

Alimentation impulsienne μ s haute tension: conception, problèmes et défis

Sébastien Dozias

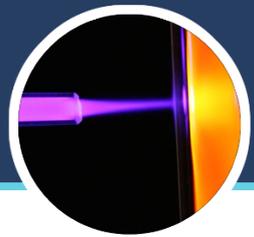
GREMI, UMR7344 CNRS Université d'Orléans, Orléans, France



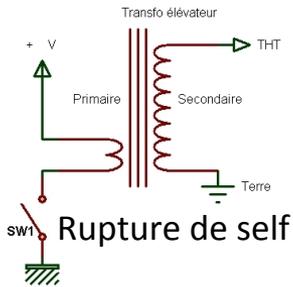


Sommaire

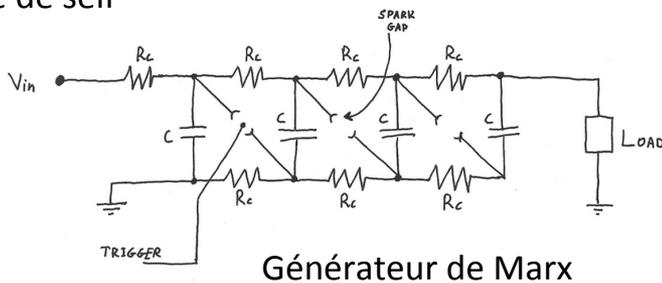
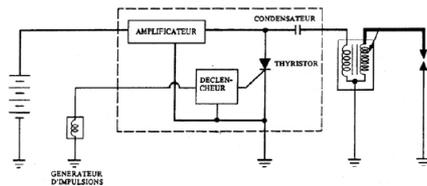
- Définition d'un système impulsionnel
- Exemple d'un générateur impulsionnel μs à décharge capacitive
 - Principe de fonctionnement
 - Les avantages/inconvénients
 - Les différents étages
- Modèle utilisé au Gremi



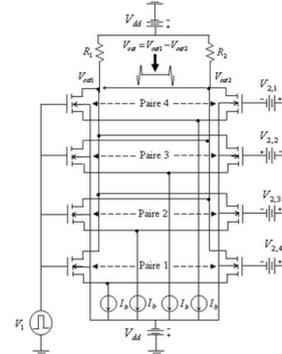
Définition d'un système impulsionnel



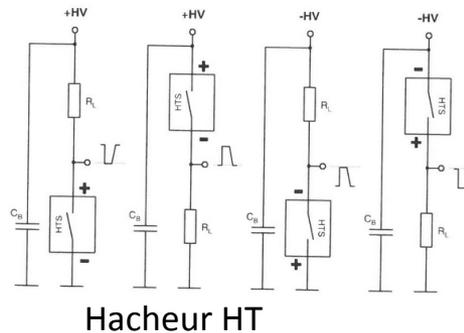
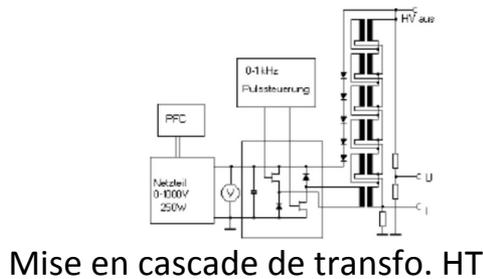
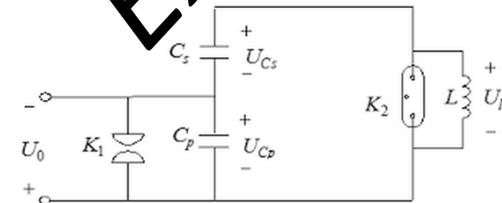
Décharge capacitive



Commutateur de lignes



Exemples



Circuit électrique ayant stocké de l'énergie et la restituant pendant un temps « court »



