



Laboratoire de Génie Electrique  
Université de Pau et des Pays de l'Adour  
Centre Universitaire de Recherche Scientifique



THALES

*Contribution à l'étude et à la réalisation  
de commutateurs et de générateurs  
haute tension transitoires*

Thèse présentée par J. BAC  
12 juillet 2005



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Je vais vous présenter les travaux réalisés au cours de ma thèse effectuée au Laboratoire de Génie Electrique de Pau et qui portent sur l'étude et la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires.

✓ **Collaboration entre la société THALES Communications et le LGE de Pau**

✓ **Convention CIFRE THALES Communications - ANRT**

➤ **Générateur foudre**

➤ **Filtres électrostatiques**

➤ **Alimentation radar ULB**



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Cette étude à été effectuée dans le cadre d'une collaboration entre la société THALES Communications et le LGE par le biais d'une convention industrielle CIFRE.

Ma contribution s'inscrit dans le cadre de ma participation à la réalisation d'un simulateur d'onde foudre par THALES pour le Centre d'Essais Aéronautique de Toulouse.

Elle a pu être étendue à la conception de l'alimentation pulsée d'un électrofiltre pour Recyl'air et à la génération d'ondes électromagnétiques pour une application radar pour le Centre d'Electronique de l'ARmement.

- 1** – Les puissances électriques pulsées
- 2** – Commutateurs à thyristors
- 3** – Génération d'impulsions haute tension
- 4** – Commutation d'éclateurs à air
- 5** – Conclusion générale et perspectives



Le plan de mon exposé va être le suivant.

Dans un premier temps, je vais vous présenter un aperçu rapide sur les puissances électriques pulsées et leurs applications.

Dans un deuxième temps, je vous présenterai le fonctionnement des commutateurs à thyristors et plus particulièrement leur aspect faible courant.

Dans un troisième temps, j'analyserai le fonctionnement de deux dispositifs amplificateurs de tension : le générateur de Marx et le transformateur d'impulsions.

Dans un quatrième temps, nous aborderons la technologie des commutateurs à gaz.

Pour terminer, une conclusion récapitulant l'essentiel des résultats obtenus viendra clore cet exposé.

**1 – Les puissances électriques pulsées**

2 – Commutateurs à thyristors

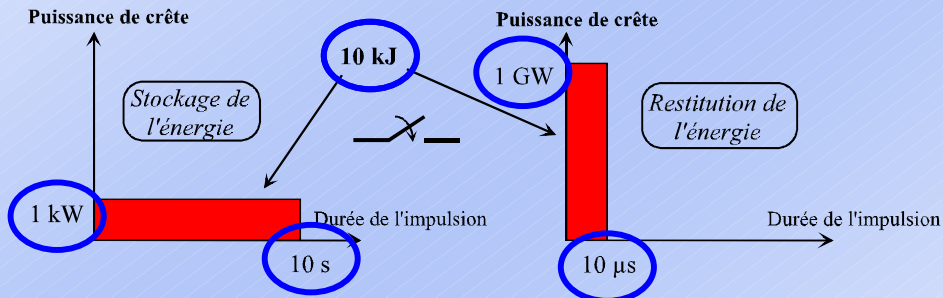
3 – Génération d'impulsions haute tension

4 – Commutation d'éclateurs à air

5 – Conclusion générale et perspectives



Je vais donc commencer par une présentation rapide des puissances électriques pulsées.

**PRINCIPE : Stockage lent et restitution rapide d'énergie****Amplification de puissance par compression du temps de restitution de l'énergie stockée**

Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires

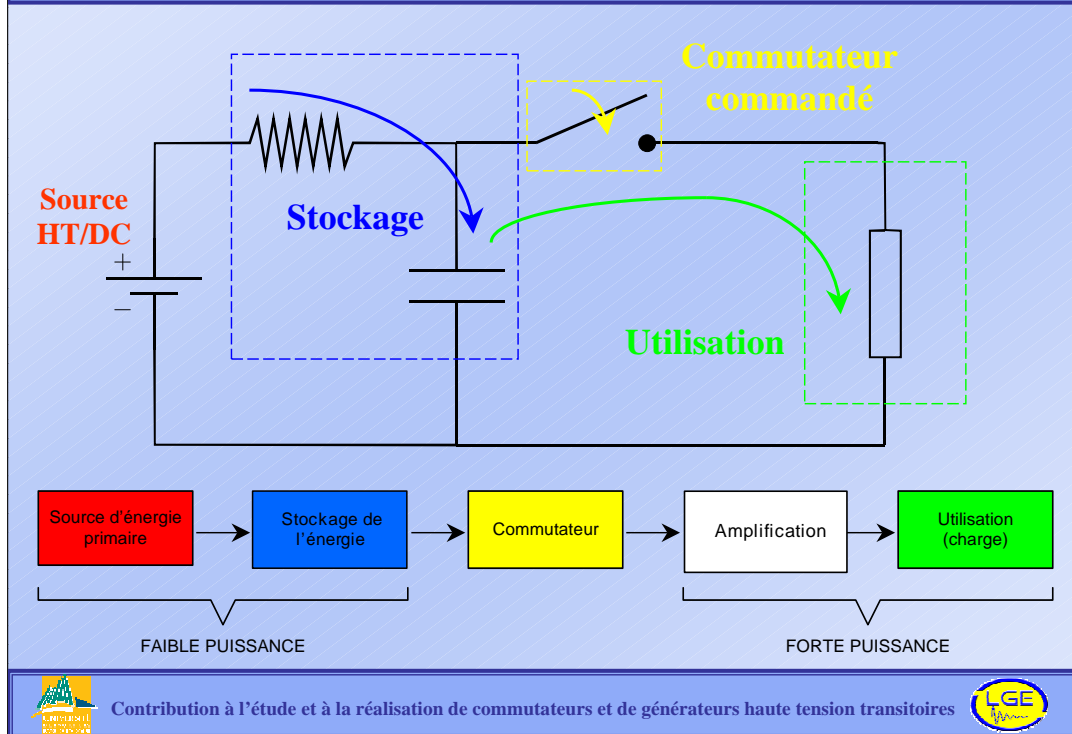


Le principe de la génération des puissances pulsées consiste en un stockage lent d'une certaine quantité d'énergie et en sa restitution rapide.

Comme le montre la figure, une énergie de 10kJ stockée en 10s, représente une puissance de 1kW.

Si on est capable de restituer cette même quantité d'énergie en 10μs, alors la puissance délivrée est de 1GW.

On a ainsi amplifié notre puissance par la compression du temps de restitution de l'énergie stockée.



Voici le schéma de principe de la génération de puissance pulsée que nous avons utilisé.

Une source haute tension charge un condensateur de stockage à travers une résistance. Une fois l'énergie stockée, on la restitue rapidement vers l'utilisation par l'intermédiaire d'un commutateur que l'on déclenche.

