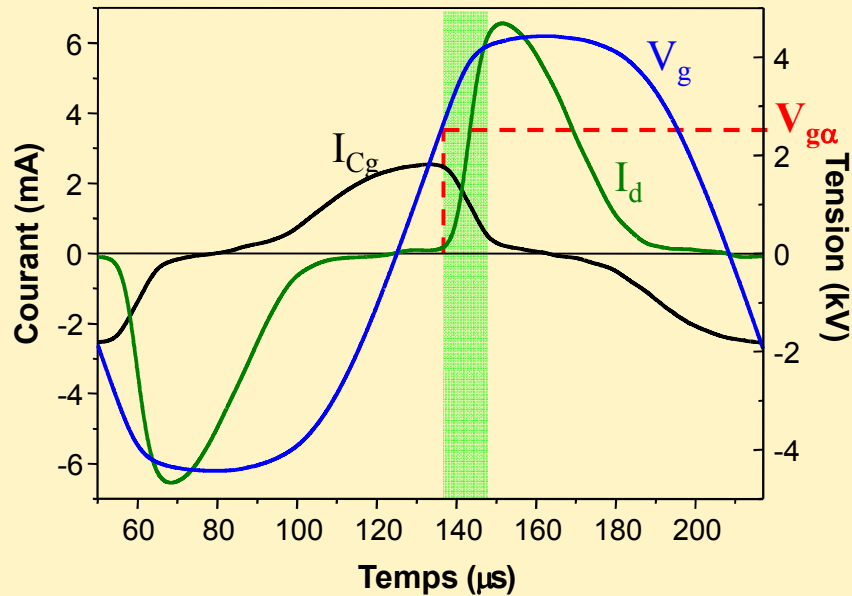
Le bombardement de la cathode par des ions ou des états excités permet de créer des électrons dit « électrons secondaire ».



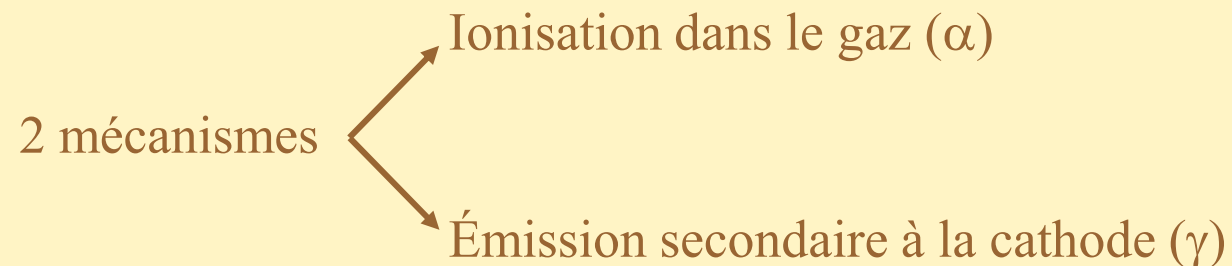
Le nombre moyen d'électrons émis par la cathode par ion ou état excité incident est défini par γ

Amorçage de la décharge

Lorsque est $V_g > V_{g\alpha}$ $\rightarrow I_d \nearrow$ et $I_{Cg} \searrow$ \rightarrow Le gaz passe d'un état capacitif à un état résistif

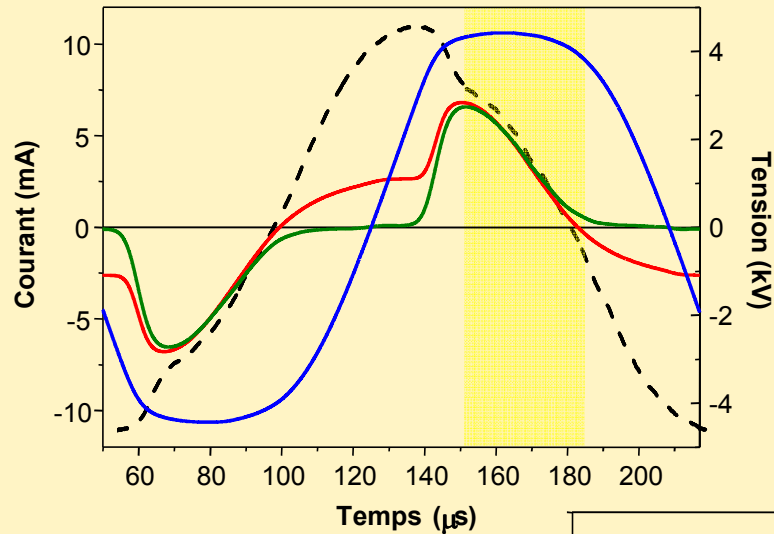


➔ **Claquage de Townsend**



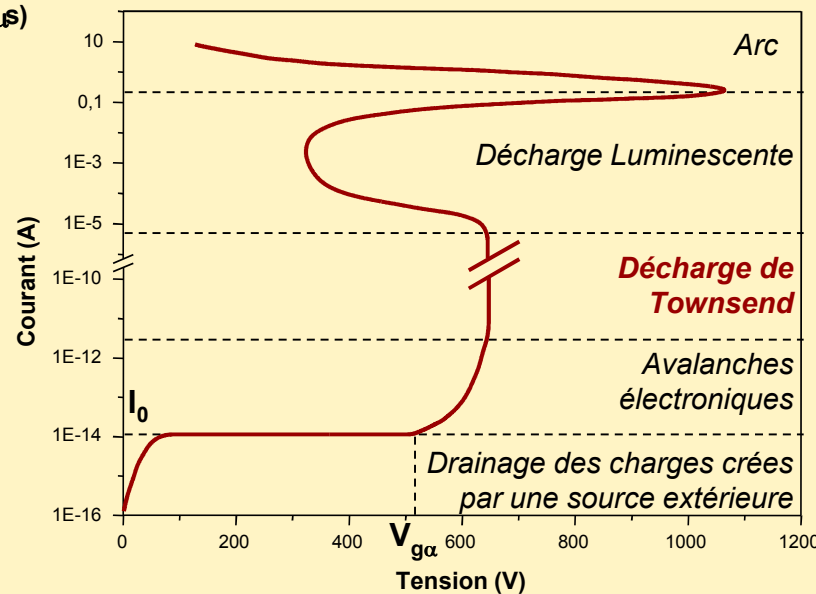
$V_{g\alpha} \approx \text{cste}$

$V_{g\alpha} = \text{cste} \Rightarrow$ toutes les variations de V_a sont reportées sur $C_{ds} \Rightarrow I_g(t) = C_{ds} \cdot \frac{dV_a(t)}{dt}$



➔ Courant I_d imposé par l'alimentation

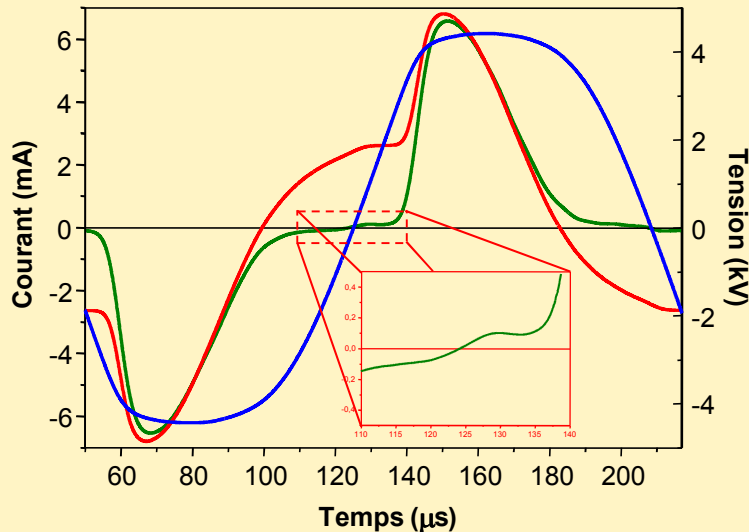
➔ Décharge alimentée par une source de courant (amplitude \propto à C_{ds} et $V \times f$)



➔ Décharge de Townsend

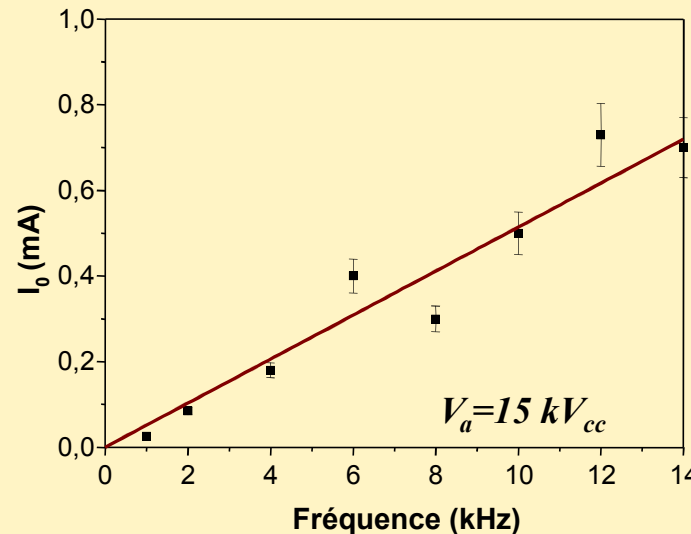
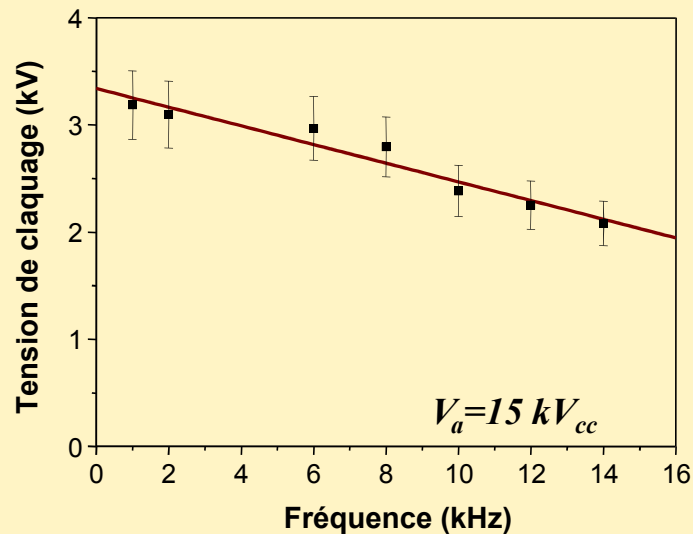
Effet mémoire d’une décharge à la suivante :

➔ Le courant de décharge n’est pas nul entre 2 décharges.