Définition d'un système impulsif

Paramètres intervenants sur la restitution de l'énergie :

- **caractéristiques électriques des composants du circuit (L, R,C)**
- **conditions initiales (courant, tension dans les selfs et capacités)**
- **caractéristiques du dispositif de commutation (t, R, L)**
- **caractéristiques électriques de l'impédance de charge (L, R,C)**



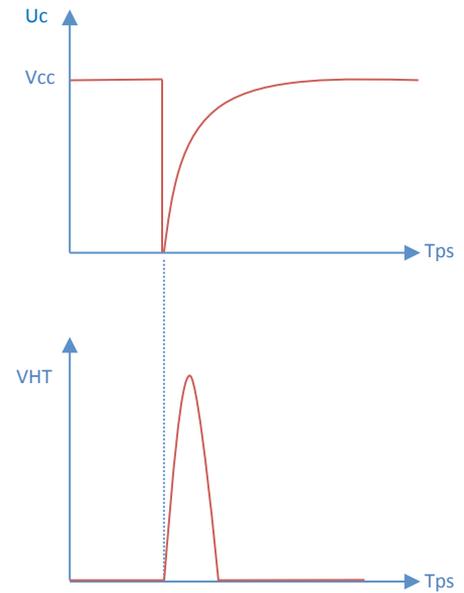
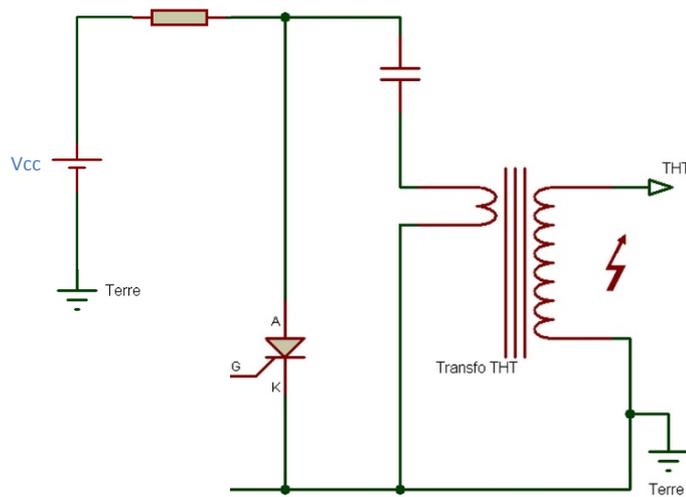
Générateur haute tension pulsé

Caractéristiques:

- **Tension :** kV à qq centaine de kV
- **Courant :** mA à qq centaine de kA
- **Impédance :** centaine de $m\Omega$ à qq dizaines Ω
- **Temps de montée :** centaine de ps à qq μs
- **Largeur :** centaine de ps à qq μs
- **Fréquence :** Mono-coup à une centaine de kHz



Générateur HT μ s: Décharge capacitive

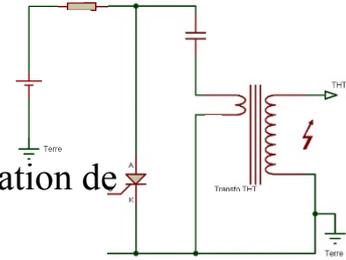




Générateur HT μ s: Décharge capacitive

Les étapes permettant d'atteindre des tensions de plusieurs kV.

Etape 1 : Charge du condensateur. Au départ l'interrupteur est ouvert, ce qui permet à l'alimentation de charger le condensateur à travers le primaire du transformateur.



Etape 2 : Décharge du condensateur. L'interrupteur se ferme et « court-circuite » l'alimentation. Le condensateur peut alors se décharger dans la bobine primaire et rentrer en oscillation (circuit LC série).

Etape 3 : Transfert d'énergie dans la bobine secondaire. Le champ magnétique de la bobine primaire produit un champ induit dans la bobine secondaire. Comme le nombre de spires du secondaire est beaucoup plus grand que dans la bobine primaire il y a en plus amplification de la tension (rapport de transformation).