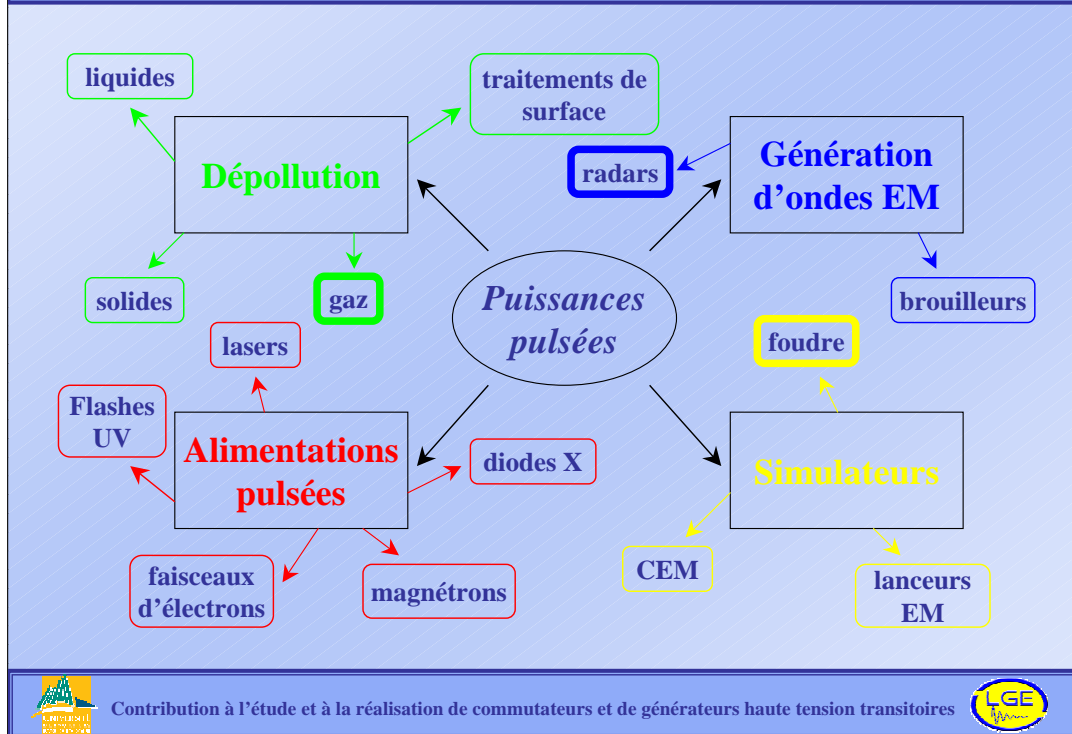
La source d'énergie primaire est généralement une alimentation de laboratoire.

Le stockage de l'énergie est dans la majorité des cas capacitive.

Le commutateur est alors à fermeture. Il permet un gain en puissance qui est fonction de son aptitude à restituer rapidement l'énergie.

Lorsque les amplitudes des tensions requises sont plus élevées que celles délivrées par l'alimentation, il faut concevoir des dispositifs amplificateurs de tension comme, par exemple, des structures de type Marx.

Un signal électrique est recueilli au niveau de l'utilisation.



On a essayé de classer les puissances pulsées dans 4 principaux domaines d'applications différents.

Le premier domaine concerne les alimentations pulsées qui servent pour les lasers, les diodes X, les magnétrons, les faisceaux d'électrons ou les flashes UV.

Le deuxième domaine d'application porte sur la génération d'ondes électromagnétiques qui trouvent leur utilité dans les radars ou les brouilleurs électroniques.

Ensuite, viens le domaine des simulateurs tels que les simulateurs d'onde foudre, de compatibilité électromagnétique ou les lanceurs électromagnétiques.

Le quatrième domaine concerne la dépollution que se soit des gaz, des solides ou des liquides par des méthodes de champs électriques pulsés, par effets couronnes ou par ondes de choc, ainsi que les traitements de surface.

Les applications liées à mon étude porteront principalement sur ma participation à la réalisation d'un simulateur d'onde foudre, sur la génération d'ondes électromagnétiques pour les radars et sur le traitement des gaz.

✓ Amplitude (I, V, P)	→	Augmenter
✓ Temps de front	→	Diminuer
✓ Largeur à mi-hauteur	→	Contrôler
✓ Fréquence de répétition	→	Augmenter



Les principales caractéristiques d'un signal électrique impulsionnel sont :

- son amplitude en courant, tension ou puissance,
- son temps de front,
- sa largeur à mi-hauteur,
- et sa fréquence de répétition.

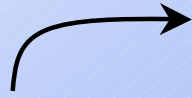
On ne peut pas optimiser simultanément ces 4 caractéristiques et les alimentations pulsées seront donc conçues, en fonction de l'application, sur la base de compromis.

Nous allons chercher à augmenter l'amplitude de l'onde délivrée par le générateur impulsionnel, à diminuer son temps de front, à contrôler la largeur à mi-hauteur de l'onde et à accroître ainsi la fréquence de répétition du système.



✓ **Élément essentiel des générateurs : le COMMUTATEUR**

✓ **Types de commutateurs (non optiques)**



**gaz**

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



**semi-conducteurs**

- excellentes synchronisation et reproductibilité
- front moyen (~ 10 à 100ns)
- I, V faibles ⇒ nécessité d'association



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Le commutateur est l'élément essentiel des générateurs qui va nous permettre de jouer sur ces 4 points.

Il existe 2 principales technologies de commutateurs.

La première, les commutateurs à gaz, présente les avantages :

- d'être les commutateurs les plus simples et les plus robustes,
- d'avoir des temps de commutation faibles, voisins de la nanoseconde,
- et d'avoir une tenue en courant, tension et puissance élevée.

Mais leur synchronisation et leur reproductibilité sont relativement mauvaises et ils génèrent des perturbations électromagnétiques importantes.

La seconde technologie, celle des commutateurs à semiconducteurs, présente les avantages :

- de générer de faibles perturbations électromagnétiques,
- d'avoir une synchronisation et une reproductibilité excellentes,
- et ces composants sont compacts.

Par contre, les inconvénients majeurs sont :

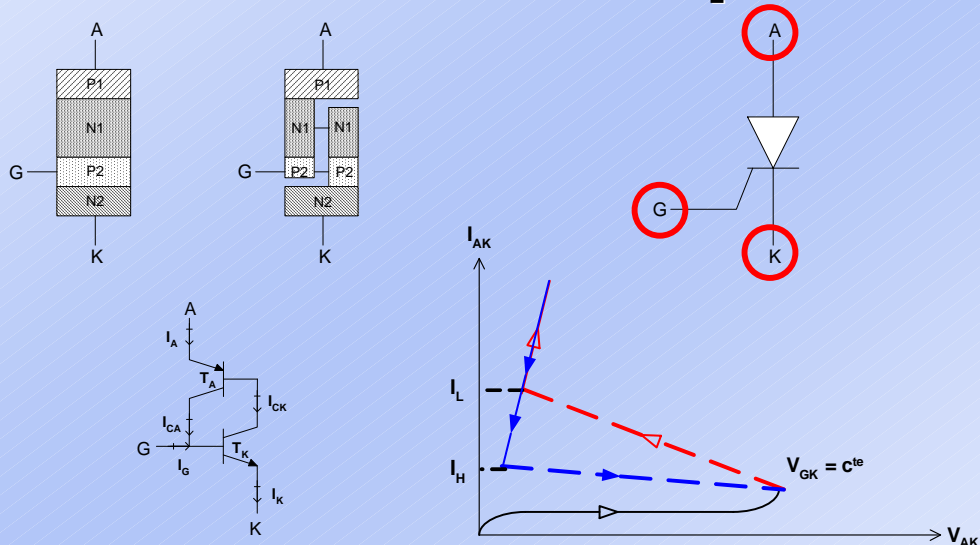
- que, pour des composants classiques, leurs temps de commutation sont moyens, de l'ordre de 10 à quelques 100ns,
- leurs niveaux de courant et de tension sont plus faibles ce qui va nécessiter de les associer en série ou en parallèle,
- et ces composants sont relativement fragiles d'utilisation.

- 1 – Les puissances électriques pulsées
- 2 – Commutateurs à thyristors**
- 3 – Génération d'impulsions haute tension
- 4 – Commutation d'éclateurs à air
- 5 – Conclusion générale et perspectives



Nous allons maintenant aborder la deuxième partie sur les commutateurs à thyristors.

