

Quelle alimentation pour quel plasma ?

Générateurs pour l'étude du foudroiement des avions

C. Zaepffel – ONERA

01/04/2019

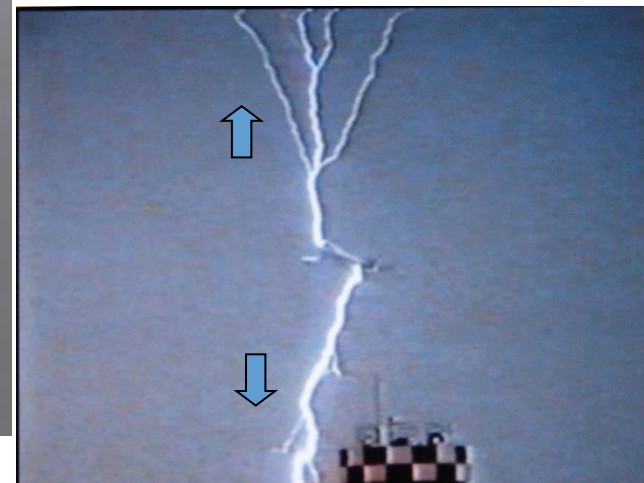
Alim-Plasma GREMI Plasmas Froids CNRS
QUELLE ALIMENTATION POUR QUEL PLASMA?
Orléans, 1-3 avril 2019

1. Ondes foudres
2. Générateurs de tension
3. Générateurs de courant
4. Mesures électriques
5. Protection et sécurité

I. Foudroiement d'aéronefs



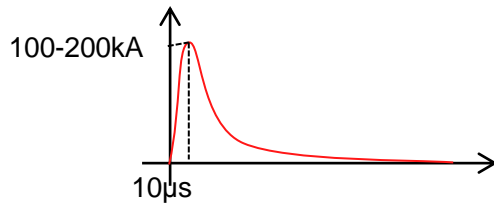
Avion déclenche la foudre



I. Phases courant foudre

Courant impulsionnel

- Onde A (200kA), onde D (100kA)
- Arc explosif
- Onde de choc
- Forme quasi cylindrique
- Forte émission radiative



0µs 10µs 20µs 30µs

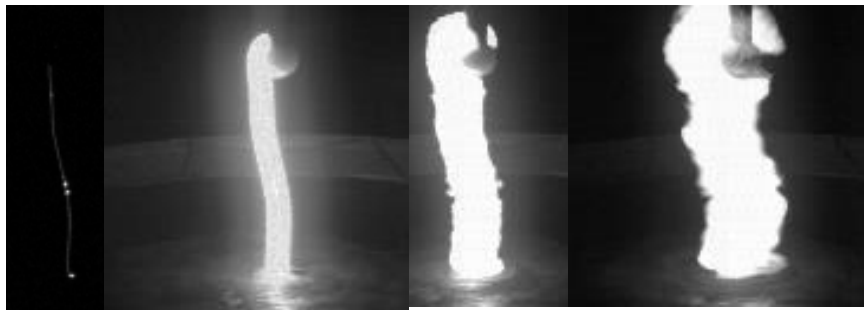


Image Onera

Courant continu ou faiblement variable

- Onde B et onde C
- Ecoulement hydrodynamique dépendant de la forme des électrodes
- Comportement chaotique de la colonne (grandes longueurs)
- Formation de spots, et de jets de plasma

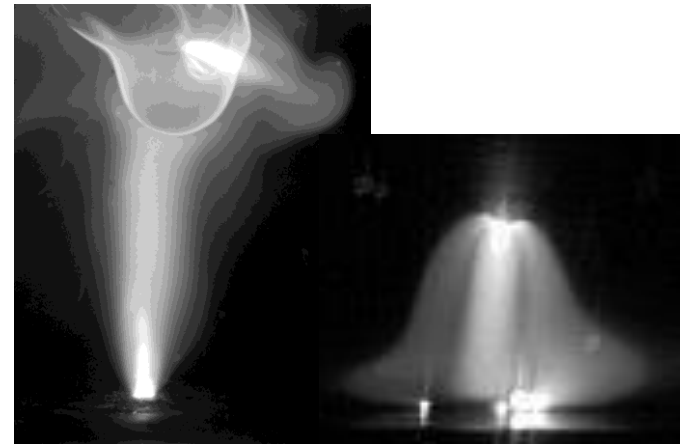
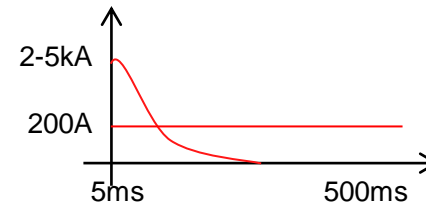
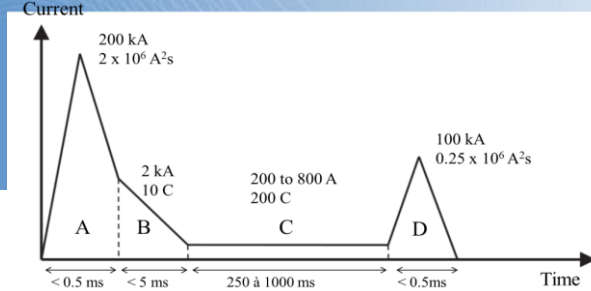


Image Onera

I. Norme

- Protection foudre: normes ondes de courant, dépend du zoning de l'avion



Type d'onde	A	Ah	B	C	C*	D
Amplitude (kA)	200	150				100
Rise time (μs) ^a	< 50	37.5				< 25
Action integral (A ² s)	2×10^6	0.8×10^6				0.25×10^6
Average current (A)			2 000	400	400	
Charges (C)			10	200	18	
Duration (ms)	0.5 max	0.5 max	5	500	5 to 50 (=45)	0.5 max