Etape 4 : formation de l'arc électrique. A chaque commutation du condensateur primaire, la tension au niveau du secondaire augmente et devient supérieure à la tension de claquage de l'air, d'où la formation d'un arc électrique ce qui ferme le circuit secondaire.

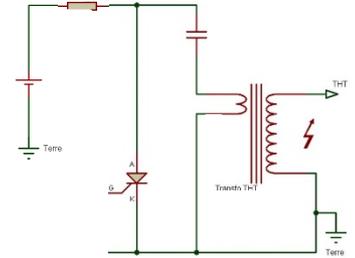
Etape 5 : ouverture de l'interrupteur. Le commutateur s'ouvre alors, et permet de recharger le condensateur primaire.

Et ainsi de suite...



Générateur HT μ s: Décharge capacitive

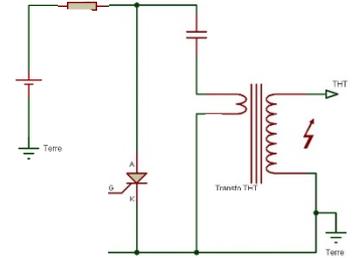
- Pourquoi cette solution? **Les +**
 - Simple à mettre en œuvre au départ...
 - Pas d'alimentation HT au primaire
 - Inversion de la polarité possible
 - Contrôle de l'énergie déposée par impulsion
 - Système de protection sur le primaire
 - Pulse HT avec polarisation