## LE THYRISTOR – Principe



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires

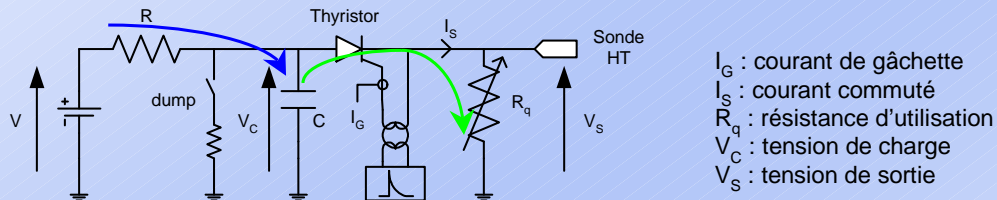


Le thyristor est un composant à commande unique à la fermeture. C'est un interrupteur unidirectionnel en courant et en tension possédant trois bornes : l'anode, la cathode et la gâchette. Les figures présentent la structure du thyristor et son modèle équivalent à deux transistors.

Pour faire passer un thyristor de l'état bloqué à l'état passant, la méthode la plus classique consiste à lui injecter un courant de gâchette, jusqu'à atteindre la valeur de courant d'anode permettant d'assurer l'autonomie du circuit, appelée courant de latching. A partir de ce moment-là, le courant d'anode, imposé par le circuit extérieur, contrôle le système et le courant de gâchette peut être supprimé.

Cette conduction se prolongera jusqu'à ce que le courant commuté devienne inférieur au courant de holding. Le thyristor s'ouvre alors à nouveau.

## Schéma expérimental d'essais des thyristors



## ✓ Paramètres influençant la commutation du thyristor :

- Tension de charge  $V_C$
- Courant commuté  $I_S$
- Impulsion de gâchette :  $I_G$ ,  $T_{fG}$  et  $Q_G$



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires

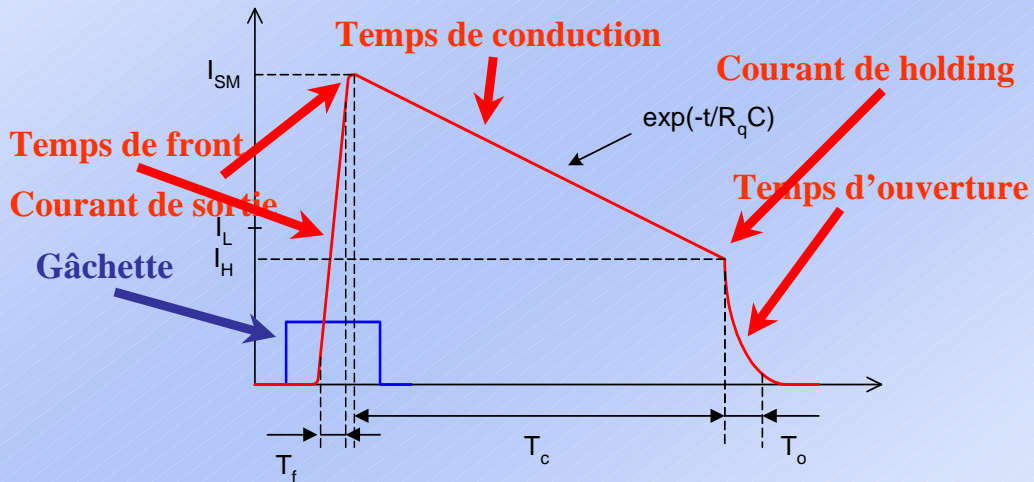


Le schéma du montage expérimental consiste à charger le condensateur à travers une résistance, puis à le décharger dans la résistance d'utilisation via le thyristor dont on contrôle le signal gâchette.

Les paramètres influençant directement la commutation du thyristor sont :

- la valeur de la tension de charge  $V_C$  du condensateur,
- la valeur du courant commuté  $I_S$ , directement liée à celle de la résistance d'utilisation  $R_q$ ,
- et les caractéristiques de l'impulsion de gâchette, c'est-à-dire son amplitude de courant  $I_G$ , son temps de front  $T_{fG}$  et la quantité de charge  $Q_G$  qu'elle injecte.

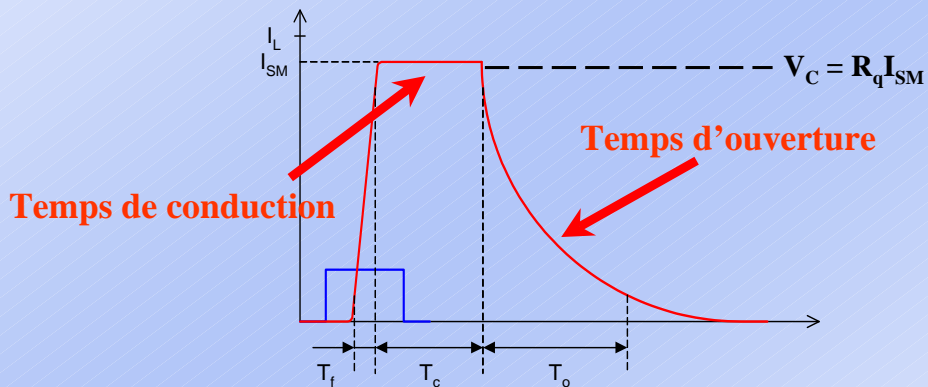
### Impulsion de sortie - Fonctionnement classique -



L'allure de l'impulsion de tension recueillie aux bornes de l'utilisation dépend du courant qui la traverse.

Ce premier exemple, correspondant au cas où le courant commuté  $I_S$  supérieur au courant de latching  $I_L$ , montre le fonctionnement classique du thyristor, c'est-à-dire que, suite à l'application d'une impulsion de déclenchement sur sa gâchette, son courant de sortie augmente en un temps de front  $T_f$  puis décroît pendant un temps de conduction  $T_c$  jusqu'à ce que le courant atteigne sa valeur de holding  $I_H$ . Il se rouvre ensuite en un certain temps d'ouverture  $T_o$ .

### Impulsion de sortie - Fonctionnement faible courant -



➤ **Fonctionnement très intéressant : permet de réaliser des commutateurs de tension fonctionnant en fréquence**



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires

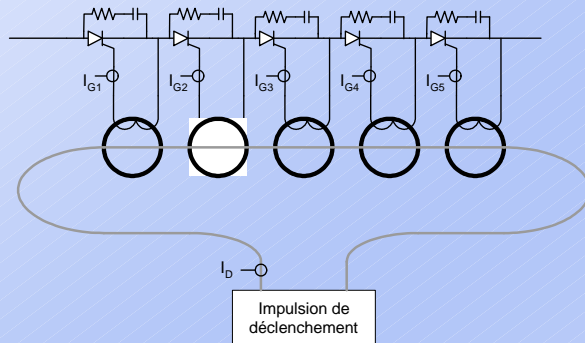


Ce deuxième exemple correspond maintenant au cas où le courant commuté  $I_S$  est inférieur au courant de latching  $I_L$ .

Le thyristor conduit alors pendant un temps très court lié, principalement, aux caractéristiques de l'impulsion de déclenchement et à celles du circuit de puissance. Il se rouvre ensuite bien que le condensateur ne soit pas déchargé et que la tension appliquée soit encore très élevée.

Ce fonctionnement à faible courant est très intéressant car il permet de réaliser des commutateurs de tension fonctionnant en fréquence.

