



# ÉCOLE TECHNOLOGIQUE DES PLASMAS FROIDS

## 15<sup>e</sup> JOURNÉES DU RÉSEAU



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

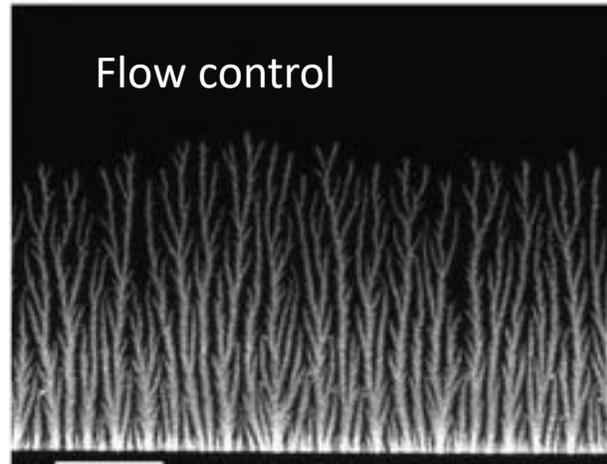
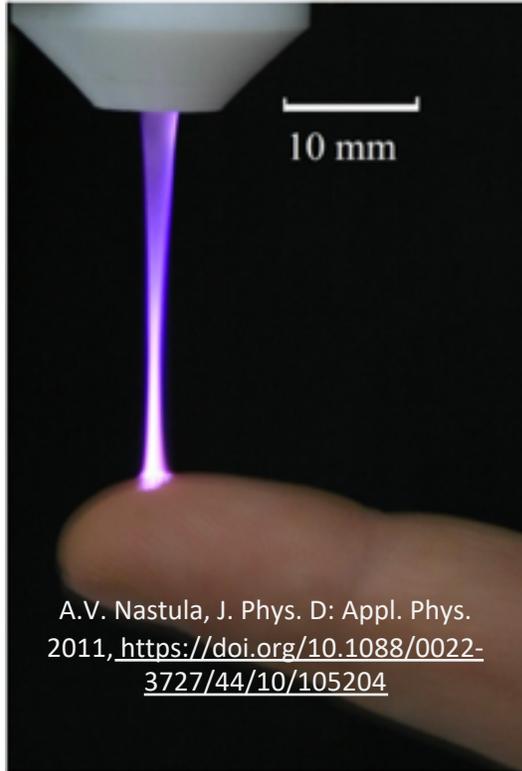
# Structures et mise en œuvre des Alimentations Impulsionnelles

Antoine Belinger

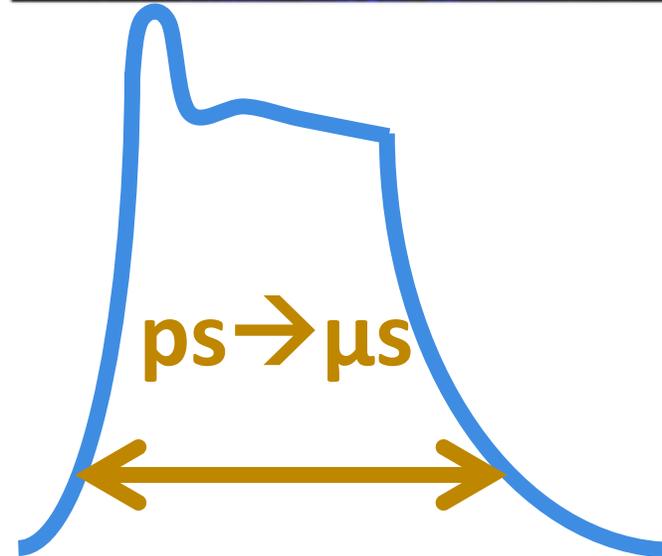
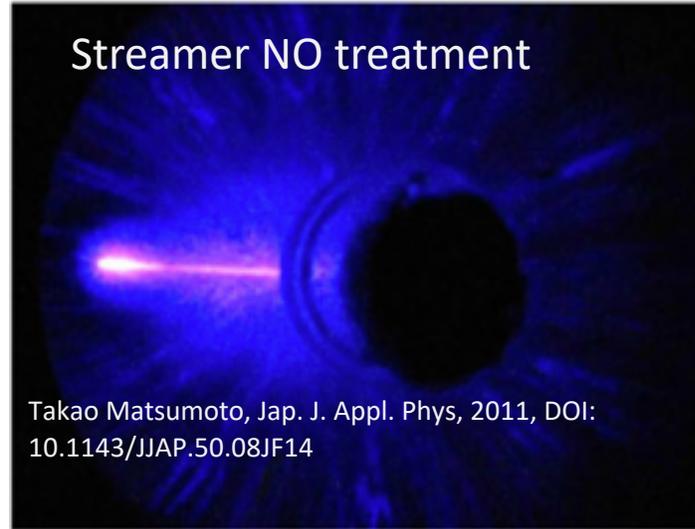
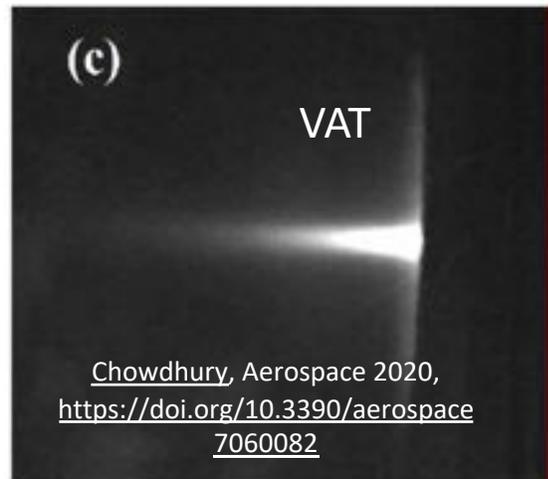
[belinger@laplace.univ-tlse.fr](mailto:belinger@laplace.univ-tlse.fr)



# Décharge impulsionnelle : applications

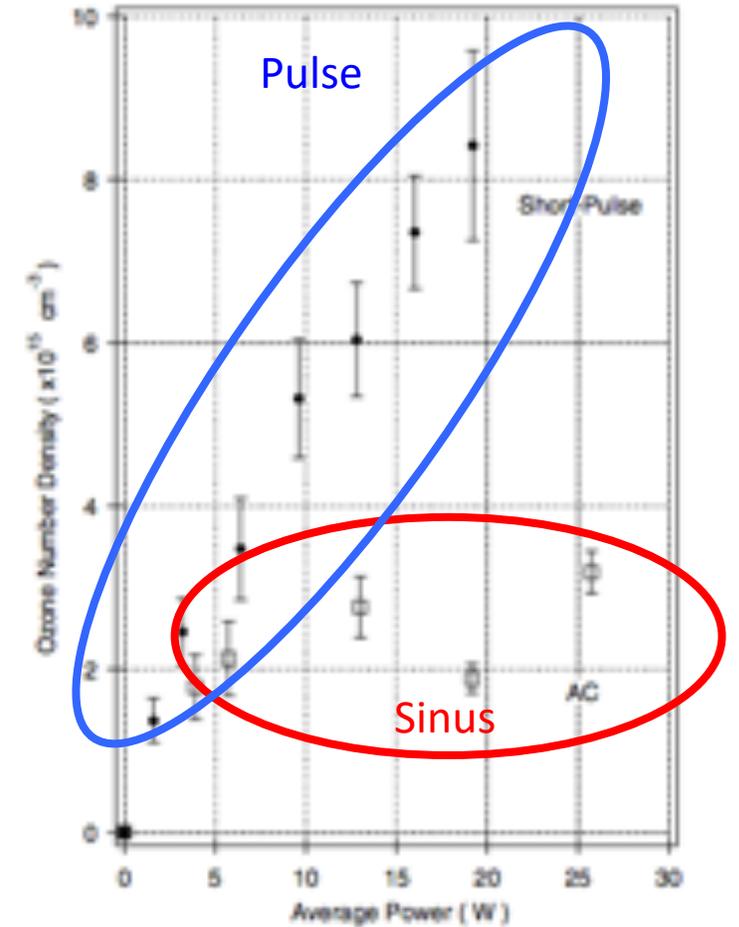
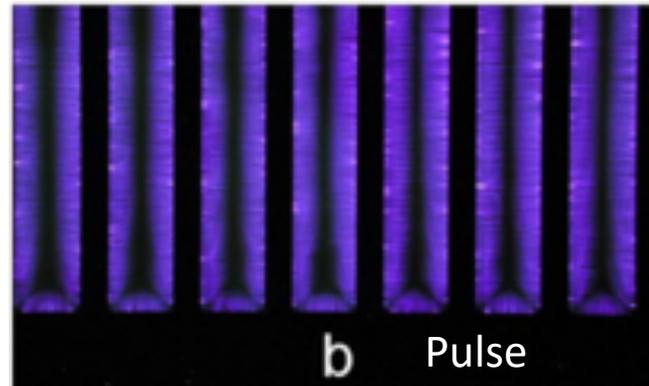
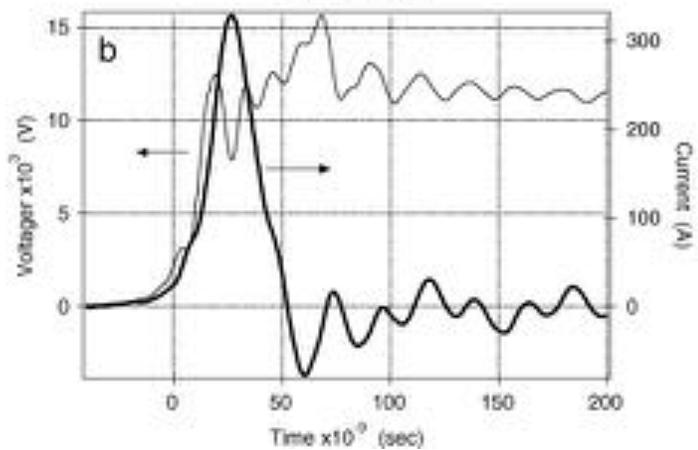
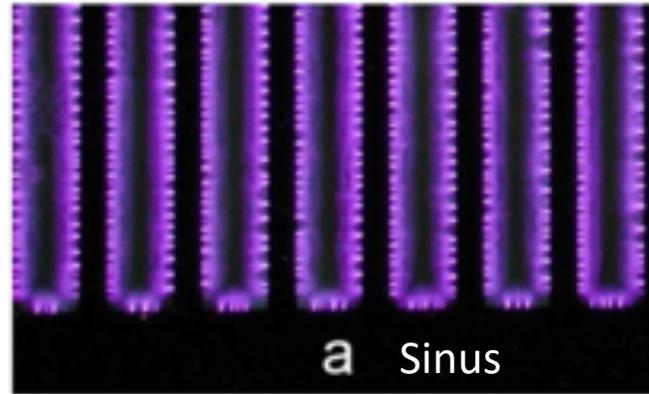
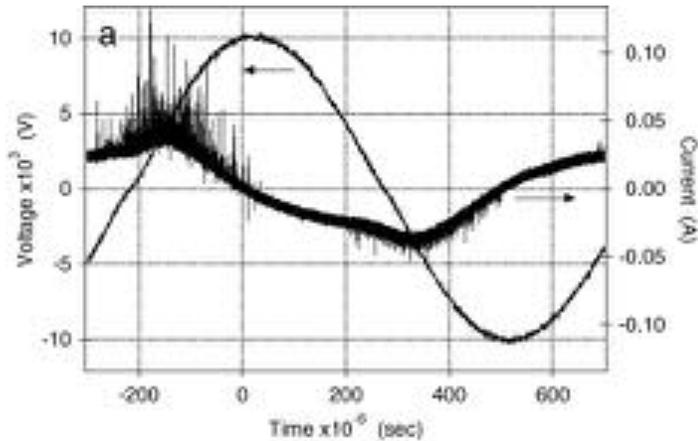


Moreau, J. Appl. Phys. 2015, <https://doi.org/10.1063/1.4927844>



# Intérêt d'une alimentation impulsionnelle

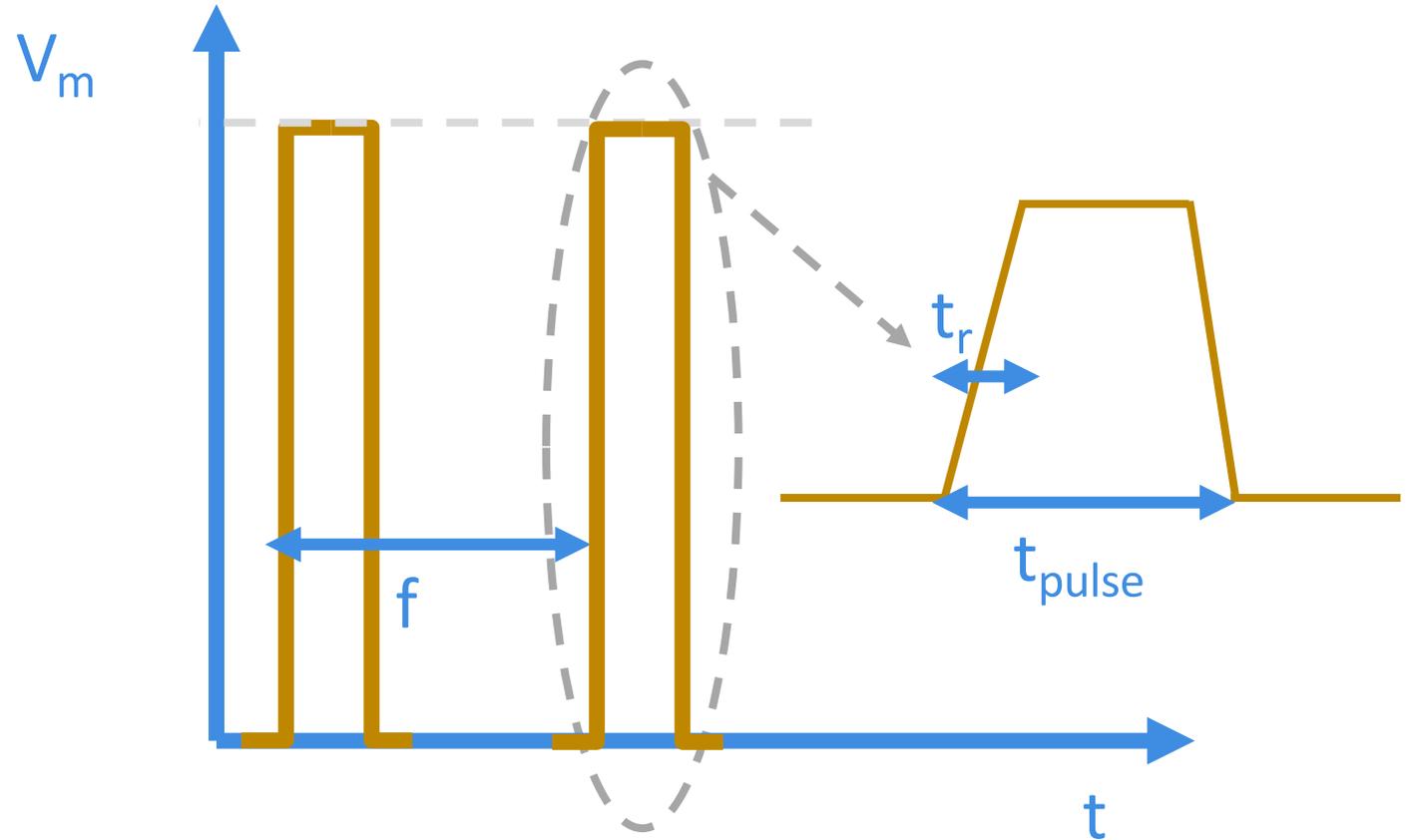
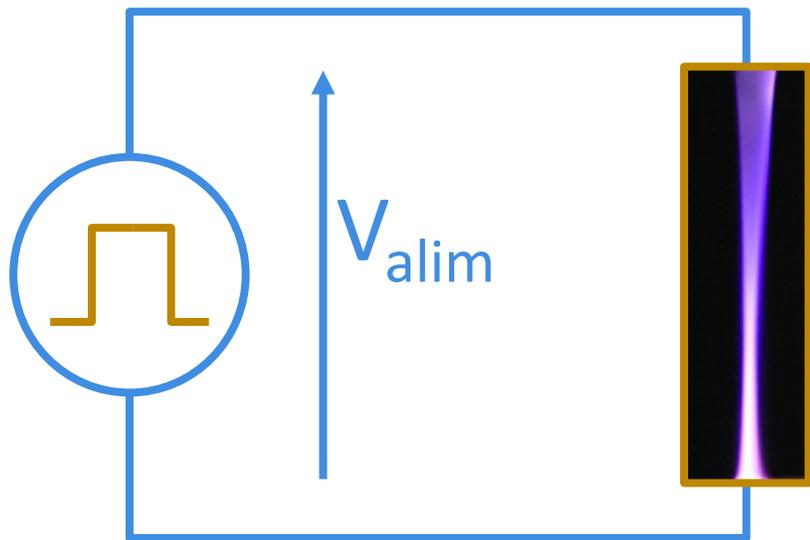
Exemple DBD production d'ozone :



Williamson – 2006 J Phys D - <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/39/20/016>

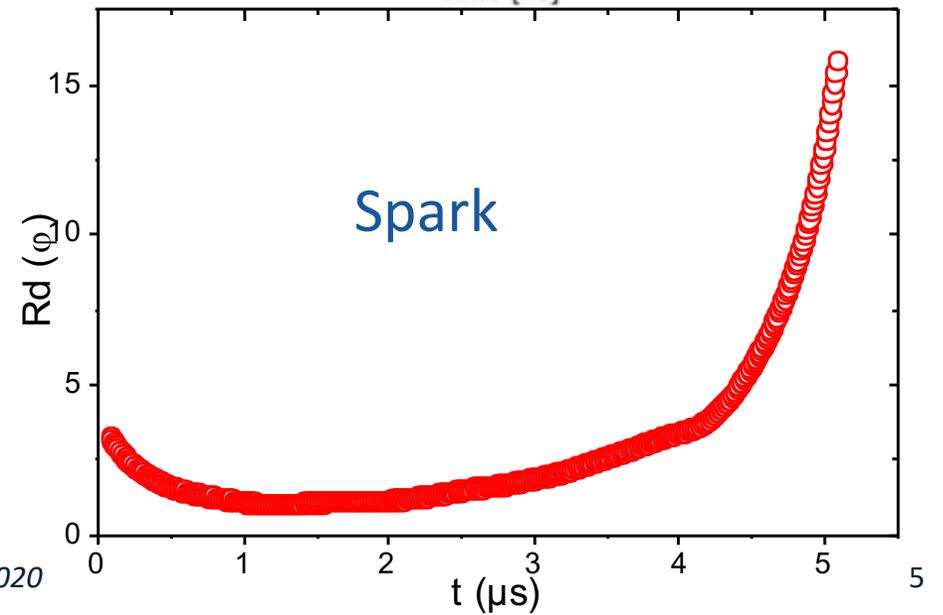
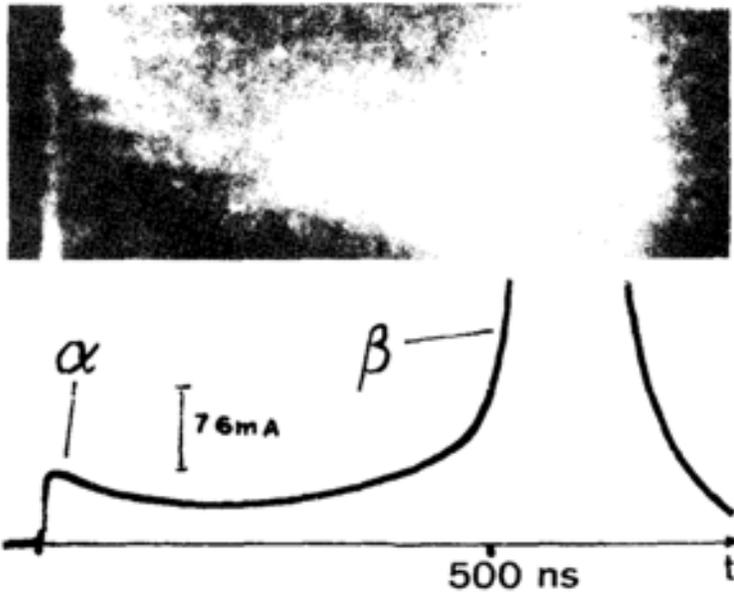
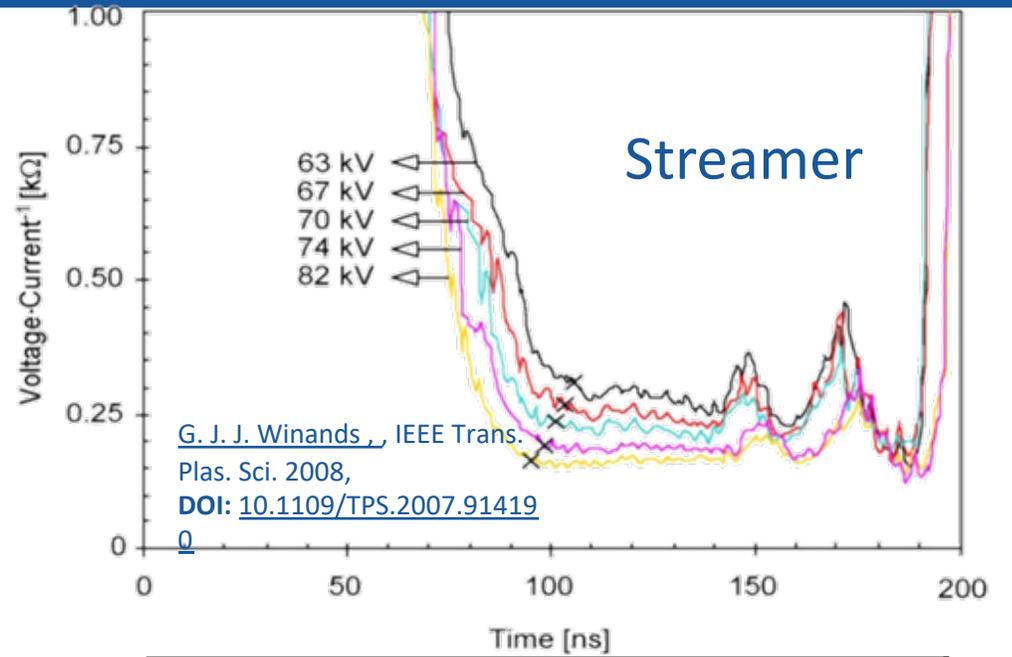
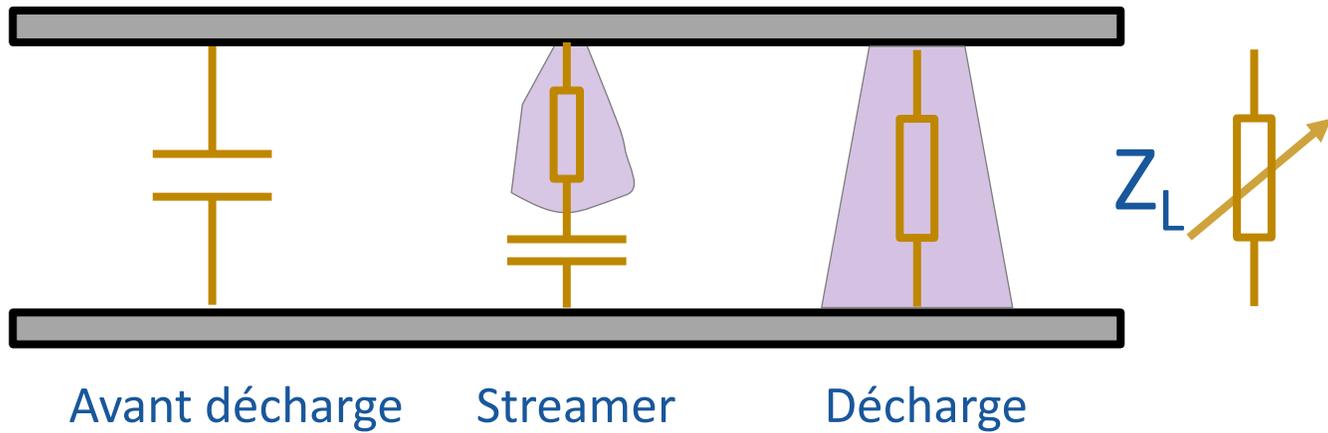
# Pulse idéal