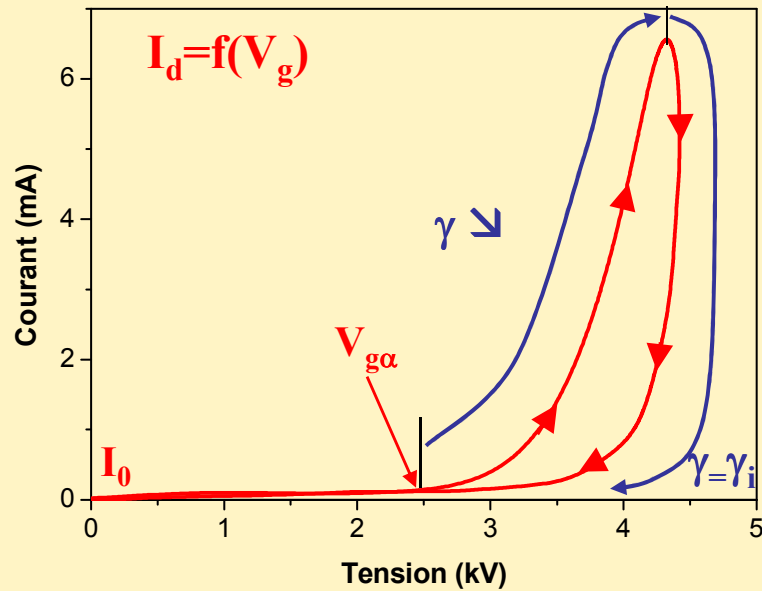
➔ Le gaz ne revient pas au repos entre 2 décharges ($I_d=I_0$).

➔ Ce courant provient de la diffusion des métastables $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ créés pendant la décharge précédente qui induit une émission continue d’électrons à la cathode.



➔ de V_{claquage} pour partie due à l’effet mémoire

Variation de l'émission secondaire durant la décharge :



→ Hystérésis sur la caractéristique $I_d = f(V_g)$

Lors de l'amorçage, le diélectrique recouvrant la cathode est chargé négativement → γ fort (jusqu'à 0,5)



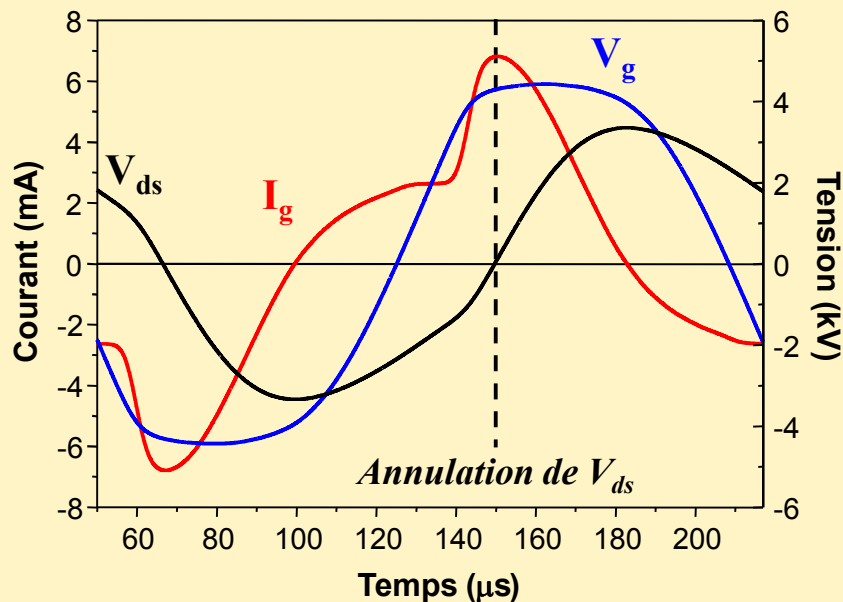
Lorsque la charge du diélectrique ↘ alors γ ↘



L'ionisation dans le gaz ↗ (donc V_g)



Lorsque le diélectrique recouvrant la cathode est entièrement déchargé : $\gamma \approx \gamma_i$ (0,01)

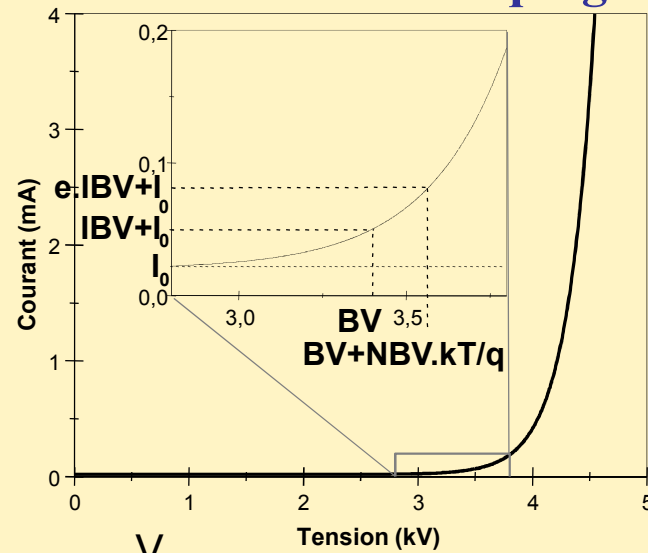


La modélisation de la DTPA devra rendre compte :

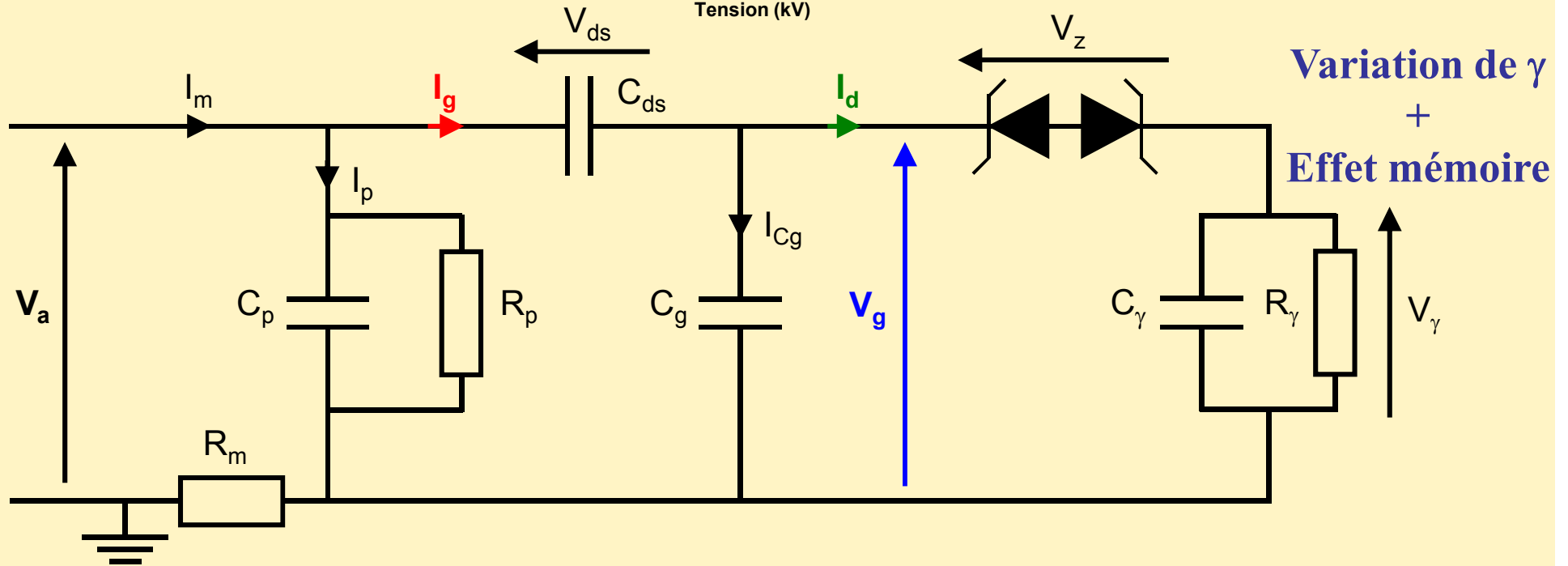
- ➡ du claquage de type Townsend qui conduit à une décharge de Townsend
- ➡ de la variation de l'émission secondaire pendant la décharge
- ➡ de l'effet mémoire d'une décharge à la suivante

- **Dispositif expérimental**
- **Caractéristiques de la Décharge de Townsend à la Pression Atmosphérique (DTPA)**
- **Modélisation de la DTPA**
- **Augmentation de la puissance transmise à la DTPA**
- **Conclusion et perspectives**