## Dispositif de commande



L'impulsion de commande est transmise aux thyristors par l'intermédiaire de transformateurs d'impulsions à ferrites

### AVANTAGES :

- isolation galvanique entre le circuit de puissance et le circuit de commande
- déclenchement simultané de tous les composants dans le cas d'associations



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



L'impulsion de déclenchement qui va venir commander les thyristors est transmise par l'intermédiaire de transformateurs d'impulsions à ferrite connectés entre leur gâchette et leur cathode.

Les deux principaux avantages de ce dispositif de commande sont :

- l'isolation galvanique réalisée entre le circuit de puissance et celui de commande,
- le déclenchement simultané de tous les composants dans le cas d'associations séries ou parallèles.

### FERMETURE – Influence de l'impulsion de gâchette

➤ 3 zones de fonctionnement :

-  $I_{SM} < 200\text{mA}$  :

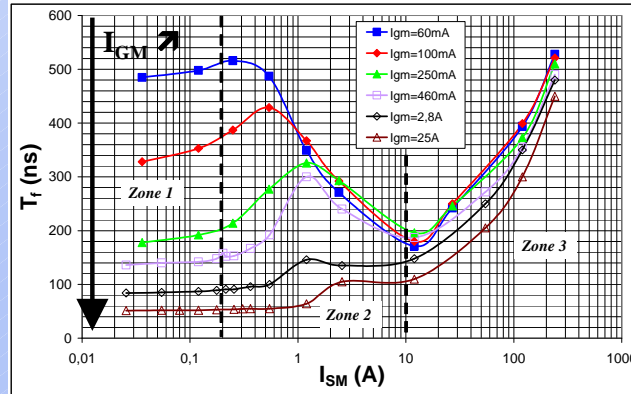
$T_f$  est contrôlé par  $I_{GM}$

-  $200\text{mA} < I_{SM} < 10\text{A}$  :

zone de transition

-  $I_{SM} > 10\text{A}$  :

$T_f$  augmente avec  $I_{SM}$ ,  
indépendamment de  $I_{GM}$



$\nabla I_{SM} :$   $I_{GM} \nearrow \Rightarrow T_f \searrow$



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



On étudie, dans un premier temps, l'influence de l'amplitude du courant de gâchette  $I_{GM}$  sur le temps de front  $T_f$  de l'impulsion délivrée en fonction de la valeur du courant commuté  $I_{SM}$ .

Il apparaît que, quelle que soit la valeur du courant commuté, le temps de fermeture est d'autant plus bref que l'amplitude du courant de gâchette est importante.

De plus, quelle que soit la valeur du courant de gâchette  $I_{GM}$ , on observe 3 zones de fonctionnement :

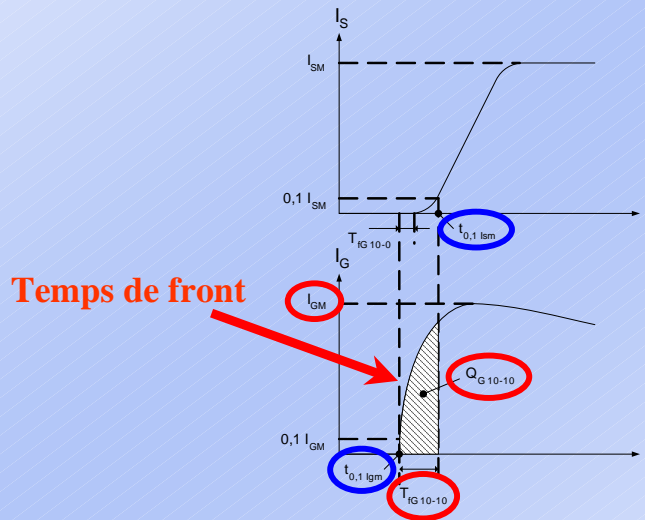
- la première zone correspond à des courants commutés inférieurs au courant de latching  $I_L$ . Le temps de front  $T_f$  est essentiellement contrôlé par le courant de gâchette  $I_{GM}$  ;

- pour les fortes valeurs du courant commuté  $I_{SM}$ , l'influence du courant de gâchette  $I_{GM}$  ne se fait pratiquement plus sentir et le temps de front  $T_f$  augmente avec le courant commuté  $I_{SM}$ . C'est le régime de fonctionnement classique du thyristor ;

- entre ces deux zones, apparaît une zone de transition caractérisée, lorsque le courant commuté  $I_{SM}$  augmente, par une légère augmentation du temps de front  $T_f$ , son passage par un maximum suivi d'une décroissance jusqu'à une valeur minimale qui marque le début de la zone fort courant.



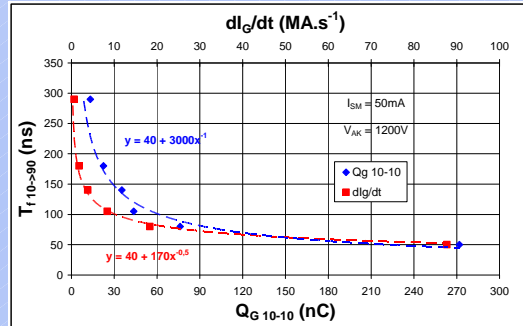
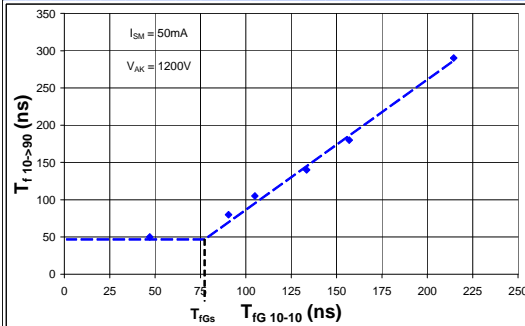
## FERMETURE – Influence de l'impulsion de gâchette



Nous avons essayé, à partir d'enregistrements caractéristiques du courant de gâchette et de la tension de sortie, de corrélérer le temps de front  $T_f$  avec plusieurs paramètres tels que :

- l'amplitude du courant de gâchette  $I_{GM}$  ;
- et son temps de front  $T_{fG}$  ;
- la quantité de charge  $Q_G$  injectée par la gâchette entre l'instant où le signal de gâchette atteint 10% de sa valeur finale et l'instant où la tension commutée atteint 10% de sa valeur finale ;
- le temps de front du courant de gâchette, mesuré entre ces mêmes instants ;
- et la valeur de la pente du courant de gâchette, mesuré également entre ces mêmes instants.

**FERMETURE – Influence de l'impulsion de gâchette**



$$T_f = \begin{cases} T_{fs} = 50ns & \text{si } T_{fG} < T_{fGs} \\ (k \cdot T_{fG} - K) & \text{si } T_{fG} > T_{fGs} \end{cases}$$

$$T_f = T_{fs} + k' \cdot (dI_G / dt)^{-1/2}$$

$$T_f = T_{fs} + k'' \cdot Q_{G10-10}^{-1}$$



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires

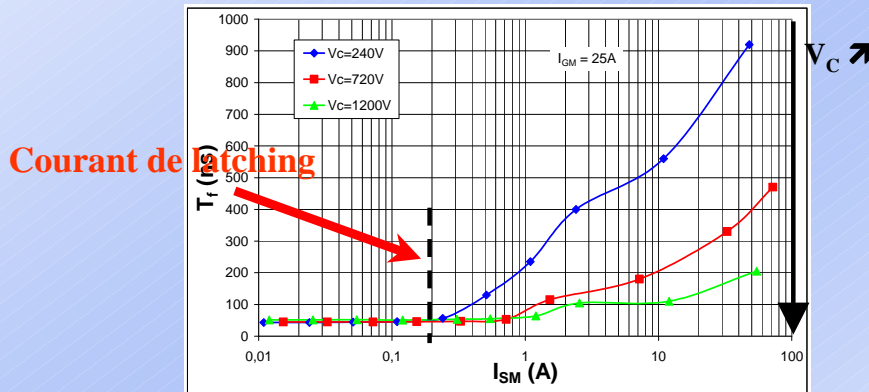


Il ressort que le thyristor considéré ne semble pas pouvoir se fermer en un temps inférieur à une cinquantaine de nanosecondes et qu'au-delà, son temps de front est directement proportionnel à celui de l'impulsion de gâchette.

