

Générateurs rapides d'impulsions hautes tensions

Principe de fonctionnement et état de l'art

*ANF « Quelle alimentation pour quel plasma ? »
GREMI Orléans*

Générateurs rapides d'impulsions hautes tensions

Principe de fonctionnement et état de l'art

- 1- Principe de base des Hautes Puissances Pulsées (HPP)
- 2- La mise en forme d'impulsions
- 3- Dispositifs de commutation
- 4- Exemples de générateurs nanosecondes et subnanosecondes

1- Principe des Hautes Puissances Pulsées (HPP)

Transférer une quantité d'énergie électrique vers une charge
en amplifiant la puissance

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

Energie

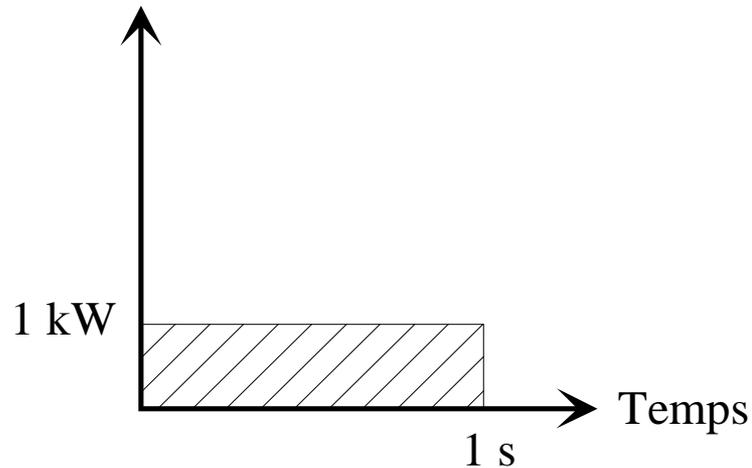
Puissance
instantanée

On parle de compression temporelle d'énergie électrique

Energie stockée:

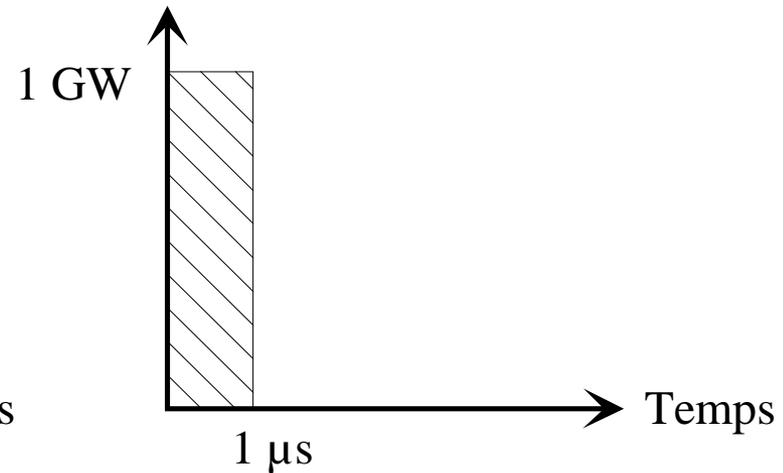
$$E = 1 \text{ kJ}$$

Puissance crête



Stockage lent

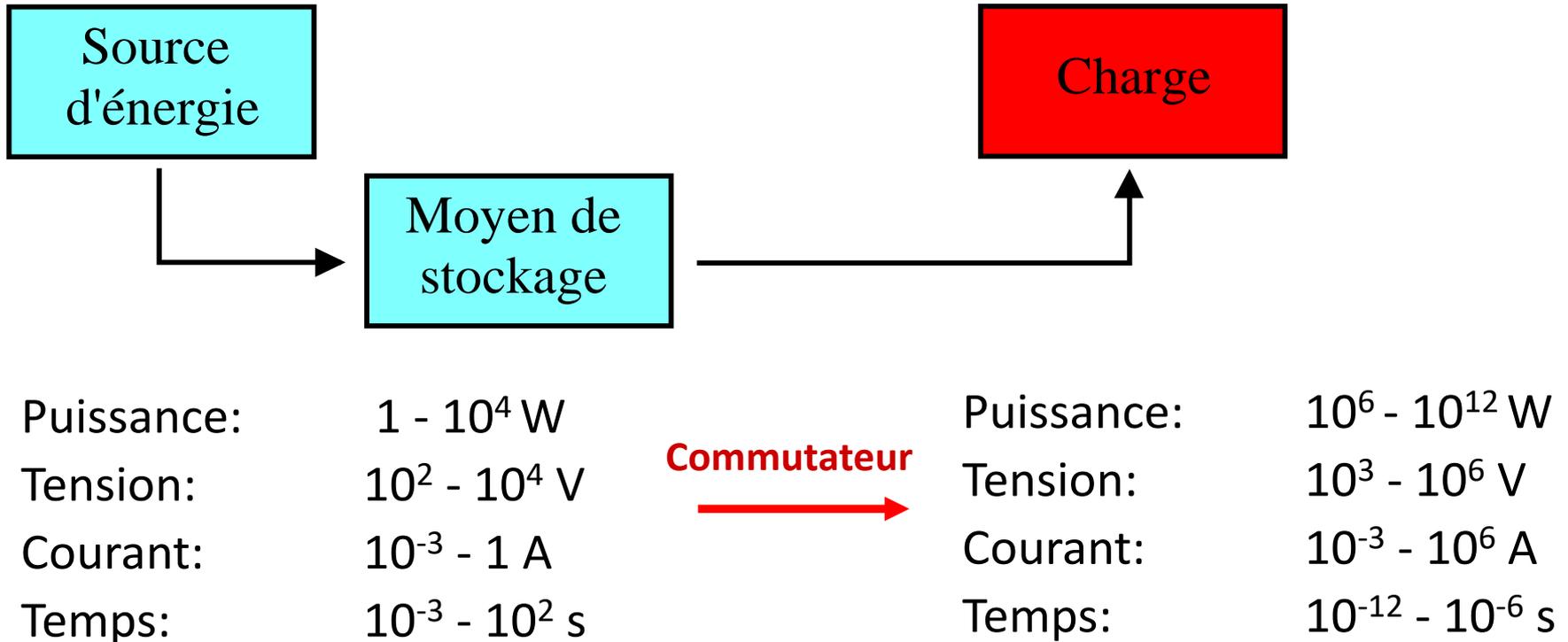
Puissance crête



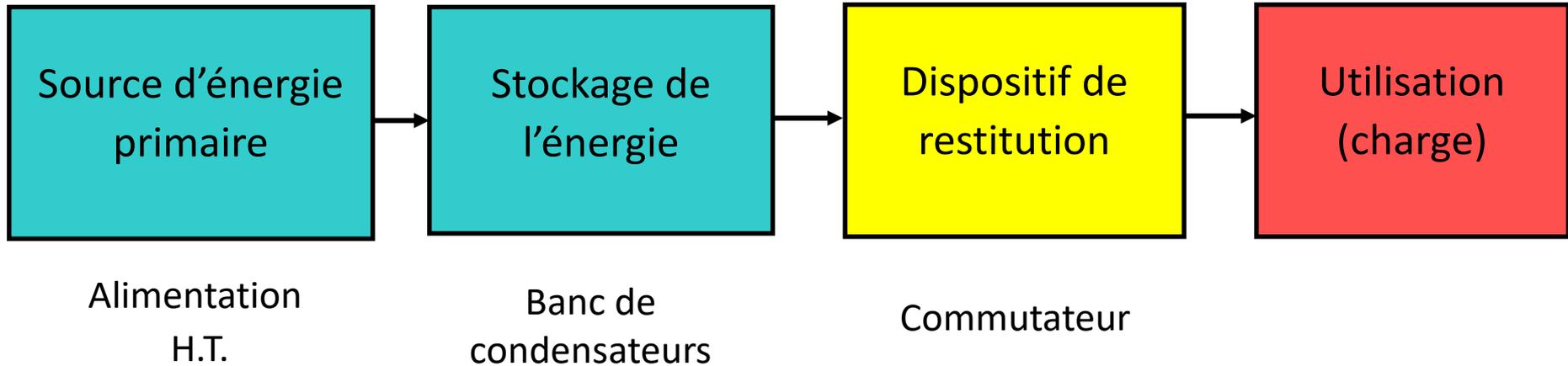
Restitution rapide

Amplification de puissance par compression du temps de restitution de l'énergie stockée

Les ordres de grandeur typiques

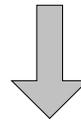


Structure d'un banc de HPP



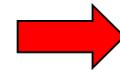
Le dispositif de restitution est l'amplificateur de puissance