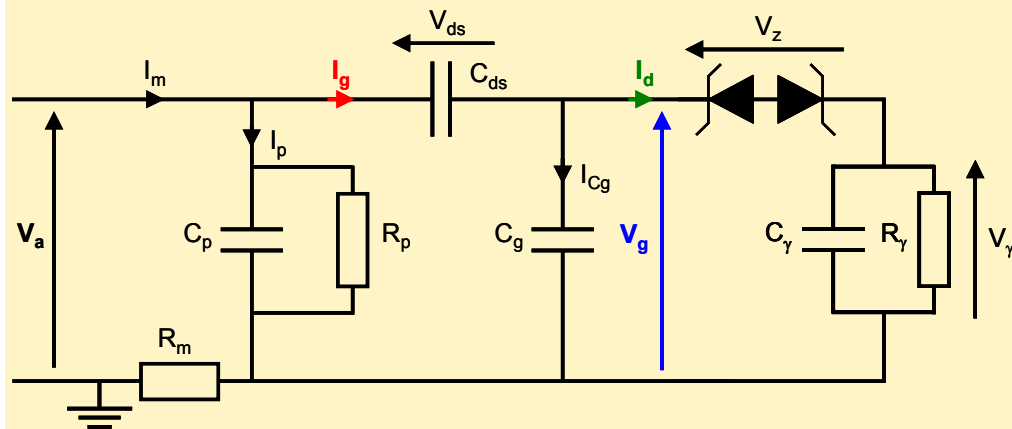
Claquage de type Townsend



4 paramètres :
 BV , IBV , $NBV.kT/q$ et I_0



Variation de γ
 +
 Effet mémoire



Amorçage

$$V_z(t) = V_g(t) - V_\gamma(t)$$

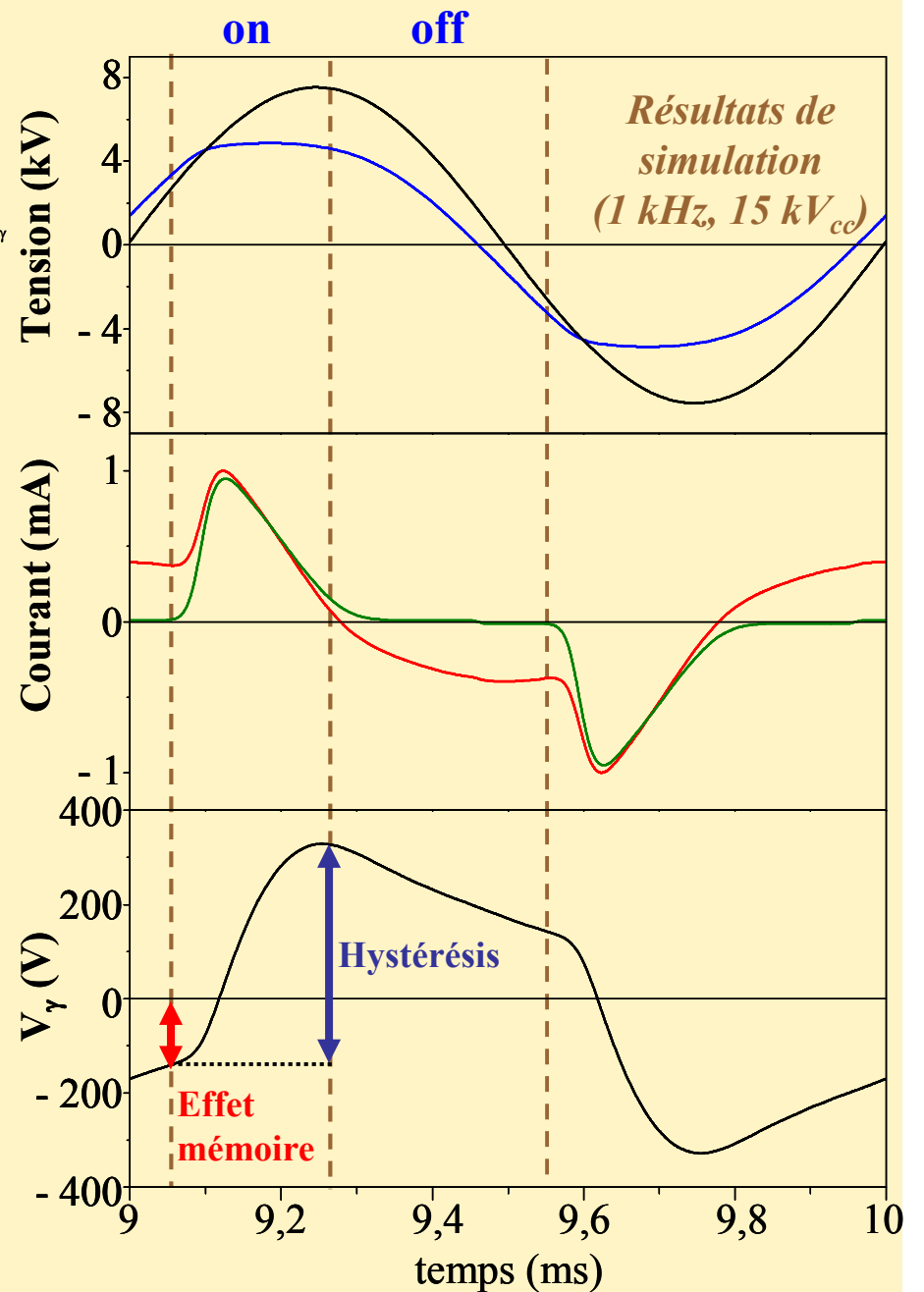
>0 >0 <0 ➔ Amorçage de la Zener pour $V_g < BV$

Pendant la décharge

$I_d \nearrow$: C_γ se charge et V_γ qui était de signe – change de signe et \nearrow

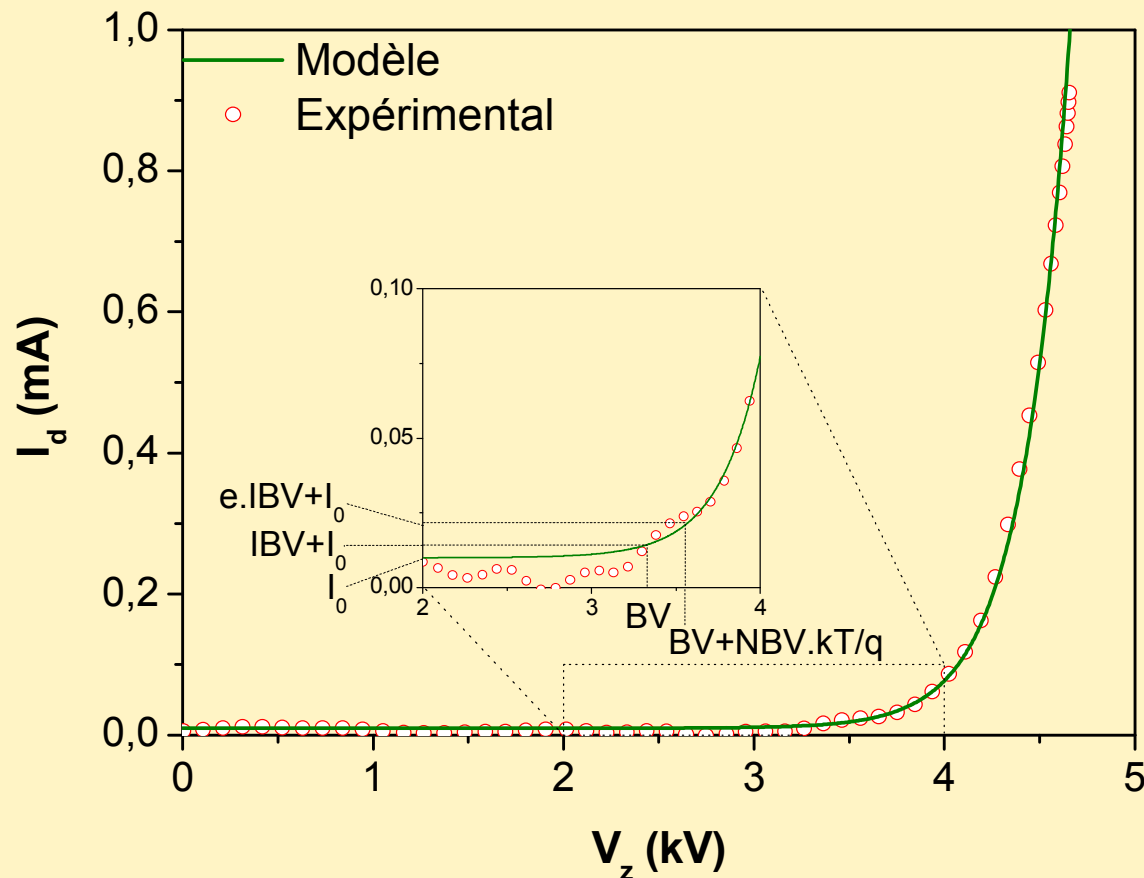
Entre deux décharges

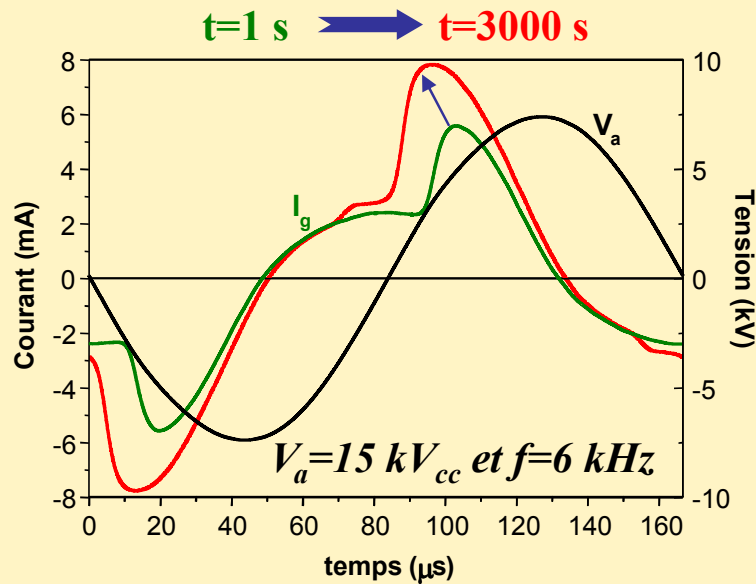
Les diodes sont bloquées : C_γ se décharge dans R_γ et donc $V_\gamma \searrow$



Les valeurs de R_γ et C_γ sont déterminées à partir de l'hystérésis de $I_d=f(V_g)$ et de la variation de la tension de claquage de la DTPA.

Connaissant R_γ et C_γ , la tension aux bornes des diodes est calculée et les paramètres des Zeners sont déterminés graphiquement à partir de la caractéristique $I_d=f(V_z)$.





Les paramètres du modèle ont été déterminés dans une condition de puissance

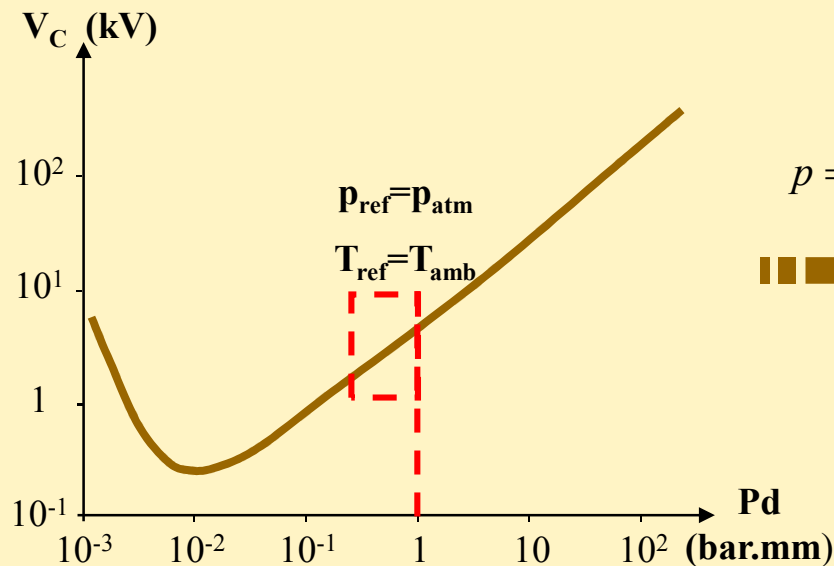
Lorsque $t \nearrow \rightarrow P \nearrow$ et $V_{\text{claquage}} \searrow$

Effet thermique ?