Ce type de variation du temps de front en fonction de celui de l'impulsion de gâchette peut être approximé par cette équation.

De plus, il résulte qu'il faut injecter le maximum de quantité de charge sur la gâchette, le plus rapidement possible, pour obtenir le temps de front le plus faible.

Ces variations du temps de front en fonction de la quantité de charge injectée par la gâchette et de la valeur de la pente du courant de gâchette peuvent être approximées par ces relations.

FERMETURE – Influence de  $V_C$  et de  $I_{SM}$ -  $I_{SM} < I_L$  :aucune influence de  $V_C$  et de  $I_{SM}$  sur  $T_f$ -  $I_{SM} > I_L$  : $V_C \uparrow \Rightarrow T_f \downarrow$  $\forall V_C : I_{SM} \uparrow \Rightarrow T_f \uparrow$ 

Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



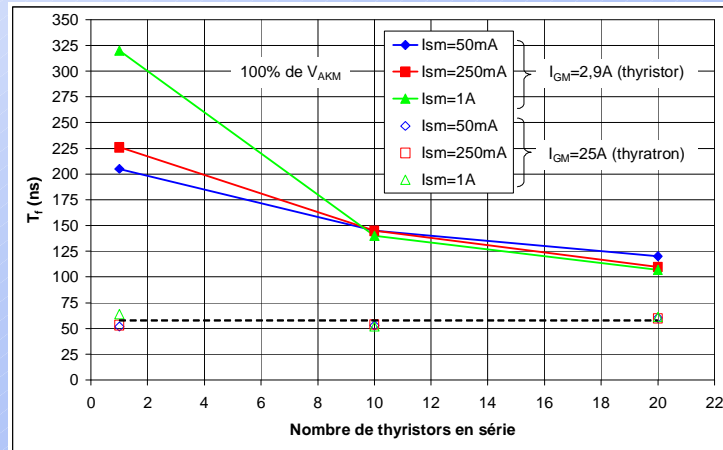
Nous nous intéressons maintenant à l'influence du circuit de puissance sur le temps de front.

Dans ce cas d'un fort courant de gâchette, on aperçoit l'influence du courant de latching  $I_L$  :

- pour un courant commuté inférieur au courant de latching, aucune influence de la tension de charge du condensateur  $V_C$  et du courant commuté  $I_{SM}$  sur le temps de front n'est observée, c'est essentiellement la gâchette qui commande ;
- par contre pour un courant commuté  $I_{SM}$  supérieur au courant de latching, lorsque la tension de charge du condensateur  $V_C$  augmente le temps de front diminue. Il vaut donc mieux travailler au niveau maximum de la tension admissible par le thyristor.

De plus, on peut noter qu'à tension de charge du condensateur  $V_C$  constante, quand le courant commuté  $I_{SM}$  augmente, le temps de front  $T_f$  augmente.

## FERMETURE - Etude de l'association série



$$T_{f - n \text{ thyristors}} = T_{f - 1 \text{ thyristor}}$$



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires

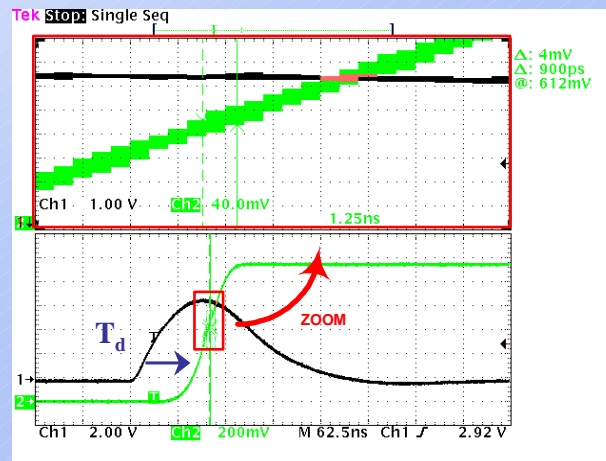


Pour une association série, on retrouve le même comportement que pour un seul thyristor.

De plus, l'association série présente des propriétés de fermeture légèrement plus intéressantes. Et ce phénomène se confirme lorsque l'on associe en série jusqu'à vingt thyristors. On peut également noter le rôle du signal de gâchette.

Ce résultat signifie que l'on peut associer en série autant de thyristors qu'on le souhaite sans détériorer le temps de front du signal de sortie.

## FERMETURE – Le jitter



Jitter < 900ps pour  $I_{SM} = 12A$  et 50mA



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires

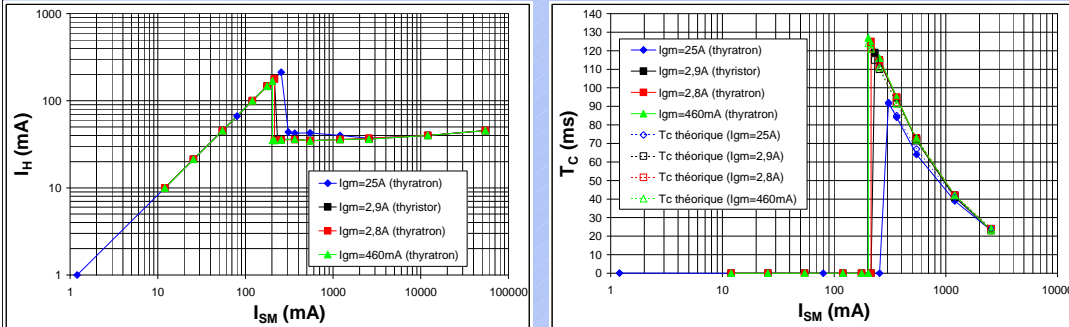


La faible valeur du jitter est l'avantage majeur de la commutation par semiconducteur.

Le jitter correspond à l'écart entre les valeurs extrêmes du temps de retard  $T_d$ .

Les résultats, obtenus à l'aide d'un oscilloscope possédant une fonction zoom, donnent un jitter inférieur à la nanoseconde, et ce pour des courants commutés de 50mA ou de 12A.

## OUVERTURE – Courant de holding $I_H$ et temps de conduction $T_c$



-  $I_{SM} \geq I_L$  : aucune influence de  $I_{SM}$  sur  $I_H$

-  $I_{SM} \geq I_L$  :  $T_c = R_q \cdot C \cdot \ln(I_{SM} / I_H)$

-  $I_{SM} < I_L$  :  $I_H = I_{SM}$

-  $I_{SM} < I_L$  :  $I_H = c^{te}$



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Nous allons maintenant nous intéresser à l'ouverture du thyristor.

Ces figures présentent les variations du temps de conduction  $T_c$  et du courant de holding  $I_H$  en fonction du courant commuté  $I_{SM}$ , pour différentes caractéristiques de gâchette.