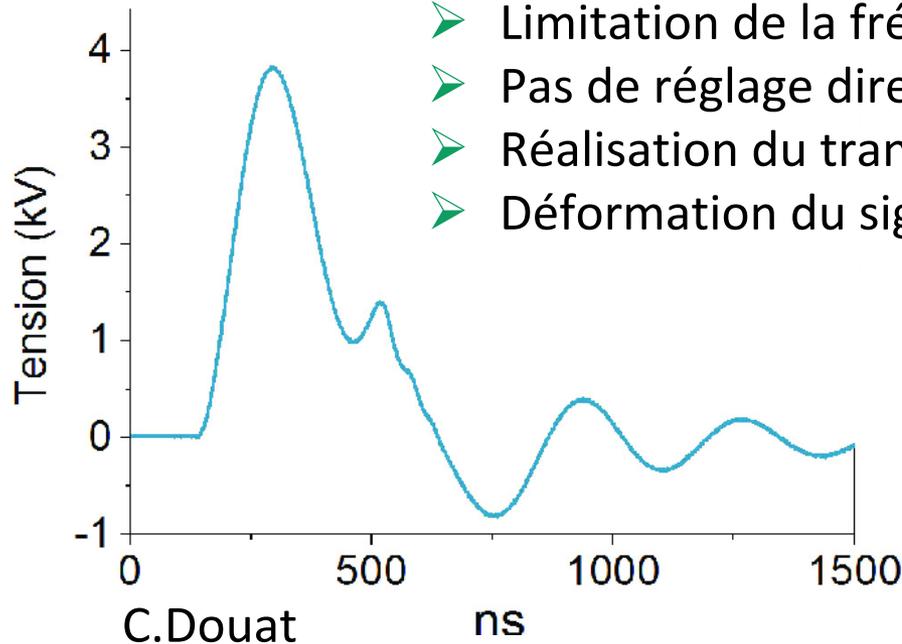


Générateur HT μ s: Décharge capacitive

➤ Pourquoi cette solution? Les -



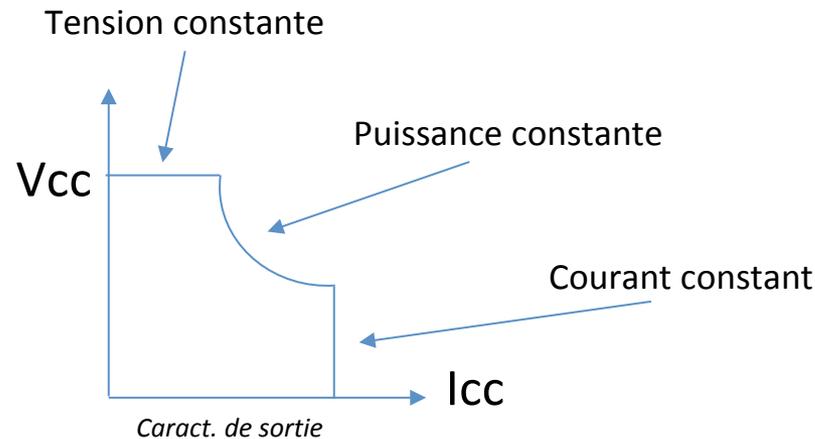
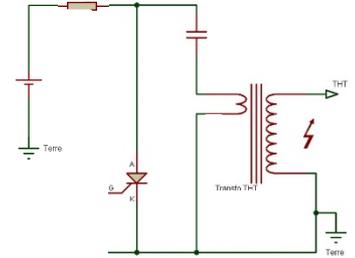
- Pas si simple à mettre œuvre...
- Limitation de la fréquence -> centaine de kHz
- Pas de réglage direct de la durée du pulse HT
- Réalisation du transformateur HT délicate
- Déformation du signal de sortie





Conception: l'alimentation

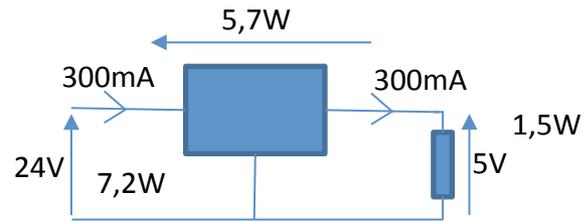
Le but d'une alimentation stabilisée est de fournir une tension, un courant ou une puissance constante



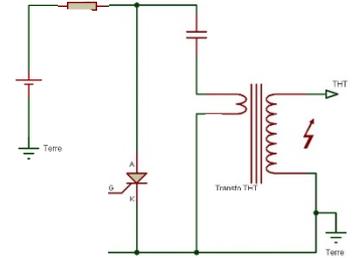
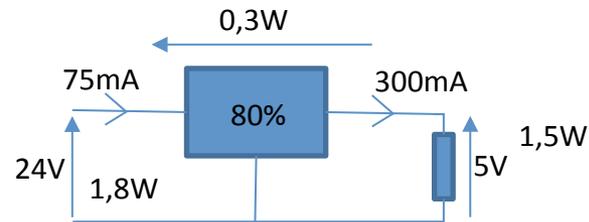


Conception: l'alimentation

- La régulation
 - Linéaire



- La régulation
 - A découpage

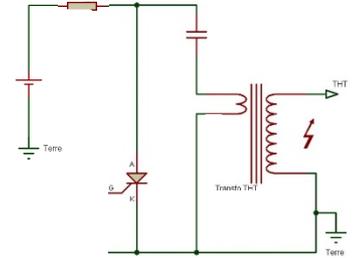




Conception: l'alimentation

- La régulation
 - **Linéaire**
 - + Excellente stabilisation / commande facile
 - - Mauvais rendement <60% / pertes importantes

 - **A découpage**
 - + Très bon rendement > 80%
 - - Génères de parasites / commande plus délicate