- $V_m$  le plus grand possible
- $f$  la plus grande possible
- $t_{\text{pulse}}$  le plus petit possible
- $t_r \rightarrow 0$



1. Comportement électrique de la décharge
2. Conception d'une alimentation
3. Comparaison des structures d'alimentations existantes
4. Choix des composants
5. Éléments parasites

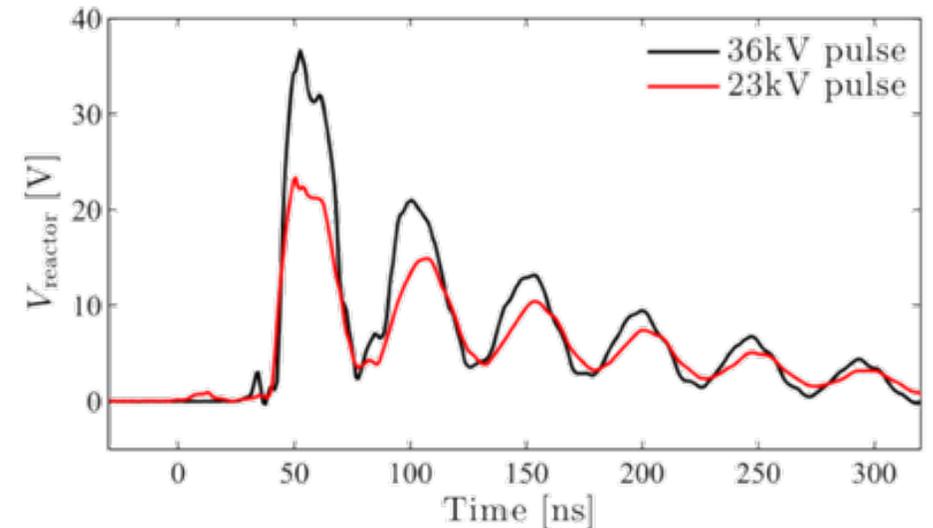
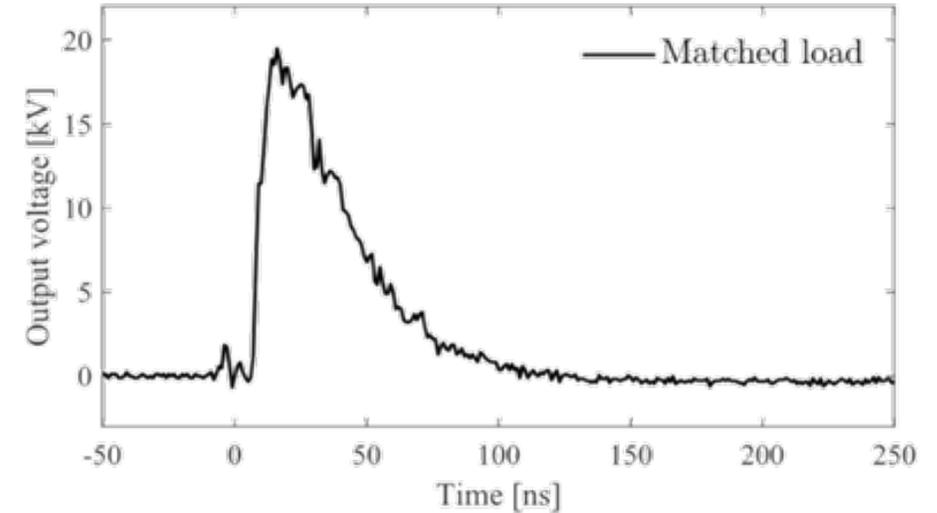
# Comportement décharge à la PA



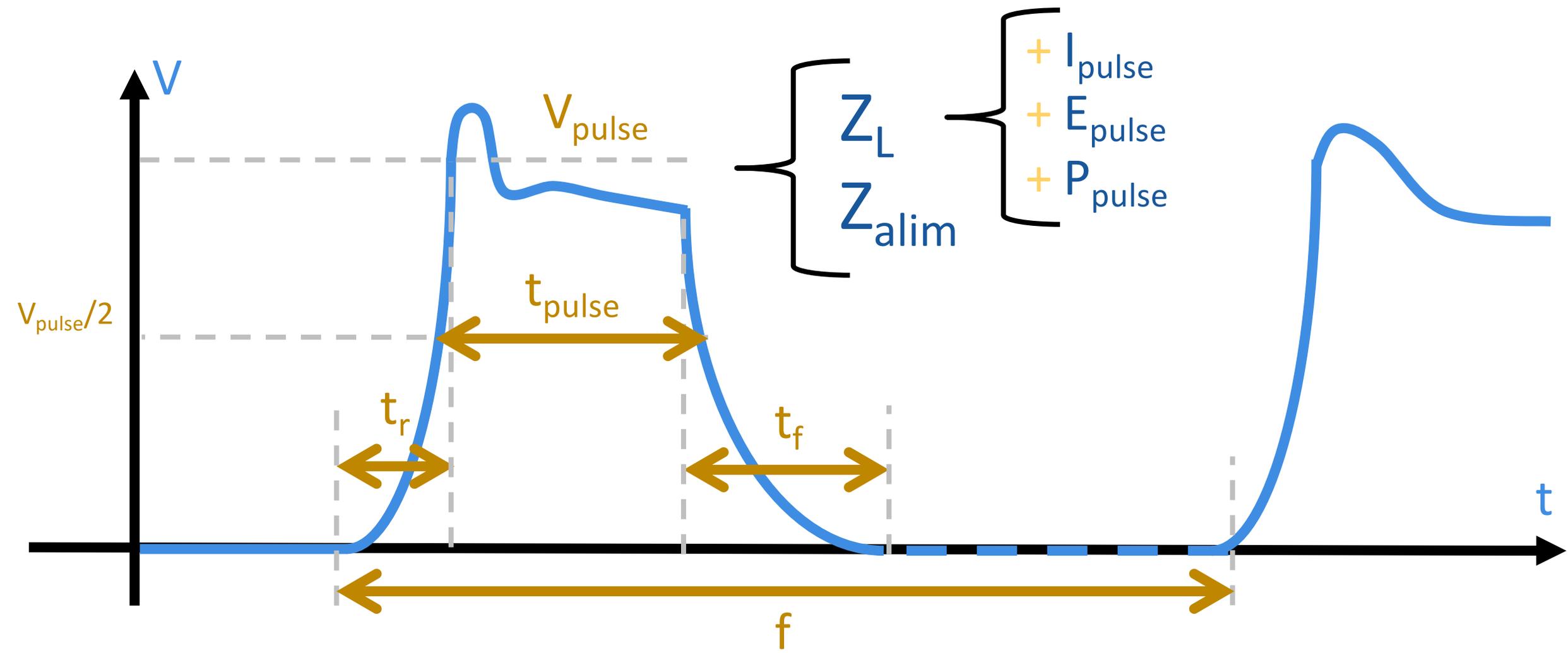
## Transfert optimal de puissance

$$Z_{\text{alim}} = Z_L \quad \forall t$$

- $Z_L \gg 50 \Omega$  plasma froid
- $Z_L \ll 50 \Omega$  si thermique
- $Z_L$  très non linéaire
- Impossible modifier  $Z_{\text{alim}}$  rapidement
- Transfert de puissance ↘



# Pulse



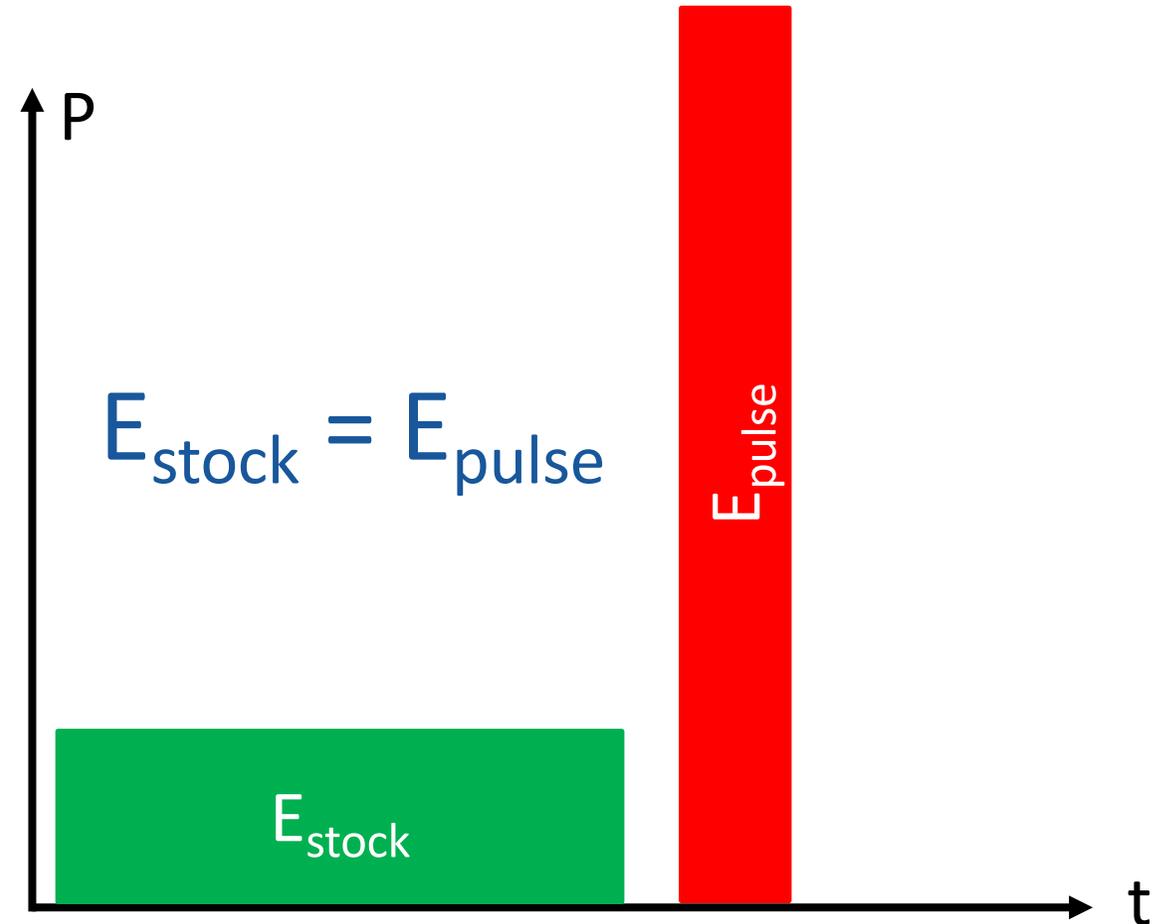
1. Comportement électrique de la décharge
2. Conception d'une alimentation
3. Comparaison des structures d'alimentations
4. Choix des composants
5. Éléments parasites

# Alimentation impulsionnelle

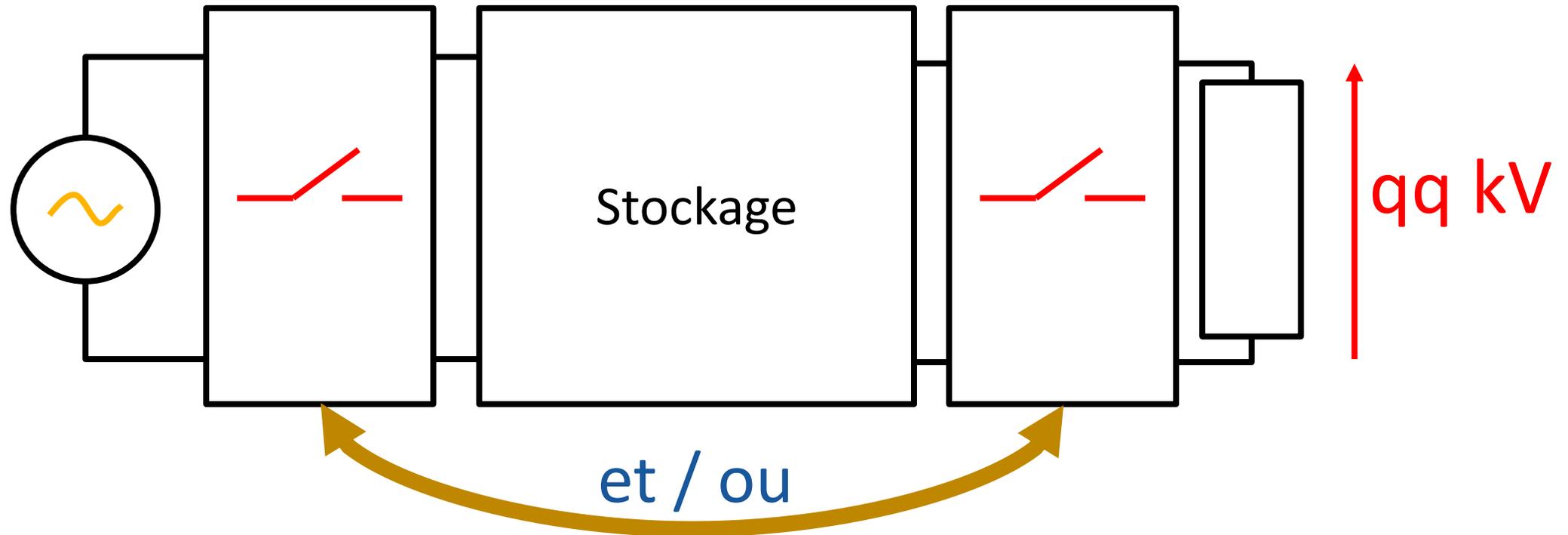
- But : transférer Energie rapidement

$$E = \int P(t)dt$$

- Puissance instantanée importante
- Transfère direct difficile depuis réseau
- Nécessité de stocker l'énergie
- $t_{\text{stock}} \gg t_{\text{pulse}}$
- $f$  faibles → **Max qq kHz**

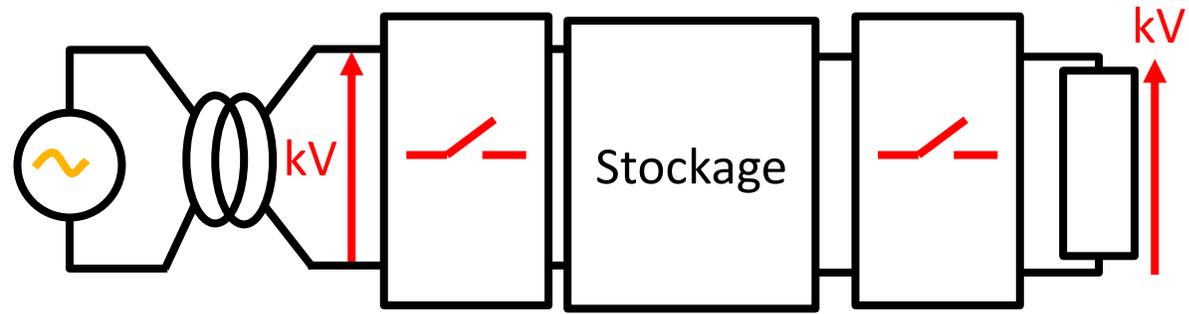


# Stockage de l'énergie



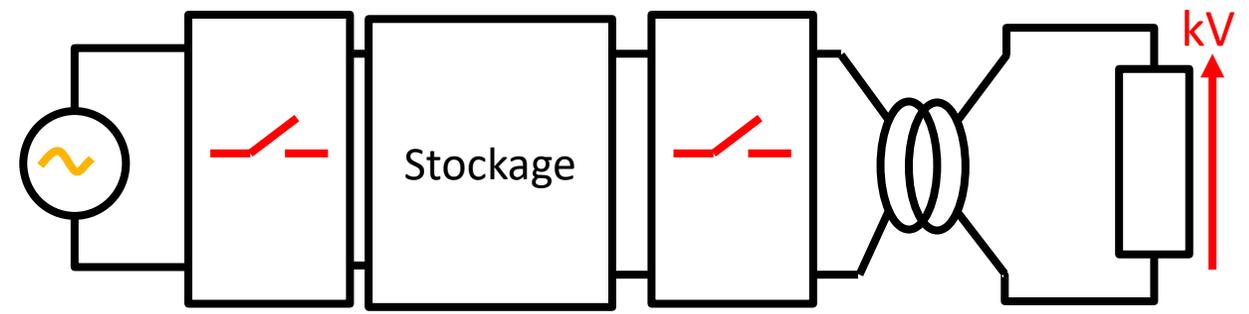
- Pas de **connections directes**
- Elévation la tension → transformateur avant ou après le stockage

# Élévation de la tension



## Solution 1

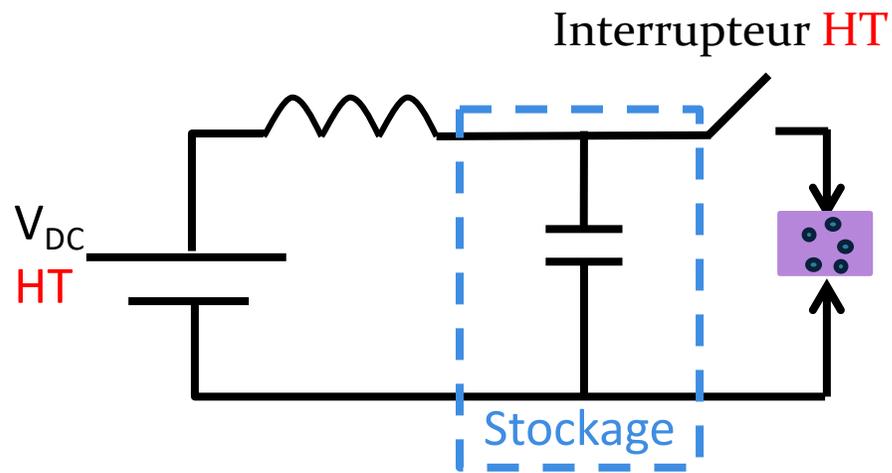
- Interrupteurs HT
- Isolation
- + Contrôle direct de la décharge