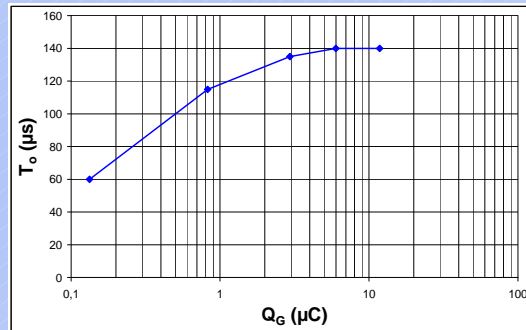
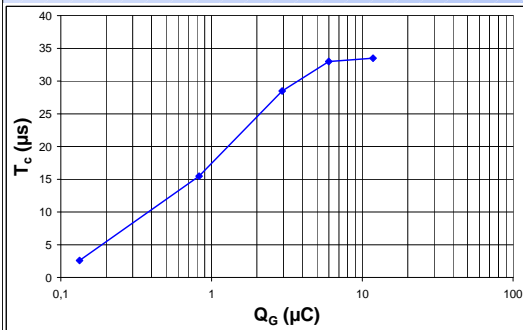
Concernant le courant de holding, on constate que :

- pour un courant commuté  $I_{SM}$  supérieur au courant de latching  $I_L$  : la valeur du courant de holding est pratiquement constante quelle que soit la valeur du courant commuté  $I_{SM}$  ;
- pour un courant commuté  $I_{SM}$  inférieur au courant de latching  $I_L$  : la valeur du courant de holding est, en fait, celle du courant commuté  $I_{SM}$ .

Maintenant, concernant le temps de conduction :

- pour un courant commuté  $I_{SM}$  supérieur au courant de latching  $I_L$  : connaissant les valeurs du courant de holding, on retrouve, par le calcul, les variations expérimentales du temps de conduction  $T_c$  en fonction du courant commuté  $I_{SM}$  en appliquant la relation classique de la décharge du condensateur  $C$  dans la résistance d'utilisation  $R_q$  ;
- pour un courant commuté  $I_{SM}$  inférieur au courant de latching  $I_L$  : le temps de conduction est pratiquement constant à cette échelle.

### OUVERTURE – Etude à faible courant Influence de $Q_G$ sur $T_c$ et $T_o$



$$N = 1/(T_c + T_o) \quad (T_c + T_o \gg T_f)$$



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



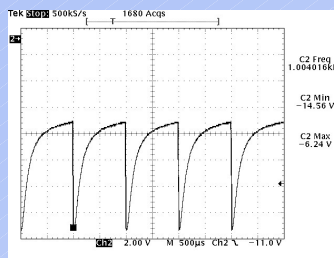
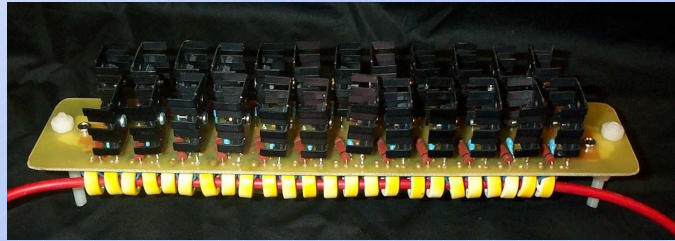
Nous avons reporté sur ces figures les variations à faible courant du temps de conduction et du temps d'ouverture en fonction de la quantité de charge  $Q_G$  injectée par la gâchette.

On constate sur la première figure que le temps de conduction  $T_c$  augmente avec la quantité de charge injectée par la gâchette jusqu'à saturer aux alentours d'une trentaine de microsecondes.

La deuxième figure montre que le temps d'ouverture  $T_o$  varie comme le temps de conduction  $T_c$ , c'est-à-dire augmente avec la quantité de charge  $Q_G$  injectée par la gâchette avant de saturer.

La somme du temps de conduction et du temps d'ouverture  $T_o + T_c$  permet de définir la fréquence de fonctionnement du système.

### Application faible courant du commutateur à thyristors



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



A partir de ces résultats sur le fonctionnement des thyristors à faible courant, il a été développé pour la société Recycl'air une alimentation pulsée pour électrofiltres dans le cadre d'une thèse actuellement en cours au laboratoire.

Cette alimentation est essentiellement composée d'un commutateur à thyristors comme celui qui est présenté sur cette photo.

Une grande répétitivité des impulsions a été obtenue améliorant ainsi les performances de l'électrofiltre.



### Conclusions sur les commutateurs à thyristors

- Jitter < ns
- $\underline{I_{SM}} > \underline{I_L}$  :  $T_f \sim$  quelques centaines de ns
  - \*  $V_{AKM} \nearrow \Rightarrow T_f \searrow$
  - \*  $I_{SM} \nearrow \Rightarrow T_f \nearrow$
- $\underline{I_{SM}} < \underline{I_L}$  :  $T_f \sim$  quelques dizaines de ns
  - \*  $T_f$  indépendant de  $V_{AKM}$
  - \*  $Q_G$  important et  $T_{fG}$  rapide,  $T_f$  faible
  - \*  $T_{f-n \text{ thyristors}} = T_{f-1 \text{ thyristor}}$
  - \* Fonctionnement en fréquence (jusqu'à quelques kHz)



- 1 – Les puissances électriques pulsées
- 2 – Commutateurs à thyristors
- 3 – Génération d'impulsions haute tension**
- 4 – Commutation d'éclateurs à air
- 5 – Conclusion générale et perspectives



Je vais maintenant présenter, dans cette troisième partie, le fonctionnement de deux dispositifs amplificateurs de tension : le générateur de Marx et le transformateur d'impulsions.

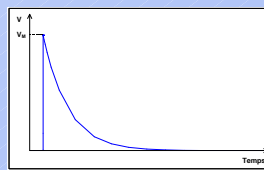
Et je vais commencer par le générateur de Marx.

## Principe d'un générateur de Marx

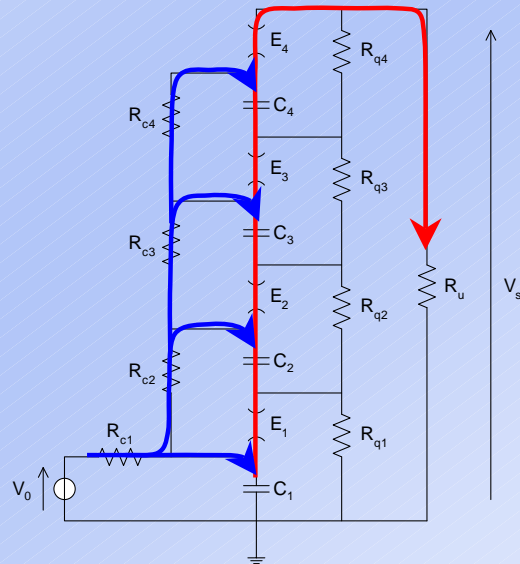
⇒ Charge à  $V_0$  de  $n$  condensateurs en parallèle

⇒ Décharge des  $n$  condensateurs en série

$$V_S = n \times V_0$$



$E_i$  : commutateurs déclenchés

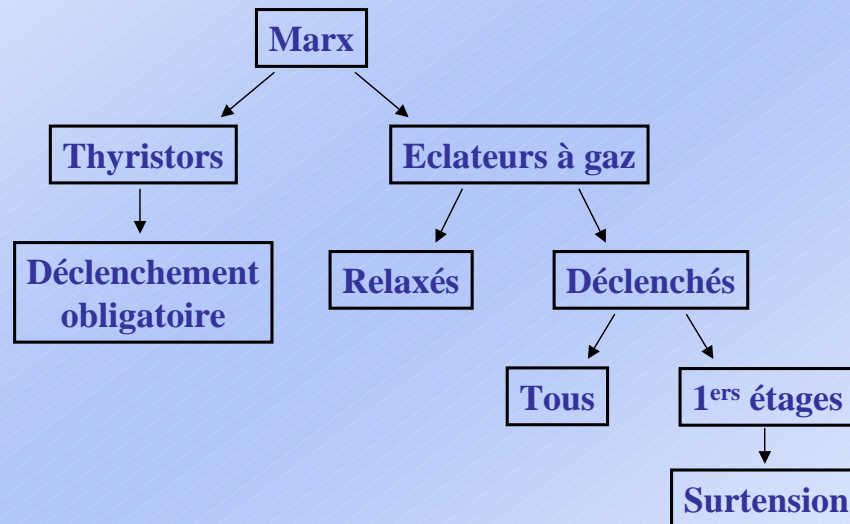


Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Le principe d'un générateur de Marx consiste à charger, à une tension initiale  $V_0$ ,  $n$  condensateurs associés en parallèle puis à les décharger après les avoir associés en série au moyen de commutateurs, de façon à appliquer la tension  $n \times V_0$  sur l'utilisation.