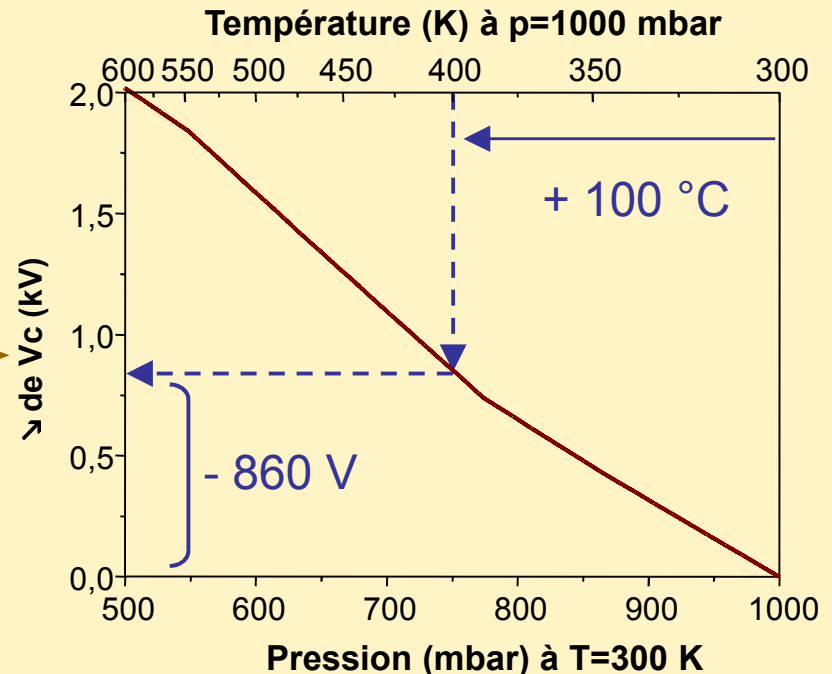
$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

à p et V constants si $T \nearrow$ alors $n \searrow$ donc $V_c \searrow$

Courbe de Paschen



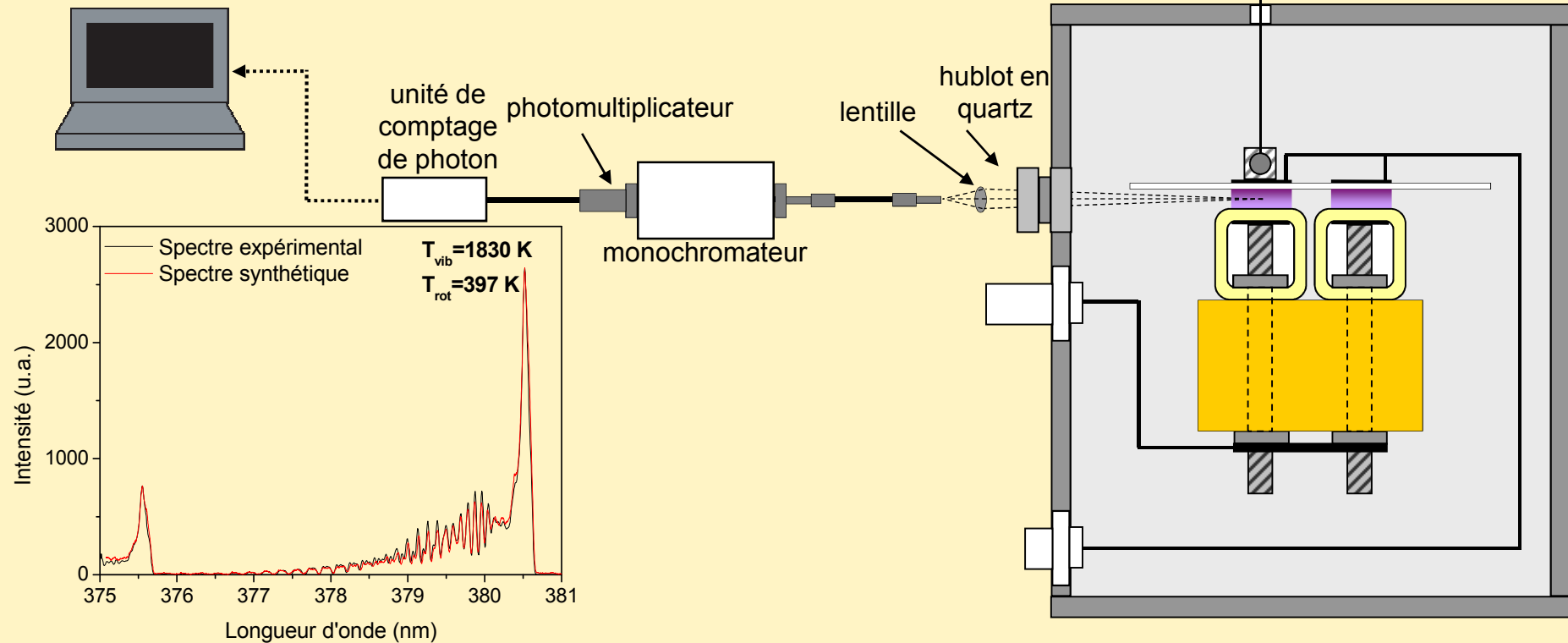
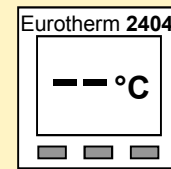
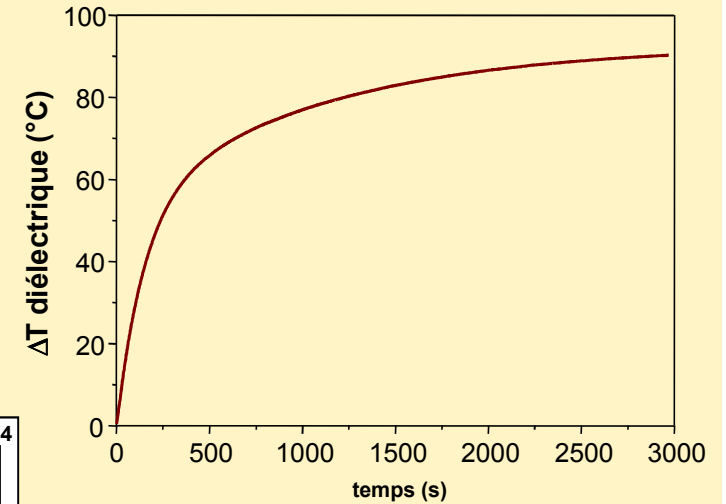
$$p = p_{ref} \cdot \frac{T}{T_{ref}}$$



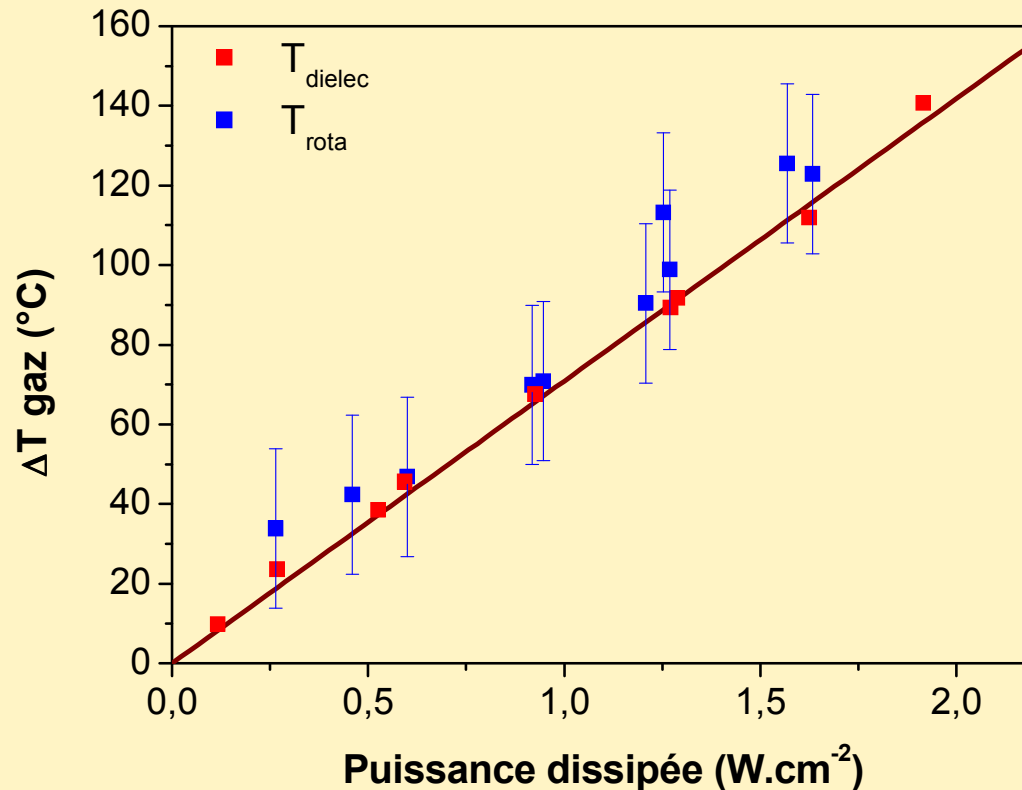
➔ Détermination de la température du gaz

La température du gaz est déterminée à partir de :

- Température en surface d'un diélectrique lorsque l'équilibre thermique est atteint
- Température rotationnelle du gaz (déduite de mesures de spectroscopie d'émission optique)



Température du gaz en régime établi en fonction de la puissance

Conditions :

- à l'équilibre (temps long)
- $1 < f < 10$ kHz
- $13 < V_a < 19$ kV_{cc}

➔ Relation liant la puissance à l'élévation de température à l'équilibre

$$\Delta T = P \cdot (-41,5 \cdot v_{gaz} + 76,7)$$

P : puissance moyenne ($W.cm^{-2}$)

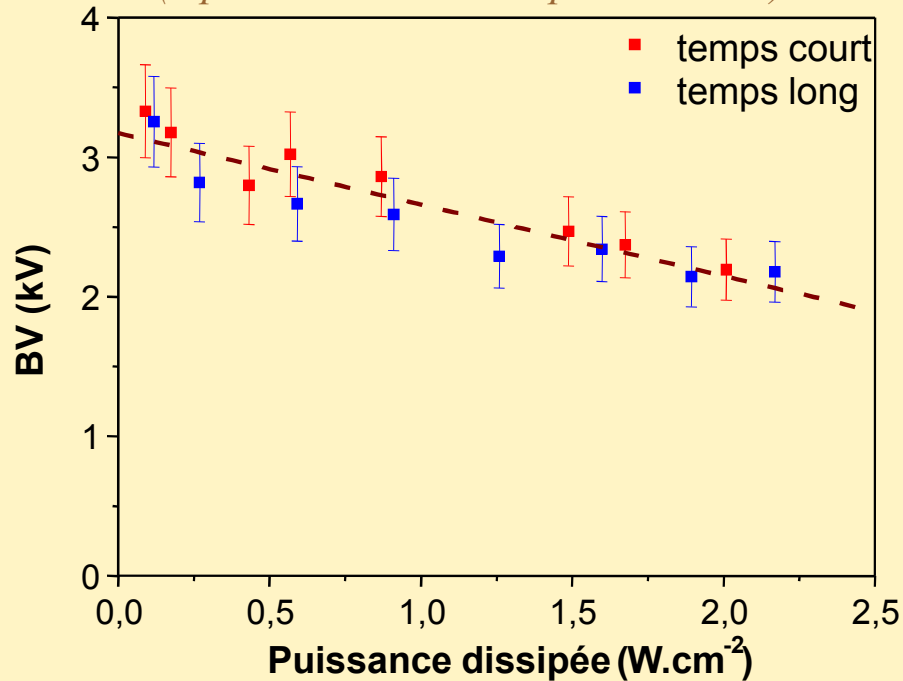
v_{gaz} : vitesse du gaz ($m.s^{-1}$)

➔ En régime transitoire ?