Il peut nécessiter une amplification de tension

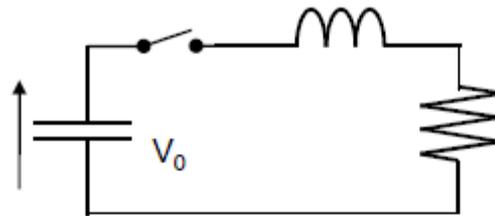


**Conception de générateurs HT transitoires
à base de commutateurs**

2- La mise en forme d'impulsions



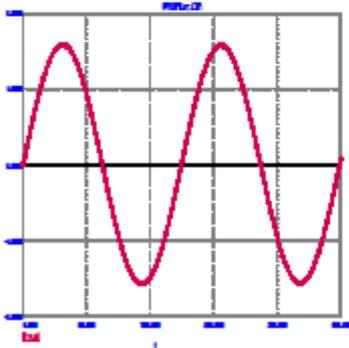
Bi-exponentielle



Circuit R, L, C

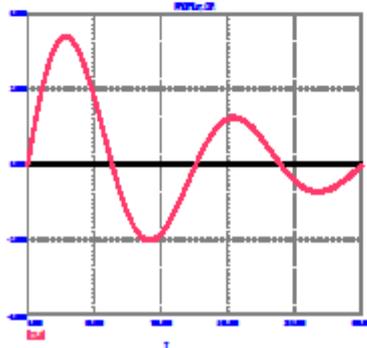
Si $R = 0$

$$I = (V_0/L\omega) \sin\omega t$$



Si $R < 2 (L/C)^{1/2}$

$$I = (V_0/L\omega) e^{-R/2L} t \sin\omega t$$

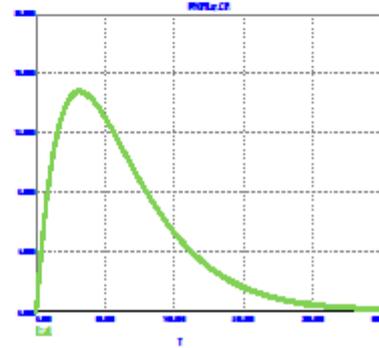


Si $R = 2 (L/C)^{1/2}$

$$I = (V/L) [t e^{-t R/2L}]$$

$$I_m = 0.736 V/R$$

$$t_m = 2L/R$$

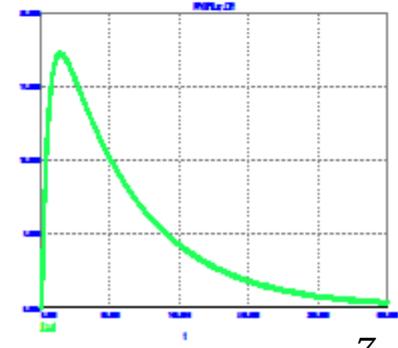


Si $R > 2 (L/C)^{1/2}$

$$I = (V/R) [e^{-t/RC} - e^{-tR/L}]$$

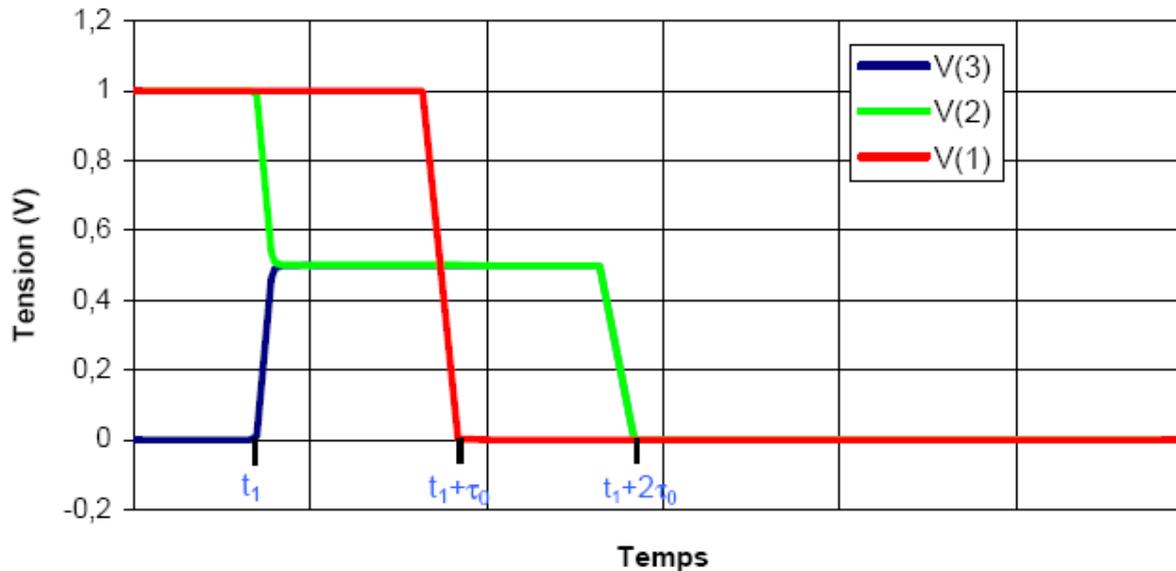
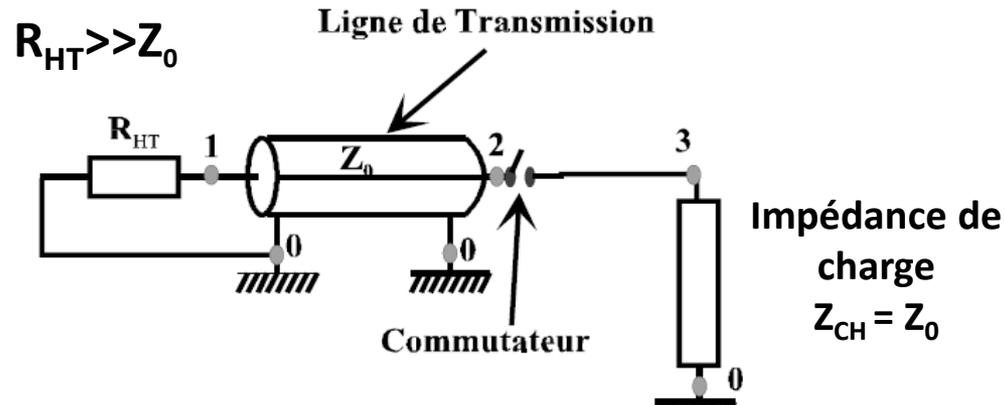
$$t_{10-90\%} = 2,3 L/R$$

$$t_{50\%} = 0,69 RC$$



2- La mise en forme d'impulsions ➔ Rectangulaires

PFL - Principe de la décharge d'une ligne en HPP



PFL - Principe de la décharge d'une ligne en HPP

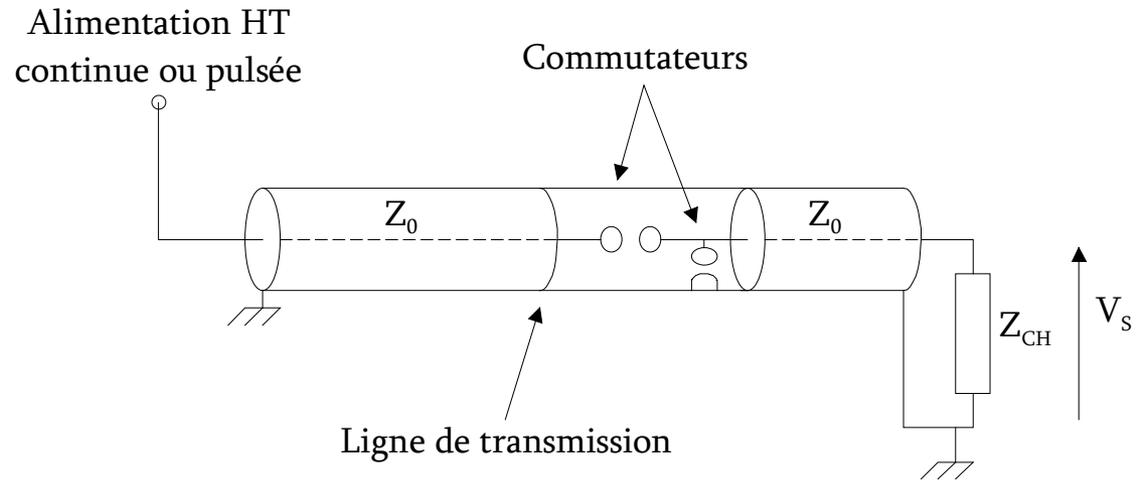
Sur charge adaptée, une **impulsion rectangulaire** est produite aux bornes celle-ci.

Ses caractéristiques principales sont :

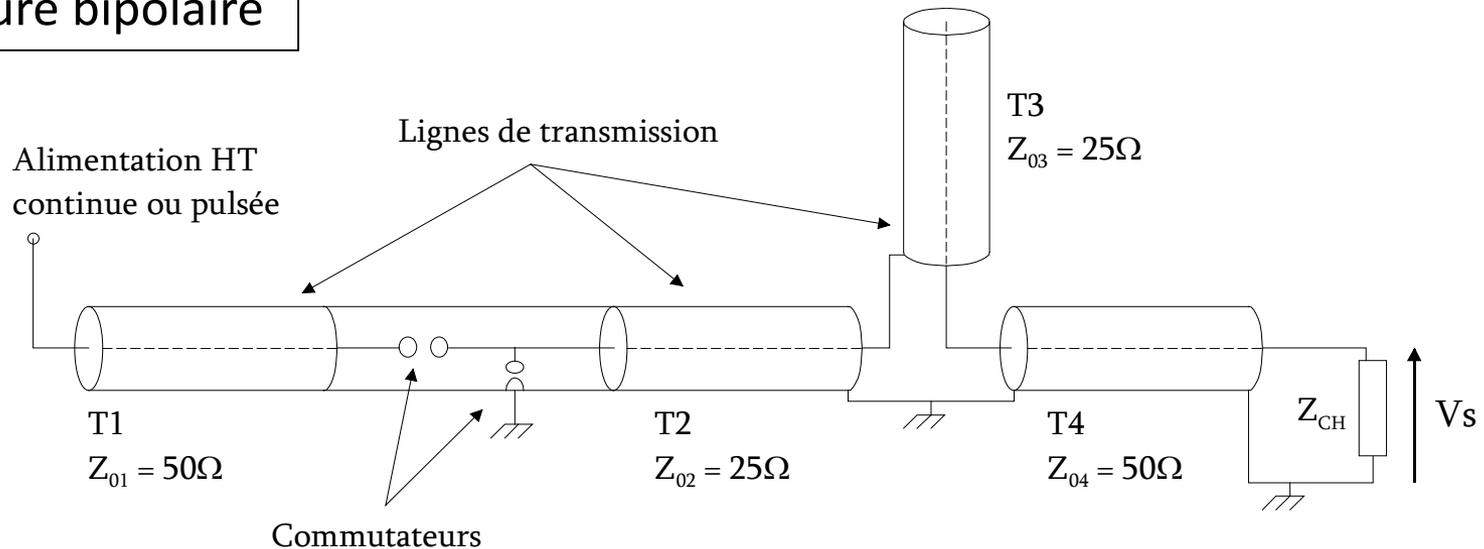
- une **amplitude égale à la moitié de la tension de charge**;
- une **durée correspondant à deux fois le temps de propagation** dans la ligne de formation

Variantes des structures de mise en forme rectangulaire

Structure avec crowbar



Structure bipolaire

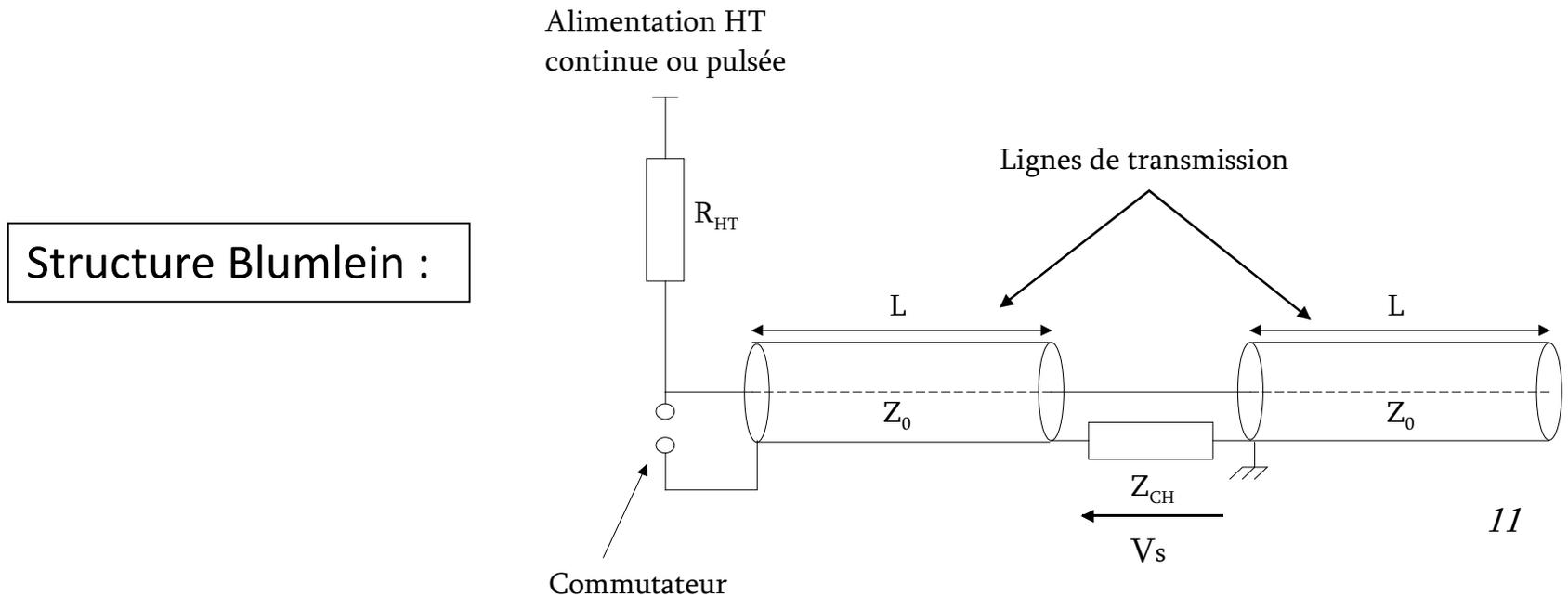


Variantes des structures de mise en forme rectangulaire

Principal inconvénient de la décharge d'une ligne dans une charge adaptée est la **perte de la moitié de la tension de charge** ($V_{OUT}=V_{IN}/2$)