L'onde de tension générée est de forme bi-exponentielle.

**Déclenchement d'un générateur de Marx**

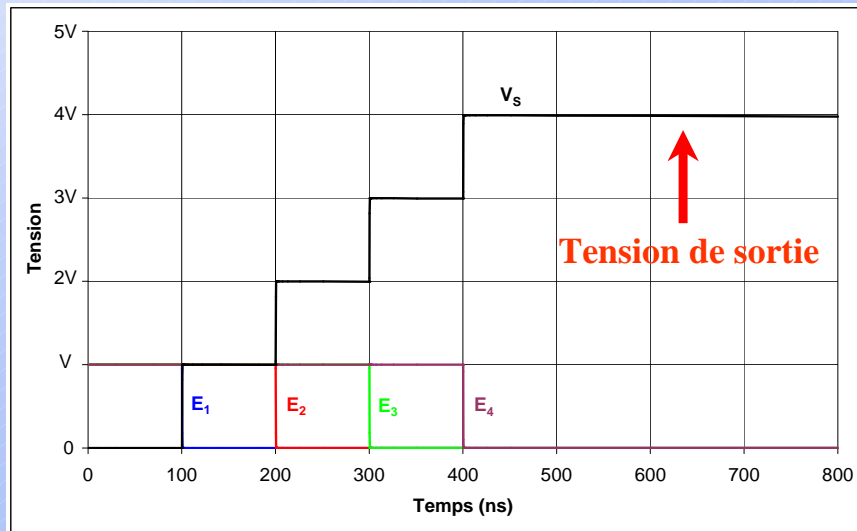
Le problème de cette étude réside dans le déclenchement des commutateurs du générateur de Marx.

Nous utilisons, soient des commutateurs à thyristors, soient des éclateurs à gaz. Les commutateurs à thyristors sont obligatoirement déclenchés alors que les commutateurs à gaz peuvent fonctionner soit en mode relaxé soit en mode déclenché.

Dans ce mode de fonctionnement, deux solutions se présentent alors : soient tous les commutateurs sont déclenchés, soient seuls les premiers étages le sont ce qui nécessite alors l'auto-application systématique d'une surtension transitoire aux bornes des éclateurs des étages supérieurs à déclencher.

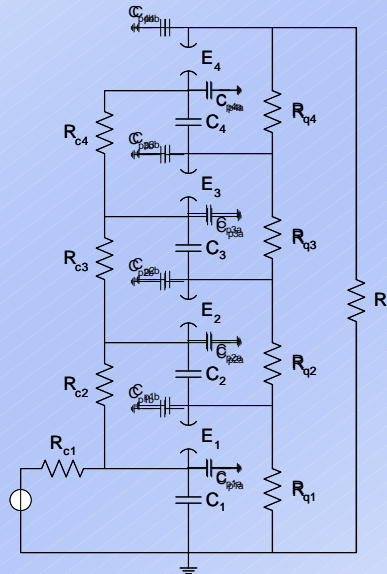
Nous allons donc analyser le fonctionnement d'un générateur de Marx à quatre étages dont la résistance d'utilisation est, dans un premier temps, infinie.

## Générateur de Marx classique



Nous avons reporté en couleur, sur cette figure, la simulation des potentiels apparaissant aux bornes des différents commutateurs E et à la sortie lorsqu'on leur impose de commuter les uns après les autres. On note qu'à la commutation de l'éclateur du premier étage, chargé à la tension  $V_0$ , la différence de potentiel reportée sur les autres éclateurs est  $V_0$ . Cette tension n'est cependant pas suffisante à la commutation correcte des éclateurs.

## Générateur de Marx classique



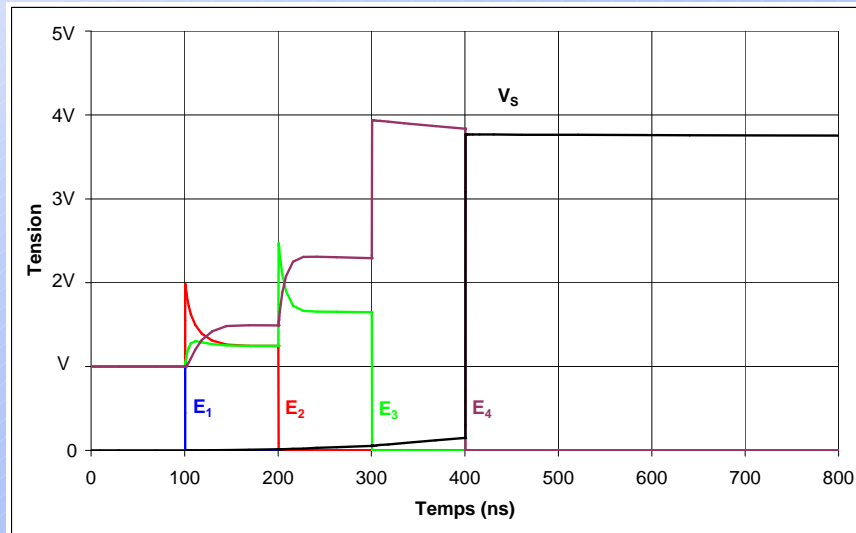
Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Si on veut comprendre le fonctionnement d'un générateur de Marx, il faut compléter son schéma par la prise en compte de condensateurs parasites contribuant à l'apparition de surtensions.

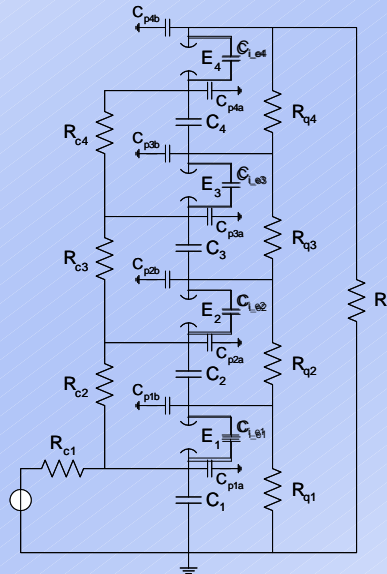
D'abord, les condensateurs parasites de chacune des deux électrodes des éclateurs par rapport à la masse.

## Générateur de Marx classique



Qui font apparaître une différence de potentiel transitoire de  $2V_0$  aux bornes de l'éclateur du deuxième étage à la commutation du premier.