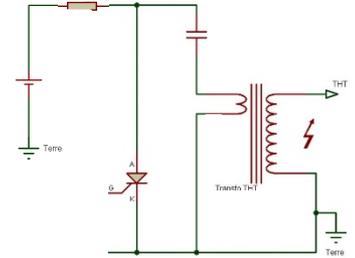


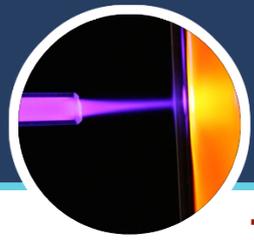


Conception: le réseau RC

- RC détermine la fréquence : Cte de temps ζ
- R limite le courant lors de la charge/décharge
- C donne l'énergie déposée pour chaque pulse
- L/C détermine la largeur d'impulsion

Adapter le condensateur à l'utilisation!
U / L / R / F





Le condensateur

Type 940C, Polypropylene Capacitors, for Pulse, Snubber High dV/dt for Snubber Applications



Type 940 round, axial leaded film capacitors have polypropylene film and dual metallized electrodes for both self healing properties and high peak current carrying capability (dV/dt). This series features low ESR characteristics, excellent high frequency and high voltage capabilities.

Highlights

- High dV/dt
- High pulse current
- Low inductance
- Self healing

NOTE: Other ratings, sizes and performance specifications are available. Contact us.

Cap. (μ F)	Catalog Part Number	D mm	L mm	d mm	Typical ESR (m Ω)	Typical ESL (nH)	dV/dt V/ μ s	I peak (A)	I _{RMS} 70 °C 100 kHz (A)
600 Vdc (275 Vac)									
.10	940C6P1K-F	9.0	34.0	0.8	28	19	196	20	2.5
.15	940C6P15K-F	10.5	34.0	0.8	13	20	196	29	4.0
.22	940C6P22K-F	11.5	34.0	0.8	12	20	196	43	4.4
.33	940C6P33K-F	13.5	34.0	0.8	9	21	196	65	5.6
.47	940C6P47K-F	15.5	34.0	1.0	7	22	196	92	6.9
.68	940C6P68K-F	18.0	34.0	1.0	6	23	196	134	8.1



Conception: le commutateur

Élément essentiel des générateurs

Types de commutateurs

→ gaz

- front raide (\sim ns)
- forte amplitude en I, V, P
- mauvaises synchronisation et reproductibilité

→ S e m i
conducteurs

- excellentes synchronisation et reproductibilité
- front moyen (\sim 1 à 100ns)
- I, V faibles nécessité d'association

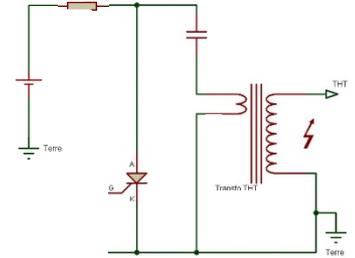


Conception: le commutateur

- Principaux dispositifs de commutation utilisés
 - Thyristors / GTO
 - IGBT
 - MOSFET
 - Diodes, Diodes SRD...
 - Thyatron / Spark Gap

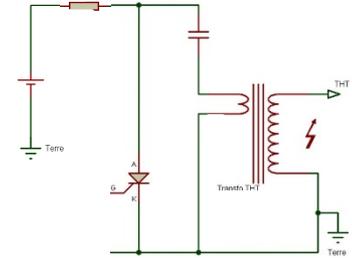
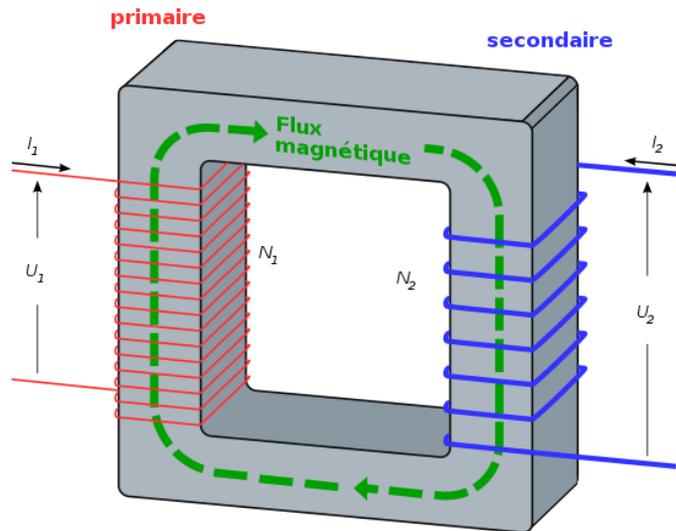
Adapter le commutateur à l'utilisation!