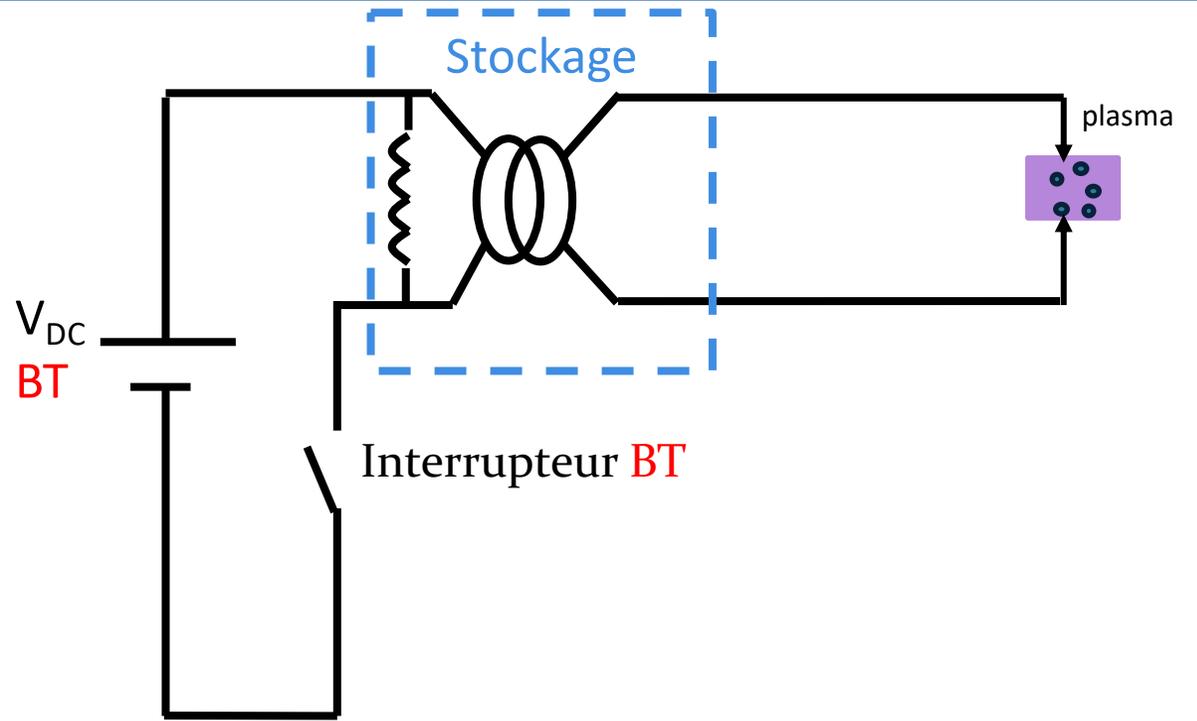
## Solution 2

- + Interrupteurs BT
- Isolation
- Contrôle indirect de la décharge

# Solution 1 vs Solution 2

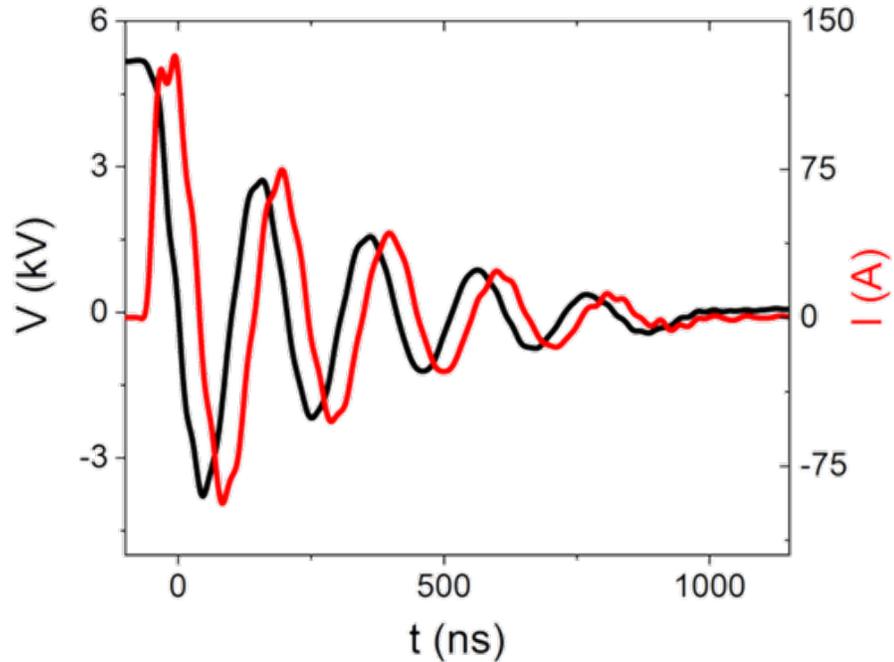


- Élévation tension  $\rightarrow$  source DC
- **Stockage capacitif**



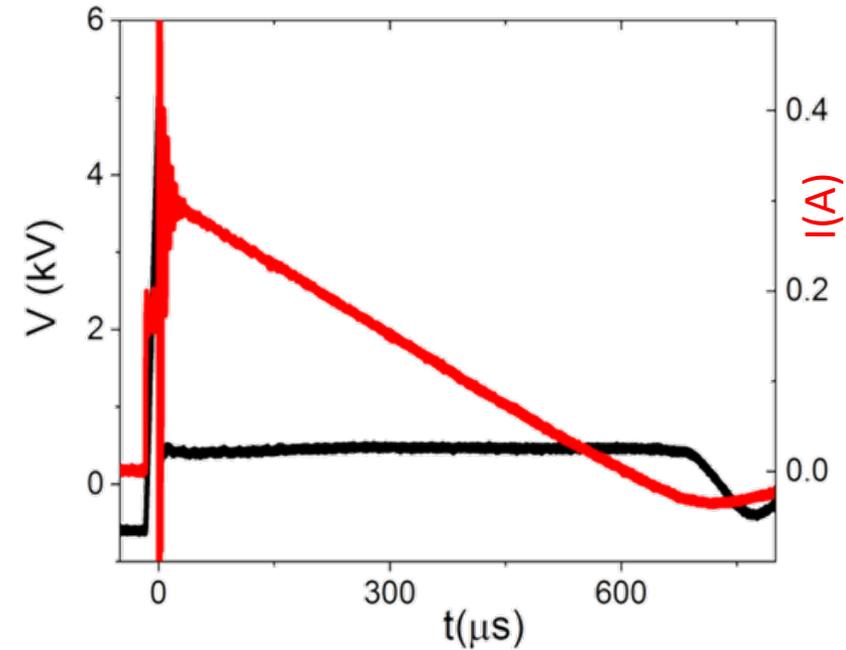
- Élévation tension et stockage  $\rightarrow$  transformateur
- **Stockage : inductance magnétisante**

# Stockage capacitif vs stockage inductif



## *Stockage capacitif*

- Décharge impulsionnelle
- Décharge Spark

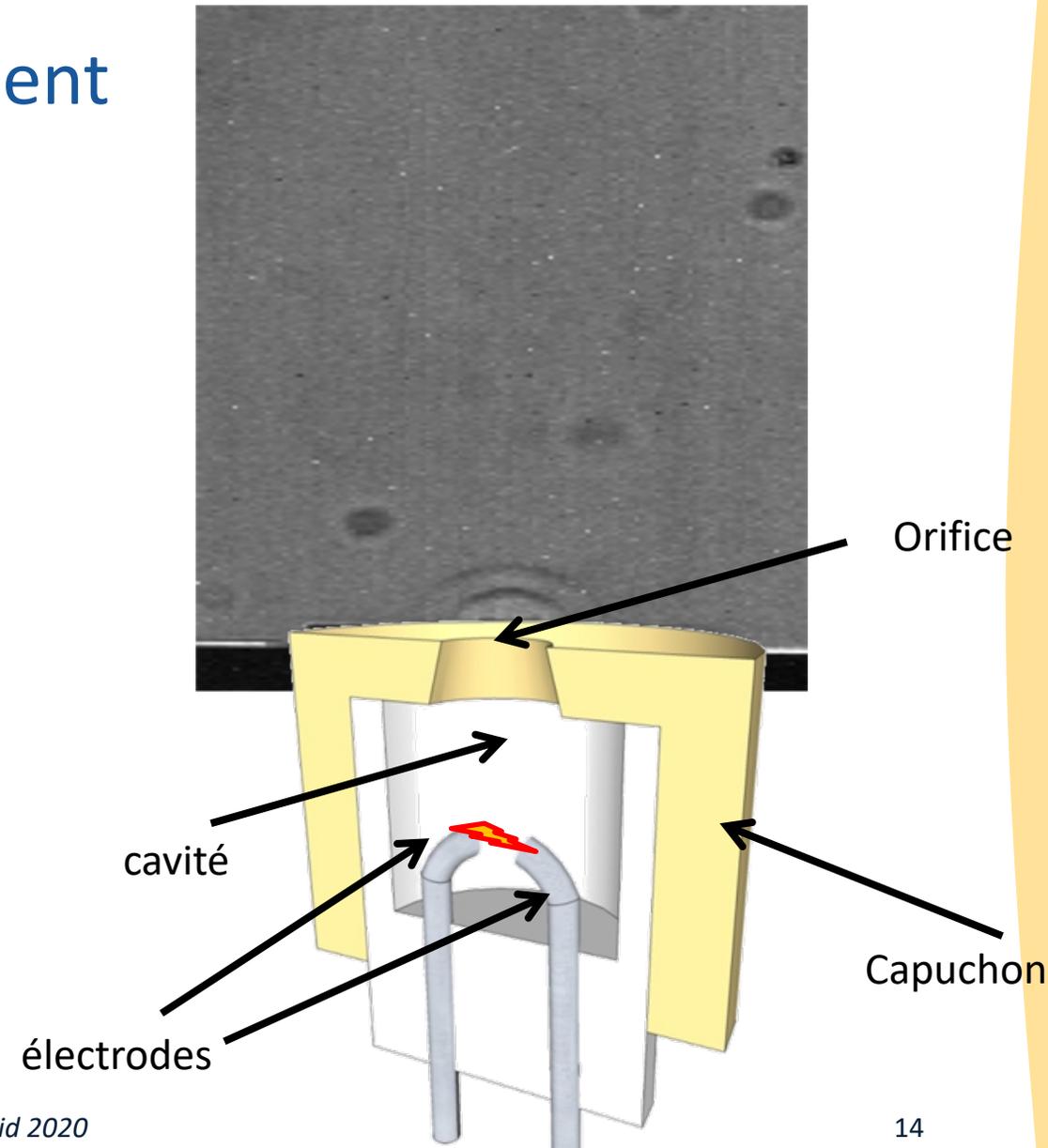


## *Stockage inductif*

- Allongement durée décharge
- Décharge Glow

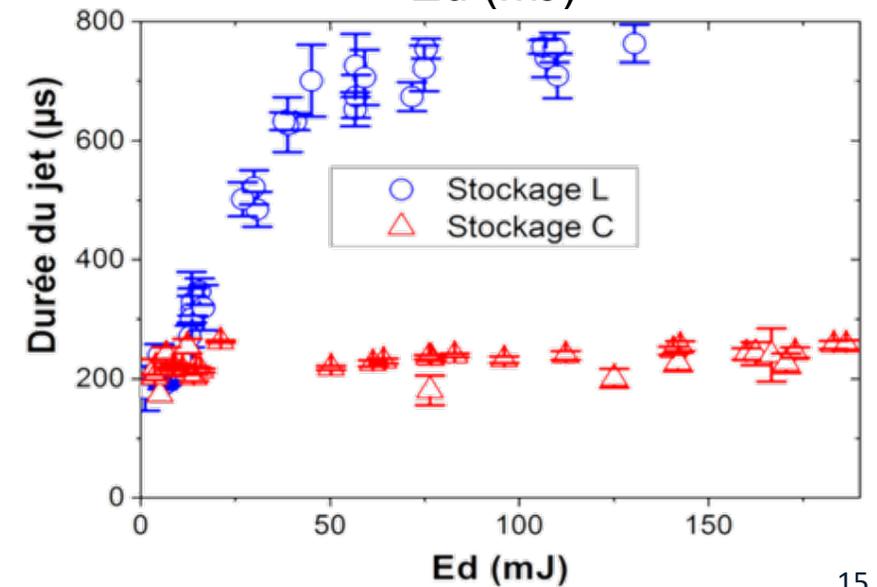
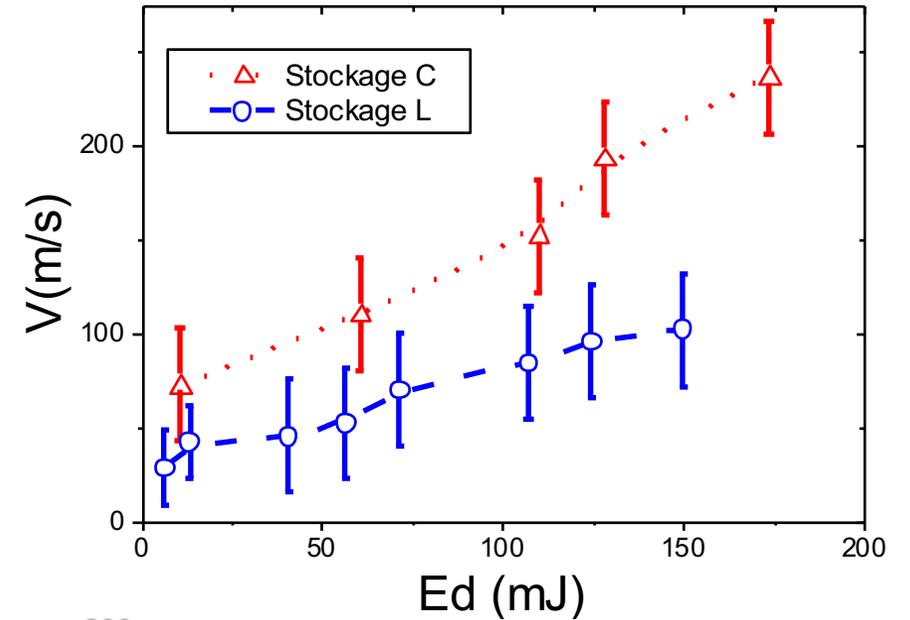
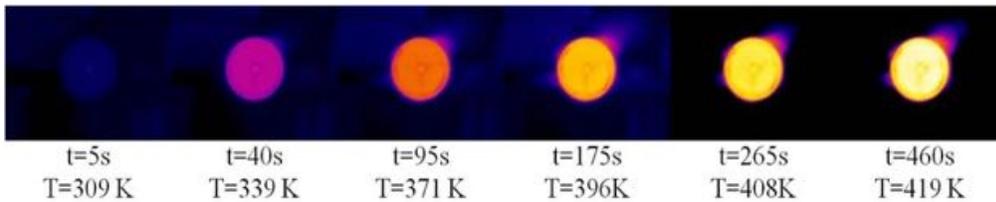
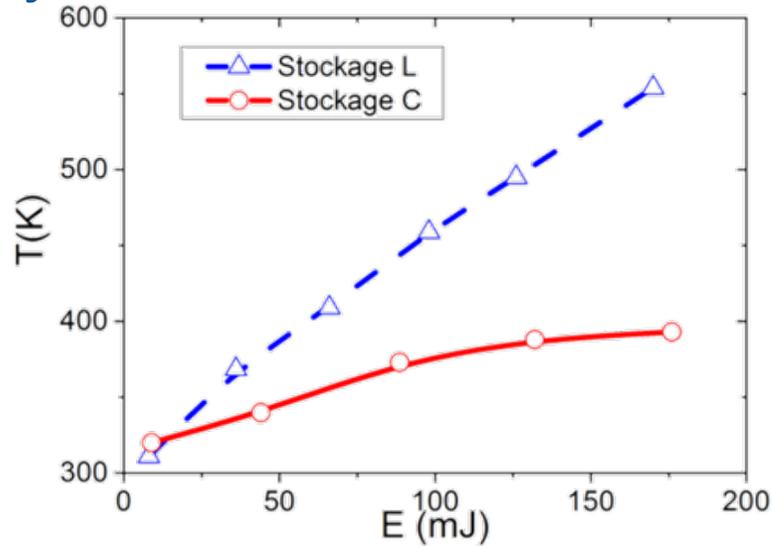
# Stockage capacitif vs stockage inductif : Sparkjets

- Actionneur pour contrôle d'écoulement
- Jets à grande vitesse  $> 200$  m/s
- $f = 5/10$  kHz
- $V_{th} = 5$  kV



# Comparaison stockage inductif et stockage capacitif

- Stockage capacitif → jet à grande vitesse
- Stockage inductif → jet long
- Stockage inductif → Problème thermique le sparkjet



# Stockage inductif et alimentation impulsionnelle

- Inductance :

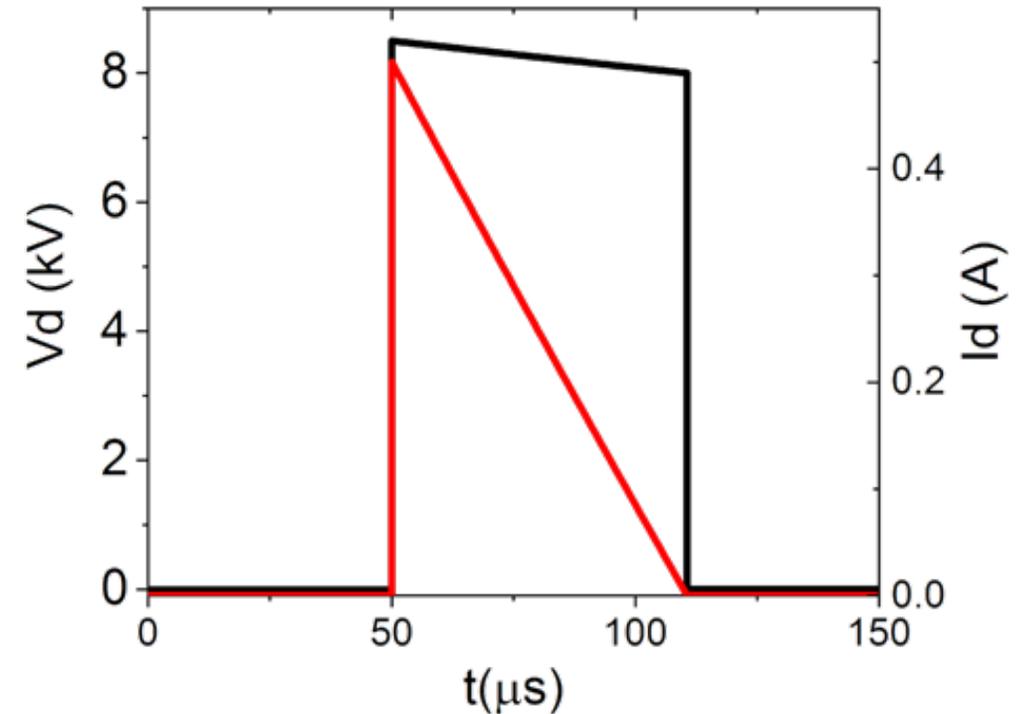
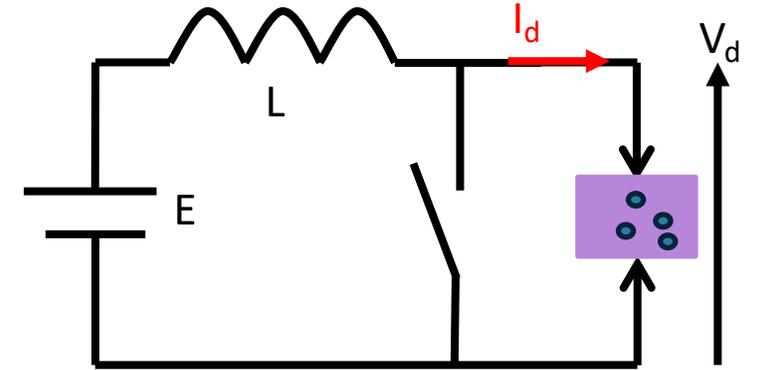
- $t_r$  ultra rapide → ouverture interrupteur