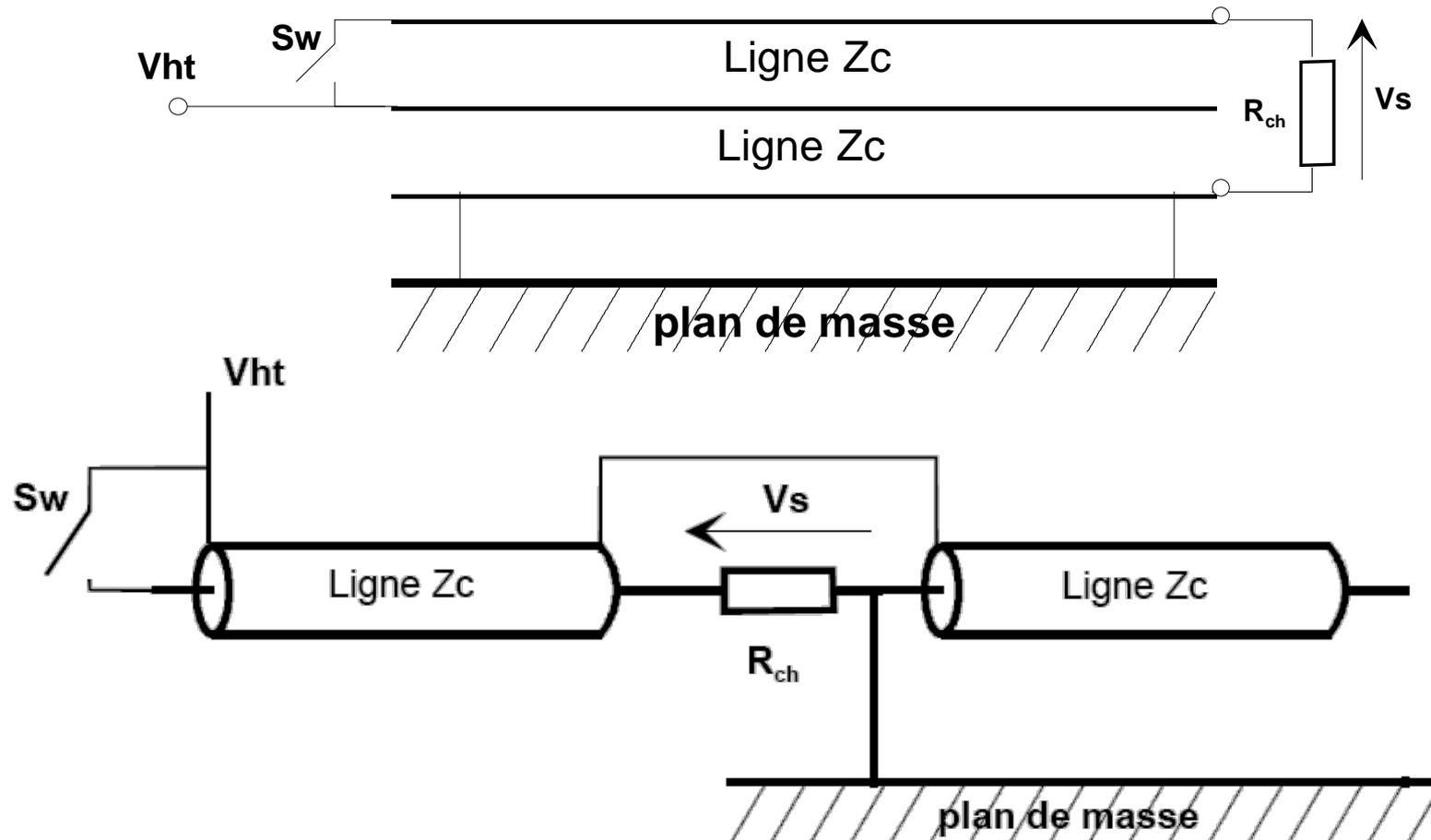


Utilisation d'un **générateur Blumlein** pour mettre en forme l'impulsion avec $V_{OUT}=V_{IN}$



Variantes des structures de mise en forme rectangulaire

Générateur Blumlein



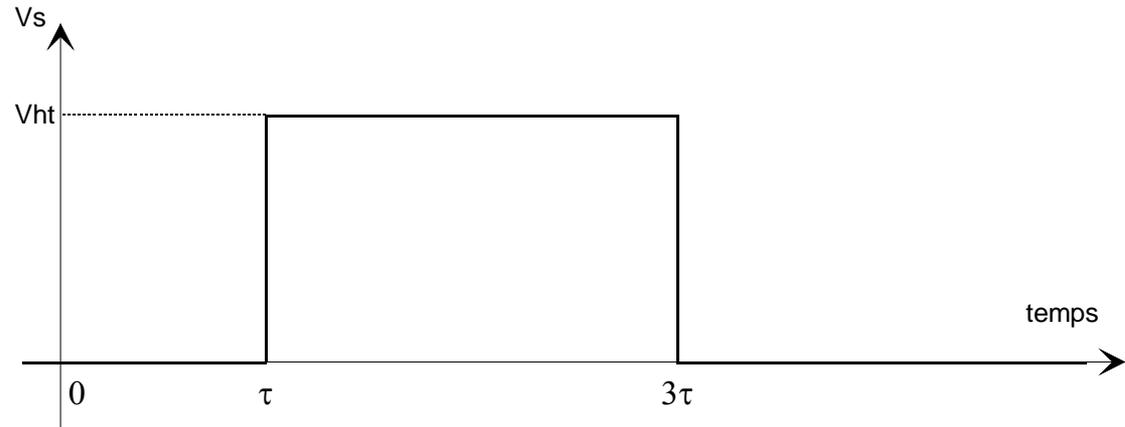
Variantes des structures de mise en forme rectangulaire

Générateur Blumlein

Allure de la tension de sortie

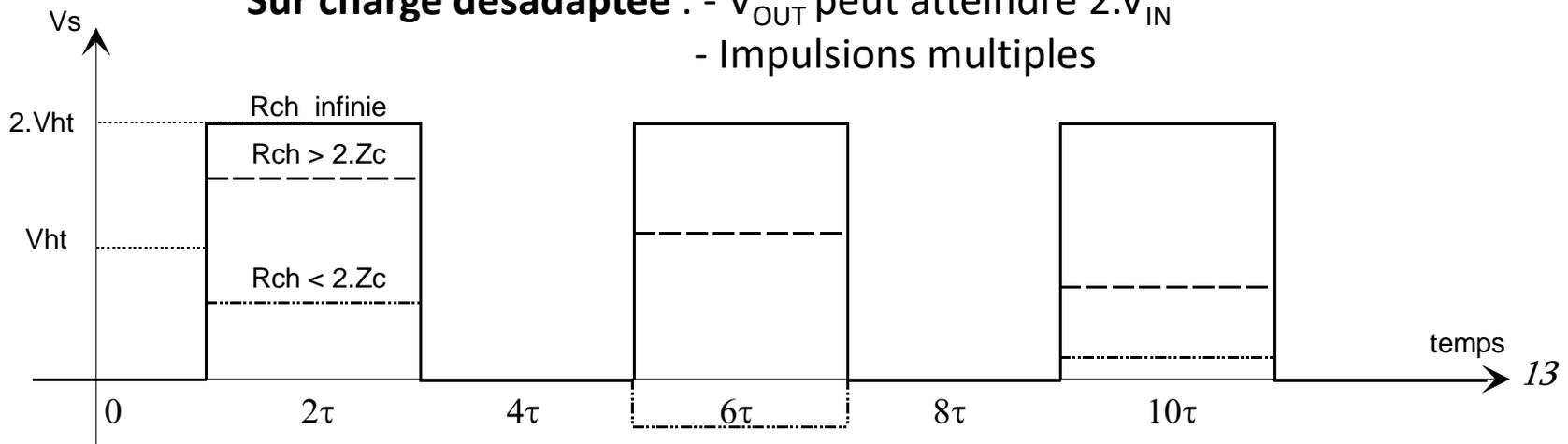
Sur charge adaptée :

- $V_{OUT} = V_{IN}$
- Durée = $2T_C$
- Impulsion unique

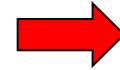


Sur charge désadaptée : - V_{OUT} peut atteindre $2.V_{IN}$

- Impulsions multiples



2- La mise en forme d'impulsions

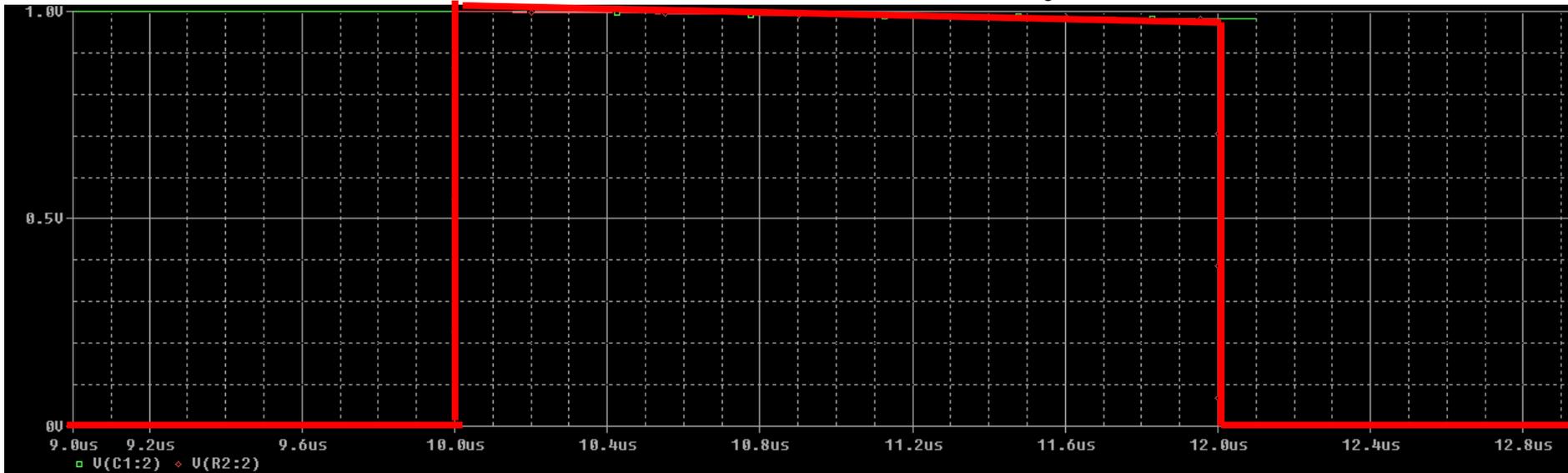
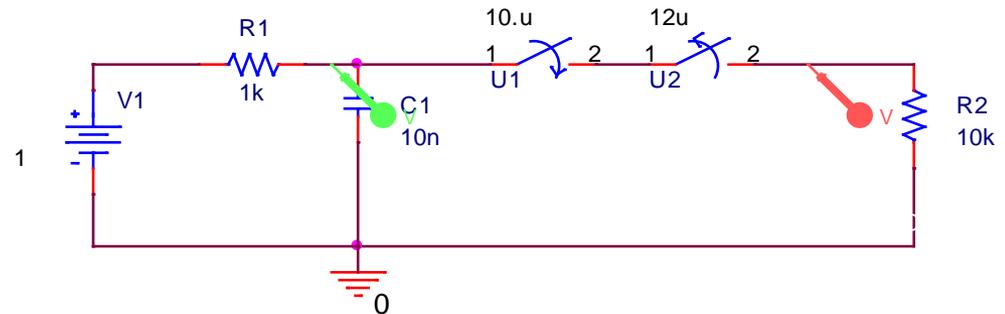