U / I / F





Conception: le transformateur HT

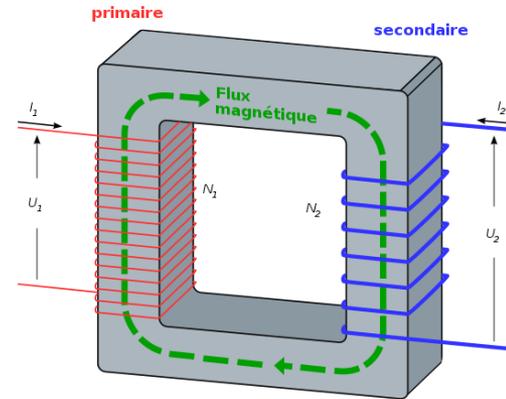


Transformateur idéal:

- Rapport de transformation
- $k = \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} + \frac{u_1}{u_2}$
 - Le transformateur idéal transmet l'énergie du primaire vers le secondaire sans aucune perte Rend.=1
 - $P_1 = P_2$
- Choisir le circuit magnétique adapté à F (tôles ou ferrite)
- Choisir le fil adapté à la tension



Conception: le transformateur HT



Les pertes de puissance d'un transformateur

Les pertes par effet Joule

Les pertes par effet Joule dans les enroulements ou «pertes cuivre», dépendent de la résistance de ces enroulements et de l'intensité du courant qui les traverse : elles sont proportionnelles au carré de l'intensité.

$$P_J = \sum_i R_i I_i^2 \quad \text{avec } R_i \text{ la résistance de l'enroulement } i \text{ et } I_i \text{ l'intensité du courant qui le traverse.}$$

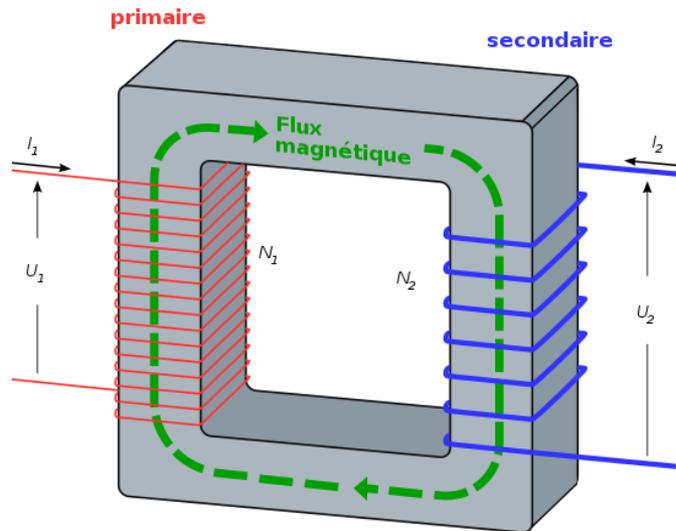
Les pertes magnétiques

Les pertes dans le circuit magnétique, ou «pertes fer», dépendent de la fréquence et de la tension d'alimentation. À fréquence constante on peut les considérer comme proportionnelles au carré de la tension d'alimentation. Ces pertes ont deux origines physiques :

- Les pertes par courants de Foucault minimisées par l'utilisation de tôles magnétiques vernies, donc isolées électriquement les unes des autres pour former le circuit magnétique, ce en opposition à un circuit massif.
- Les pertes par hystérésis, minimisées par l'utilisation d'un matériau ferromagnétique doux.