- $t_f$  très lente

- Inutilisable pour le stockage

- ↘ L si contact direct avec décharge

$$U = L \cdot \frac{di}{dt}$$

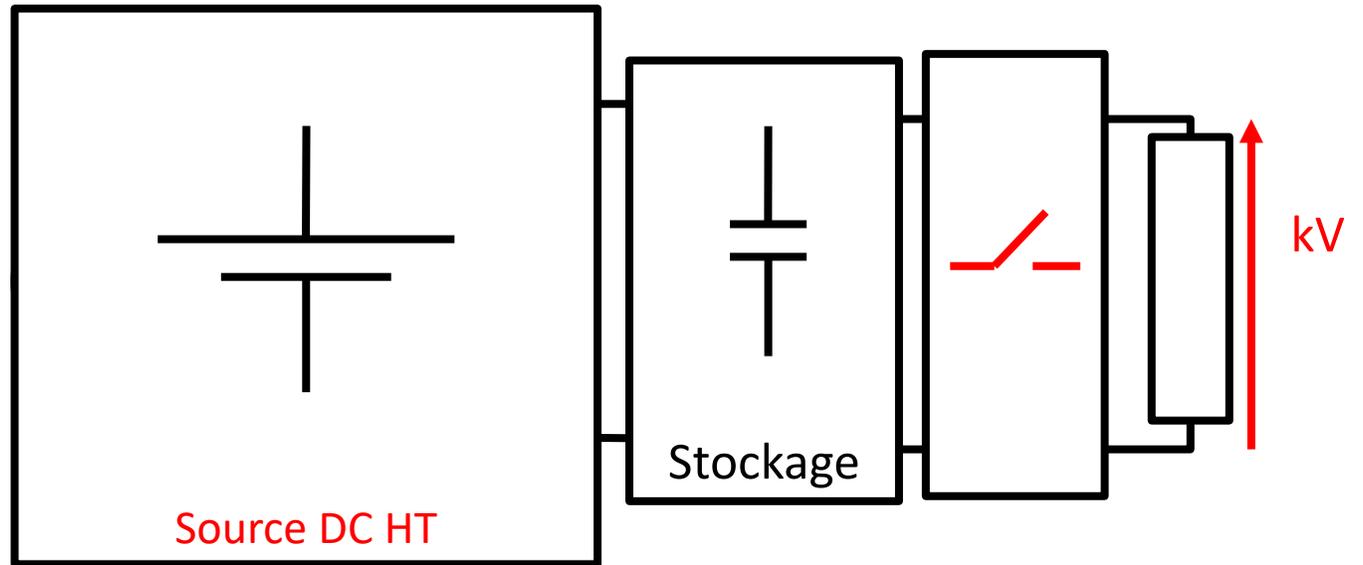
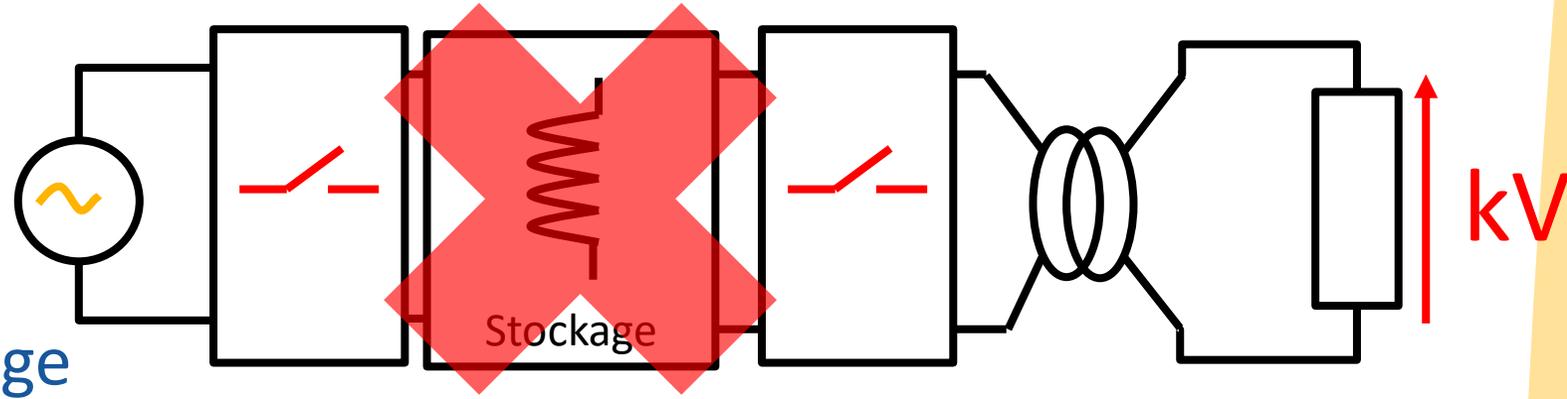


# Portrait de l'alimentation

→ Eviter transformateur coté décharge ou ↘ ↘  $L_\mu$

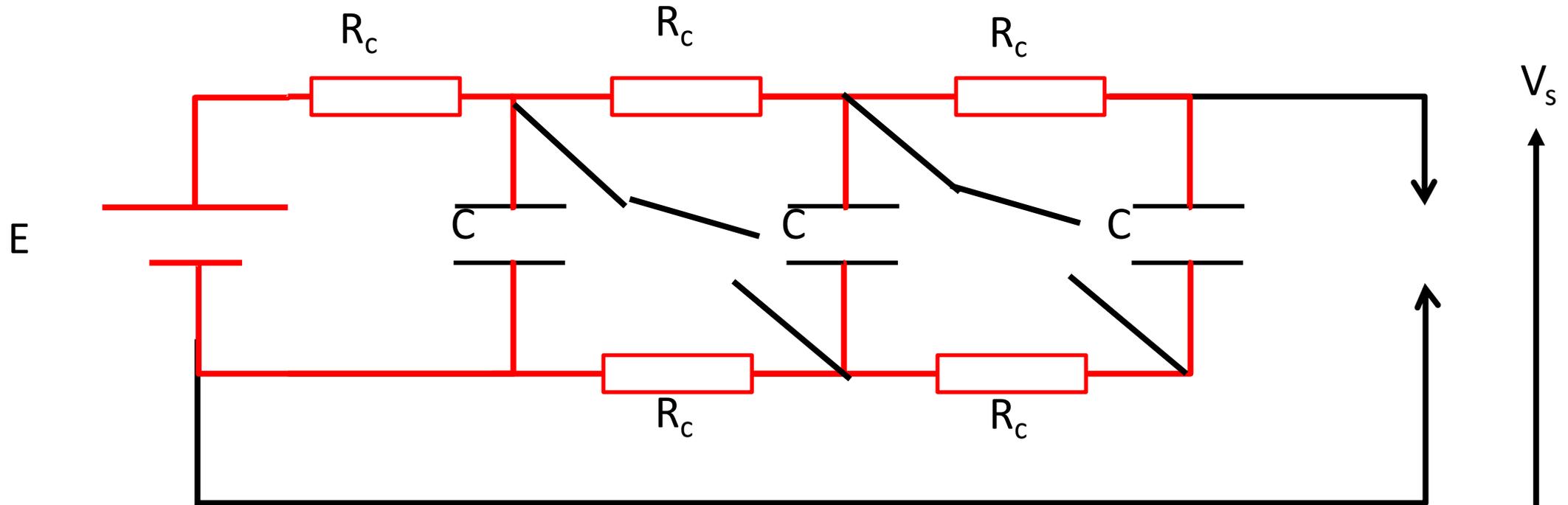
→ Transformateur avant stockage

→ **Stockage C**



1. Comportement électrique de la décharge
2. Conception d'une alimentation
3. Comparaison des structures d'alimentations
4. Choix des composants
5. Éléments parasites

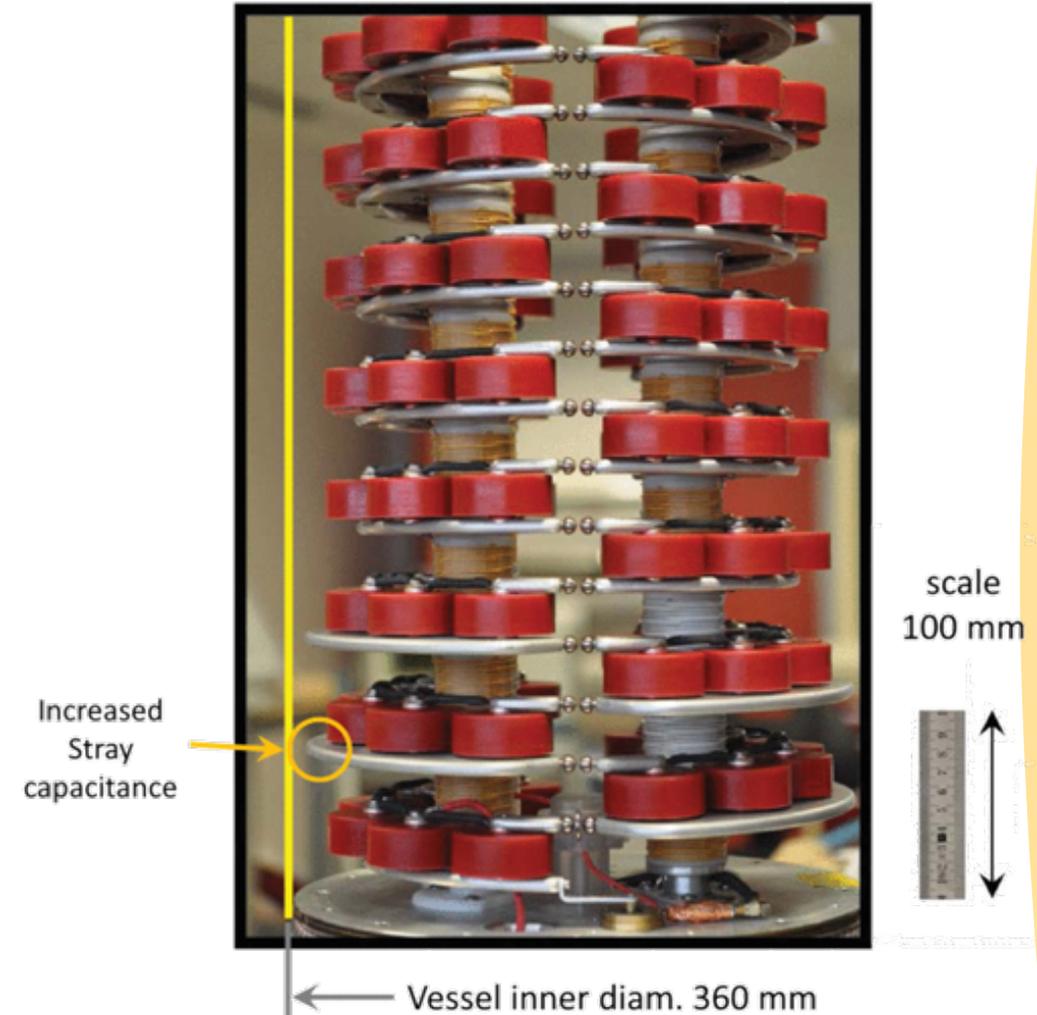
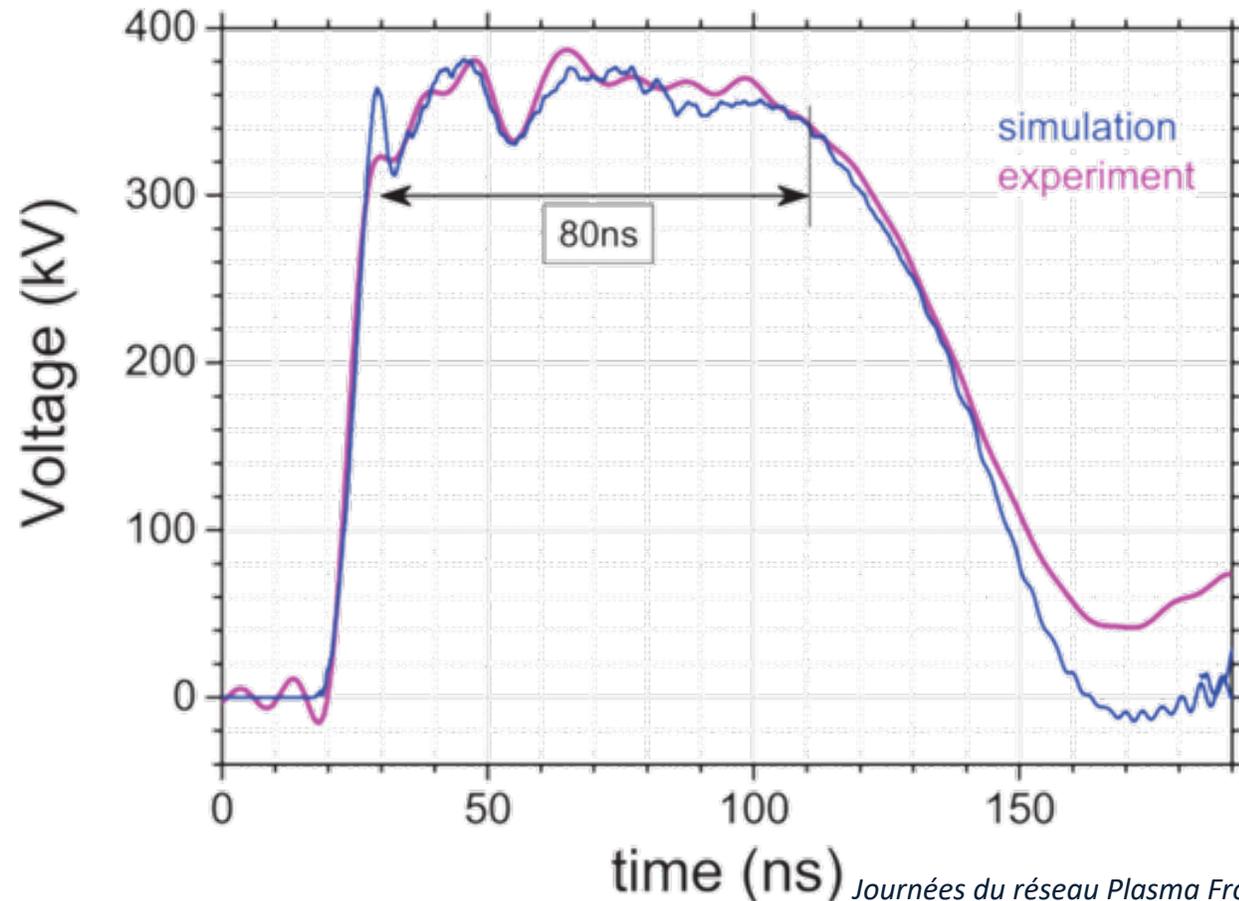
# Générateur de Marx



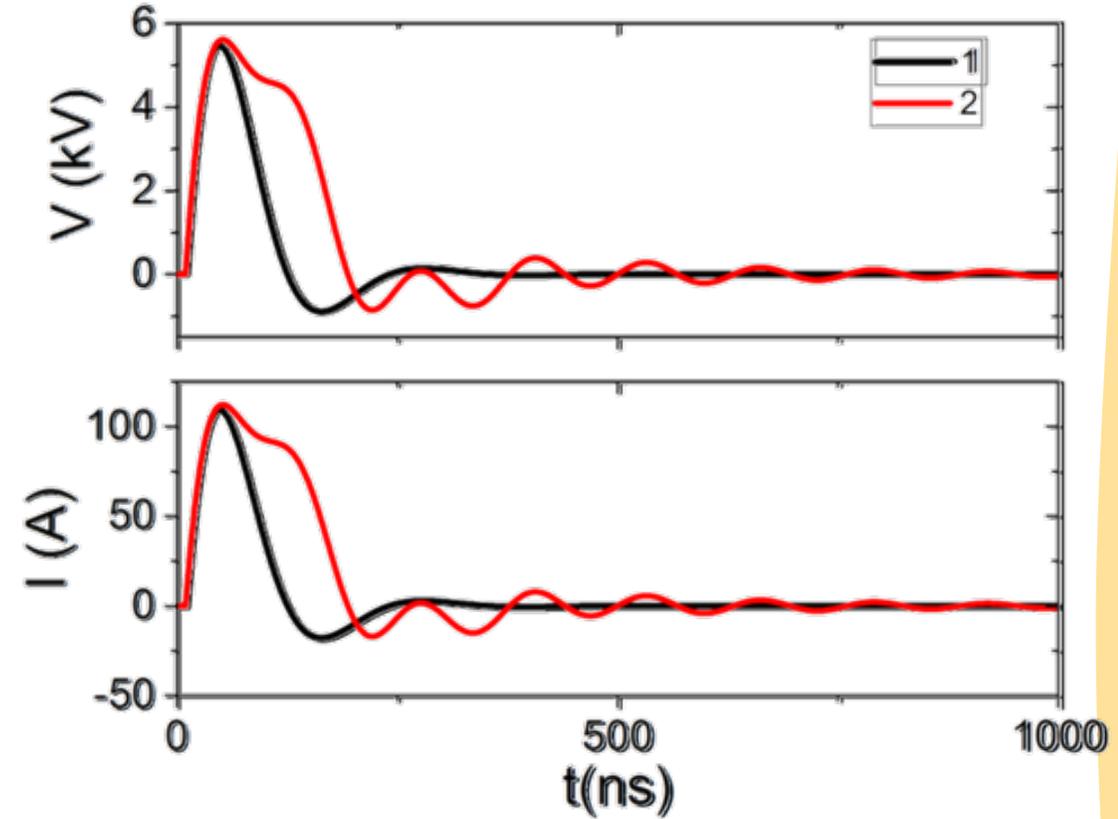
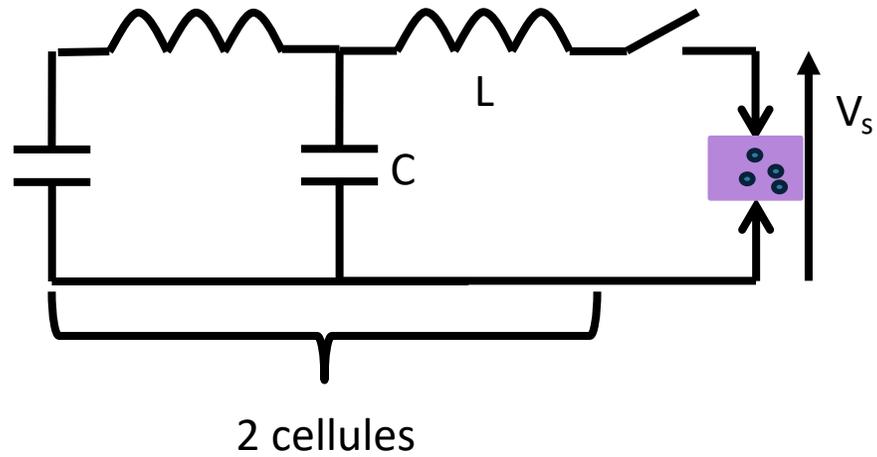
- Chargement en parallèle
- Déchargement en série
- $n$  Condensateurs  $\rightarrow V_s = nE$
- Limite la tension de la source primaire

# Pont de Marx : exemple CEA

- Génération de THT ( $> 100$  kV) grâce au nC
- $t_r \searrow$
- *Charge des nC limite f*