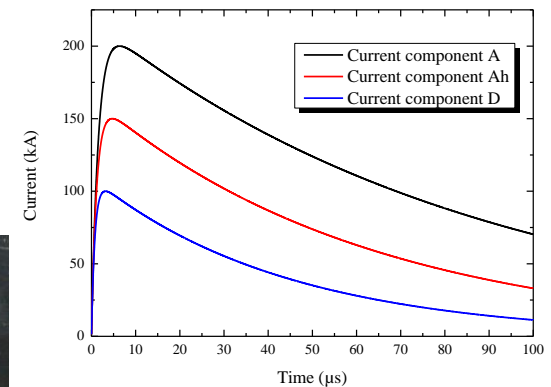
- Essais dielectriques : onde de tension

$$\frac{dV}{dt} > 1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

Claquage durant la montée de tension



Jet diverter electrode

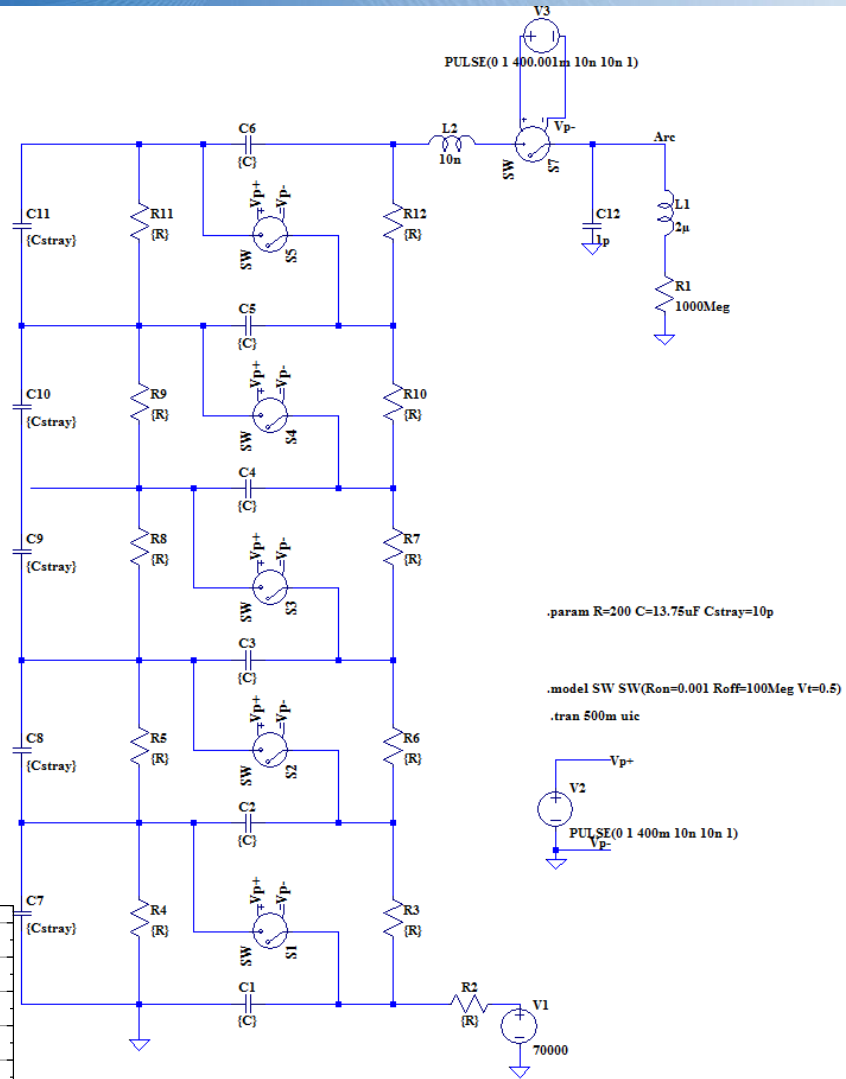
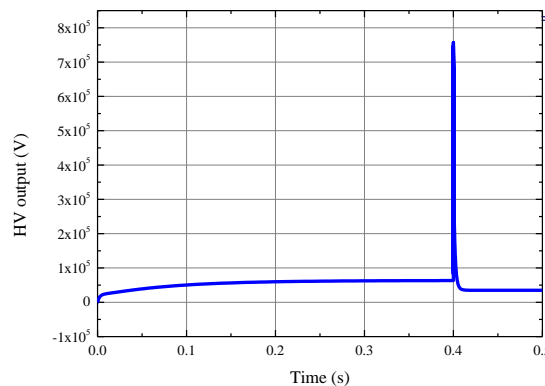


II. Générateurs de tension

Générateur de Marx

- Chargement des condensateurs en parallèle
 - Commutation de chaque étages
 - mise en série des condensateurs suite à commutation
- élévation de tension