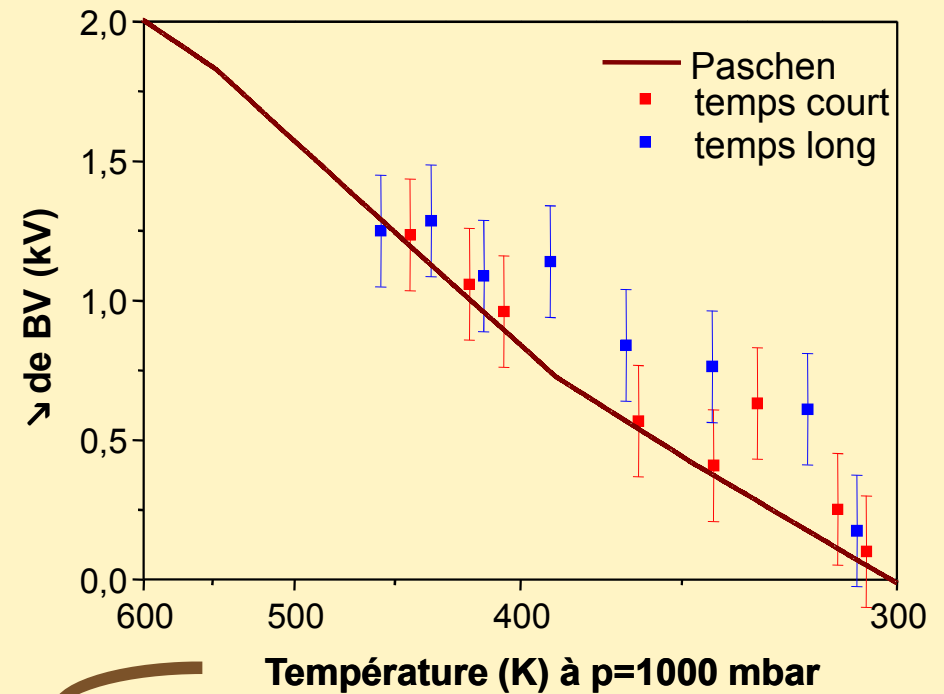
Tous les paramètres du modèles ont été déterminés dans toutes les conditions (à temps court et à temps long) puis corrélés avec la puissance dissipée dans la décharge.

Détermination de BV (Zener)

(à partir de mesures expérimentales)



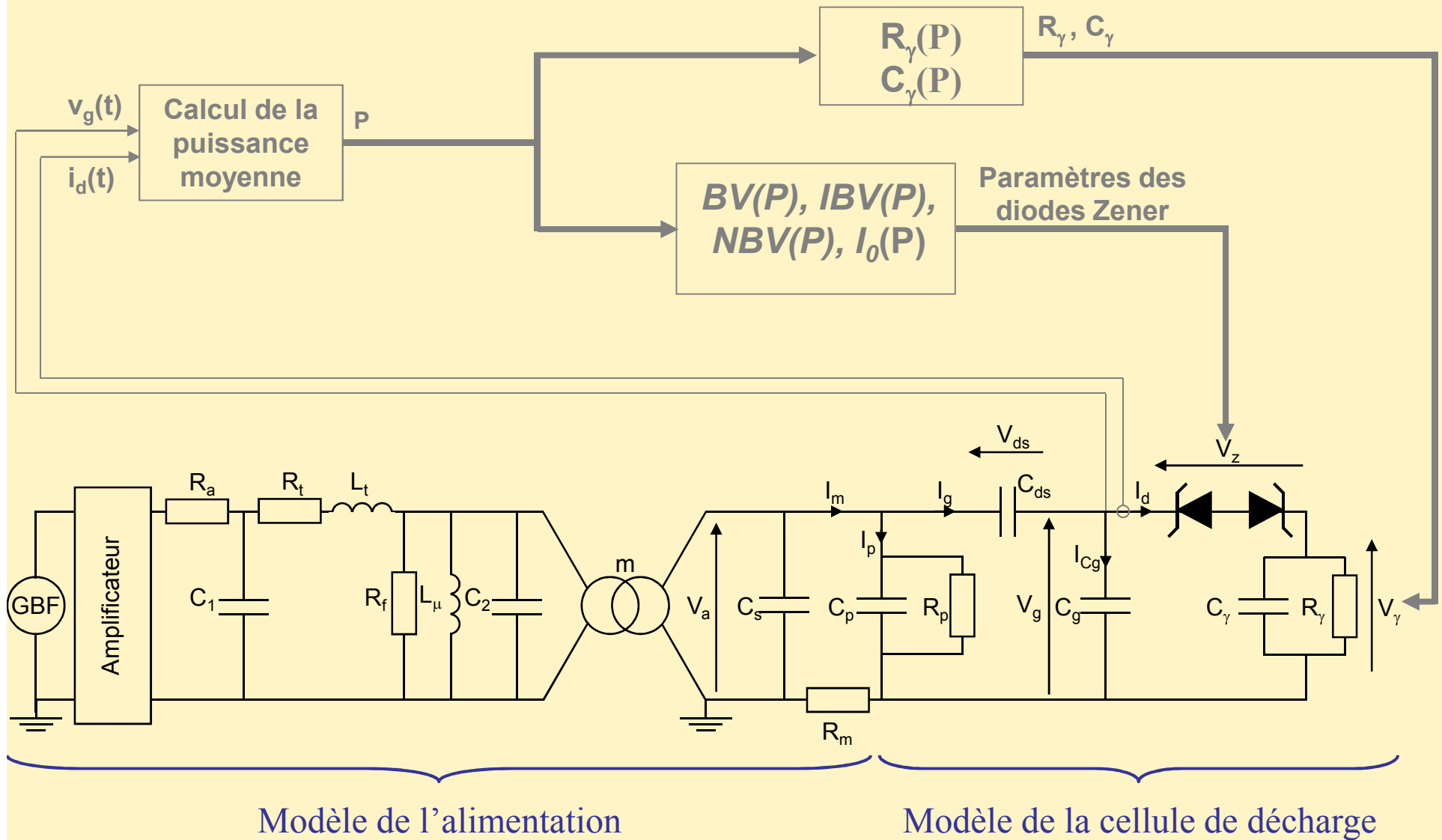
Comparaison avec Paschen



Calculée à partir de :

$$\Delta T = P \cdot (-41,5 \cdot v_{gaz} + 76,7)$$

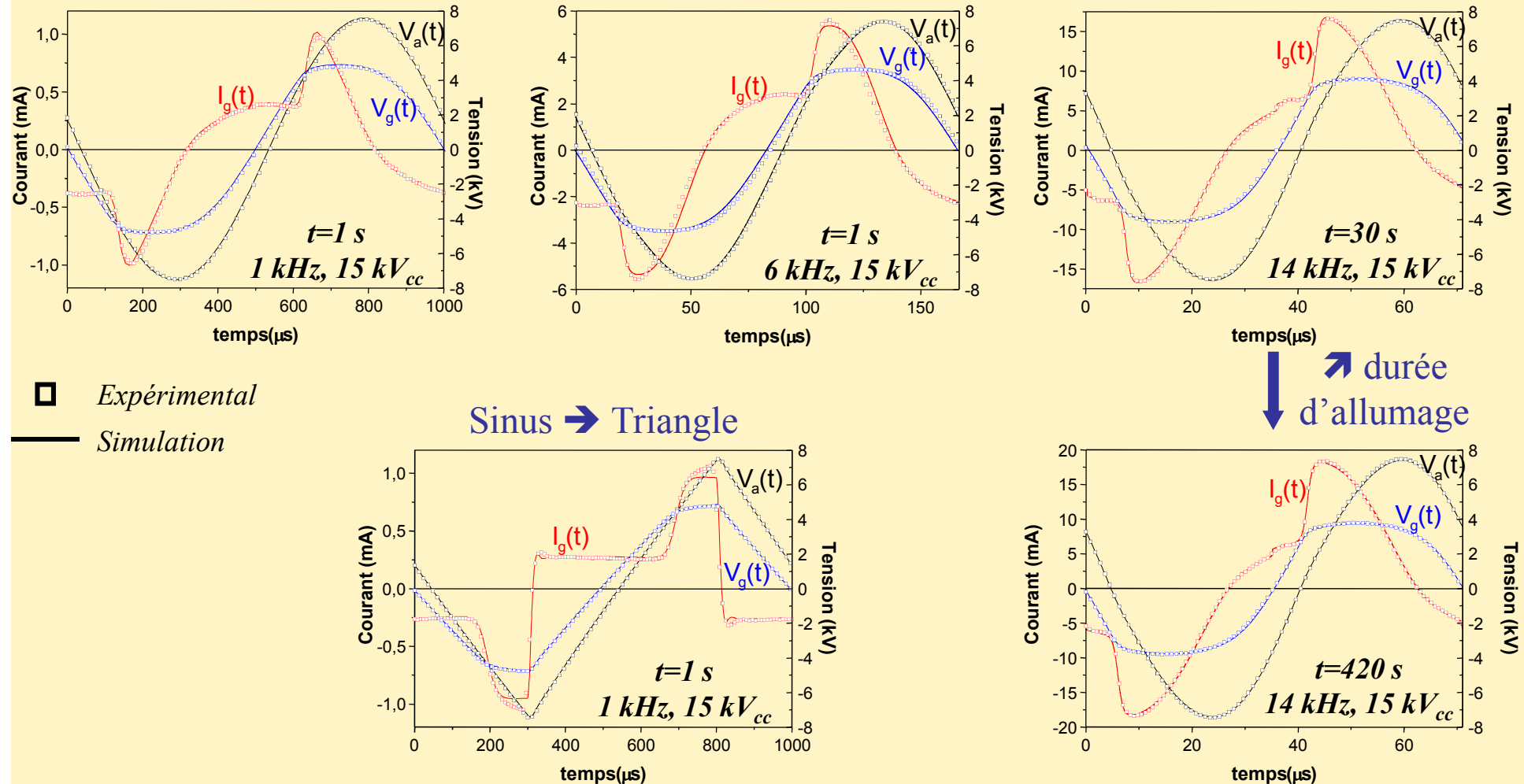
à chaque instant : $\Delta T_{gaz}(t) = P(t) \cdot (-41,5 \cdot v_{gaz} + 76,7)$



➔ **Modèle auto-adaptatif : pas d'ajustement des paramètres**

Le modèle de la DTPA a été validé par comparaison entre les résultats expérimentaux et les simulations de $V_a(t)$, $V_g(t)$ et $I_g(t)$.