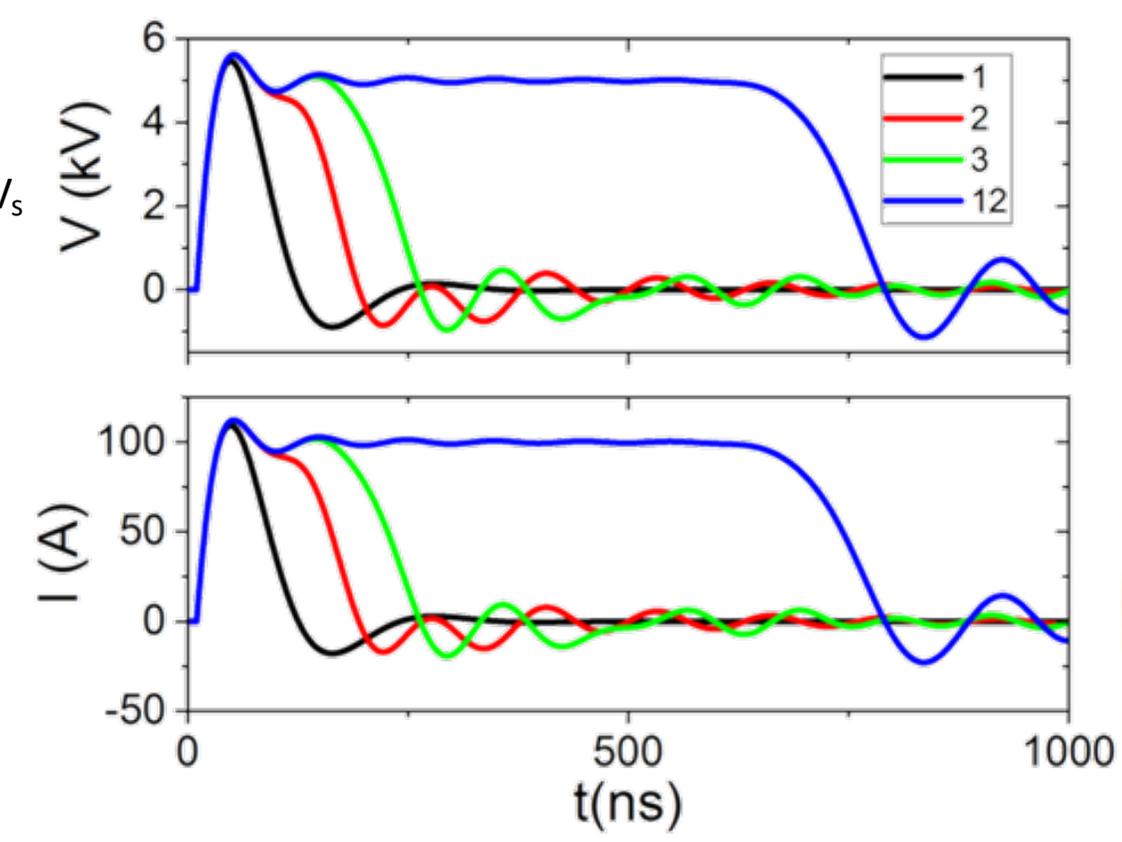
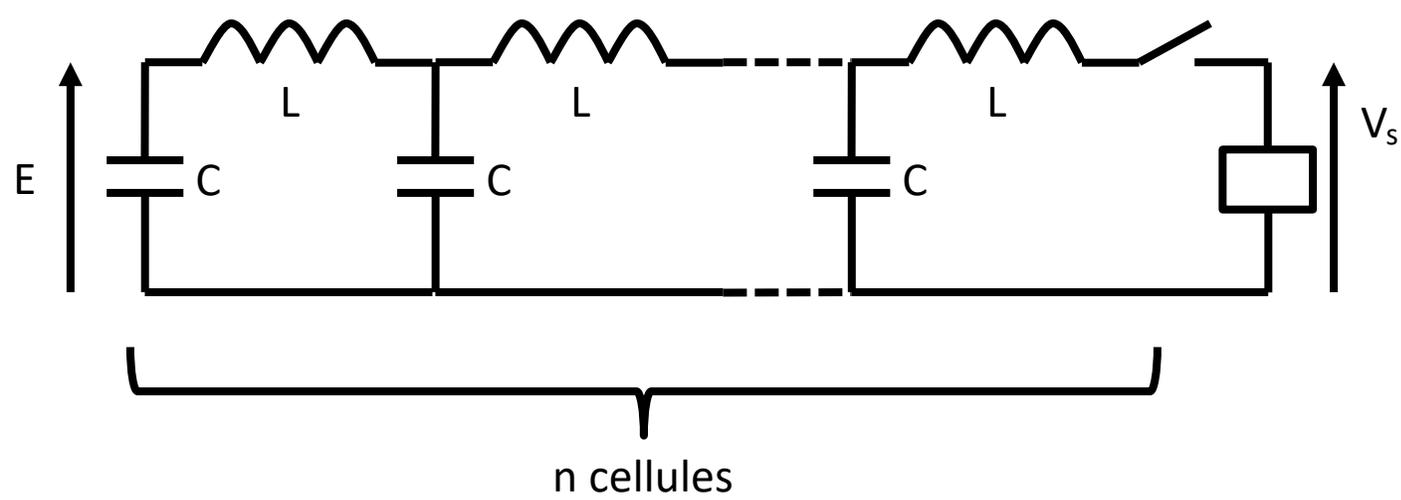


# Pulse Forming Networks



- Préalablement chargé par une source HT

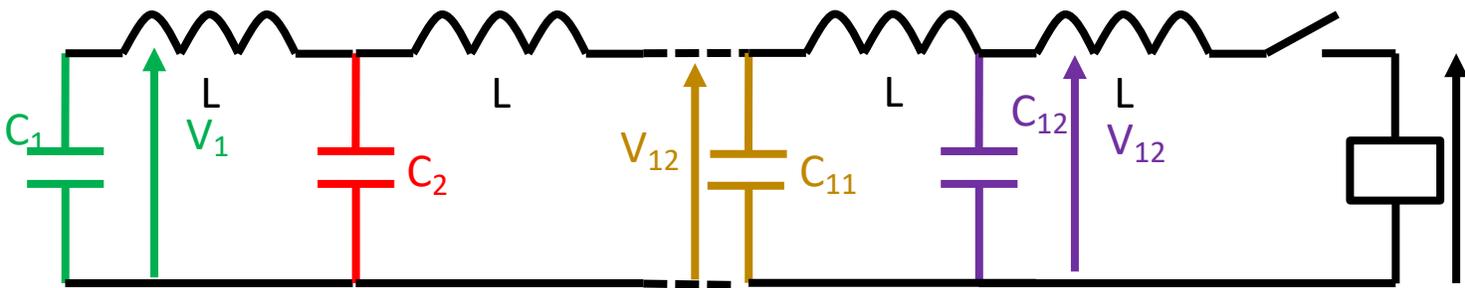
# Pulse Forming Network



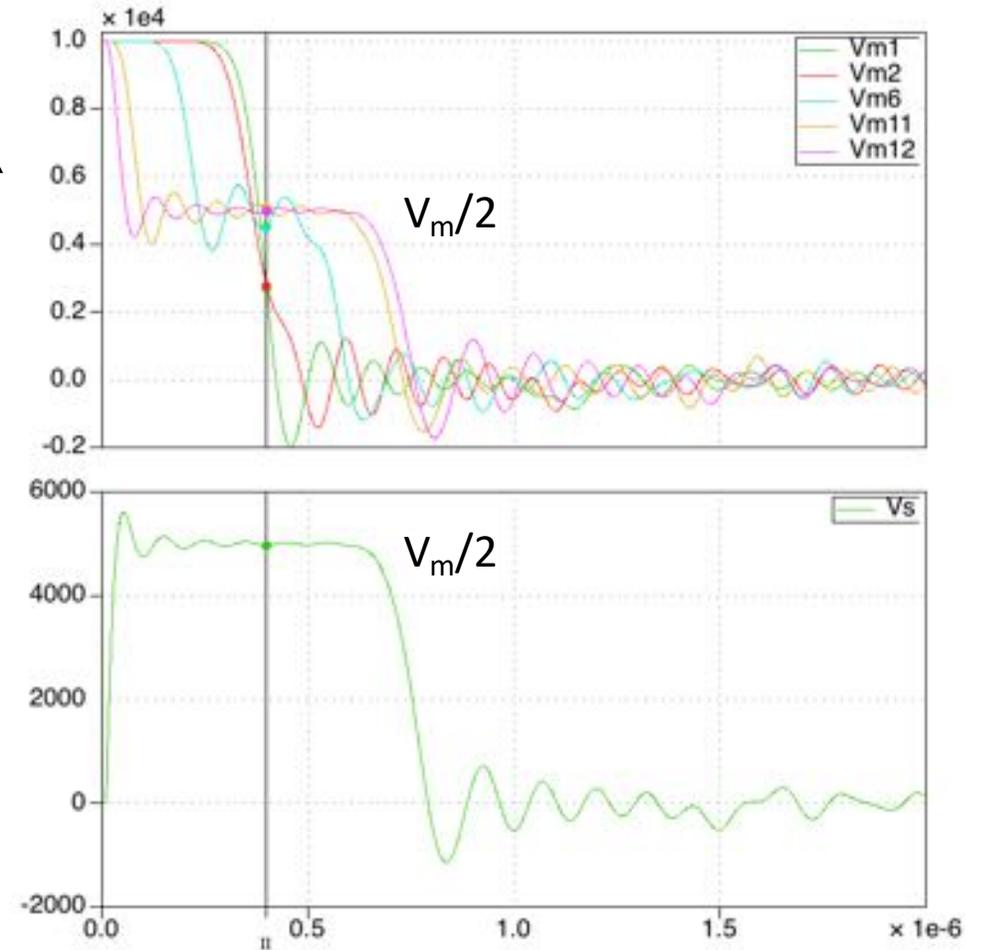
Ajout d'une multitude de cellule

- $t_{pulse}$
- Signal rectangulaire
- $t_r \ll t_{pulse}$

# Pulse Forming Network



- $C_{12}$  se décharge immédiatement à  $V_m/2$
- $C_{11}$  l'aide à se maintenir à  $V_m/2$
- ... jusqu'à ce que  $C_1$  se décharge complètement
- Amplitude du pulse :  $1/2 V_m$



# Lignes de transmissions

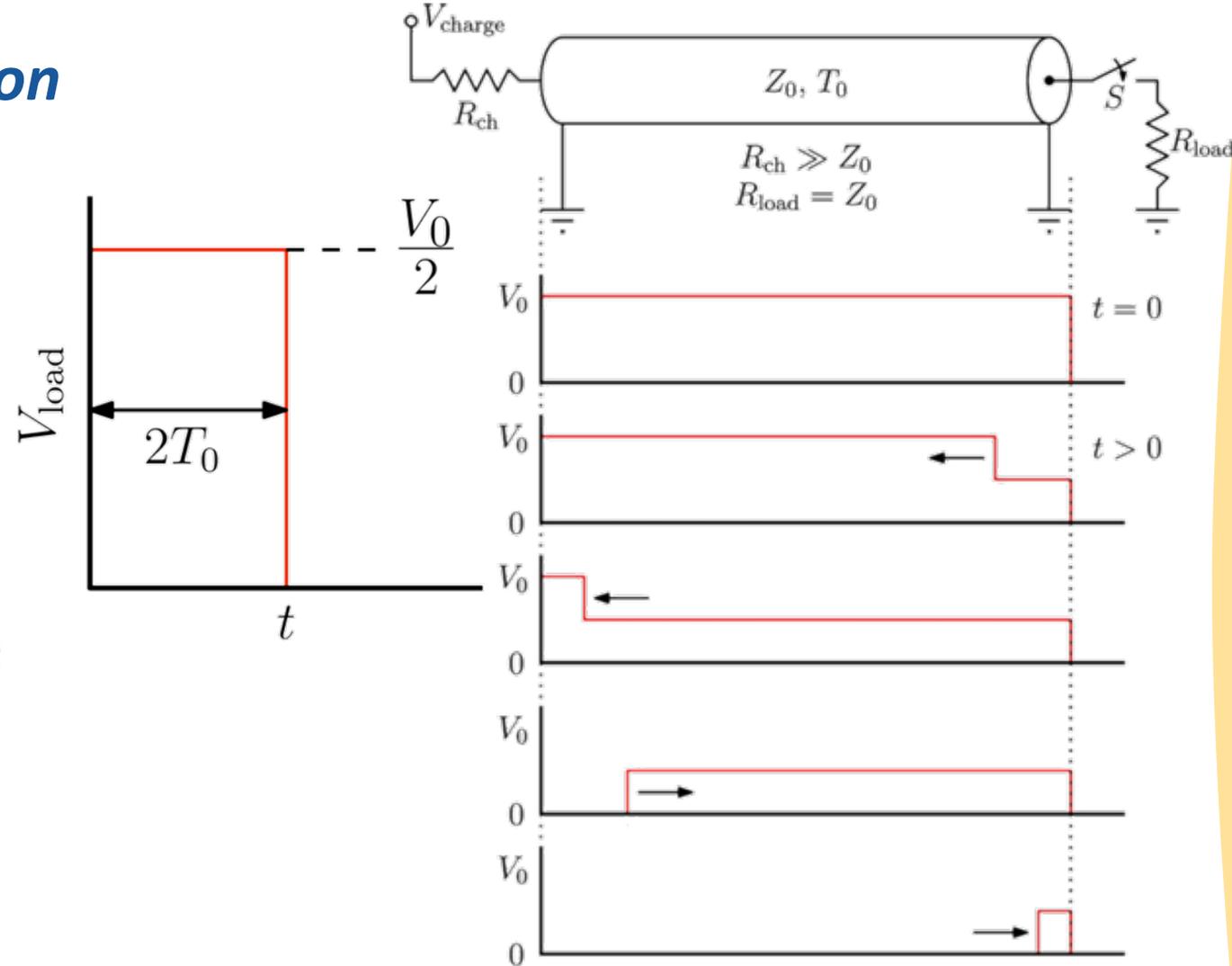
## Câble coaxial / ligne de transmission

→ L et C distribués linéairement

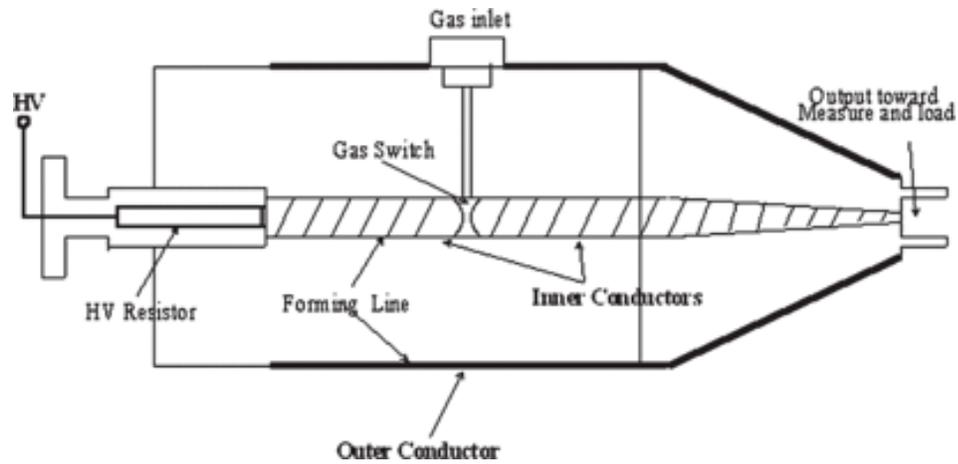
$$\rightarrow Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

→ onde se propage dans la lignes

■ Temps de propagation  $T_0 = t_{\text{pulse}}$  : dépend de la longueur de la ligne

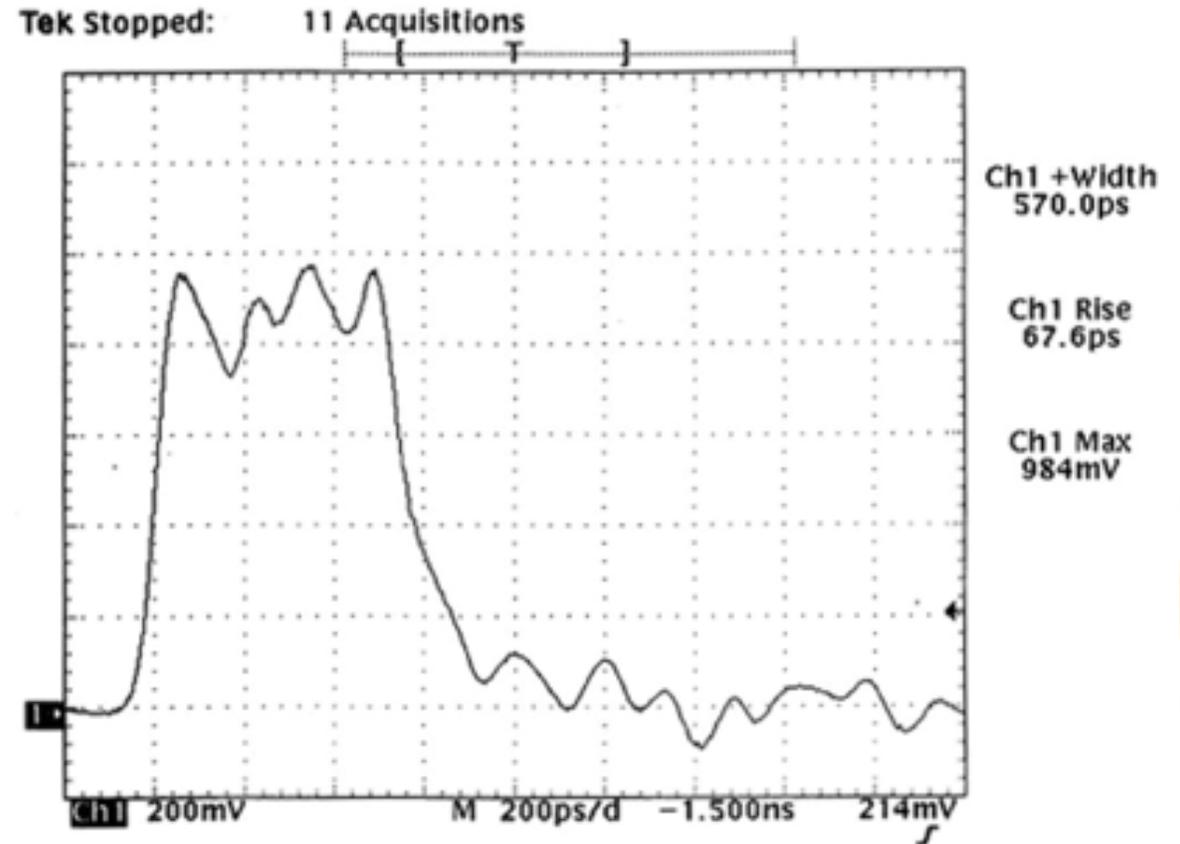


# Lignes de Transmissions ou PFL

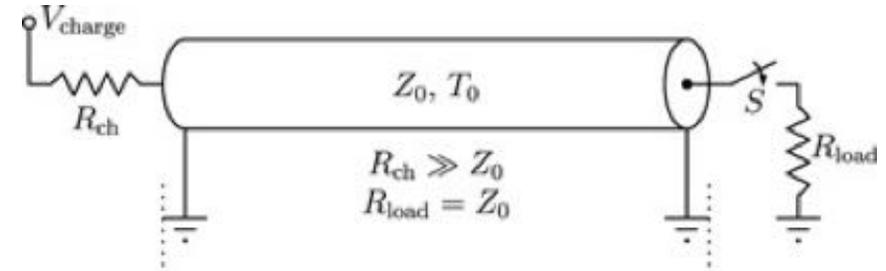
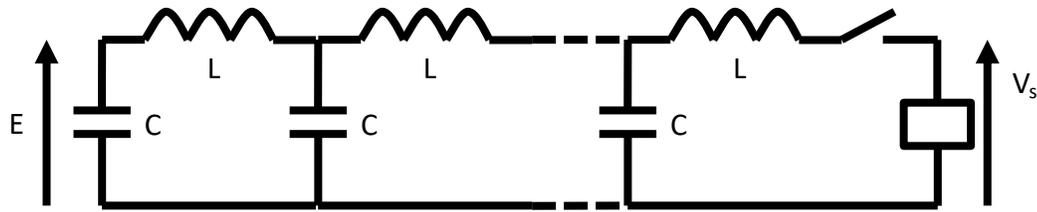


## *PFL Université de Pau :*

- $E_{\text{pulse}} < 10 \text{ mJ} / V_{\text{pulse}} : 26 \text{ kV}$
- **Durée de Pulse 600 ps /  $t_r = 68 \text{ ps}$**
- Coaxial :  $50 \Omega / 25 \text{ cm}$



Pecastaing, IEEE Trans Plas. Sci. 2006, [10.1109/TPS.2006.883346](https://doi.org/10.1109/TPS.2006.883346)