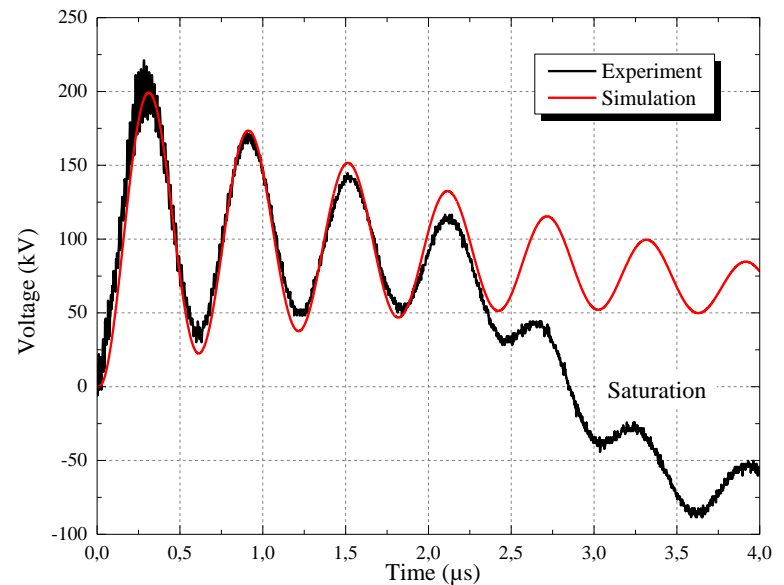
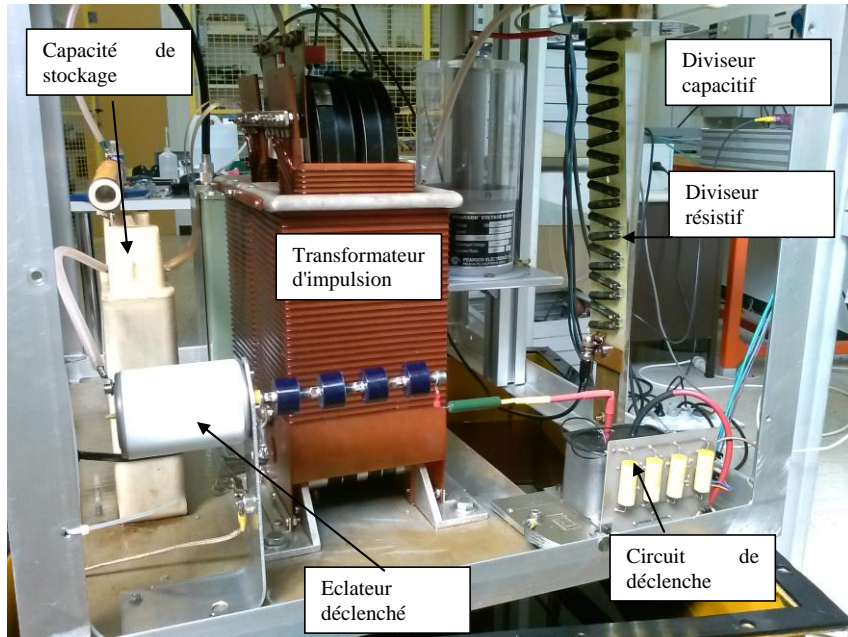
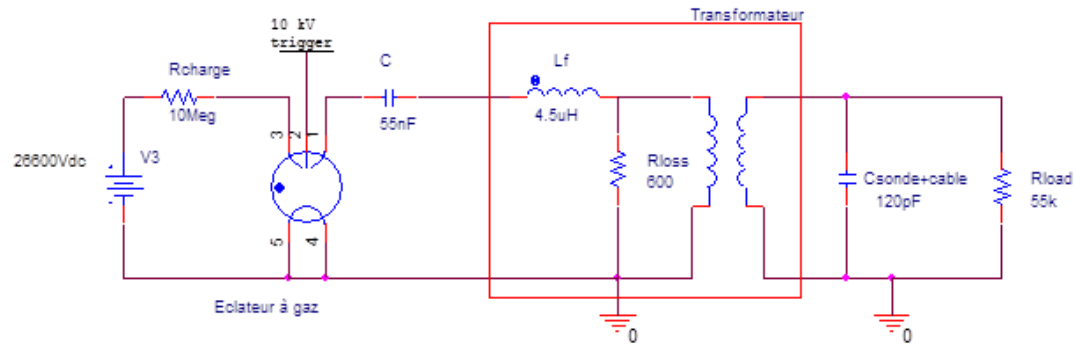
Possibilité d'augmenter la tension de sortie avec un circuit de peeking (circuit CLC)