Rectangulaires

Décharge RC

Impulsion de type bi-exponentielle à
décroissance lente

Arrêt de la décroissance avec interrupteur
commandé également à l'ouverture

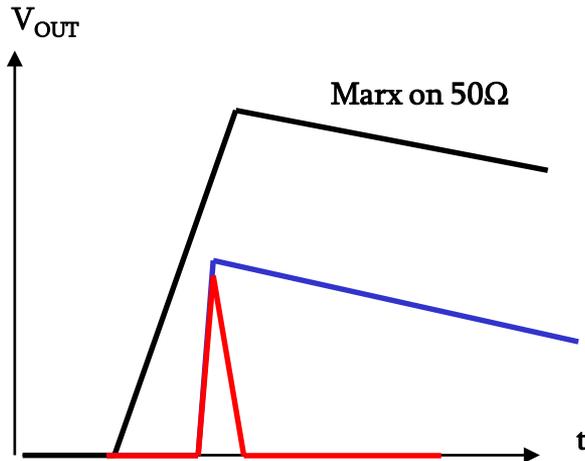


2- La mise en forme d'impulsions Rectangulaires

Comparaison des solutions technologiques proposées

	PFL	Blumlein	RC classique
Tension de sortie	$V_0/2$	V_0	V_0
Durée de l'impulsion	$2.T_c$	$2.T_c$	Commandée
Adaptation d'impédance requise	Oui	Oui	Non
Impédance de charge	Z_0	$2.Z_0$	Haute

Génération d'impulsion ultra courte



→ Peaking switch : to sharpen the rise-time of the Marx generator output pulse

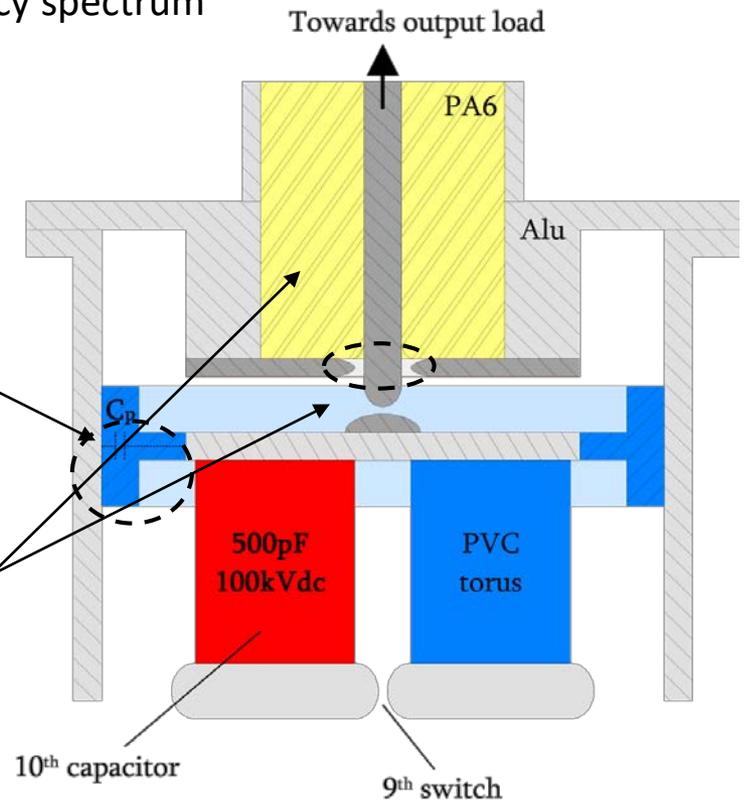
→ Crowbar switch : to avoid a too long pulse decay
- higher voltage capabilities due to short pulse application
- better frequency spectrum

Generation of nanosecond pulse using:

→ Peaking capacitor :
- optimum capacitance
- low inductance

→ Crowbar switch $\Rightarrow t_r \approx 300\text{ps}$

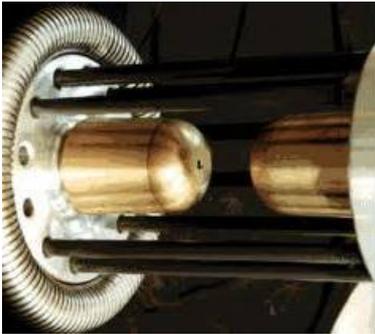
→ Coaxial line towards output load



3- Dispositifs de commutation

La restitution de l'énergie : le commutateur

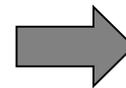
C'est l'élément central de la chaîne de génération des HPP



Au moins 2 électrodes + 1 diélectrique

Choix du diélectrique:

- Solide (isolant ou semi-conducteur)
- Liquide (eau, huile,...)
- Gazeux (air, hydrogène, SF₆, ...)



Caractéristiques du
commutateur

3- Dispositifs de commutation

Caractéristiques du commutateur à fermeture

- **Etat ouvert**: tension maximale admissible, courant de fuite (résistance R_{off}),
taux de commutations erratique
- **Phase de commutation**: temps intrinsèque de commutation dV/dt ou dI/dt
Ce temps dépend de la géométrie du commutateur (distance inter-électrodes)
du diélectrique, des grandeurs électriques commutées (tension, courant) et
des éléments du circuit électrique en amont
- **Phase de conduction**: courant max admissible, résistance R_{on} , temps de conduction
- **Phase d'ouverture**: temps de recouvrement (temps pour retrouver ses propriétés
diélectriques initiales), temps d'ouverture (semi-conducteur) →
LIMITATION DE LA FREQUENCE DE REPETITION

3- Dispositifs de commutation

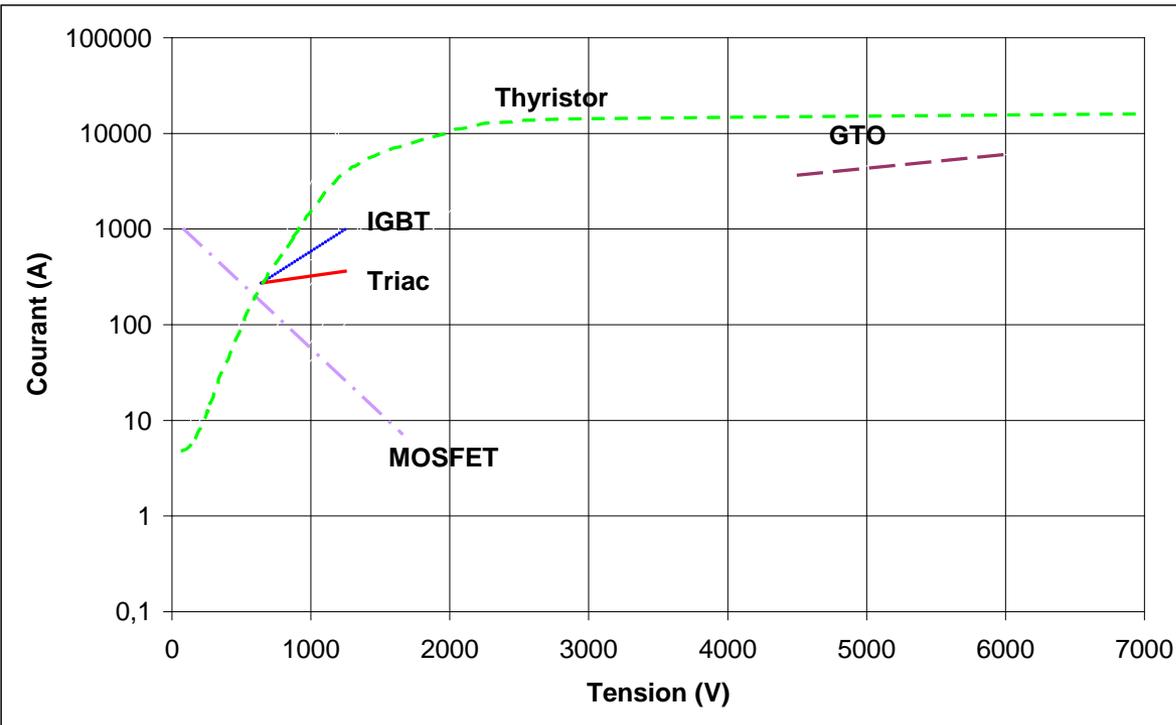
Les commutateurs à semi-conducteurs

Principales spécificités

- **les thyristors et triac**: commande unique à la fermeture - Courant unidirectionnel pour les thyristors et bidirectionnel pour les triacs
- **les GTO (Gate Turn Off)** sont des thyristors commandables à l'ouverture et à la fermeture
- **les MOS**: transistors monopolaires à effet de champ \Rightarrow applications haute fréquence et rapidité de commutation. Commandes à l'ouverture et à la fermeture
- **les IGBT**: association d'un MOS qui commande un transistor bipolaire. Avantage de commande des MOS et du comportement en puissance du bipolaire

3- Dispositifs de commutation

Les commutateurs à semi-conducteurs



Matriçage des composants

Commutation haute tension



association série

Commutation fort courant

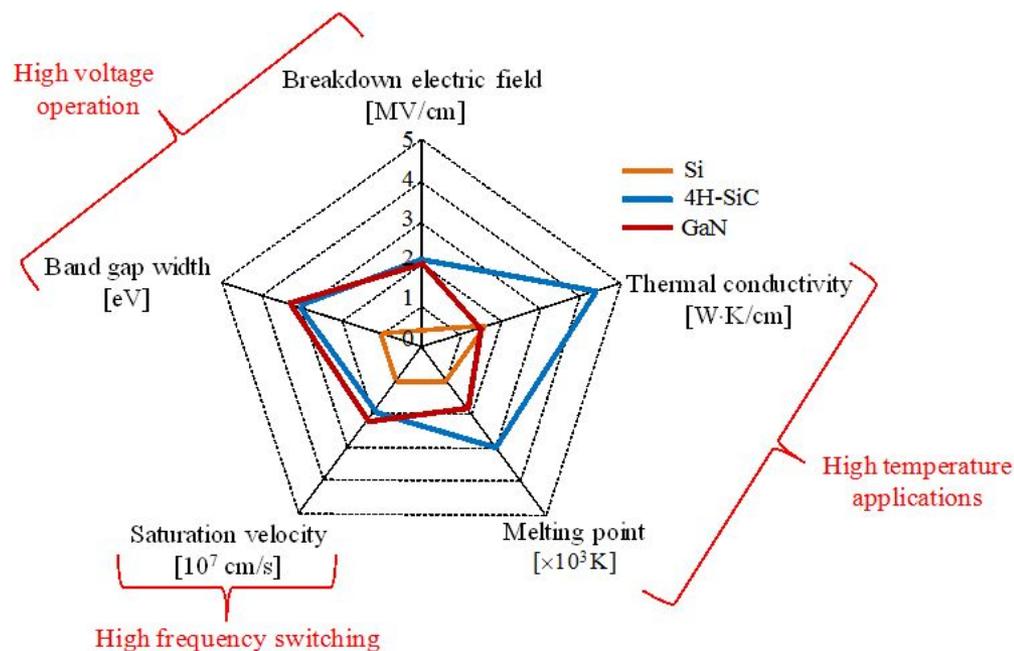
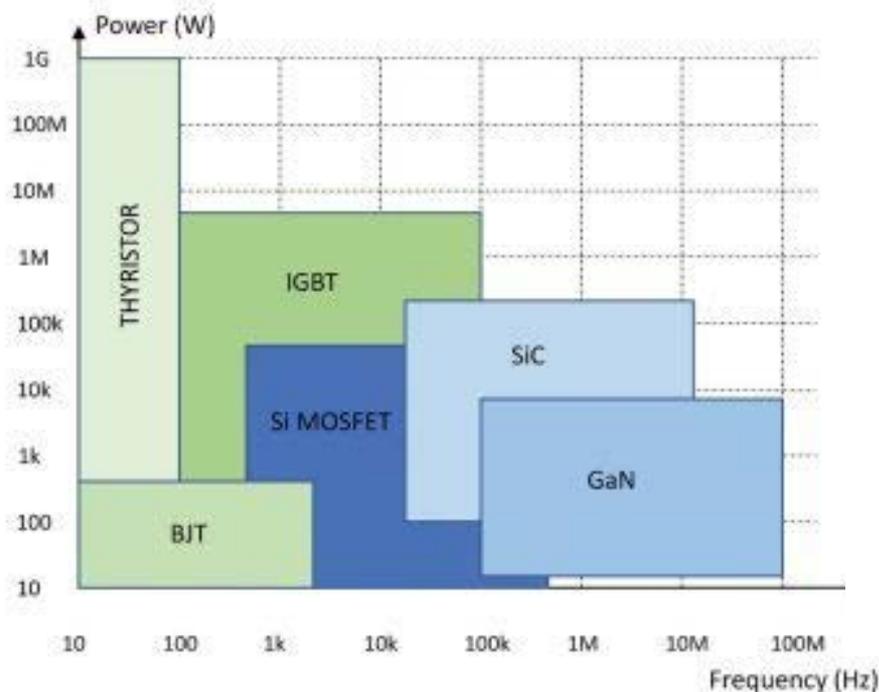