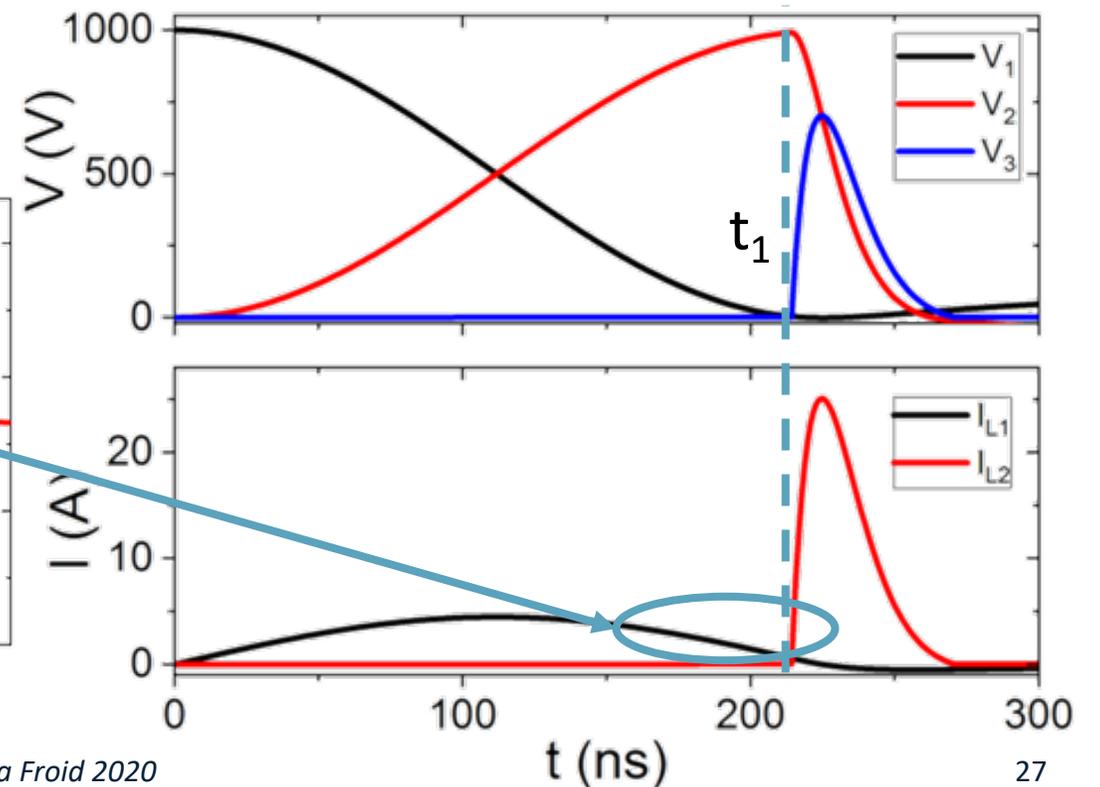
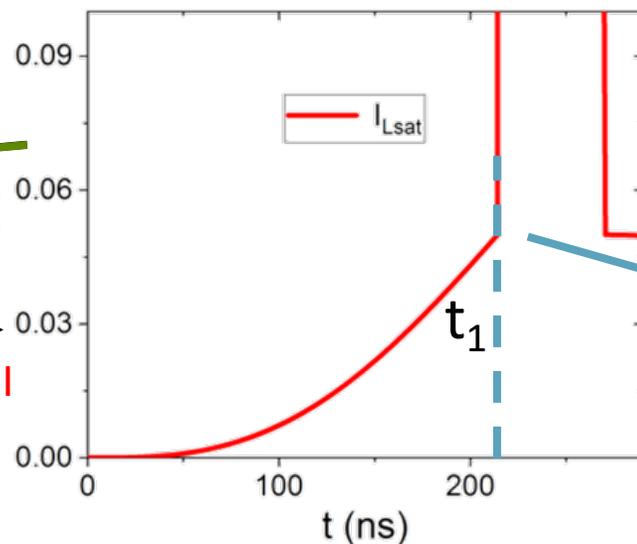
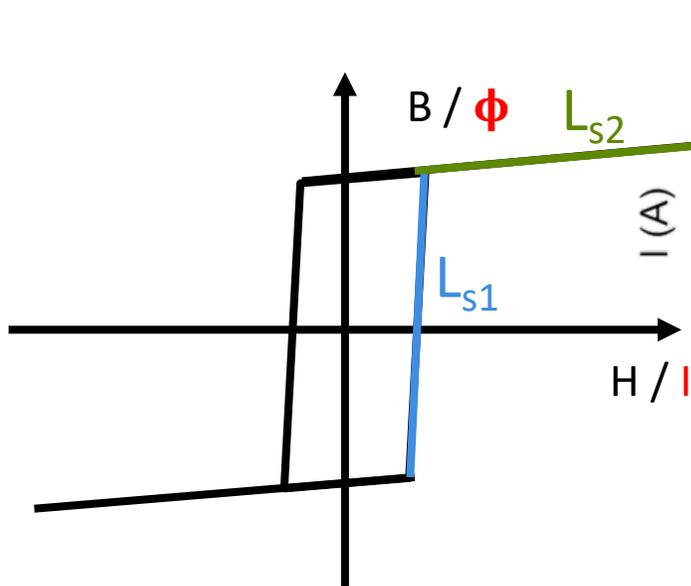
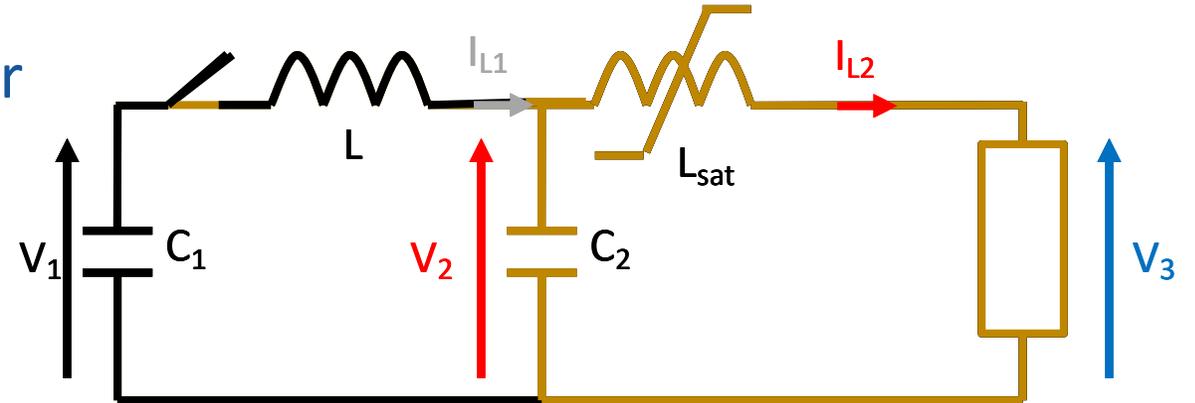


## Principe de fonctionnement similaire : Pulse Rectangulaire

- C et L  $\rightarrow$  Composant
- Energie  $\nearrow$  car C  $\nearrow$
- $t_{pulse}$  **long**
- $t_r \ll t_{pulse}$
- **Décharge de type arc / Spark**
- C et L distribué
- Energie  $\searrow$
- $t_{pulse}$  **court** (pour 100 ns  $\sim$  10 m de coaxial)
- $t_r \ll t_{pulse}$
- **Décharge de type streamer**

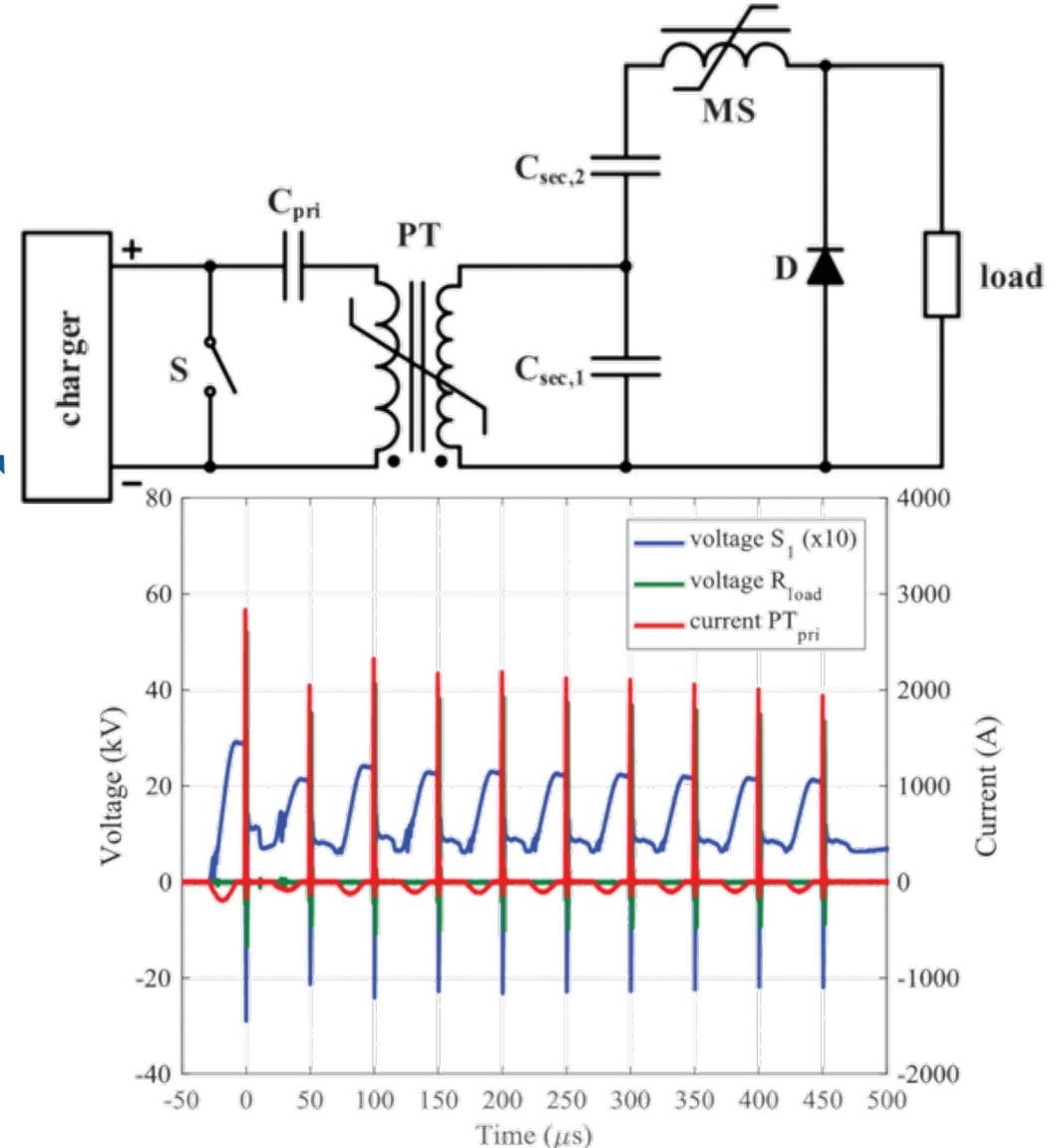
# Magnetic Pulse Compression : principe

- Utiliser la saturation de  $L_{sat}$  → interrupteur
- Fermeture interrupteur :
  - Charge de  $C_2$
  - $I_{L2} \ll I_{L1} \rightarrow L_{sat} = L_{s1}$
- $L_{sat}$  calculée pour qu'elle sature à  $I_{L2}(t_1)$
- À  $t=t_1$   $L_{sat} \rightarrow$  Pulse contrôlé par  $C_2$   $L_{s2}$



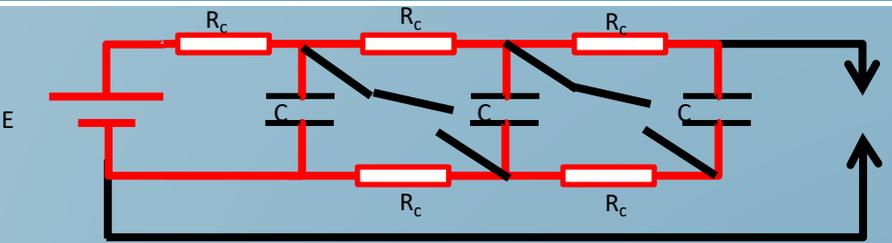
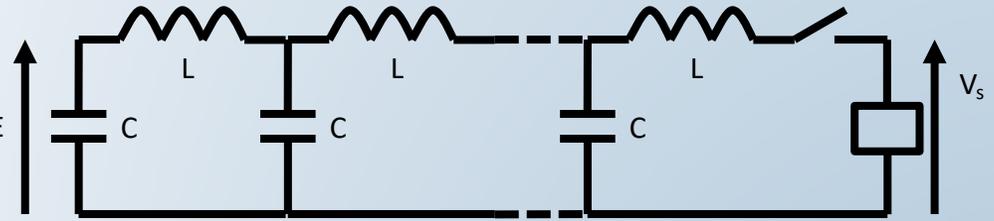
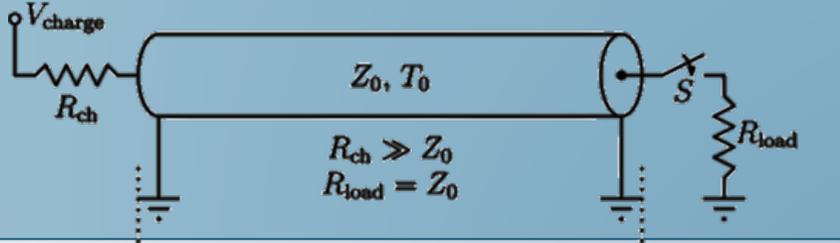
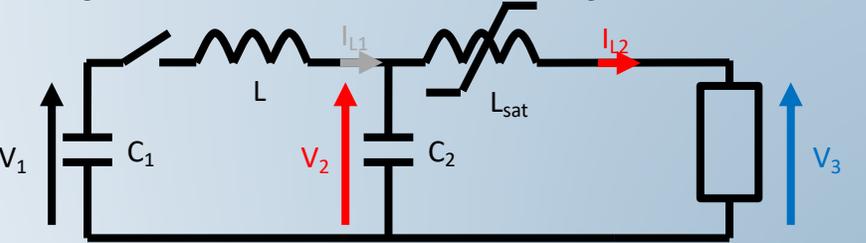
# Magnetic Pulse Compression

- Saturation tout composant inductif : transformateur
- Dimensionnement des switchs magnétiques complexe
- Saturation magnétique  $\rightarrow I_{\text{pulse}} \nearrow \rightarrow P \nearrow$
- $f \nearrow$
- HT à fort taux de répétition
- possibilité arc impulsionnel



A. B. J. M. Driessen, IEEE Trans Plas. Sci. 2017, DOI: [10.1109/TPS.2017.2771275](https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2771275)

# Synthèse structures

	$t_{\text{pulse}}$	$t_r$	E	f	$V_{\text{pulse}}$	Autre
	+	+	++	- Inter	+++ Inter	THT
	--	++	+++ 10 J	-	++ Inter	Dépend du LC
 <p> <math>Z_0, T_0</math>  <math>R_{\text{ch}} \gg Z_0</math>  <math>R_{\text{load}} = Z_0</math> </p>	++ 100ps	+++	-	Inter	+ Inter	Contrôle par la longueur de câble
	+	+	+	++ >10kHz z	+	Conception complexe

1. Comportement électrique de la décharge
2. Conception d'une alimentation
3. Comparaison des structures d'alimentations
4. Choix des composants
5. Éléments parasites

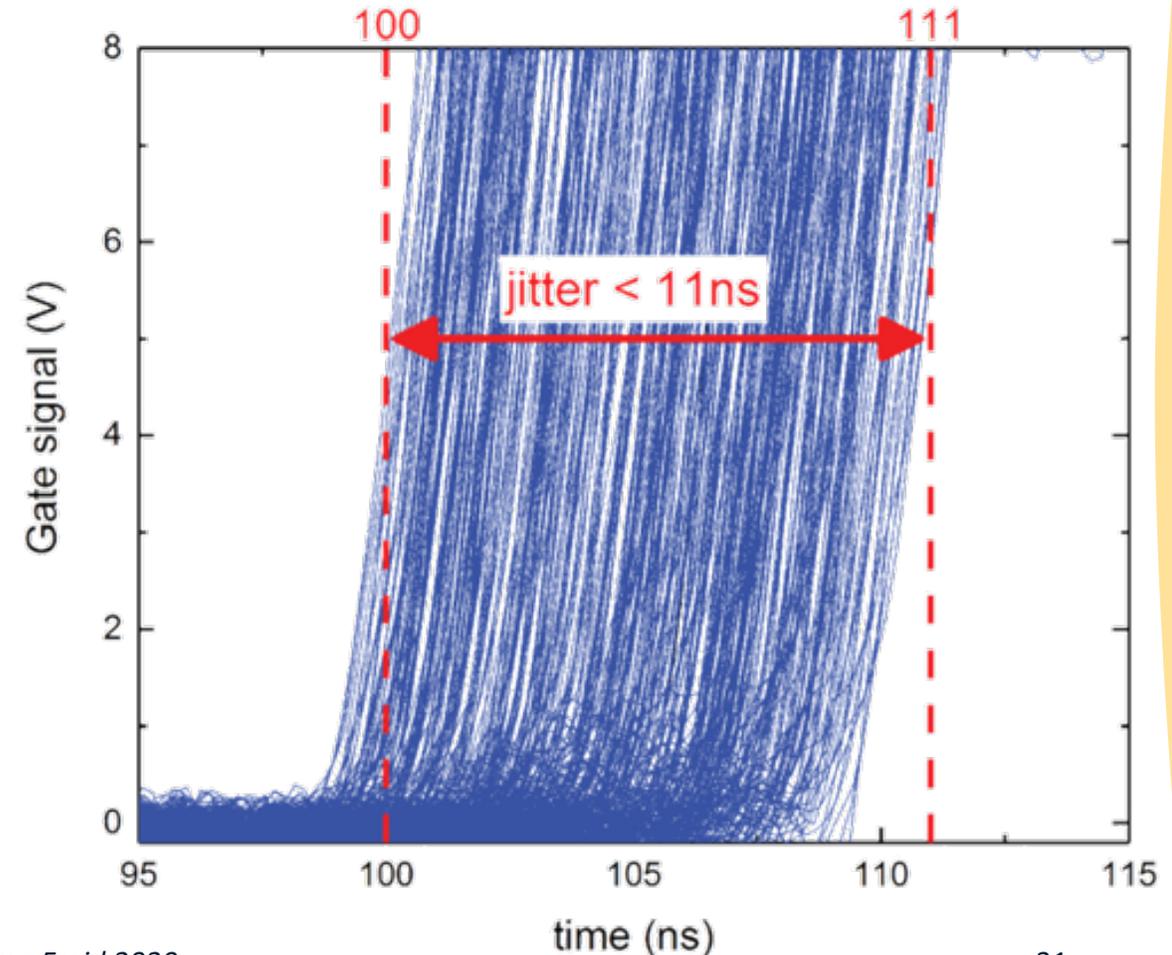
## 2 type d'interrupteurs

- Gaz
- Semi-conducteur

### Paramètres importants :

- Tenue en tension  $V_{\max}$
- Fréquence de répétition  $f$
- Contrôle de l'amorçage
- Jitter

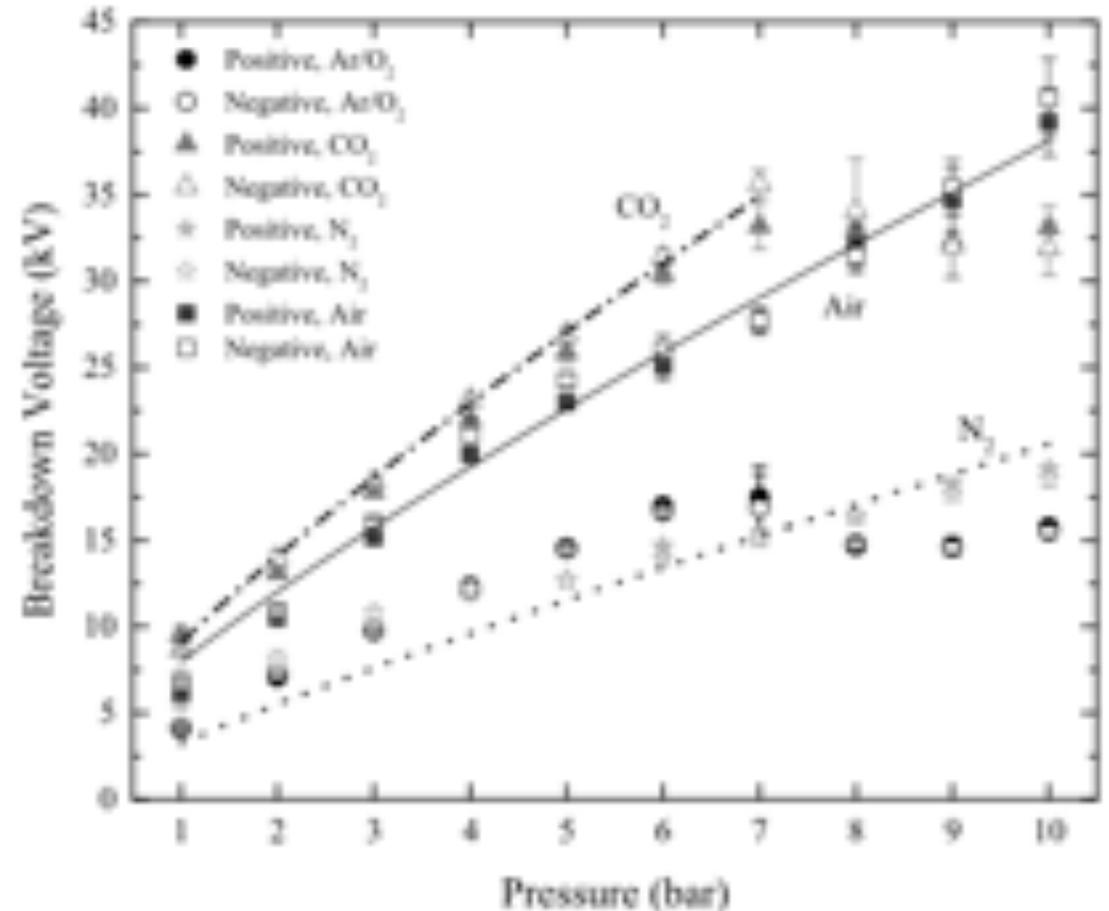
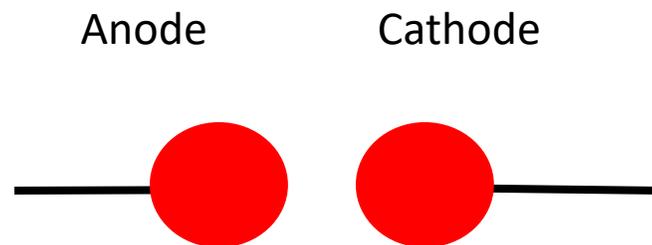
[Hochberg et al, IEEE Trans. Plas. Sci. 2019 10.1109/TPS.2018.2876503](#)