II. Générateurs de tension

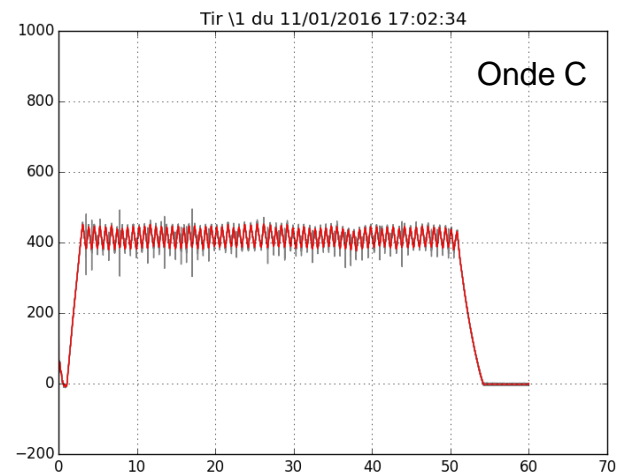
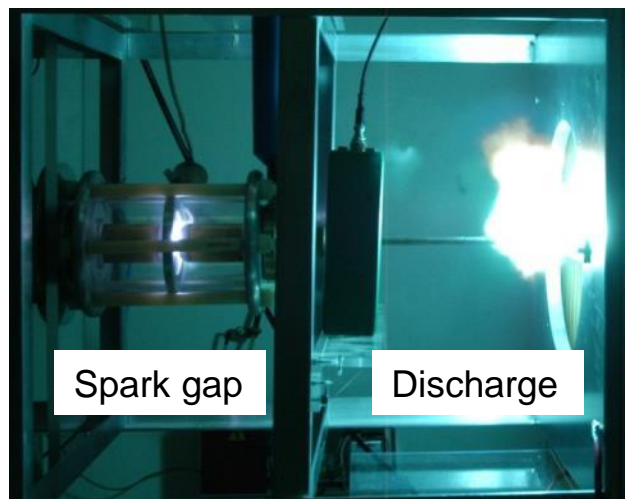
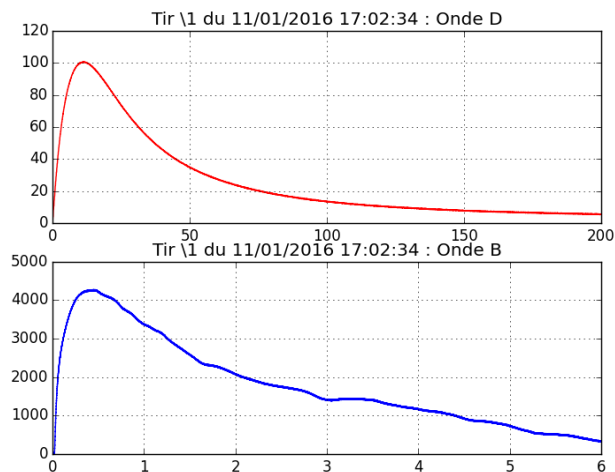
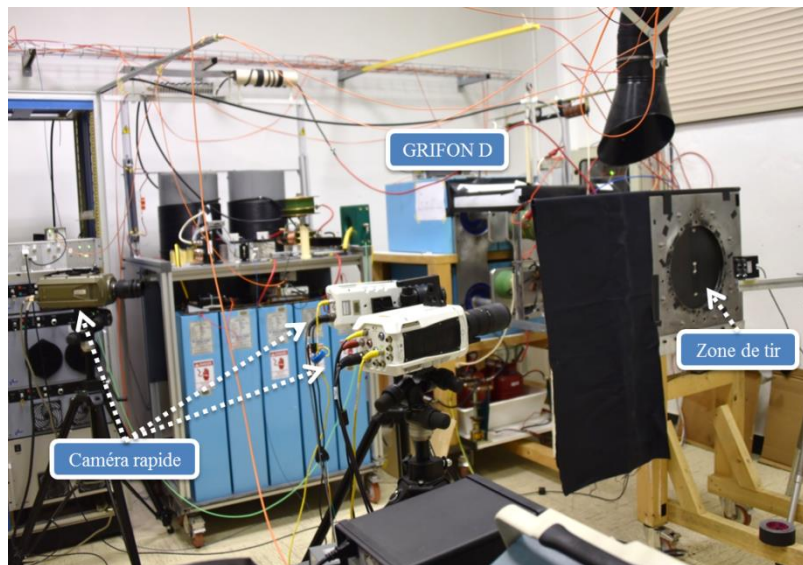
Transformateur impulsionnel

- Décharge du condensateur dans le primaire
- Flux magnétique important
- Apparition d'une forte haute tension au secondaire



III. Générateurs fort courant

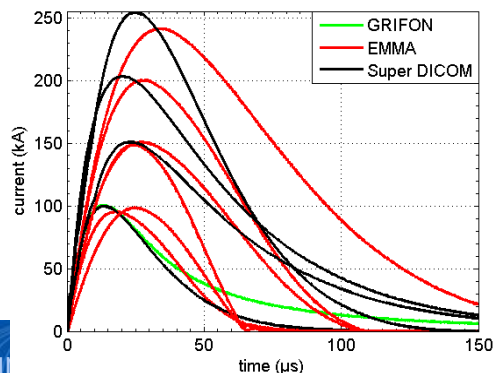
Moyen d'essai ONERA – GRIFON DBC



III. Moyens d'essais DGA-TA, Super Dicom et EMMA



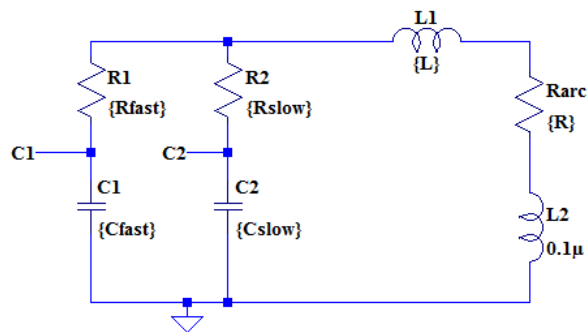
- Générateur dans un shelter
- Zone de tir et filtre à l'extérieur
- Basé sur un crowbar RLC pour l'onde A
- Tension max de 80kV
- Courant max de 240 kA (possiblement plus)



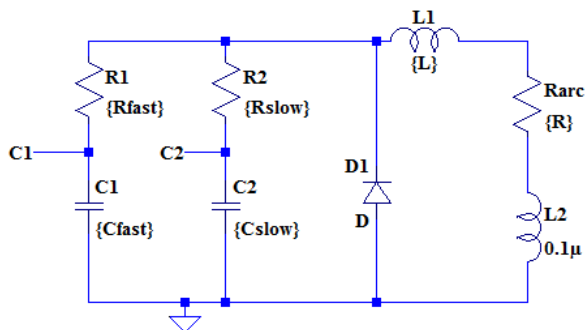
- 5 MARX de 5 étages en parallèle
- Tension max > 200 kV
- Courant max de 250 kA
- $di/dt > EMMA$