↗ f



Bonne description du comportement électrique de la DTPA qq soient les conditions

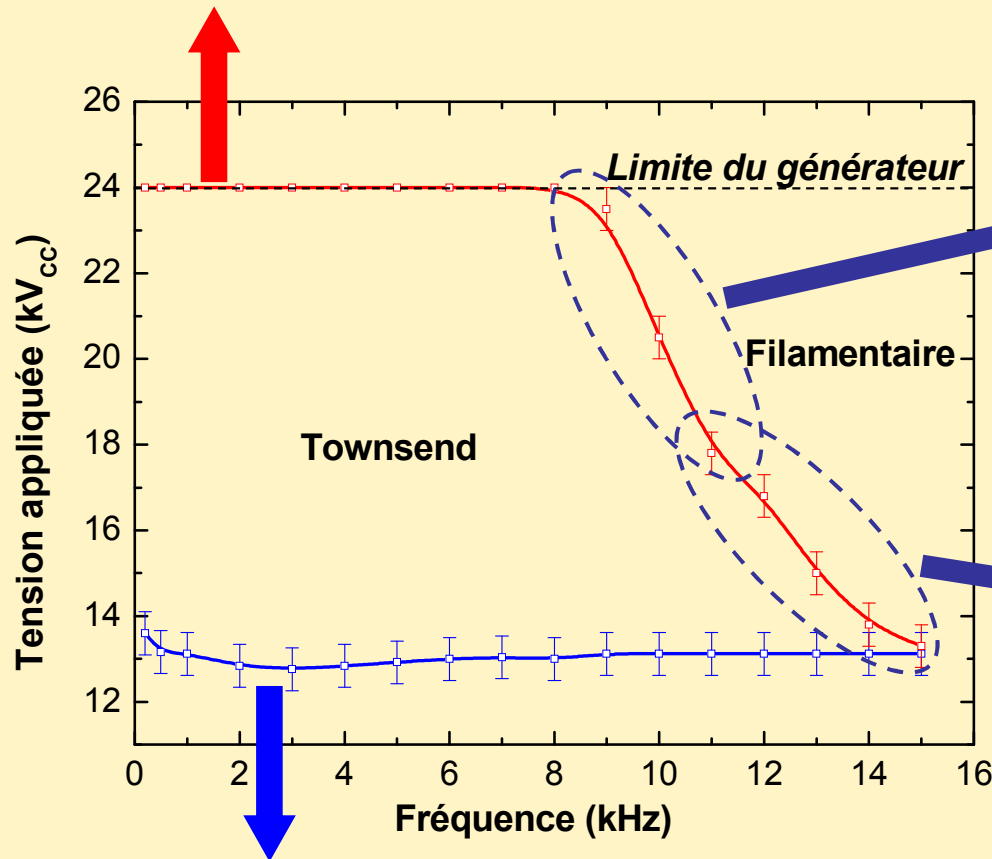
Le modèle montre que le comportement de la DTPA est contrôlée par :

- *la variation de l'émission secondaire durant la décharge*
- *l'effet mémoire d'une décharge à la suivante*
- *l'élévation de la température du gaz*

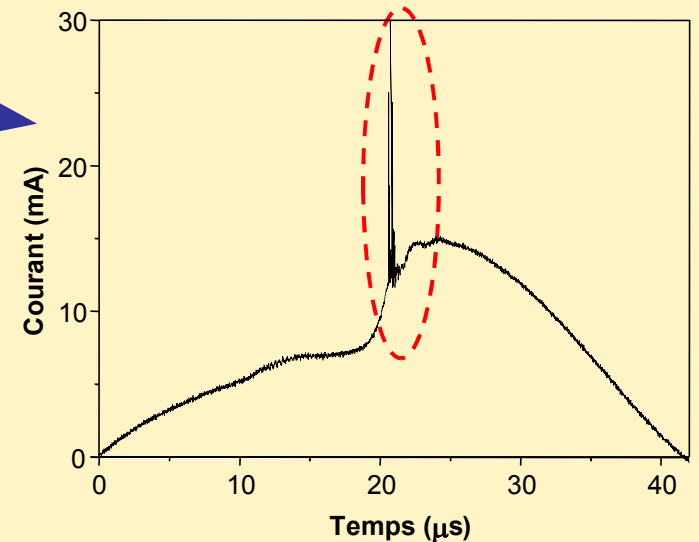
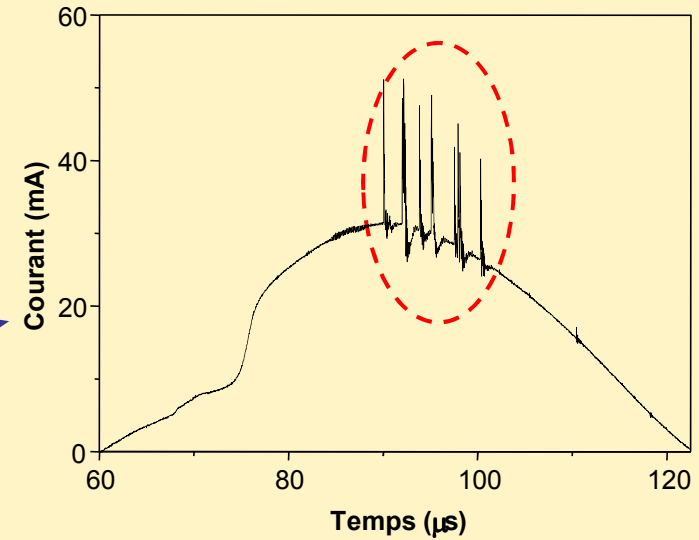
- **Dispositif expérimental**
- **Caractéristiques de la Décharge de Townsend à la Pression Atmosphérique (DTPA)**
- **Modélisation de la DTPA**
- **Augmentation de la puissance transmise à la DTPA**
- **Conclusion et perspectives**

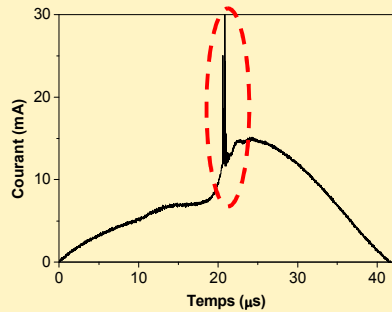
Le domaine de fonctionnement $V_a=f(f)$ permettant d'obtenir une DTPA est limité :

Limite supérieure = limite du générateur ou tension de transition DT / DF

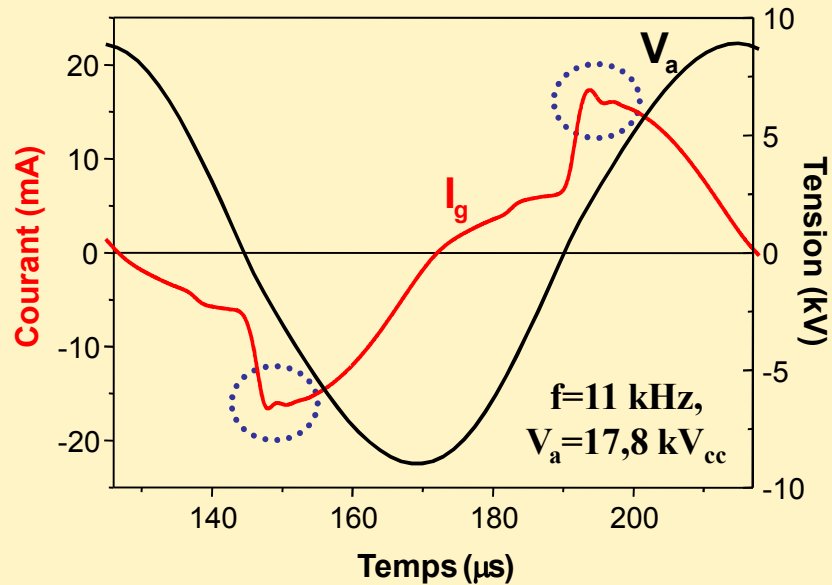


Limite inférieure = tension de recouvrement des électrodes

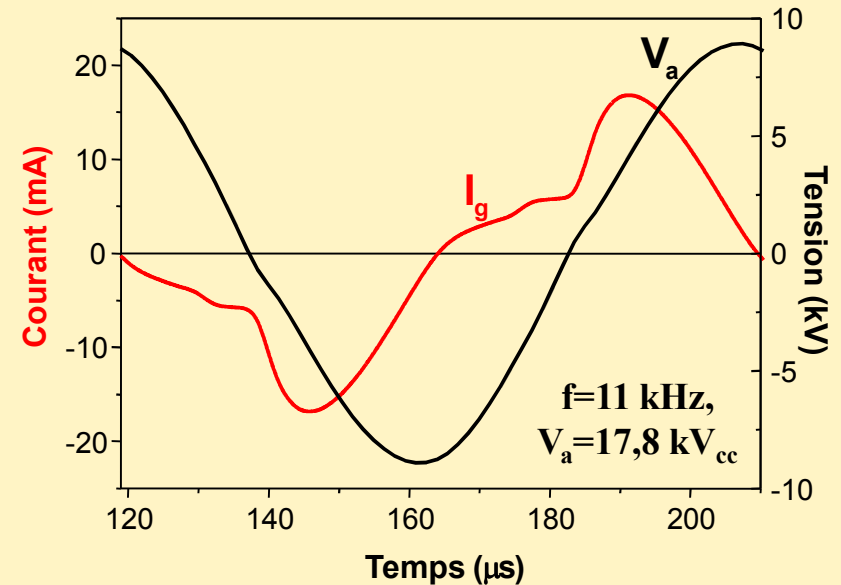




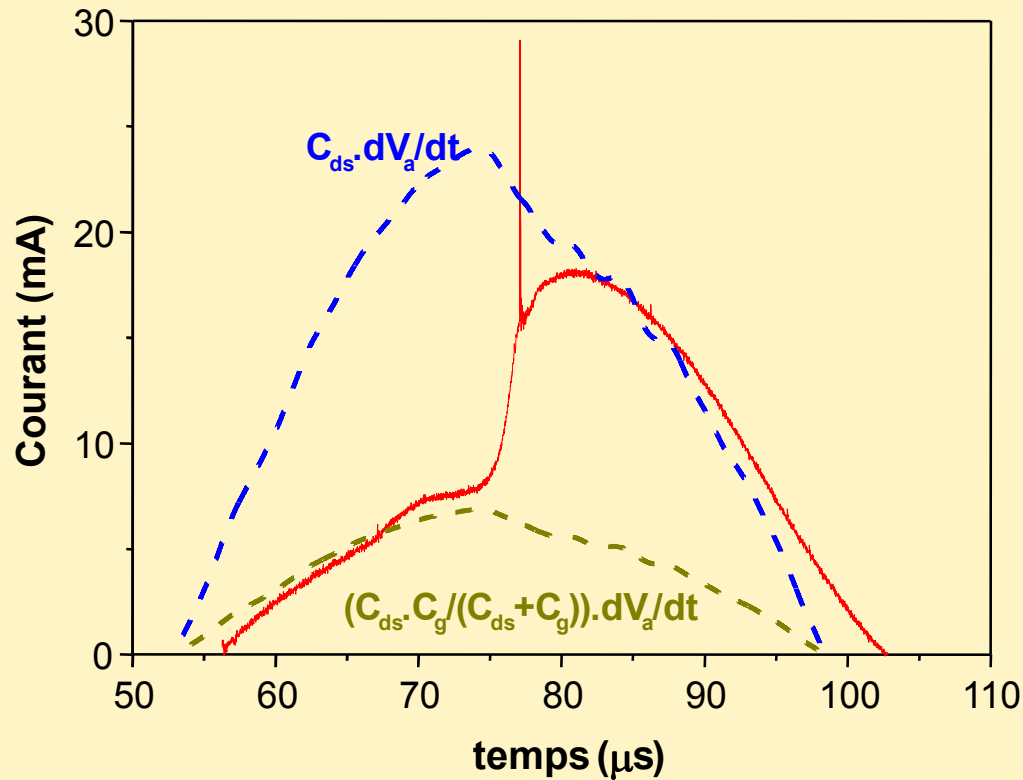
Modèle DTPA + Modèle Alim



Modèle DTPA + Alim parfaite



➔ **En simulation : apparition d'oscillation durant la \nearrow de I_g uniquement lorsque le modèle de la DTPA est couplé à celui de l'alim !**