association parallèle

3- Dispositifs de commutation

La technologie SiC / GaN

Power technologies and where they fit

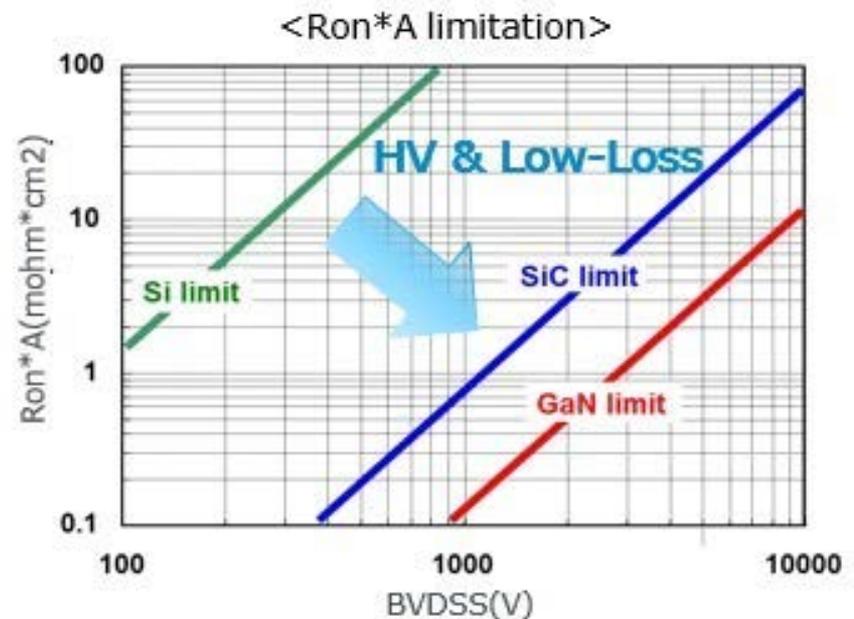
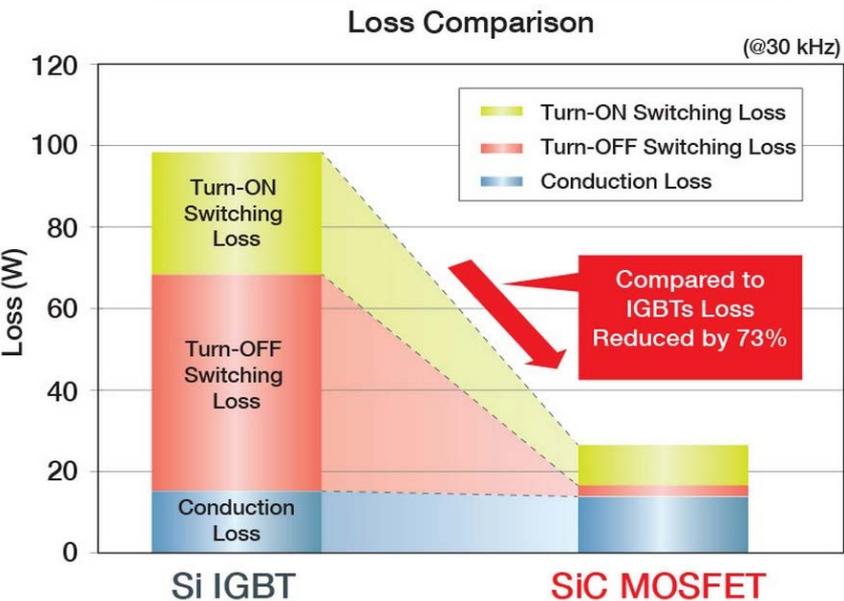


A. Bhalla, Practical considerations when comparing SiC and GaN in power applications, <http://unitedsic.com/wp-content/uploads/2018/07/Practical-considerations-when-comparing-SiC-and-GaN-in-power-applications.pdf>

O. Deblecker et al., Comparative study of optimally designed DC-DC converters with SiC and Si power devices, *Intech Open*, Chapitre 5, pp 143-172, 2015, <http://dx.doi.org/10.5772/61018>

3- Dispositifs de commutation

La technologie SiC / GaN



<https://www.rohm.de/sic/sic-mosfet>

J. Lehmann, Caractérisation électrique d'hétérostructures AlGaIn/GaN pour des applications de puissance, Thèse de doctorat de l'Université Grenoble Alpes, 2015

3- Dispositifs de commutation

Avantages et inconvénients des commutateurs à semiconducteur

Avantages :

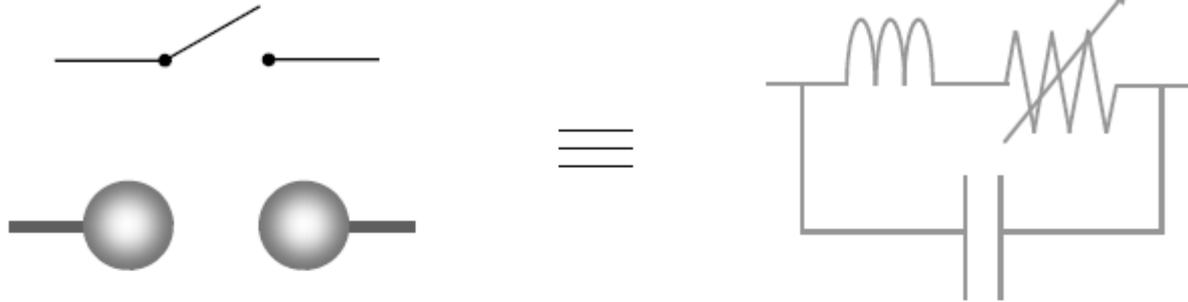
- Très grande dynamique de commutation
- Peu de perturbations électromagnétiques
- Très faible jitter au déclenchement
- Fréquences de répétition élevées

Inconvénients :

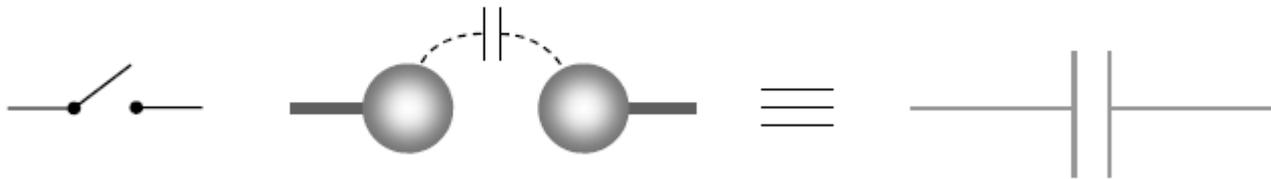
- Faibles valeurs des puissances commutées
- Dispositif de commande parfois complexe
- Temps de commutation
(THY. ~ 60ns; Si IGBT ~ 10ns; SiC MOSFET ~ 1ns)
- Fragilité d'utilisation

3- Dispositifs de commutation

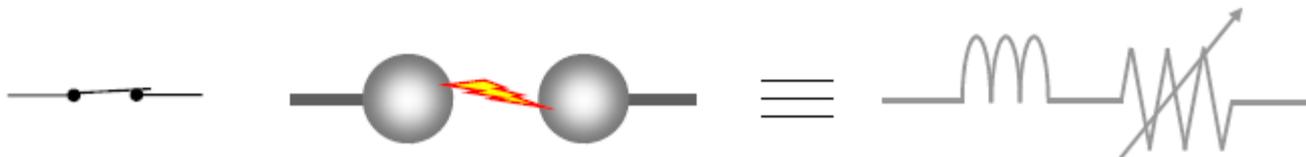
Commutateur à gaz ou liquide



OUVERT



FERME



3- Dispositifs de commutation

Commutateur à gaz

Caractéristiques géométriques

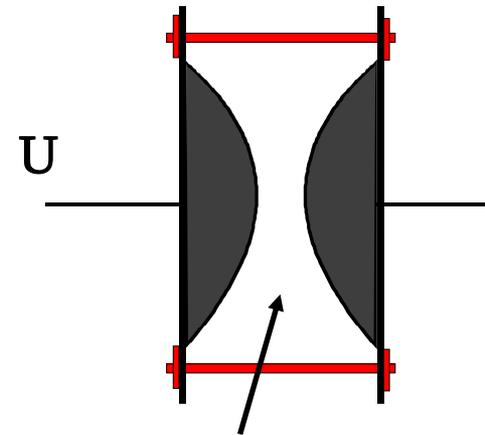
(Distance inter-électrodes D , Rayon de courbure R)

+

Caractéristiques du gaz (nature, P , T)



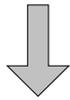
Tension disruptive



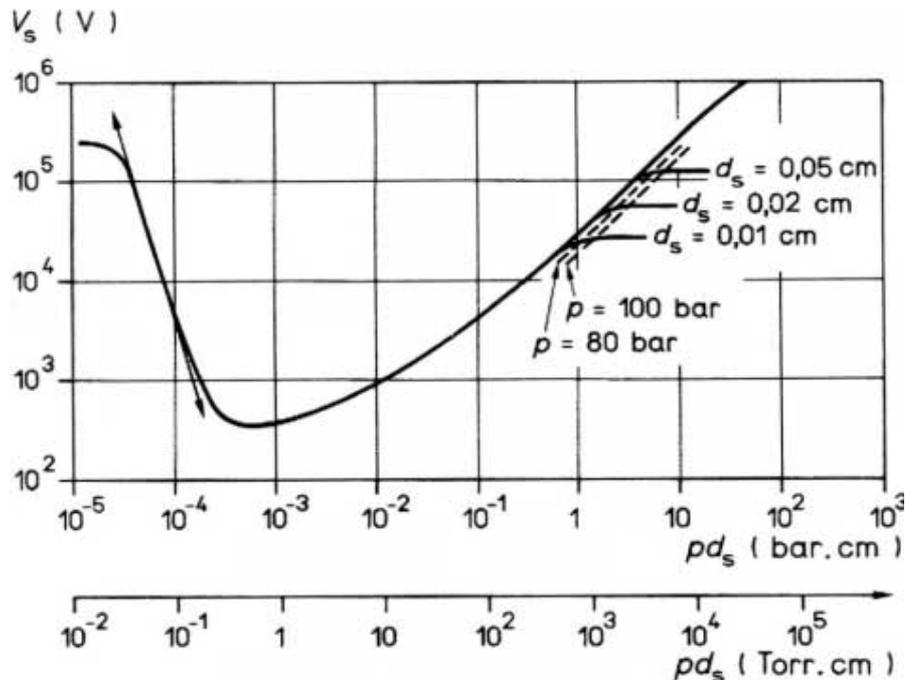
Gaz (pression P , température T)

3- Dispositifs de commutation

Dans l'air ($T_0 = 20^\circ\text{C}$)
champ homogène ($5D \leq R$)



Tension disruptive U_b donnée par
la loi de Paschen



Commutateur à gaz

$$U_b = 6,72\sqrt{p \cdot d} + 24,36(p \cdot d)$$

↑ [kV]
 ↑ [bar.cm]