III. Générateurs forts courants, plusieurs types

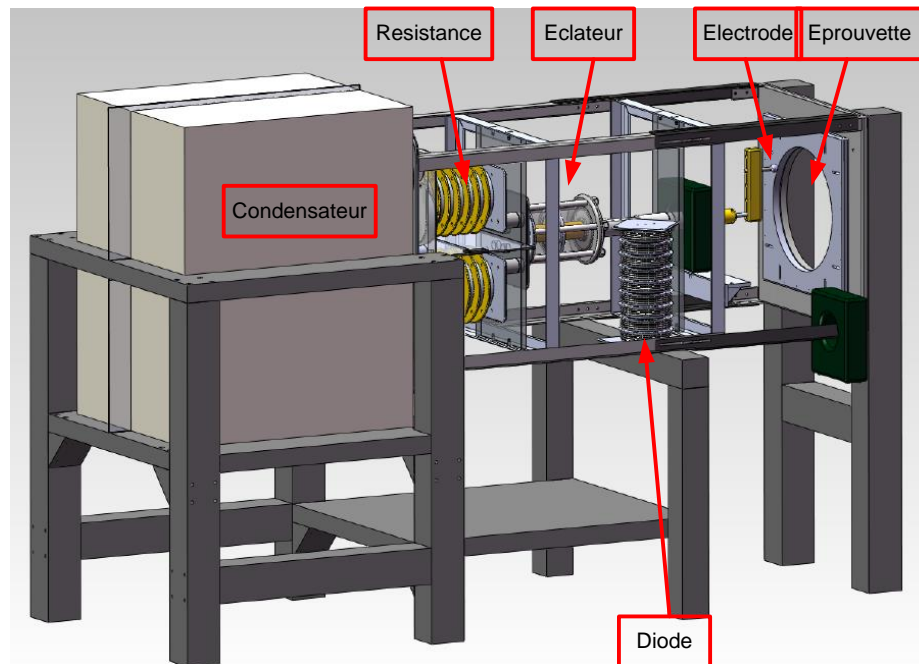
→ RLC (GRIFON)



→ Crowbaré (EMMA)



→ MARX (Super Dicom)

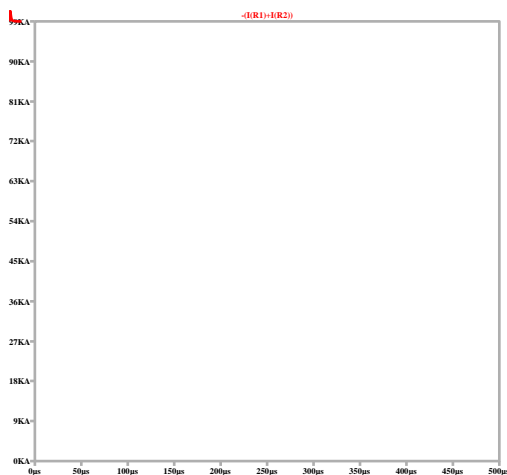


GRIFON D

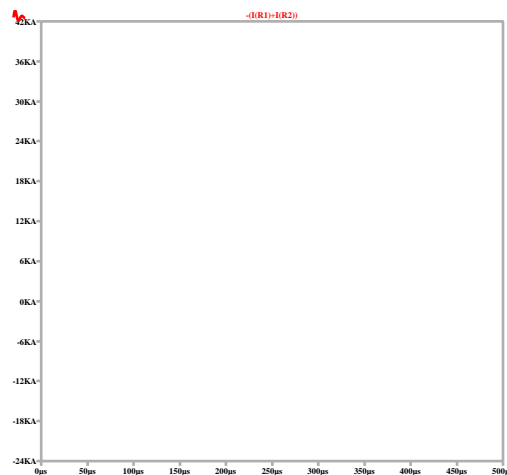
Pour être en mode générateur de courant
→ Les résistances de ballast doivent être bien supérieure à l'impédance de l'éprouvette

Rappel : Formules décharge RLC

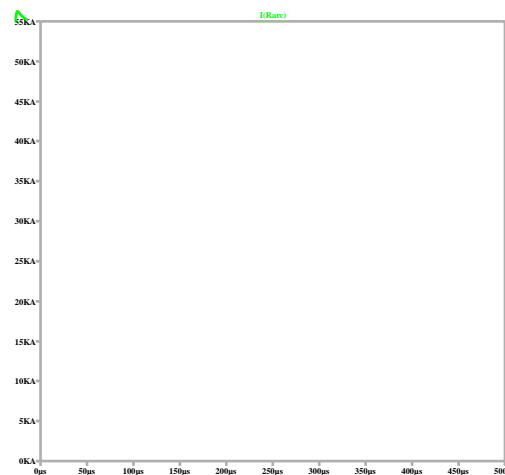
	Amorti : $R^2 > \frac{4L}{C}$	Oscillant : $R^2 < \frac{4L}{C}$
Courant I	$i(t) = \frac{V_0}{\omega L} e^{-\frac{Rt}{2L}} \sinh(\omega t)$	$i(t) = \frac{V_0}{\omega L} e^{-\frac{Rt}{2L}} \sin(\omega t)$
Pulsation ω	$\omega = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$	$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$
Durée pour atteindre I_{\max}	$t_{\max} = \frac{1}{\omega} A \tanh\left(\frac{2L\omega}{R}\right)$	$t_{\max} = \frac{1}{\omega} A \tan\left(\frac{2L\omega}{R}\right)$



Amorti
Cas le plus simple



Oscillant
Peu représentatif de la foudre



Crowbar
Ajout d'une diode pour redresser
→ Augmente l'intégrale d'action dans des circuits inductifs

III. Compromis

- **Plus l'échantillon est de grande taille, plus son inductance et/ou sa résistance va augmenter**
 - Cela impose une résistance de ballast plus importante pour compenser l'inductance et éviter l'oscillation
 - Le temps de montée est fonction de V/L , plus l'inductance est importante, plus la tension devra être élevée pour atteindre la norme
- **Mais augmenter la tension impose de plus grande volume → une plus grande inductance.**
- **En pratique un compromis est donc nécessaire entre tension du banc et taille de celui-ci et cela définit l'impédance maximum de l'échantillon**