# Interrupteur à gaz

## Pashen

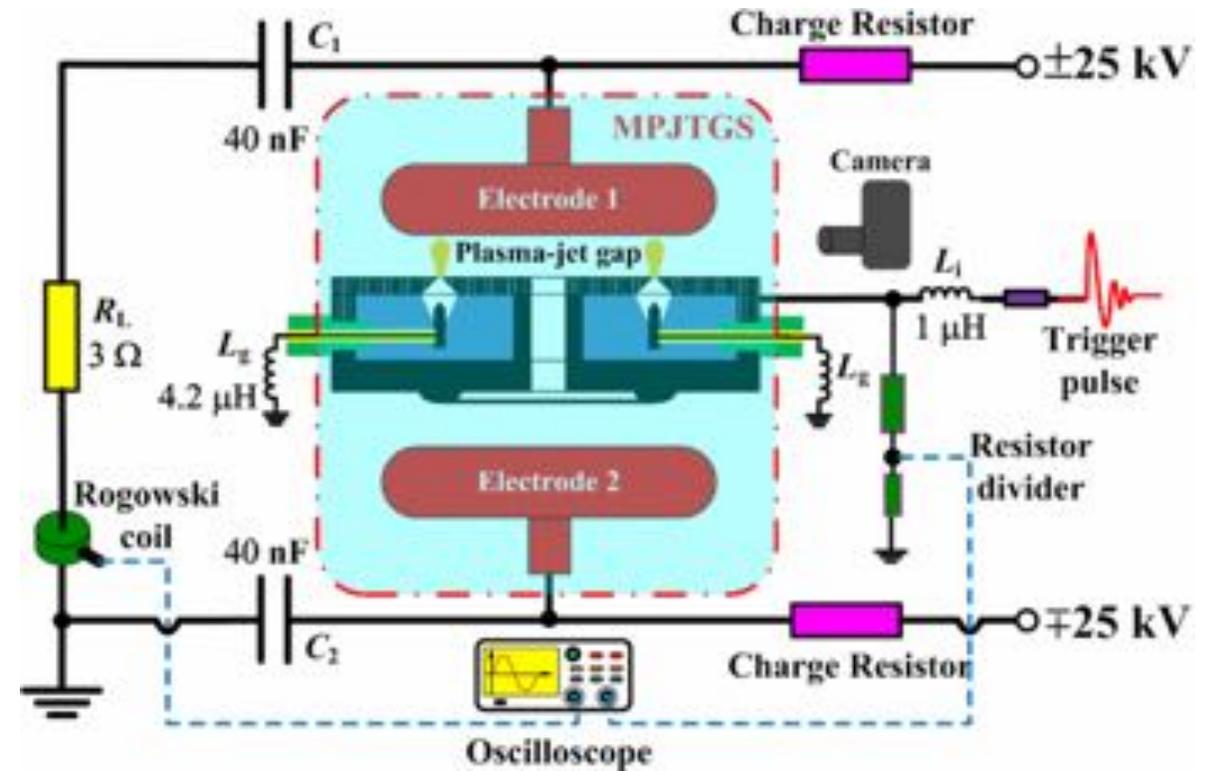
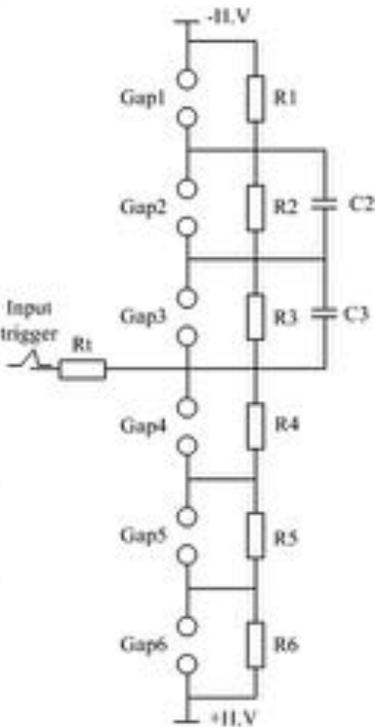
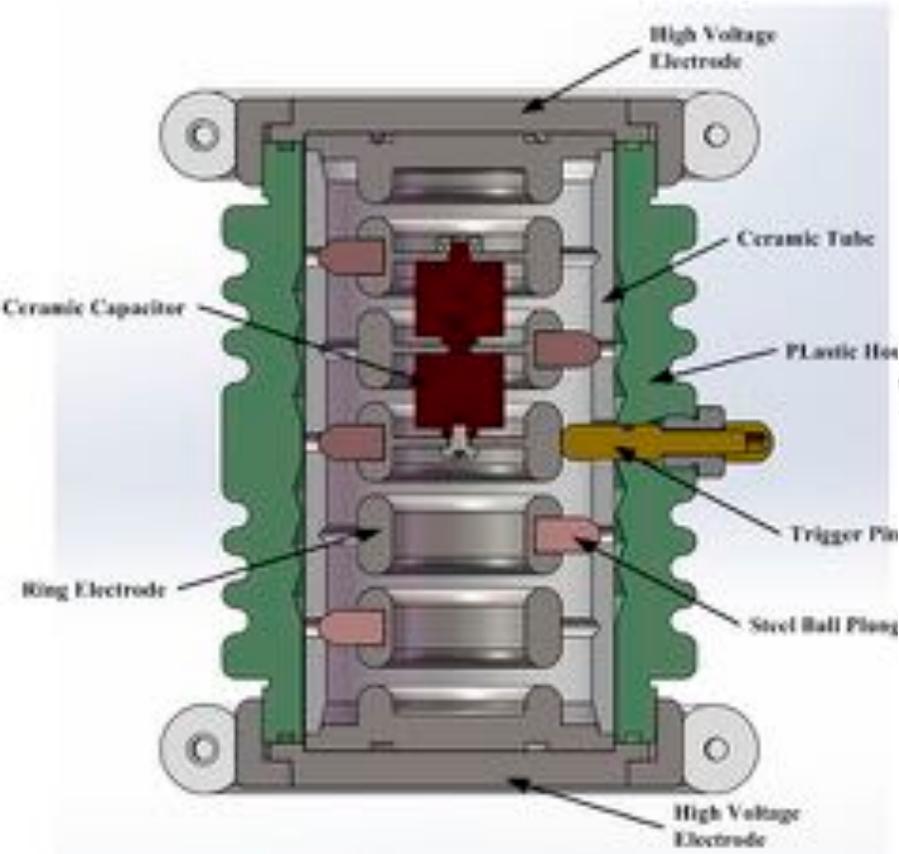
- $V_{AK} < V_{th} \rightarrow$  interrupteur ouvert
- $V_{AK} > V_{th} \rightarrow$  interrupteur fermé
- Une fois fermé il s'ouvre quand courant trop faible
- Dépend de P et du gaz
- Alim contrôle le temps d'amorçage



Yao, IEEE Trans Plas. Sci. 2018, 10.1109/TPS.2018.2856306

# Interrupteur à gaz contrôlé

Faciliter l'amorçage du gaz : → électrode intermédiaire polarisée ou pré-ioniser le gaz

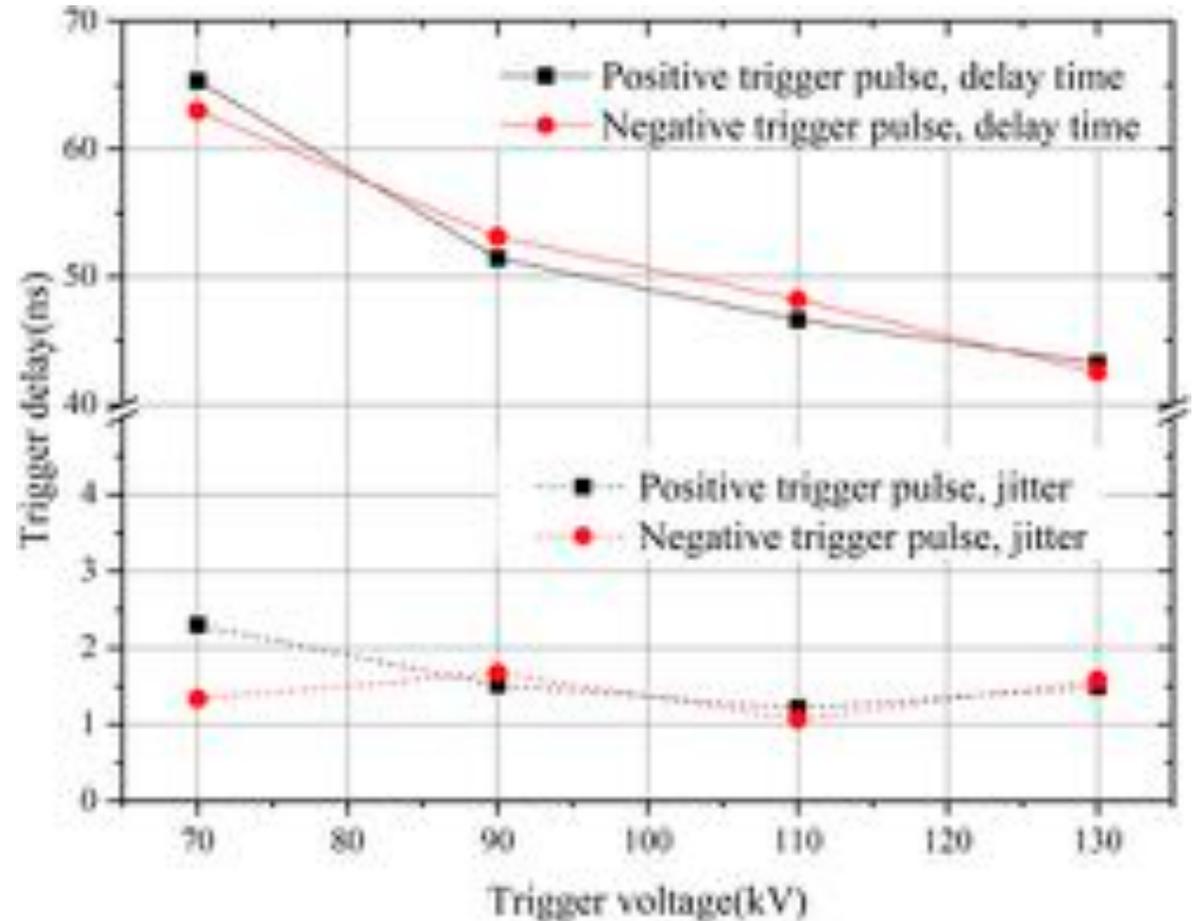


W. Tie, RSI 2014, <https://doi.org/10.1063/1.4891190>

Xiaofeng Jiang, RSI 2019, <https://doi.org/10.1063/1.5113704>

# Interrupteur à gaz contrôlé

- Utilisable *THT* qq 100 kV
- Electrode intermédiaire → contrôle précis de l'amorçage
- Relaxation du gaz →  $f$  faible
- Pas de contrôle de l'extinction →  $I = 0$



Xiaofeng Jiang, RSI 2019, <https://doi.org/10.1063/1.5113704>

# Interrupteur de type semi-conducteur commandé

- **Thyristor** : → THT, faible fréquence pas de commande d'ouverture

- **MOS** :

  - $V_{\max} = 2 \text{ kV}$

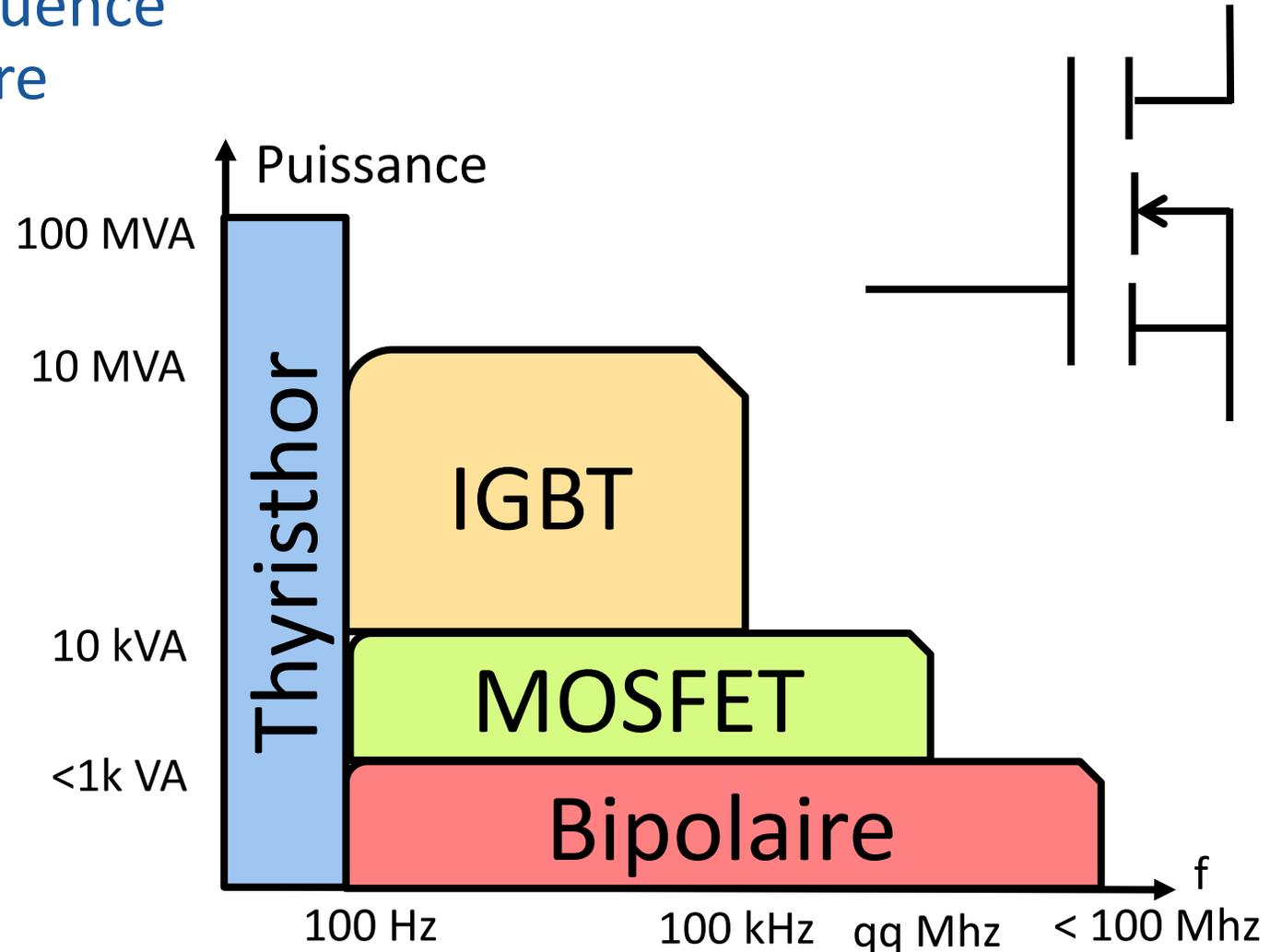
  - $f_{\max} = \text{qq } 100 \text{ kHz}$

- **IGBT** :

  - $V_{\max} > 10 \text{ kV}$

  - $f_{\max} = \text{qq } 10 \text{ kHz}$

  - $I_{\max} > \text{qq } \text{kA}$

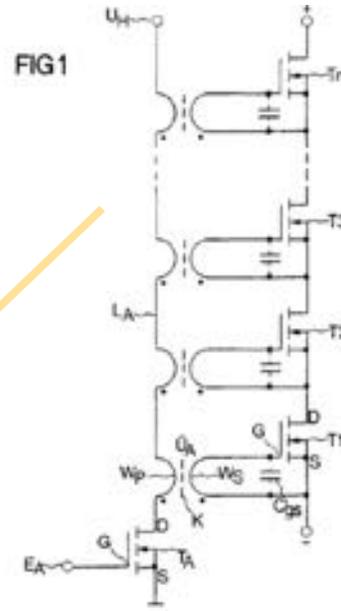
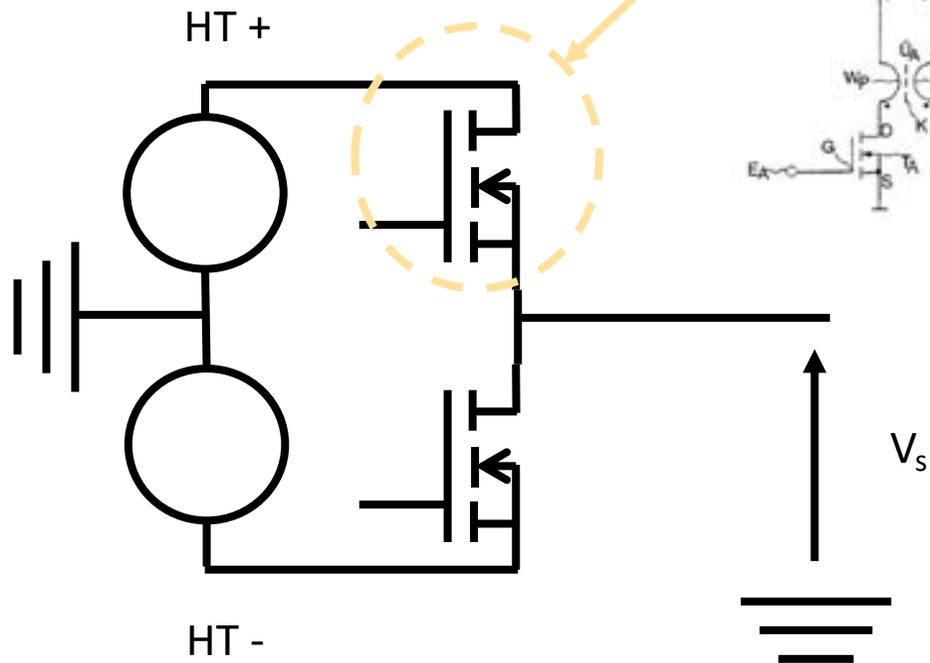