Lors de l'amorçage, la charge vue par l'alimentation bascule d'une source de courant contrôlée par C_{ds} et C_g vers une source contrôlée par C_{ds}

Amplitude de la variation de charge :

$$k_c = \frac{C_{ds}}{C_g} + 1$$

Si la variation de charge est trop rapide et/ou trop importante



Oscillations du courant dues aux éléments parasites de l'alimentation

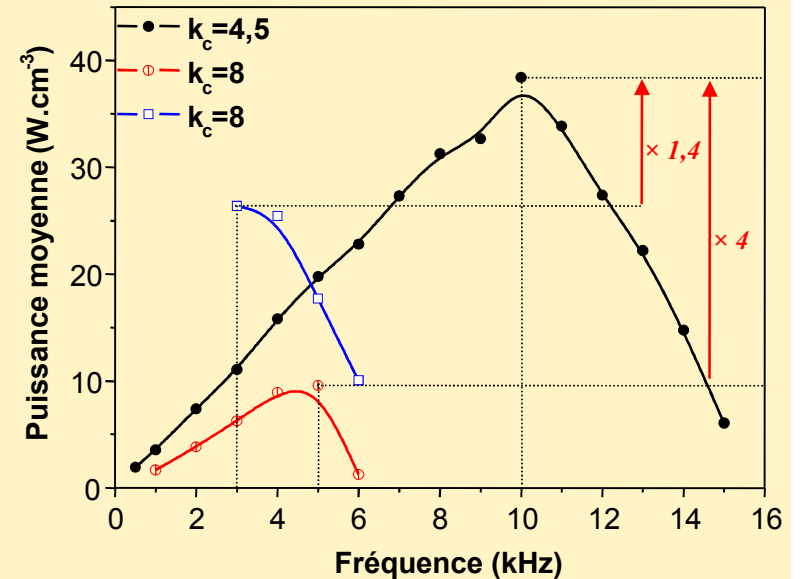
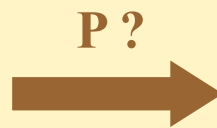
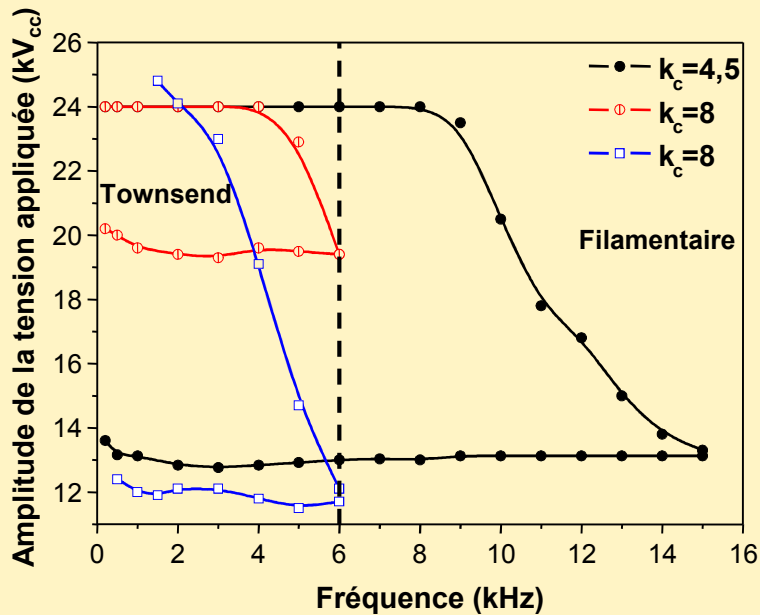
2 solutions possibles pour éviter les oscillations

↘ l'amplitude de la variation (k_c)

↘ la vitesse de la variation

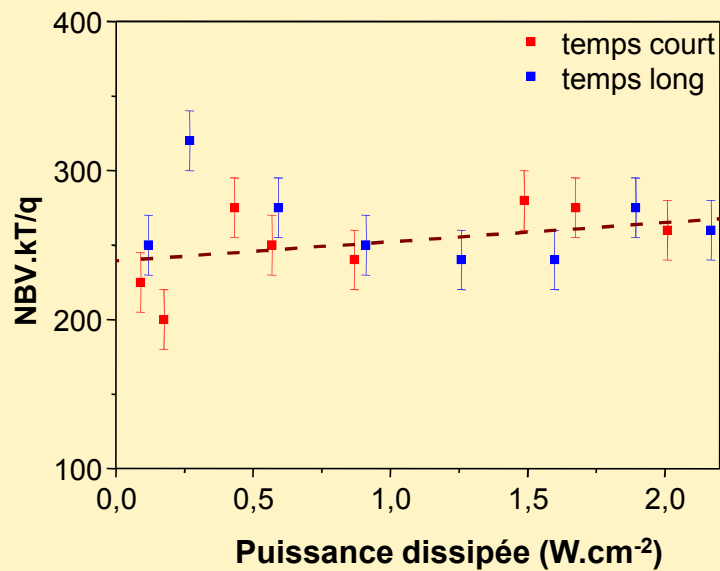
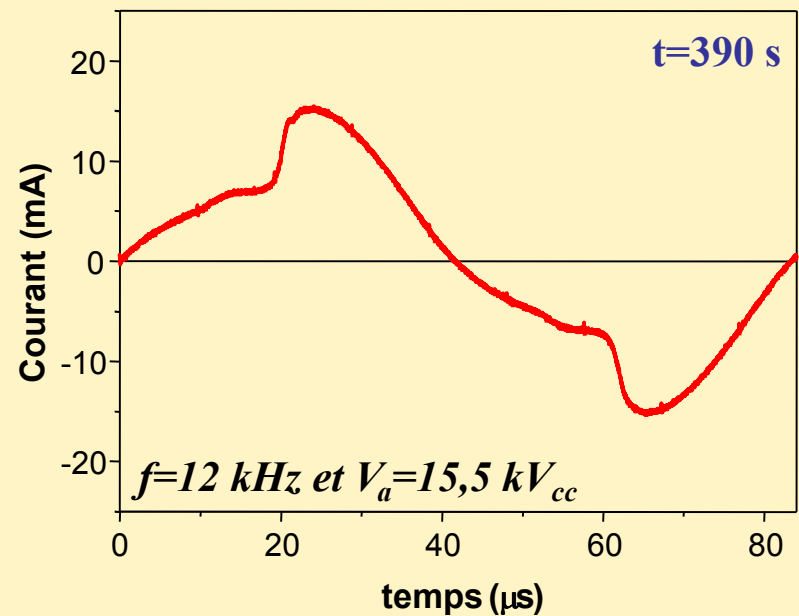
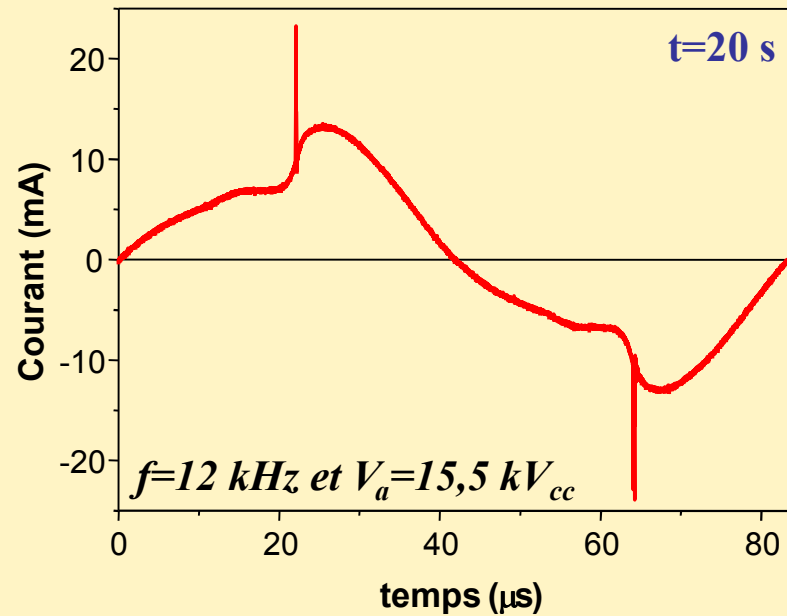
↳ de l'amplitude de la variation de charge (3 cas étudiés)

- $k_c = \frac{C_{ds}}{C_g} + 1$
- ➔ $k_c=4,5$: conditions standards ($C_{ds}=37,26 \text{ pF}$, $C_g=10,62 \text{ pF}$)
 - ➔ $k_c=8$: gap ↗ à 2 mm ($C_{ds}=37,26 \text{ pF}$, $C_g=5,31 \text{ pF}$)
 - ➔ $k_c=8$: épaisseur des diélectriques ↘ et cellule ≠ ($C_{ds}=106 \text{ pF}$, $C_g=15 \text{ pF}$)



➡ Fréquence maximale dépend de k_c : + k_c ↘, + f_{max} ↗

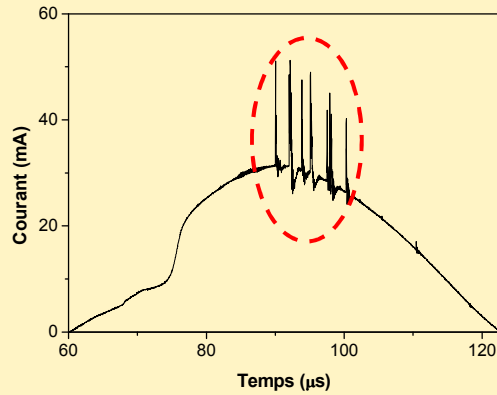
➡ $k_c=8 \Rightarrow k_c=4,5 \Rightarrow f_{max} \times 2,5$ et $P_{max} \times 1,4$



La vitesse de la variation de charge dépend de la température du gaz :

Plus T augmente plus la variation de l'ionisation dans le gaz en fonction de la tension devient lente.