III. Eclateur à gaz

Plusieurs types ont été développés dans la littérature

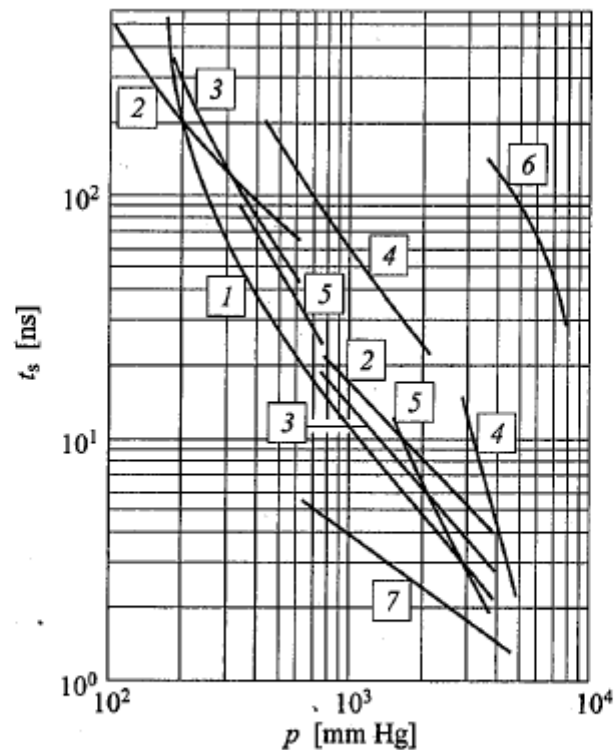
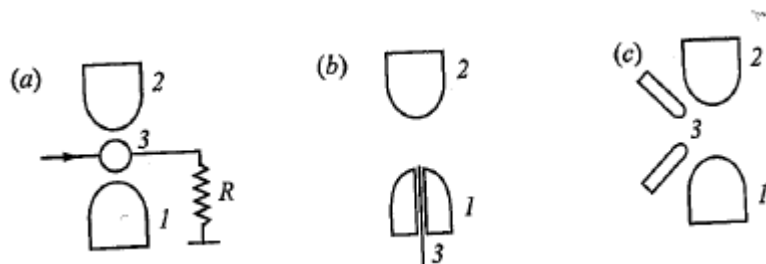


Figure 9.1. Pulse rise time as a function of fill gas pressure: 1 – air, 2 – carbon dioxide, 3 – nitrogen, 4 – hydrogen, 5 – freon, 6 – helium, and 7 – argon

III. Générateur onde C continue ONERA

Buck converter

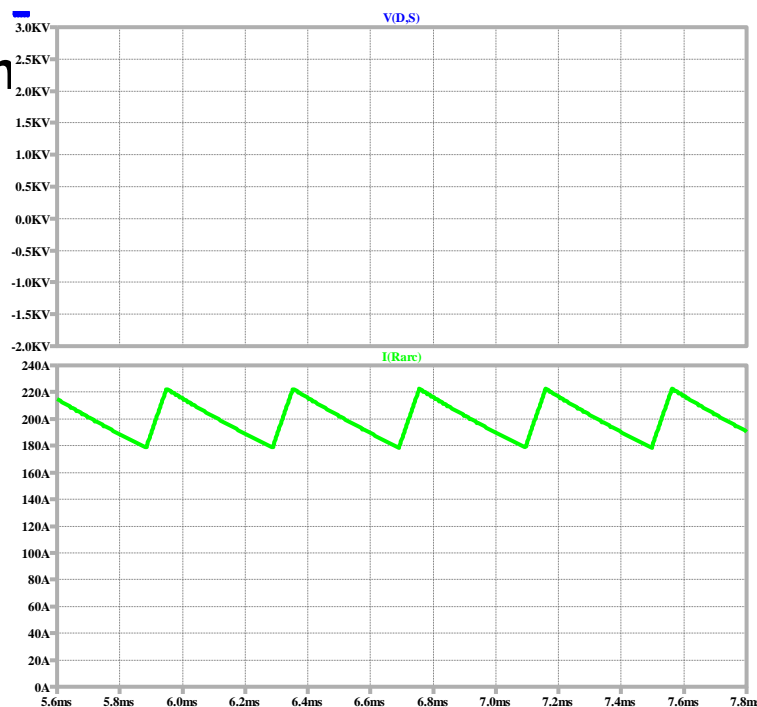
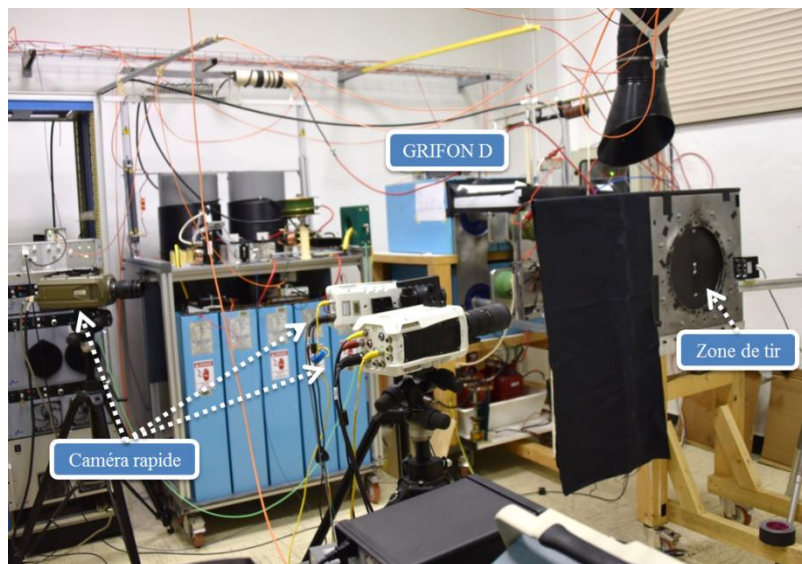
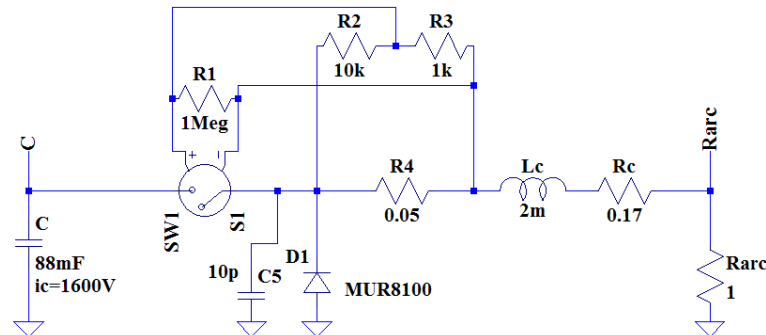
Courant continue de 200 à 800A