Conception: le transformateur HT



Transformateur réel:

- Résistance sur les enroulements > pertes effet joule
- Fuite de flux > multiplication non linéaire
- Non-linéarité du circuit magnétique (saturation et hystérésis) > F_c modifiée

Circuit magnétique des transformateurs HF

Les pertes par courants de Foucault au sein du circuit magnétique sont directement proportionnelles au carré de la fréquence mais inversement proportionnelles à la résistivité du matériau qui le forme. Pour limiter ces pertes, le circuit magnétique des transformateurs HF est réalisé avec matériaux ferromagnétiques isolants :

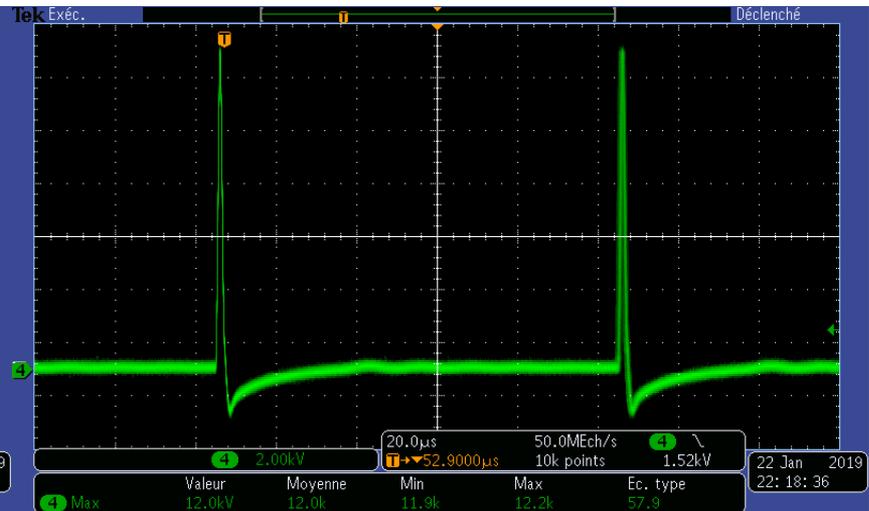
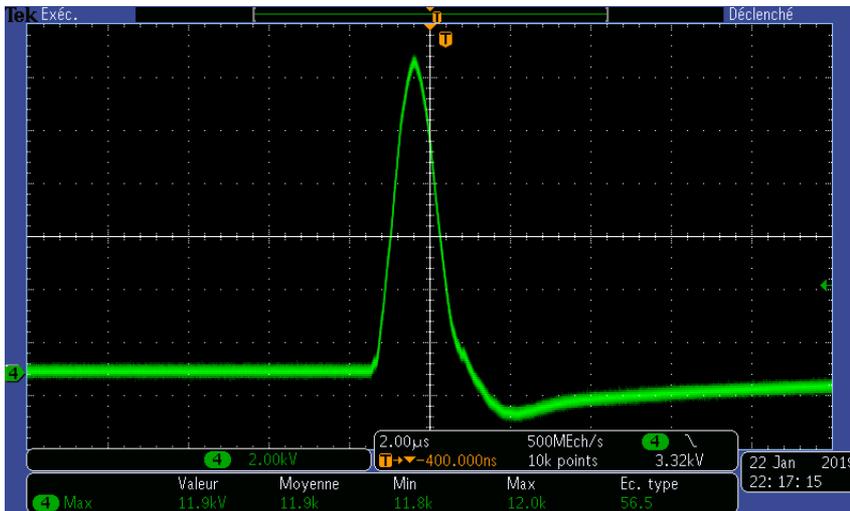
- les ferrites douces : oxydes mixtes de fer et de cuivre ou de zinc ;
- les matériaux nanocristallins.