➔ L'augmentation de la température du gaz entraîne une stabilisation de la décharge

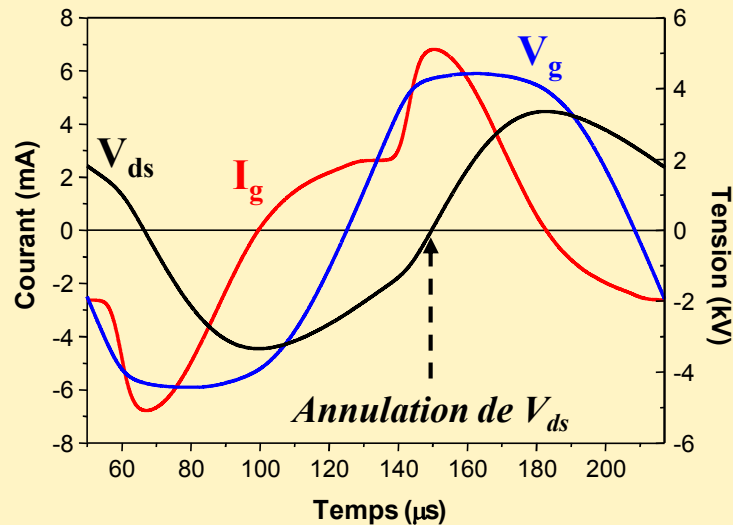


Une étude optique (E. Croquesel) a permis de mettre en évidence que *cette déstabilisation est due à des micro-décharges qui se développent dans le gaz.*

Quelle est l'origine de ces micro-décharges ?

Elles apparaissent toujours après le maximum de I_g , dans la zone où :

- le courant est imposé par le circuit extérieur → $I_g(t) = C_{ds} \cdot dV_a(t)/dt$
- la charge du diélectrique recouvrant la cathode s'annule → \searrow de γ



➔ Afin de compenser la perte d'ionisation liée à la \searrow de γ , l'ionisation dans le gaz ↗

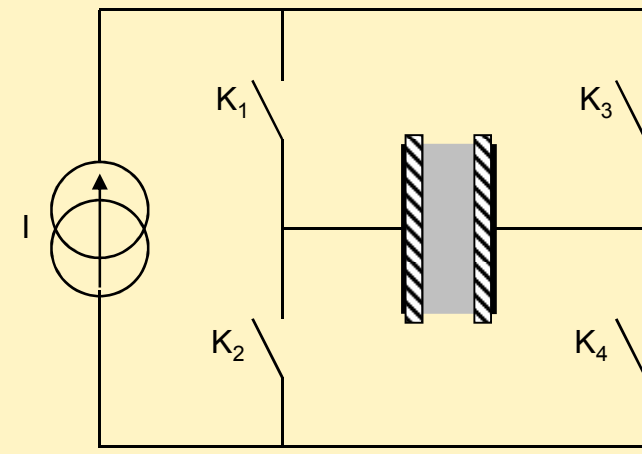
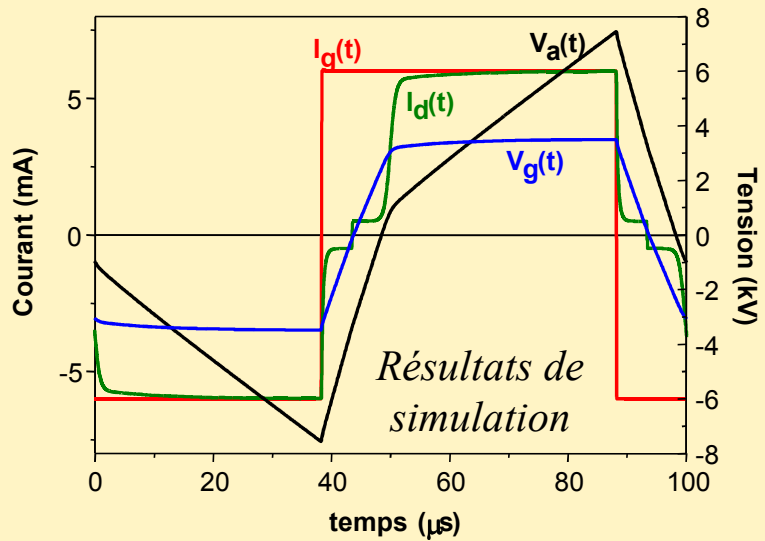
↗ du champ E qui peut entraîner la formation de grandes avalanches lorsque celui-ci devient suffisamment élevé

Comment augmenter P ?

Objectifs : → ↗ la durée d’allumage de la décharge

→ maintenir le courant maximum durant toute la durée de la décharge

➔ **Commutateur de courant**



Tension sinusoïdale vs Commutateur de courant

$f=10\text{ kHz}$
 $k_c=4,5$

	<i>Tension</i>	<i>Courant</i>
$V_a (kV_{cd})$	23,6	40
$I_{max} (mA)$	24,7	24,7
$P (W.cm^{-3})$	38	54 (+ 40 %)
t_{on}/t_{total}	75 %	95 % (x 1,5)

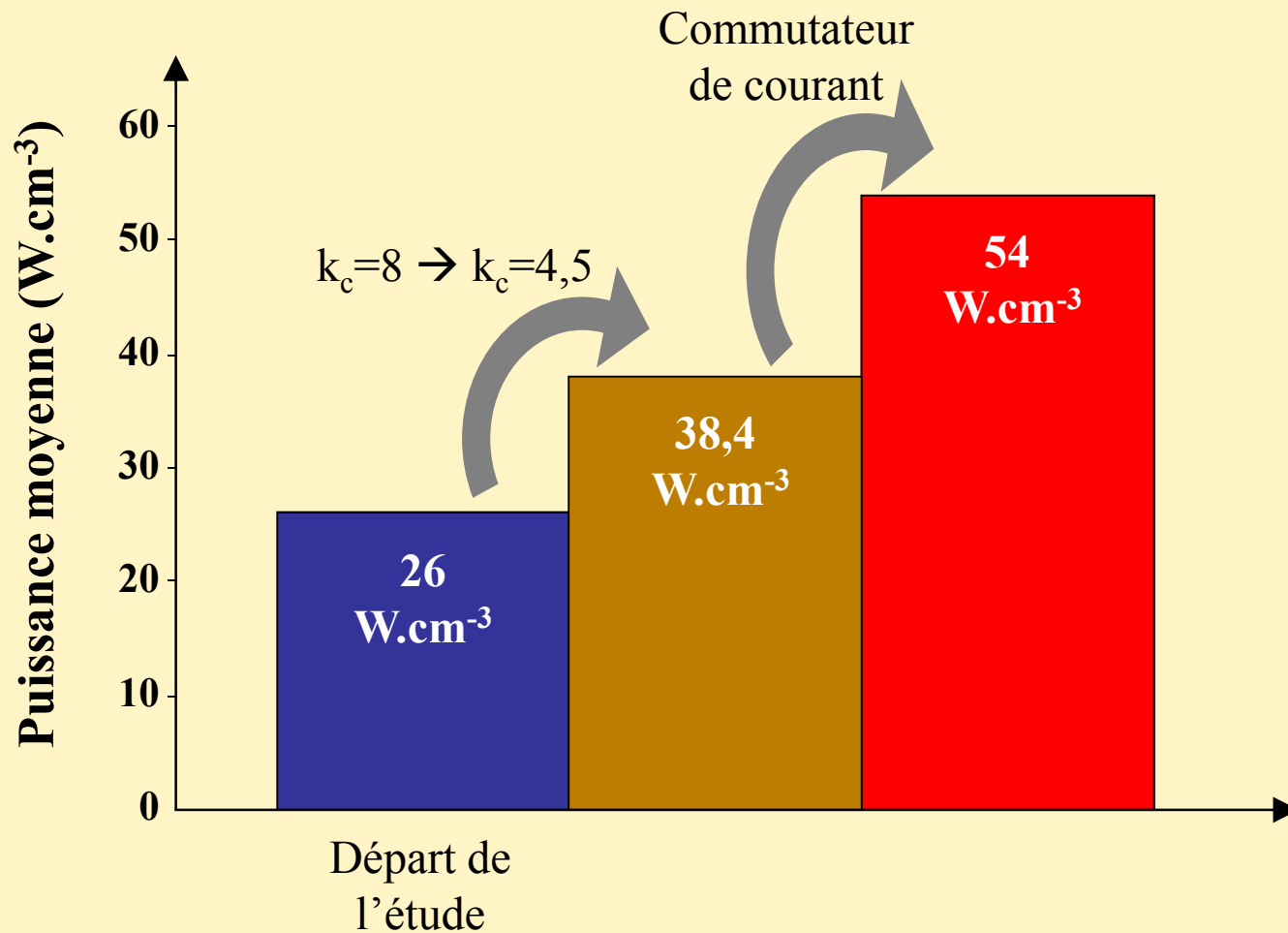
experimental *simulation*

➔ P ↗ de 40 % (à valider expérimentalement)

➔ $50\% < t_{on}/t_{total} < 95\%$

➔ Ne nécessite pas d’adaptation d’impédance

La compréhension des 2 causes de déstabilisation de la DTPA a permis de définir des solutions permettant d'augmenter la puissance transmise à la décharge :



- **Dispositif expérimental**
- **Caractéristiques de la Décharge de Townsend à la Pression Atmosphérique (DTPA)**
- **Modélisation de la DTPA**
- **Augmentation de la puissance transmise à la DTPA**
- **Conclusion et perspectives**

Modèle électrique de type circuit de la DTPA :

- Modèle auto adaptatif valide sur l'ensemble du domaine de fonctionnement
- Vision macroscopique de la DTPA
- Mise en évidence de l'importance :
 - *de la variation de l'émission secondaire durant la décharge*
 - *de l'effet mémoire d'une décharge à la suivante*
 - *de l'élévation de la température du gaz*

L'étude de la température du gaz a permis :

- De corréler les mesures de températures de surface aux mesures de température rotationnelle
- De définir une relation, valable en régime instantané, liant l'élévation de température du gaz à la puissance dissipée dans la décharge et à la vitesse du gaz

L'utilisation de ce modèle a permis :

- de prouver qu'une cause de déstabilisation de la DTPA est liée à des oscillations dues aux éléments parasites de l'alimentation
- d'aider au dimensionnement et à la conception d'une alimentation pour un prototype industriel basé sur l'utilisation d'une DTPA
- de séparer la contribution de l'effet thermique et de l'effet mémoire d'une décharge à la suivante

L'étude du couplage entre l'alimentation et la décharge a permis de définir des solutions afin d'accroître la puissance transmise à la décharge :

- La réduction du rapport C_{ds}/C_g
- L'utilisation d'une source de créneaux de courant (commutateur de courant) afin de maintenir un courant maximal durant la durée la plus grande possible

- **Test avec un commutateur de courant**
- **Étude de l'influence de la température sur la stabilité de la décharge et sur la puissance transmise en découplant T et P**
- **Étude du mécanisme de déstabilisation au maximum de courant : Valeur maximale de courant de décharge (effet de la température, de γ , ...)**