1300 V max

1 IGBT assure la commutation

1 resistance de shunt et un

µcontrôleur assure la contre réaction



IV. Mesures électriques

	Type	Bandwith	Isolation
Tension	Diviseur résistif	DC+BF	Modèle de table <100kV
	Diviseur capacitif	HF	Haute
Courant	Transformateur de courant	Passe bande	Sonde blindé mais pas isolé
	Resistance de shunt coaxiale	DC à HF	Suivant modèle
	Rogowsky (amplifiée)	DC à BF	Câble isolé à 10kV, place pour ajout d'isolation



IV. Mesure de tension cas fort courant

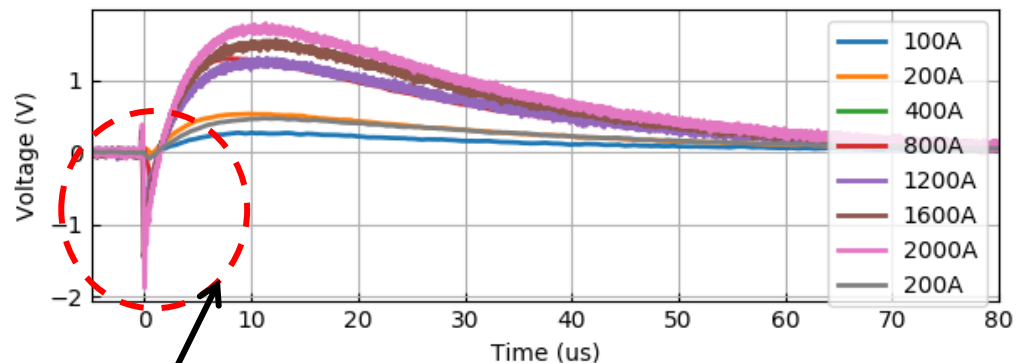
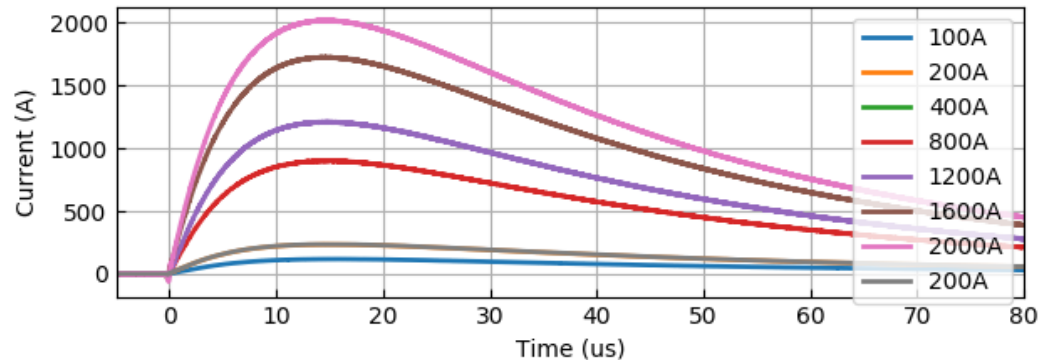
Inductance de la sonde et/ou de l'éprouvette Non négligeable

$$V(t) = L \frac{di(t)}{dt} + R(t)i(t)$$

→ Minimiser la boucle de mesure

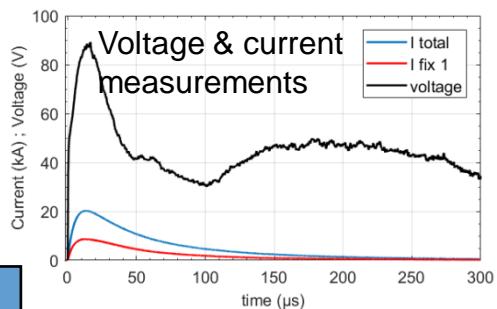
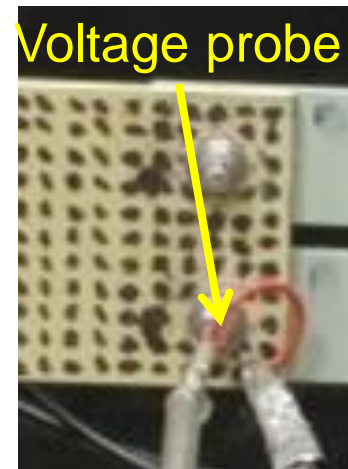
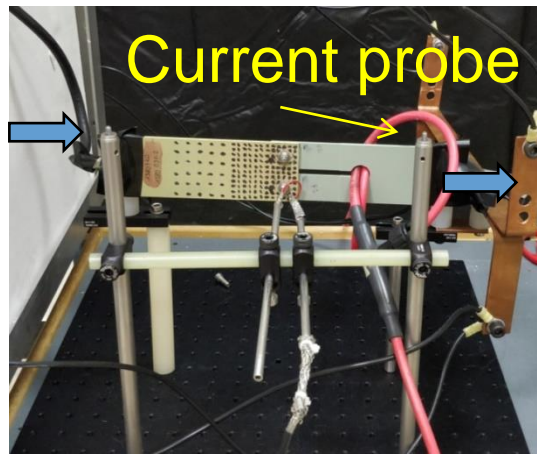
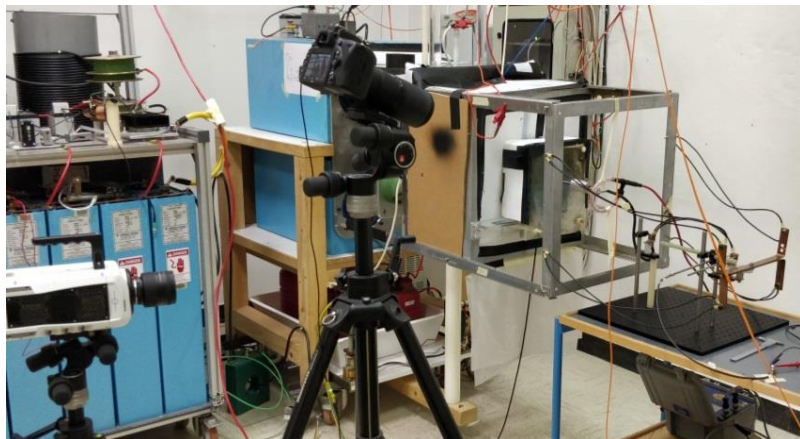
→ Dégrader di/dt (rarement possible)