# Interrupteur commercial à base de MOSFETs

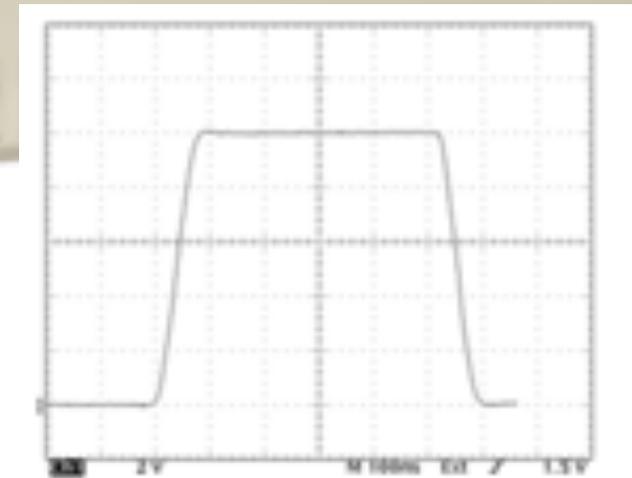
- MOSFET mise en série

→ qq 10 kV

→  $f < 10\text{kHz}$

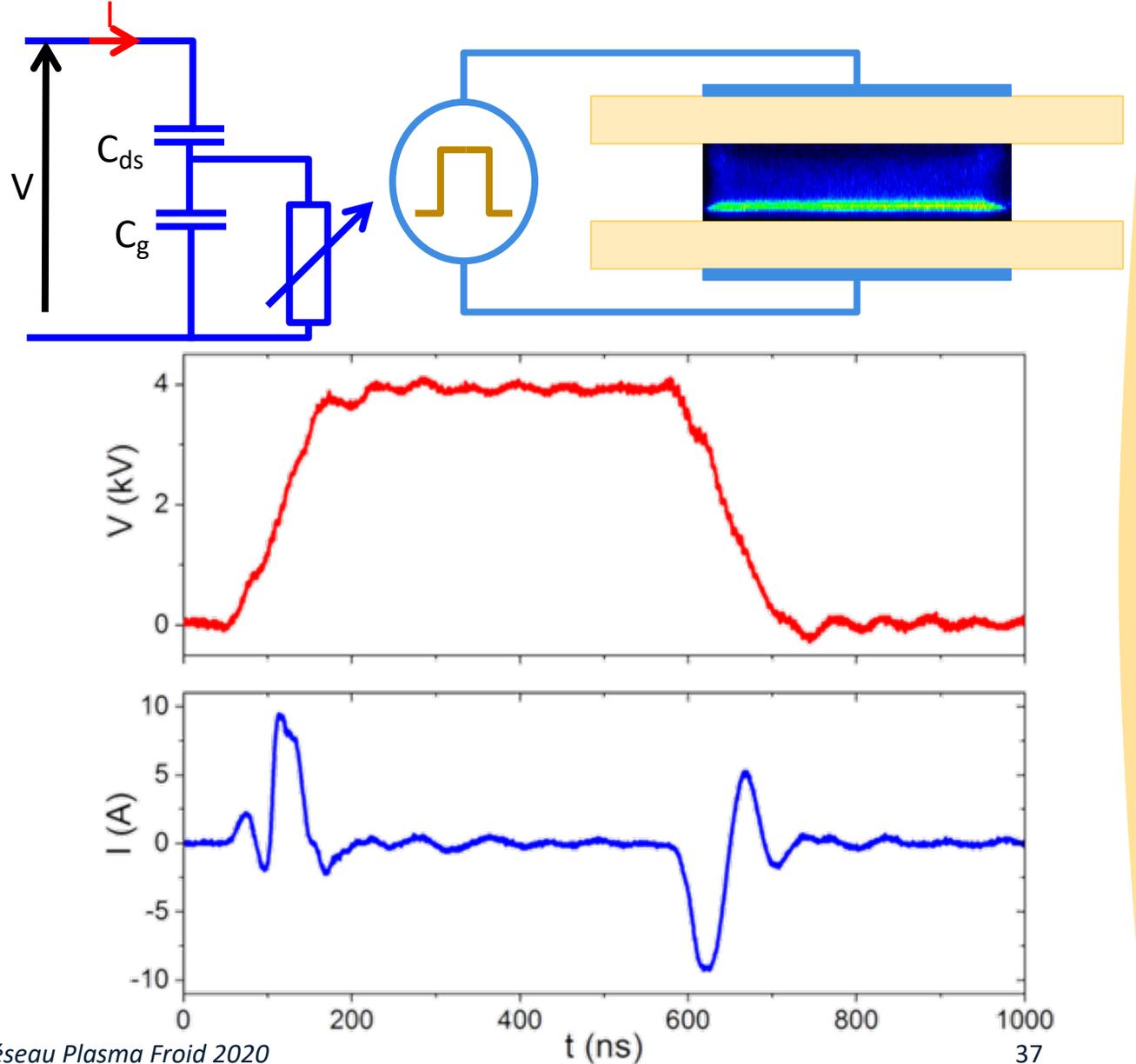


## PVX-4110 ±10,000V PULSE GENERATOR

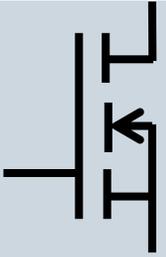
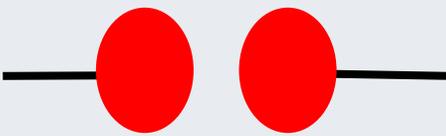
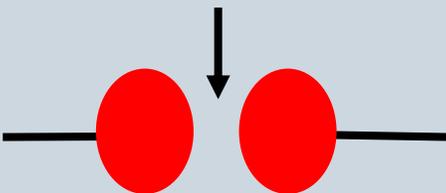


# Utilisation avec une DBD

- DBD  $\rightarrow$  comportement capacitif
- Alim directement reliée à DBD
- $dV/dt$  ou  $(t_r, V)$  impose  $I_{\text{pulse}}$
- Stockage  $\rightarrow$  indirect dans DBD



# Synthèse structure + interrupteur

	$V_{\max}$	f	Contrôle	Jitter
	+	+ 10kHz	+++	++++
	+++ >>100 KV	---	-	--
	+++	---	+	+

1. Comportement électrique de la décharge
2. Conception d'une alimentation
3. Comparaison des structures d'alimentations
4. Choix des composants
5. Éléments parasites

# Élément parasite : câble HT

- Câbles classique principalement inductif



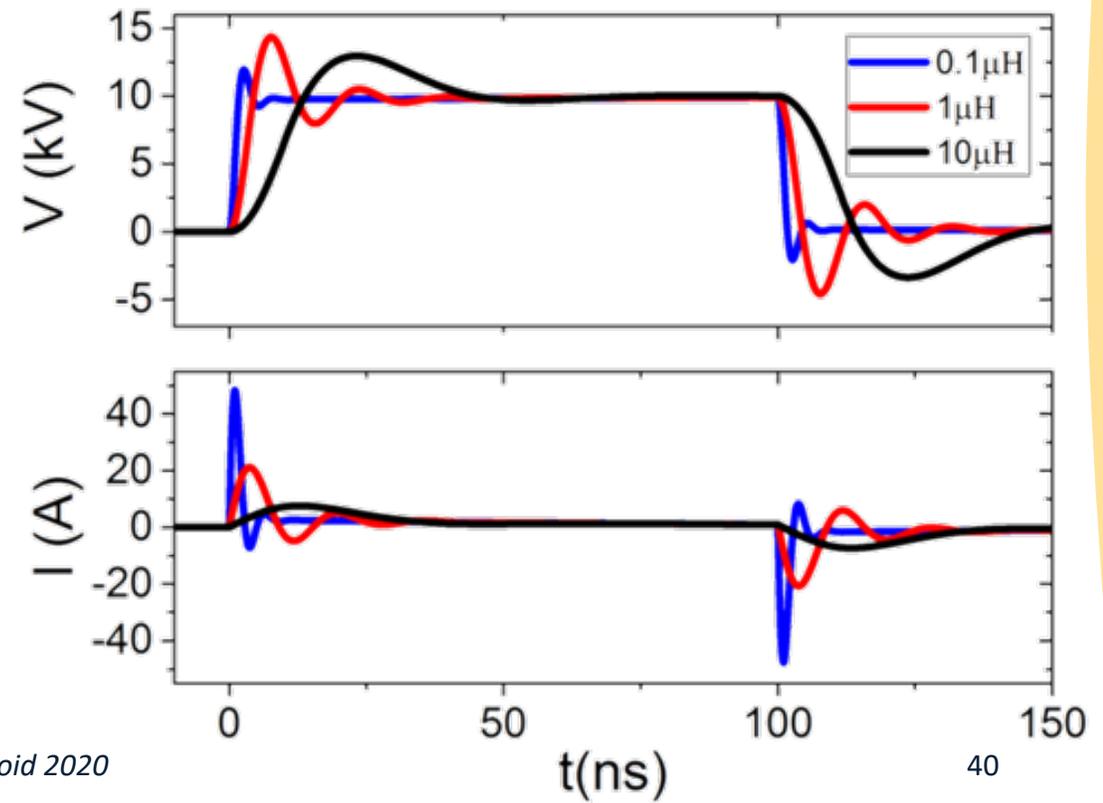
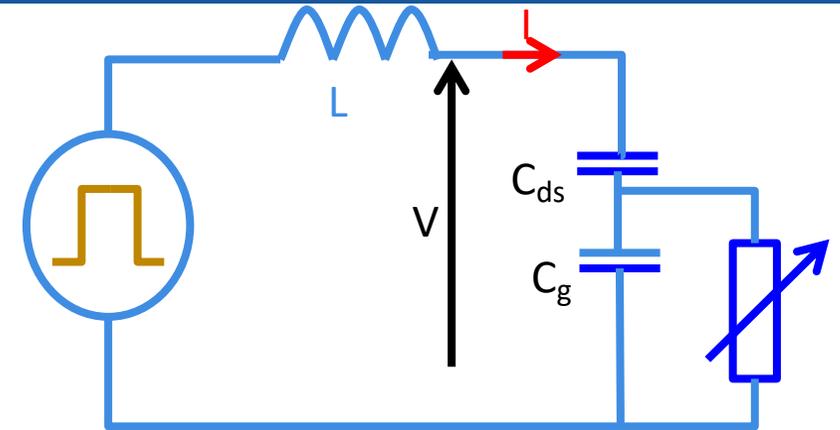
- $L \nearrow$  avec la longueur, ajoute des oscillations

- $L \nearrow$  le temps de montée  $t_r$

- +  $L \searrow$  le courant max  $I_{pulse}$

- $L \nearrow$  la durée de la décharge

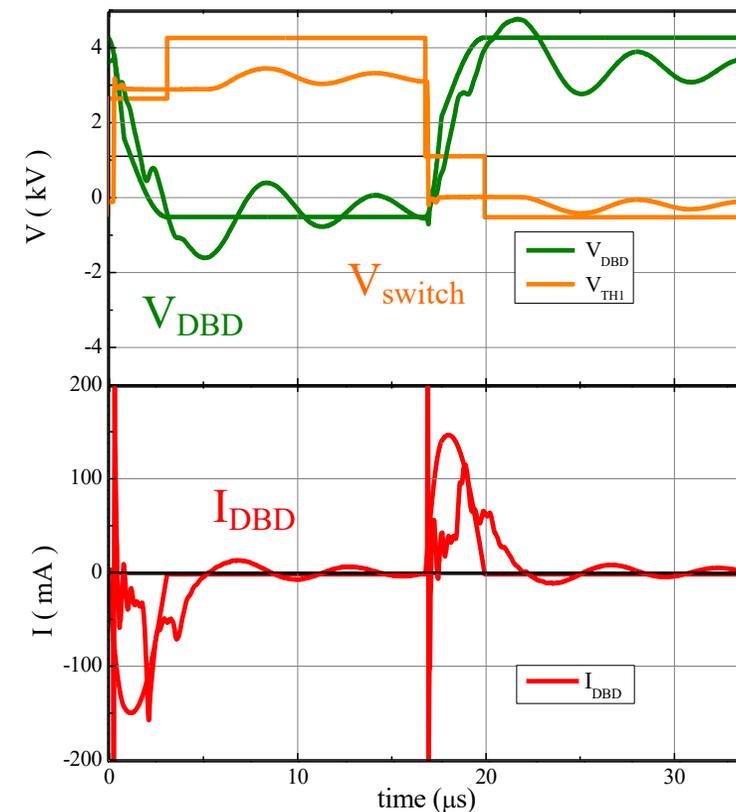
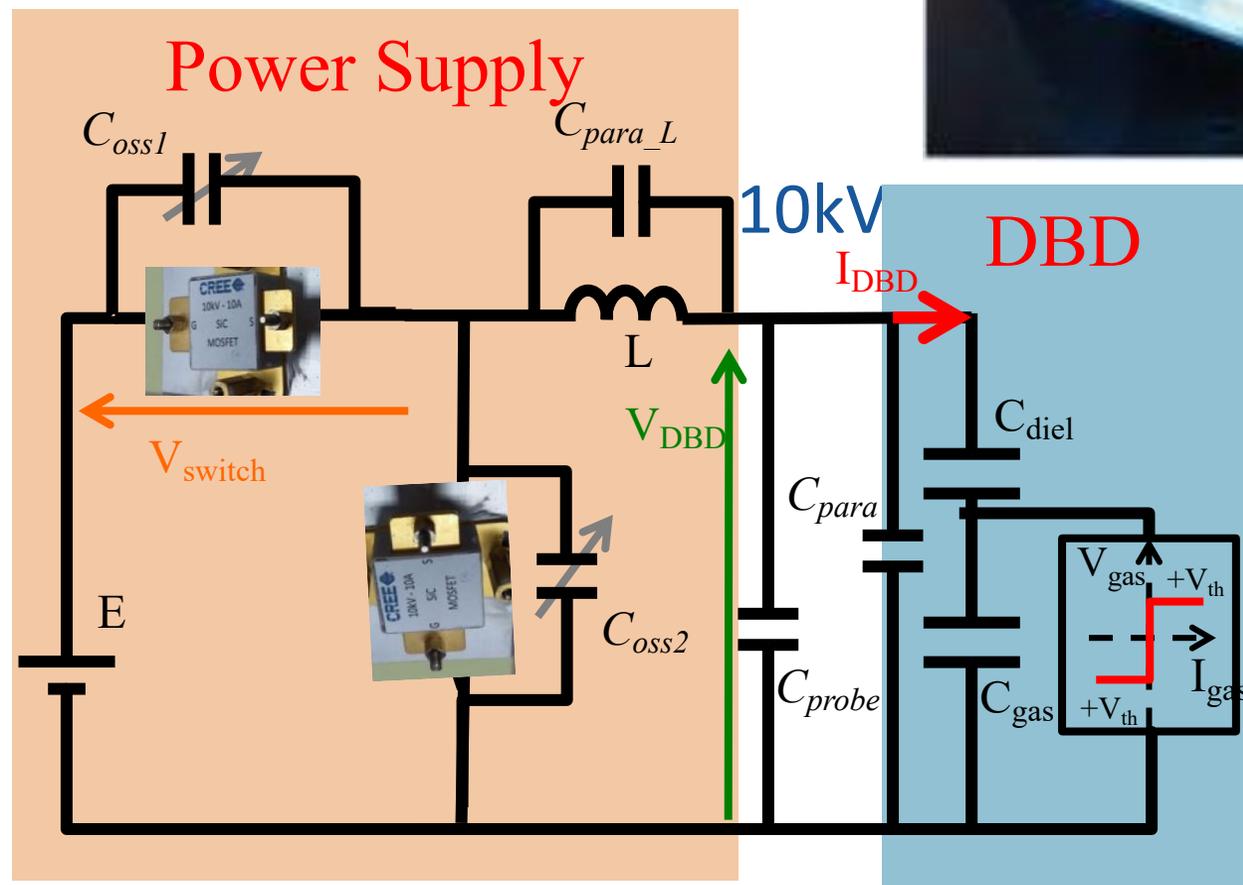
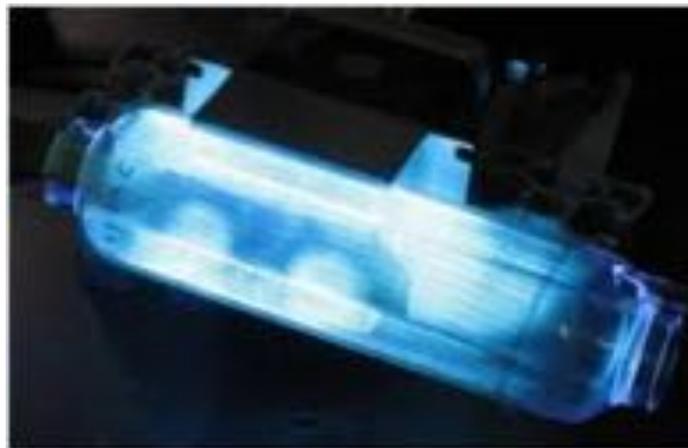
→ Préférer des câbles coaxiaux à impédance connue



# Capacités parasites des interrupteurs

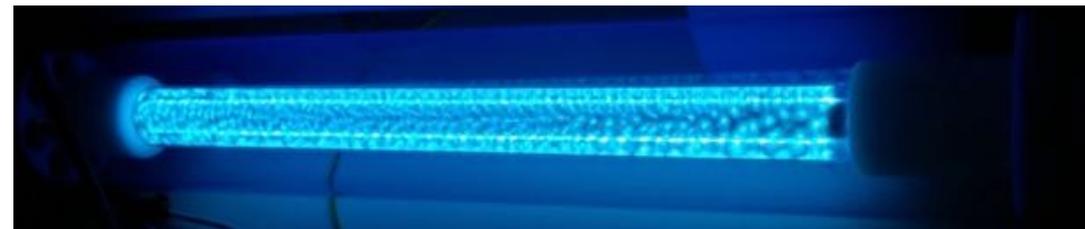
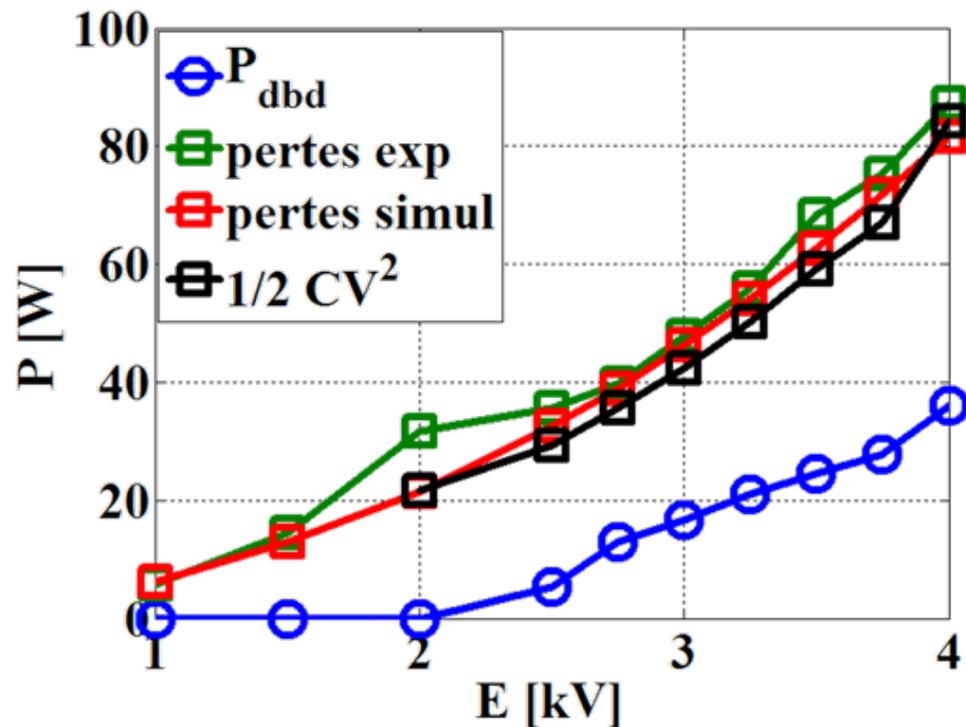


f jusqu'a 100 kHz



- Contrôle indépendant :  $P$  ,  $t_{pulse}$  ,  $f$
- Capacités parasites  $\rightarrow$  oscillations

# Rendement et capacités parasites

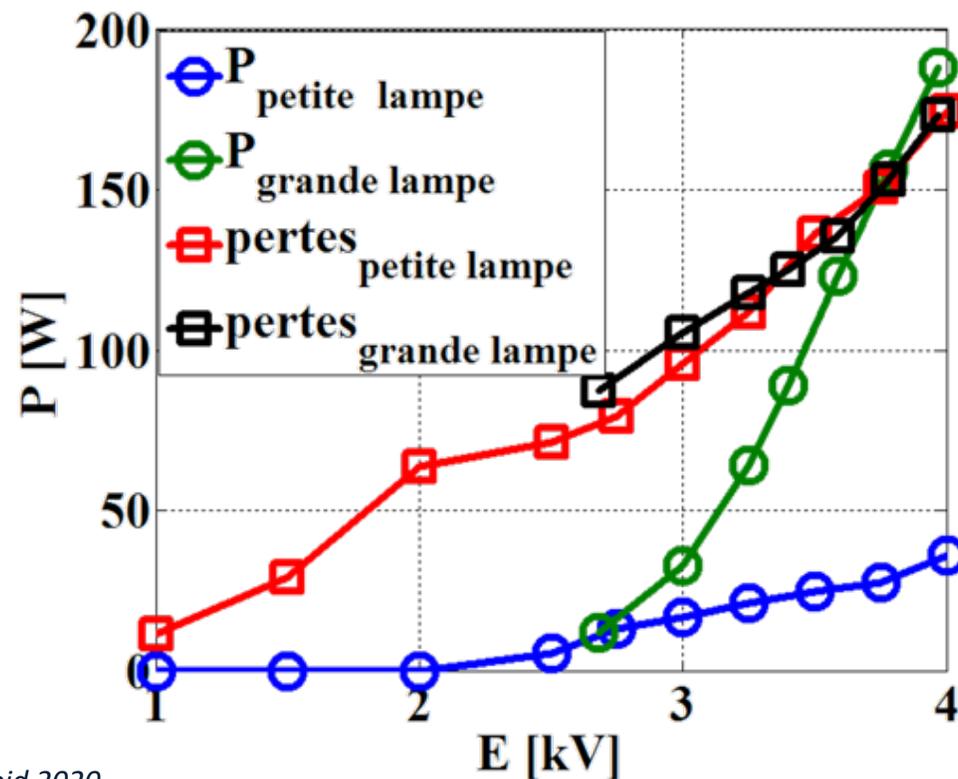


$$P_{dbd} = 4 \cdot f \cdot V_{th}^2 \cdot C_{gaz} \cdot \frac{E}{2 \cdot V_{th} - E}$$

- Pertes dans  $C_{oss}$  MOSFET  $\rightarrow \eta \searrow \searrow$

$C_{gaz}$ petite lampe	$C_{gaz}$ grande lampe
25pF	123pF

- Perte identique mais  $P \nearrow$
- Utilisable pour application  $I_{pulse} \nearrow$



# Conclusion

- Impossible d'avoir une bonne adaptation → oscillations
- **Stockage** de E pour faire un pulse → **capacitif**
- $t_{\text{pulse}}$  très court → ligne de transmission
- V très élevé → pont de Marx
- Interrupteur à gaz → THT mais  $f \searrow$
- Interrupteur semi-conducteur → Tension plus faible mais  $f \nearrow$
- Prise en compte les éléments parasites dans la conception