Exemple de générateur au GREMI

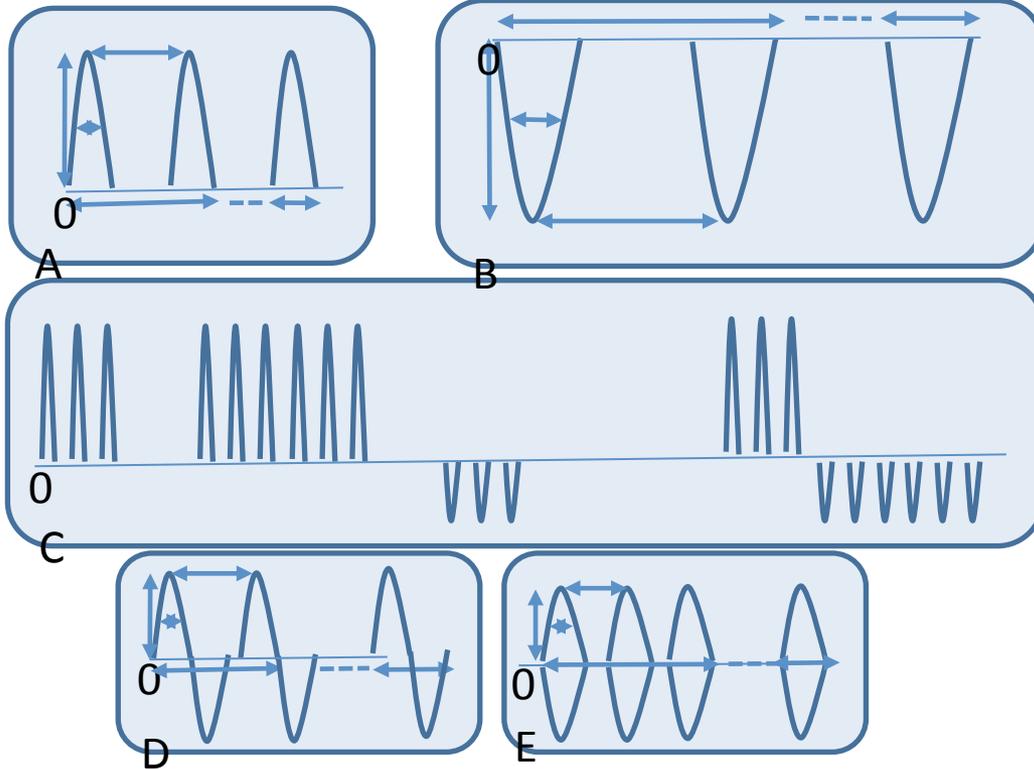


- Rack 19" 3U
- Tension primaire 350VDC
- Tension de sortie: 0 à 30kV
- Fréquence: mono-coup à 100Kz
- (selon durée de l'impulsion)
- Durée de l'impulsion fixe de $1,2\mu\text{s}$
- Energie par impulsion: 20mJ max
- Inversion de polarité
- Puissance max: 150W





Exemple de générateur au GREMI



A Train d'impulsions de polarité positive. *Largeur temporelle*, amplitude en tension, fréquence et intervalle de temps entre les trains d'impulsions sont ajustables

B Train d'impulsion de polarité négative. *Largeur temporelle*, amplitude en tension, fréquence et intervalle de temps entre les trains d'impulsions sont ajustables

C Exemple de train d'impulsions pour lequel fréquence, polarité et intervalles de temps entre chaque sous train d'impulsions sont programmés à volonté.

D Train d'impulsion bipolaires. *Largeur temporelle*, amplitude en tension, fréquence et intervalle de temps entre les trains d'impulsions sont ajustables

E Train d'impulsion flottant par rapport à la masse. *Largeur temporelle*, amplitude en tension, fréquence et intervalle de temps entre les trains d'impulsions sont ajustables



Merci

■ Sources
Les alimentations électroniques : DUNOD
Alimentation des plasmas : Nofel Merbahi