Expression valide pour

$$10^{-2} < p \cdot d < 5 \cdot 10^2 \text{ (bar.cm)}$$

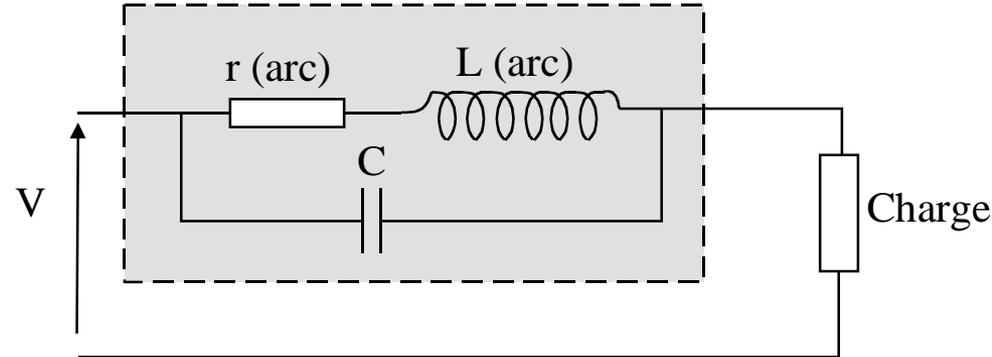
Champ disruptif de l'air:

$$E_b \sim 30\text{kV/cm/bar}$$

3- Dispositifs de commutation

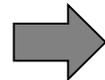
Schéma électrique équivalent d'un commutateur à gaz

r = résistance d'arc
 \sim faible; fct de l
 L = inductance d'arc
 $\sim 1\text{nH/mm}$



Limitation intrinsèque du commutateur :

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

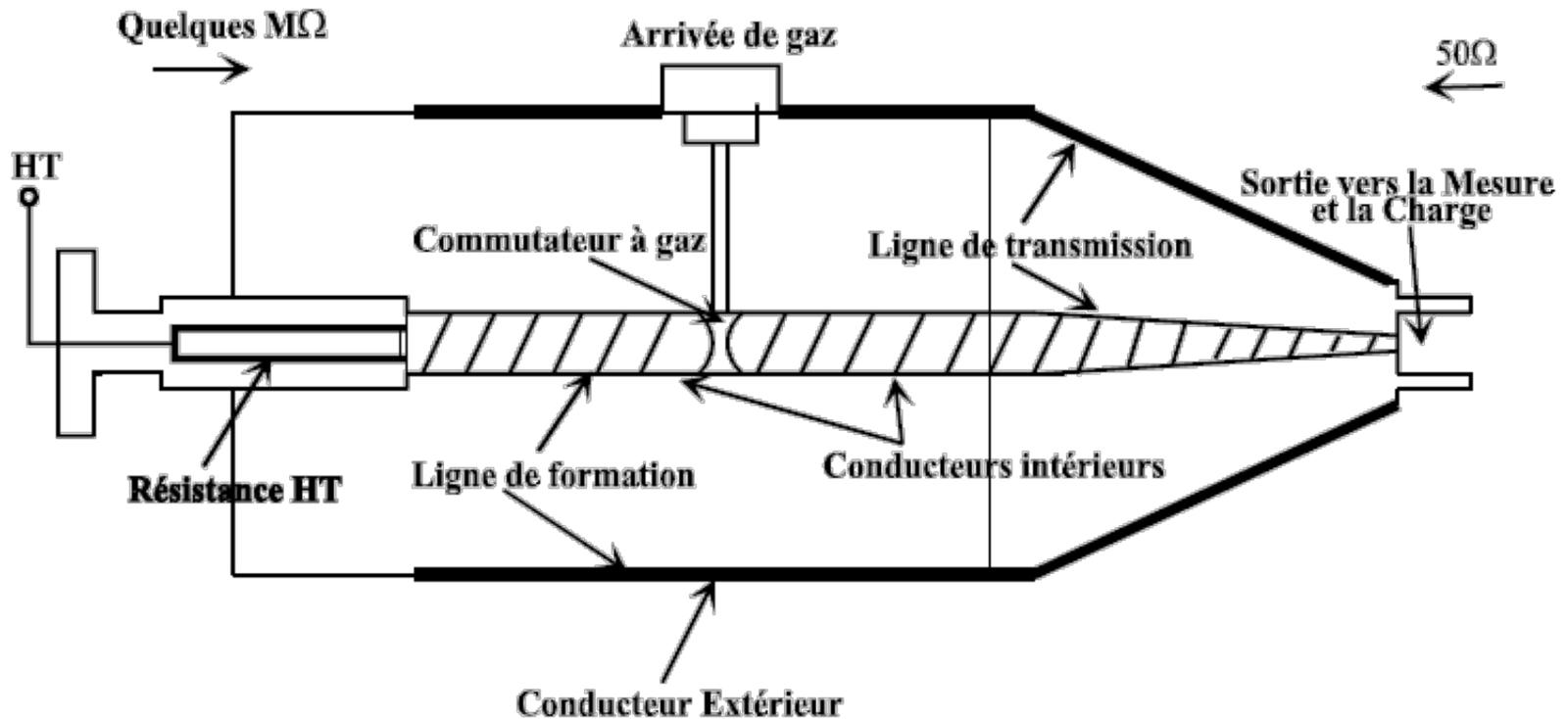


Temps de montée intrinsèque :

$$T_{m(10-90\%)} = \frac{0,35}{f}$$

3- Dispositifs de commutation

Schéma de principe d'une PFL avec commutateur à gaz



3- Dispositifs de commutation

Moyen d'optimisation du temps de commutation

$$\tau(ns) = \frac{k \cdot d^m}{Z^p E^q} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^r$$

- τ : temps de montée de l'impulsion,
- d : distance inter-électrodes,
- E : champ électrique dans l'éclateur,
- (ρ / ρ_0) : rapport de la densité du gaz de remplissage par rapport à celle de l'air
- Z : impédance caractéristique du générateur.

- Choix du gaz (H_2)
- Réduction de la self de l'arc $\Rightarrow d \searrow$
- Augmenter le champ électrique E



Paramètre
pression

3- Dispositifs de commutation

Avantages et inconvénients des commutateurs à gaz

Avantages :

- Forte tenue en tension
(Air: 30kV/cm/bar, SF₆: 89kV/cm/bar)
- Commutation de fort courant ~ qq 100kA
- Temps de commutation
(~ ns pour l'air atmosphérique
et ~ 50ps pour H₂ pressurisé)
- Fréquences de répétition intéressantes pour
les éclateurs à vide (mais temps de
commutation limité)

Inconvénients :

- Perturbations électromagnétiques
- Fort jitter au déclenchement
- Temps de recouvrement (fonction de I)
- Faible dynamique de fonctionnement
- Erosion des électrodes pour les forts I

4- Exemples de générateurs nanosecondes ou subnanosecondes



Tension de sortie
PRF :
Durée
Rapport cyclique

NANOGEN

0-10kV ou 0-30kV
1Hz - 100kHz
200ns - 250μs
0,1% - 30%

Commutateur MOS Belhke

Liaison bifilaire non accordée

➔ Pas de nécessité d'adaptation d'impédance de ligne coaxiale





Tension de sortie
PRF :
Durée

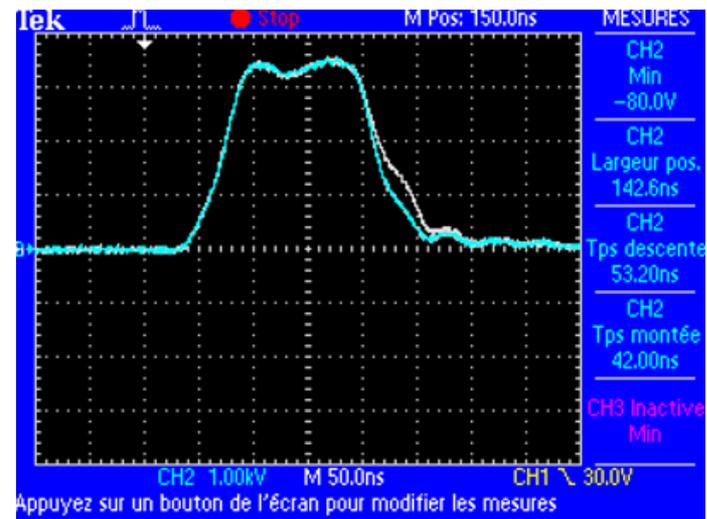
NANOPULSE

0-10kV (monopolaire) ou ± 10 kV (bipolaire)
0,1Hz - 200kHz
50ns - 2 μ s

Commutateur à MOSFET

Liaison coaxiale de longueur quelconque

➔ Pas de nécessité de charger la capacité de connexion et celle de la tête plasma



FPG and FPM series



Output voltage:

1kV to 200kV

PRF:

Single shot to 100MHz

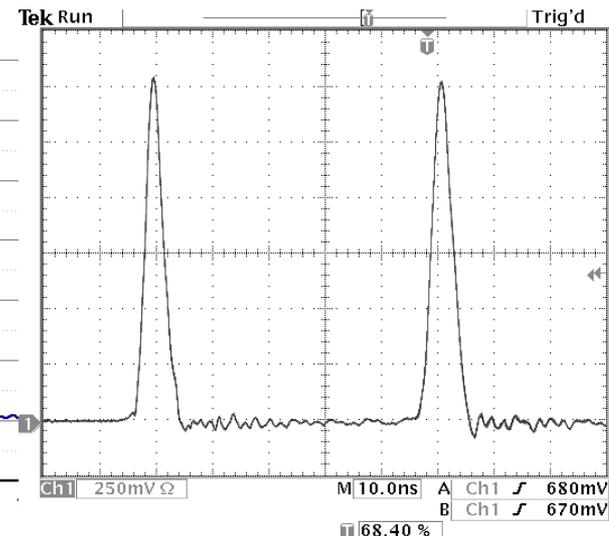
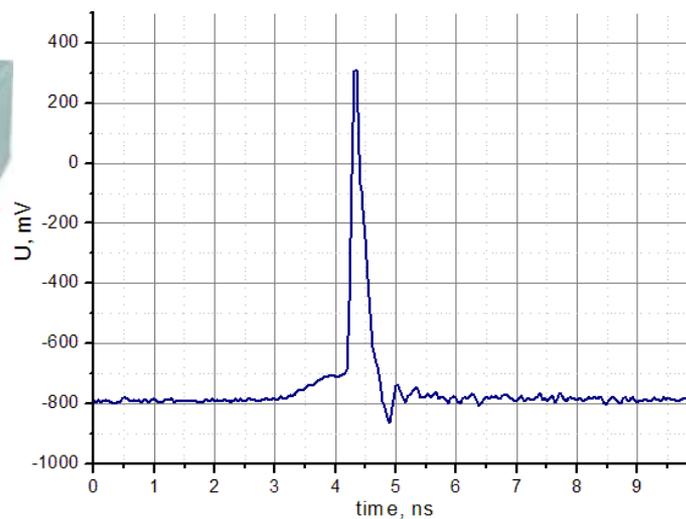
Pulse width:

0,1ns to tens of ns

Rise time:

Less than 100ps

DSRD – Drift Step recovery Diode
Générateurs à la demande distribués par



Nanosecond Pulse Source

Output voltage

3 -50kV

PRF

Single shot to 1kHz

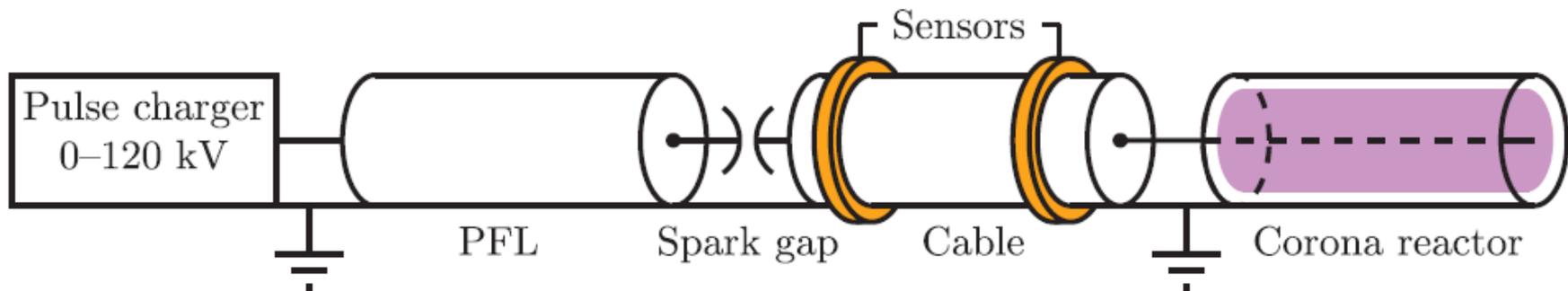
Pulse width

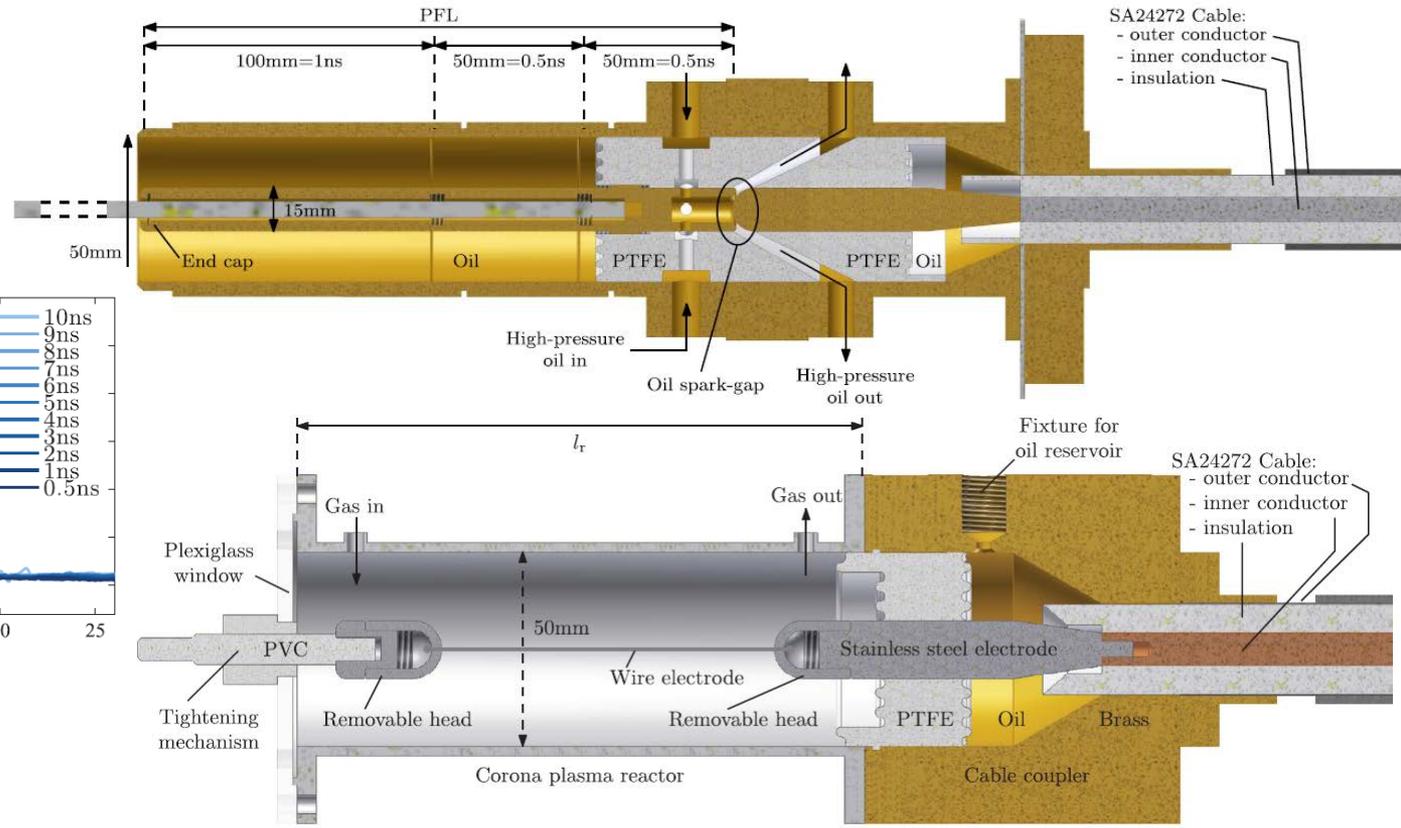
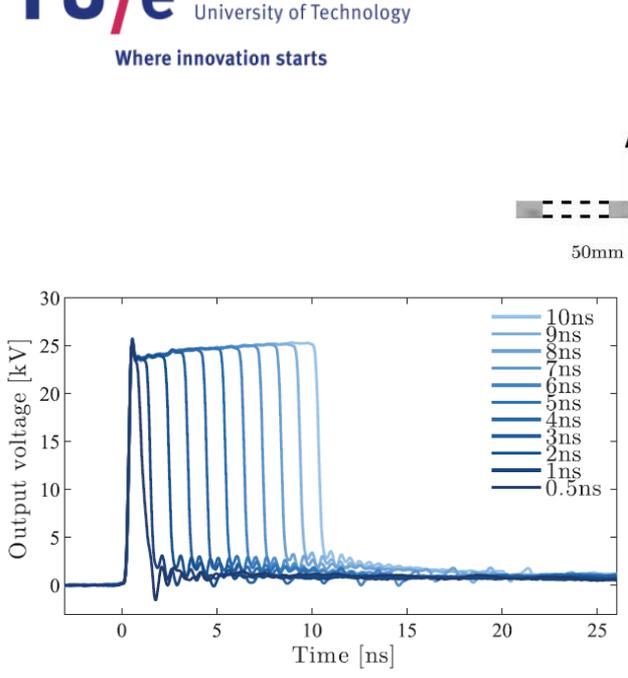
0,5ns - 10ns

Risetime

200ps

PFL avec commutateur à huile incluant circulation et filtration
Connexion directe au réacteur plasma





T. Huiskamp et al., IEEE TPS, Vol 43, N°1, 2015
 T. Huiskamp et al., Plasma Sources Sci. Technol., 25, 054006, 2016
 T. Huiskamp et al., J. Phys. D: Appl. Phys., 50, 405201, 2017

Générateurs nanosecondes

Tension de sortie

1 à 200kV

PRF

Monocoup à 100Hz

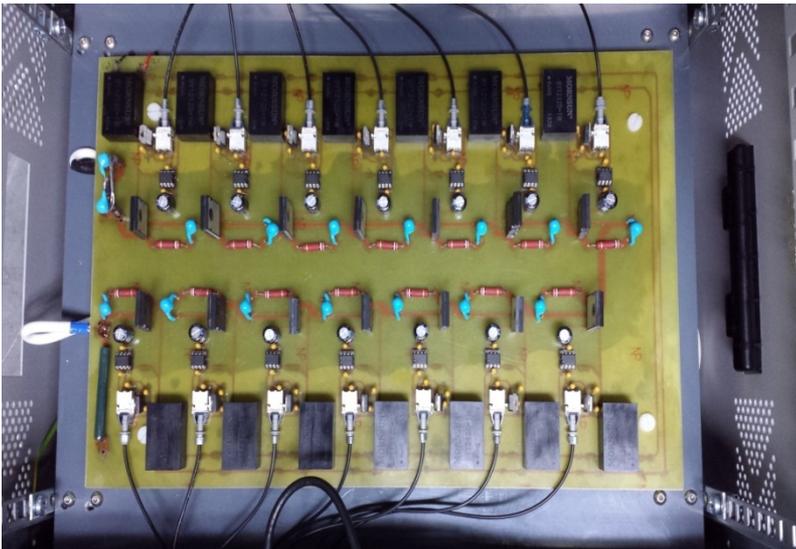
Durée

100ns - >10 μ s

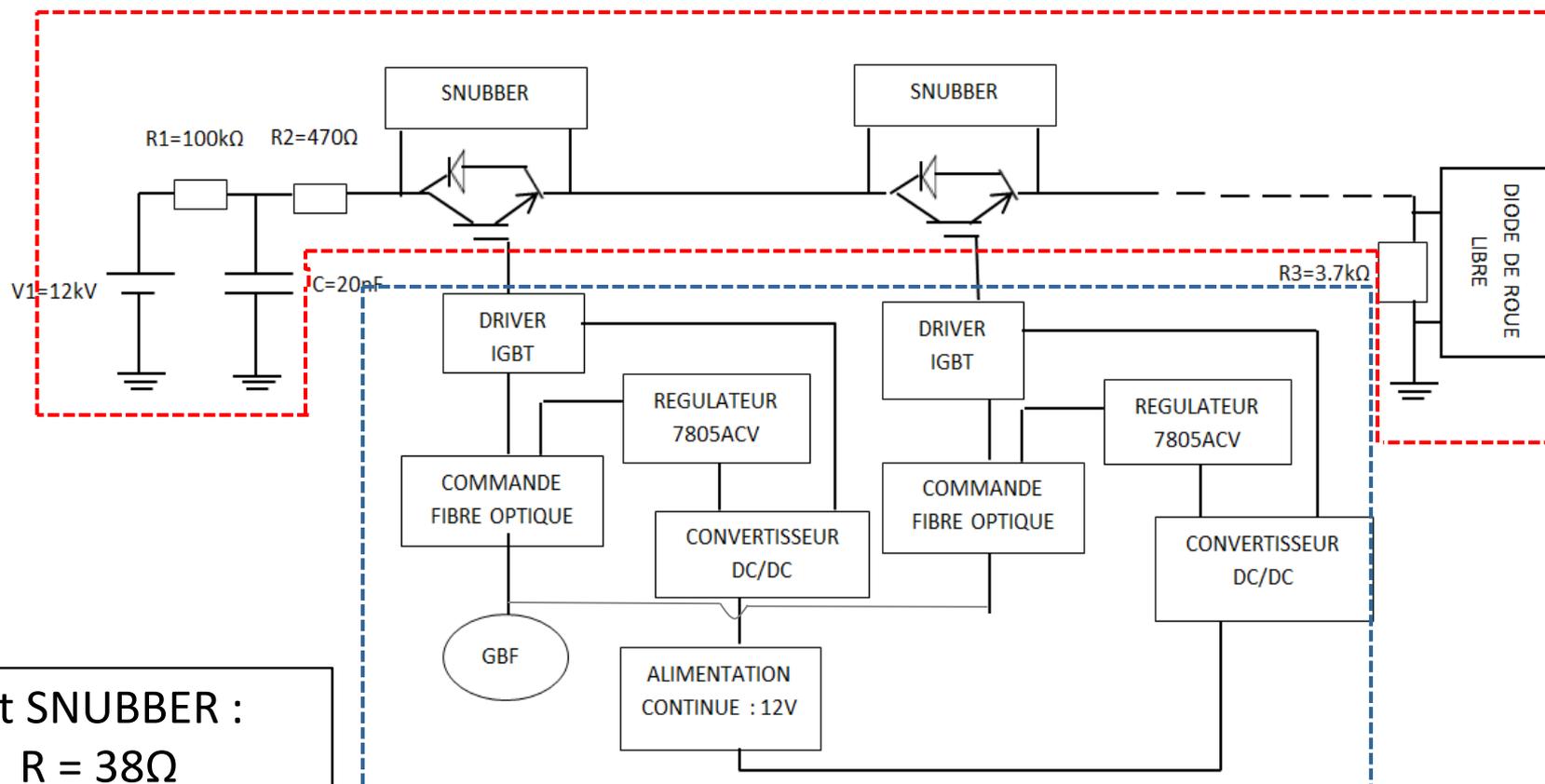
Temps de montée

Qques 10ns

Association série de 14 IGBT commandés par fibres optiques



Générateur nanoseconde

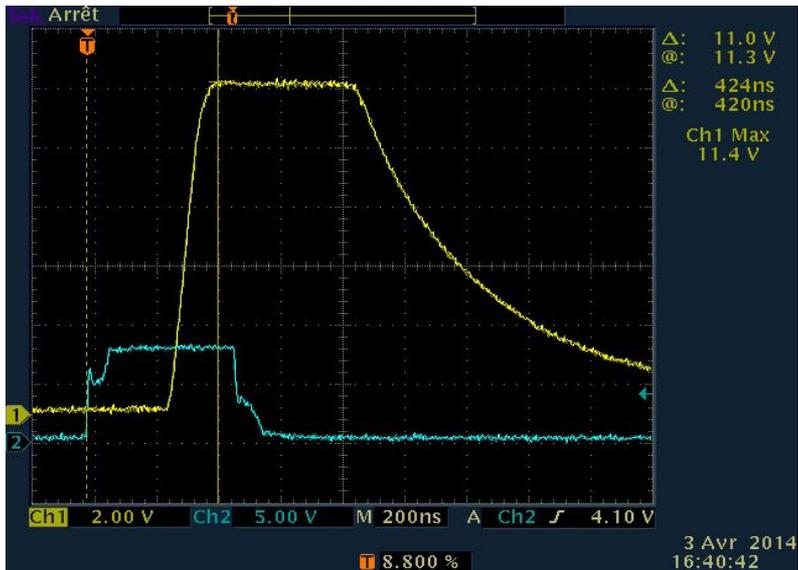


Circuit SNUBBER :