→ Déterminer $L_{parasite}$ et le soustraire par post traitement



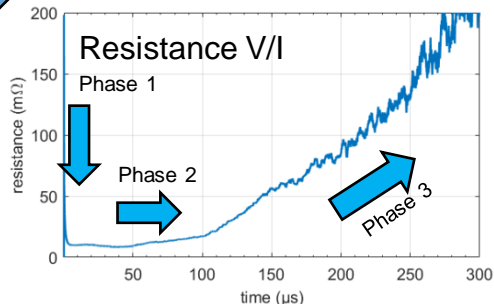
Effet de l'inductance sur une mesure de résistance pure dû à l'inductance induite dans la boucle de mesure

IV. Mesure de résistance U/I : Essai fort courant



Sonde maison pour diminuer la boucle de mesure entre le point de mesure et la référence de la sonde.
La carte d'acquisition est flottante

Toutefois pour les valeurs de I faible (t=0), la mesure reste difficile et un bruit important persiste



VI. Sécurité/Protection des systèmes

Pour séparer une partie BT et HT :

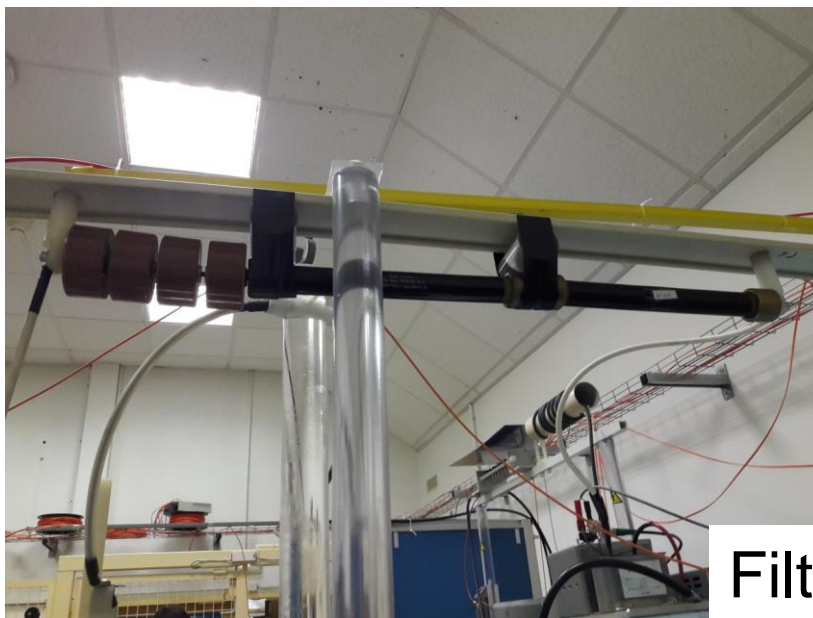
→ **Utilisation de filtre RC ou LC**

→ Tenue tension et courant des éléments

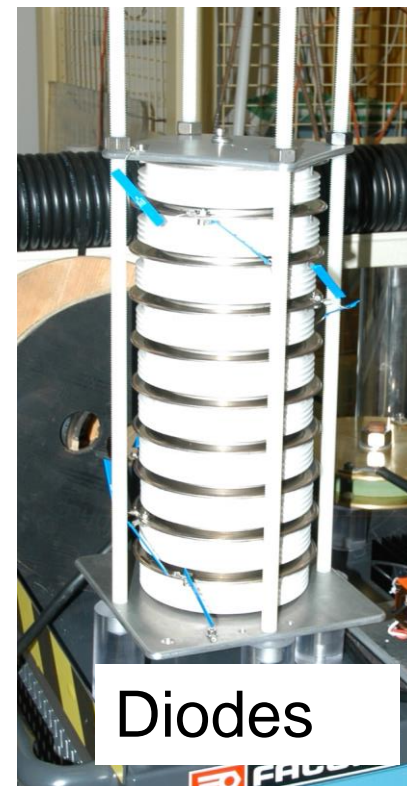
→ **Utilisation de diodes mais attention :**

→ Polarisation des diodes

→ Capacités parasites des diodes



Filtre RC



VI. Sécurité/Protection

Sur banc de condensateur forte énergie :

- **Utilisation des EPIs**
- **Mise à la masse du banc par plusieurs moyens**
 - Relais CC vers résistance liquide (sulfate de cuivre)
 - Moyen mécanique
 - Perche (projection de métal si banc chargé)
- **Limitation des accès**
- **Protection mécanique contre les projections**
- **Tir déconnecté de la terre**
- **Pas de communication cuivre**

- **Mettre à distance le poste de contrôle**



Relais et jerrican de sulfate de cuivre

Quelques ouvrages

- **J.C. MARTIN on Pulsed Power, by T.H. Martin et al, SPRINGER Sciences**
- **Transient electronics: Pulsed circuit technology, Paul W. Smith, Wiley**
- **Pulsed Power, G. A. Mesyats, SPRINGER Sciences**