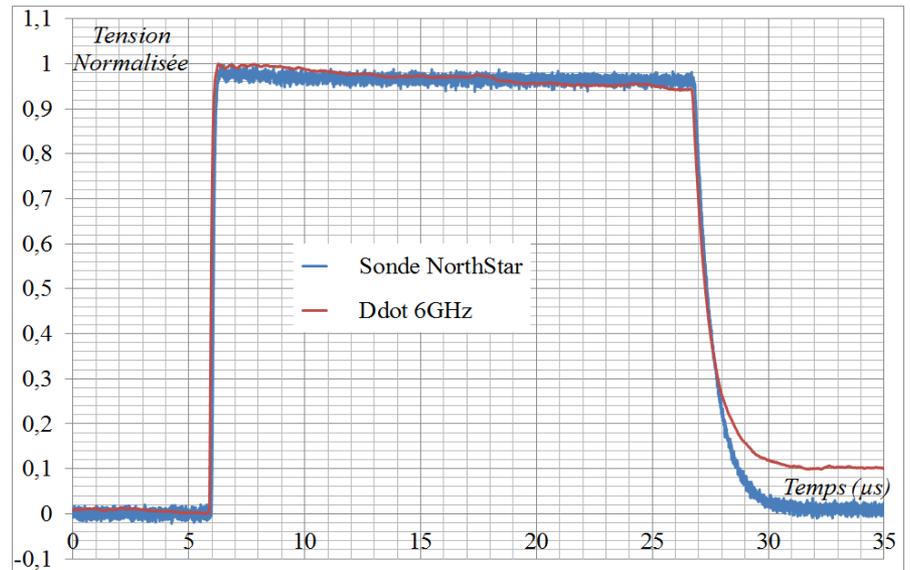
$$R = 38\Omega$$

$$C = 100\text{pF}$$

Générateur nanoseconde



Impulsion de 12kV à vide



Générateurs subnanosecondes

Tension de sortie

Jusqu'à 250kV

PRF

Monocoup jusqu'à 300Hz

Durée

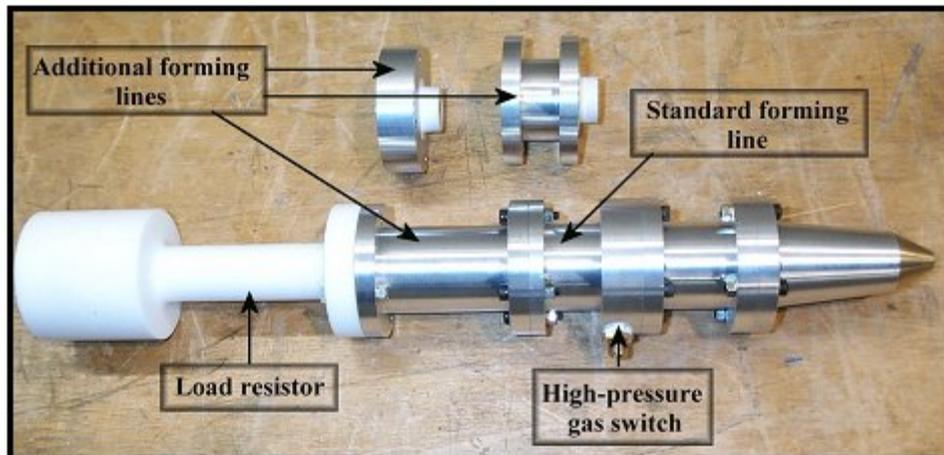
0,5ns – 2,5ns

Temps de montée

Centaine de picosecondes

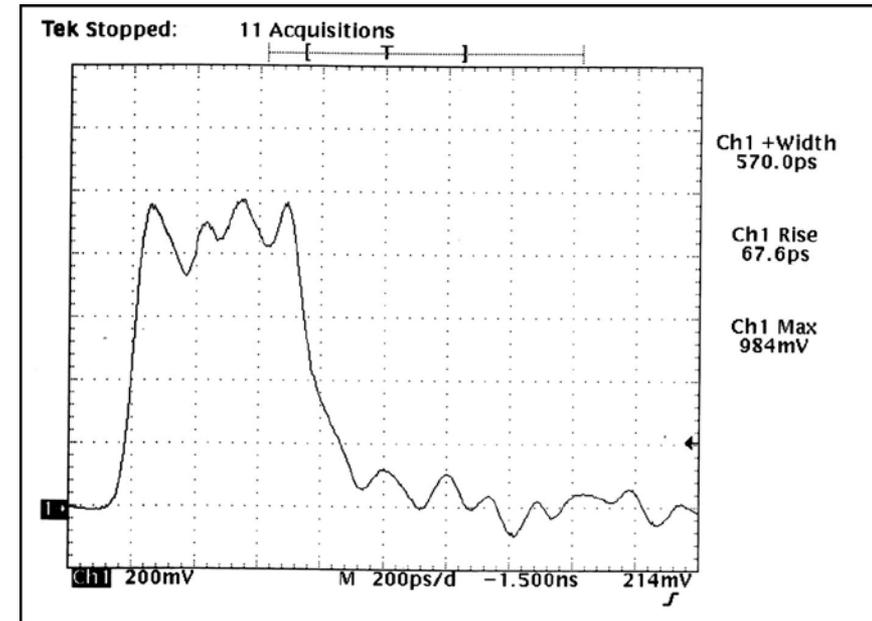


PFL avec commutateur à hydrogène pressurisé - Sortie coaxiale 50Ω
Monopolaire ou bipolaire

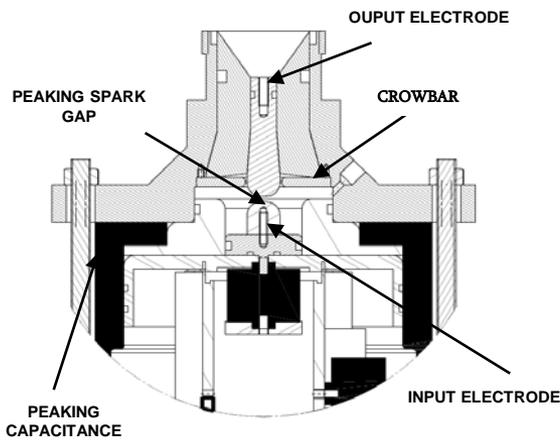


$V_{OUT}=25kV$

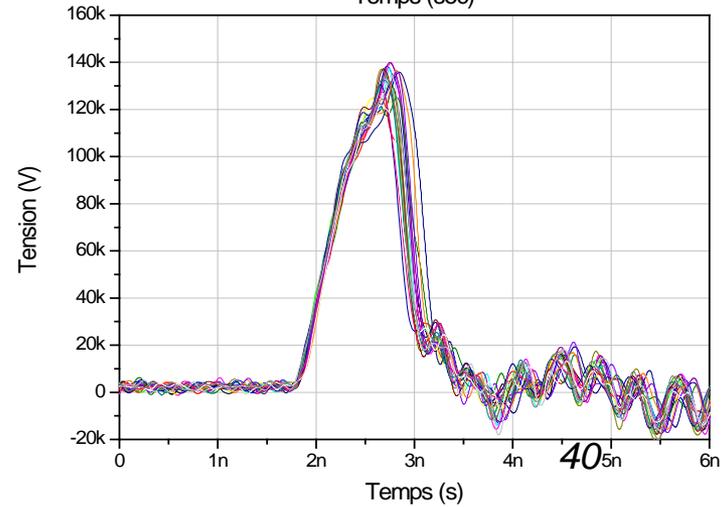
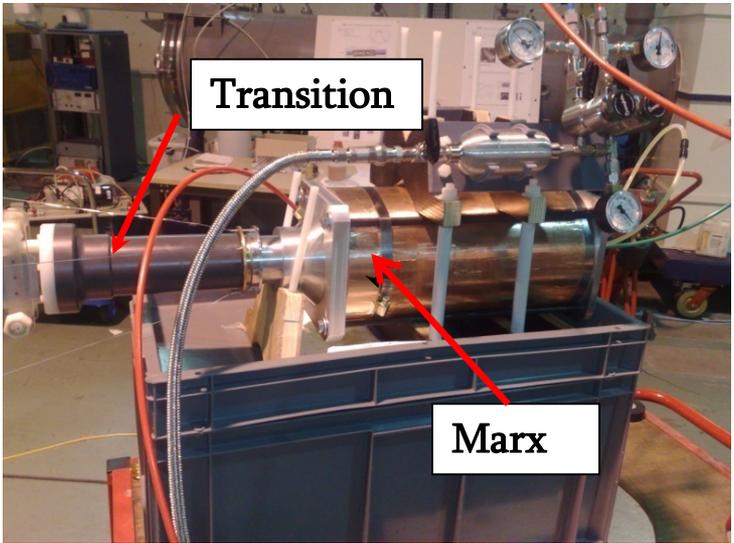
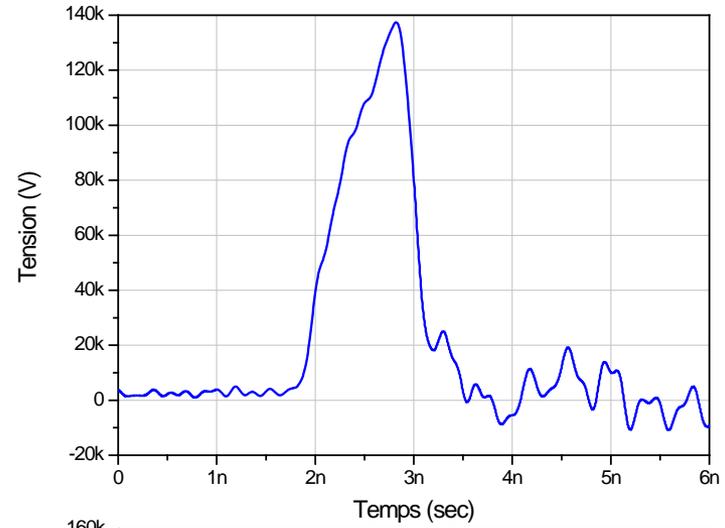
$\tau=68ps$



Générateur subnanoseconde Générateur de Marx avec mise en forme intégrée



$V_e = 40\text{kV}$
 $V_s \approx 140\text{kV}$
 $P_{\text{MARX}} = 4\text{bar (air)}$
 $P_{\text{MEF}} = 22\text{bar (air/SF}_6\text{)}$
 Charge résistive = 50Ω



Générateurs rapides d'impulsions hautes tensions

Principe de fonctionnement et état de l'art

L. Pécastaing

laurent.pecastaing@univ-pau.fr

05 59 84 53 24