## Générateur de Marx classique

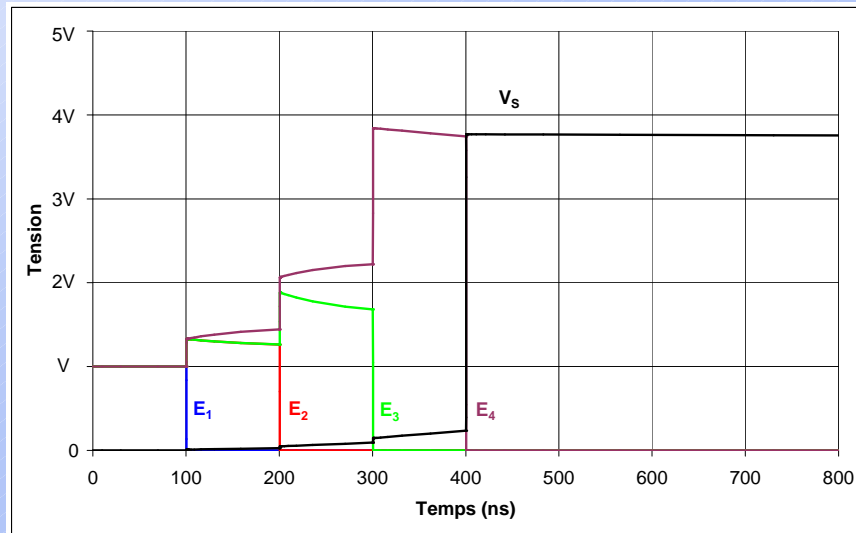


Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



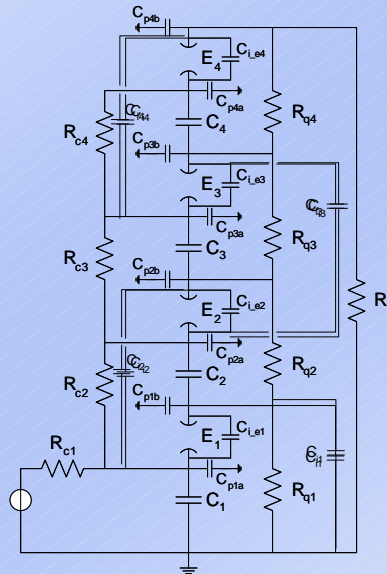
Ensuite, les condensateurs parasites inter-électrodes constitués des armatures des éclateurs.



**Générateur de Marx classique**

Ceux-ci font apparaître des surtensions plus faibles mais qui durent plus longtemps.

### Générateur de Marx classique

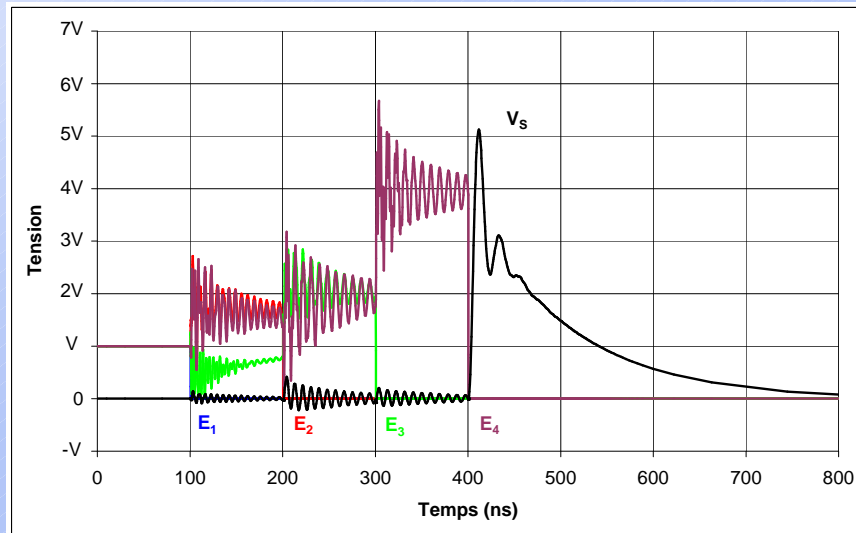


Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Enfin, les condensateurs parasites entre étages.

## Générateur de Marx classique



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



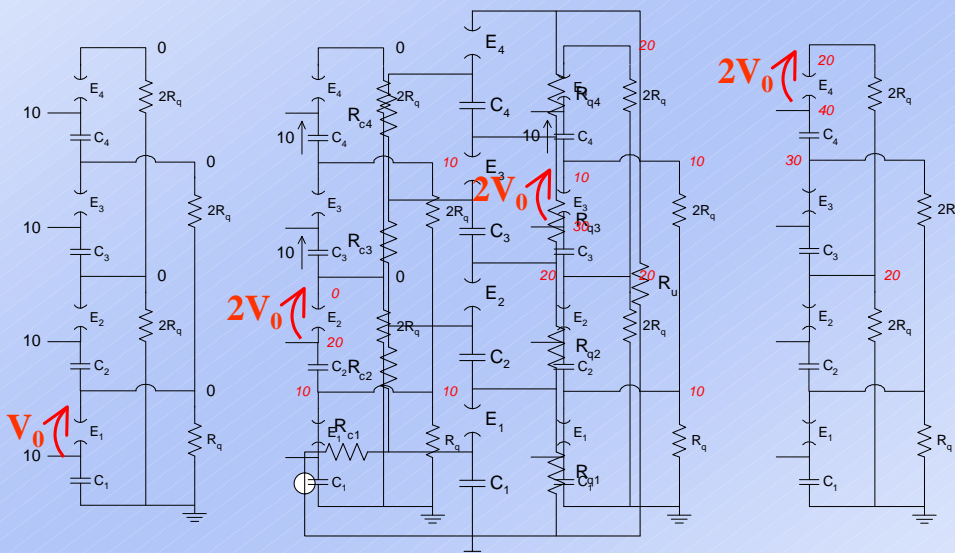
Qui font également apparaître une différence de potentiel transitoire de  $2V_0$  aux bornes de l'éclateur du deuxième étage.

Si l'on considère maintenant que la résistance d'utilisation n'est plus infinie, alors les surtensions sont plus faibles.

Parfois, la présence de self-inductances génère des oscillations à la fermeture des éclateurs. Si leur fréquence est suffisamment basse, elles peuvent être à l'origine du déclenchement des éclateurs par application d'une surtension.

La présence d'éléments parasites s'avère donc déterminante pour le fonctionnement des générateurs de Marx classique.

## Générateur de Marx à résistances décalées



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Il est cependant désagréable de conditionner le fonctionnement d'un montage à la présence de ces éléments parasites dont on maîtrise mal les valeurs.

Dans l'étude que nous venons de mener sur le générateur de Marx classique, chaque étage est référencé à l'étage inférieur par l'intermédiaire d'une résistance.

Pour palier aux aléas de déclenchement dus à cette configuration, une solution consiste à décaler les résistances de référence de chaque étage de façon à établir une différence de potentiel instantanée égale à  $2V_0$  aux bornes de chaque éclateur lors de sa commutation.

Ce phénomène se retrouve à tous les étages, comme on peut le voir sur ces figures.

La commutation des éclateurs est, alors, nettement améliorée et indépendante de la qualité du montage.

### Générateurs de Marx à éclateurs à air

#### PRINCIPE :

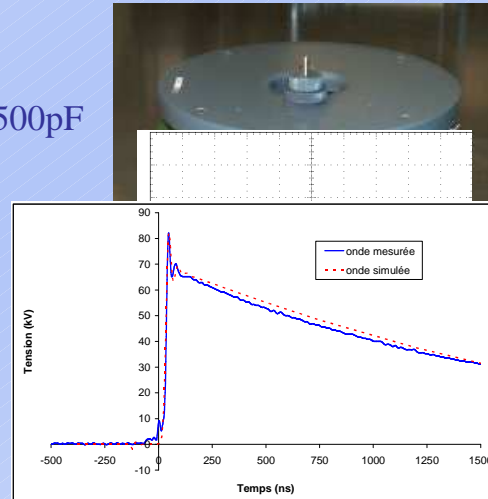
- 4 commutateurs à air
- Tension de charge de 50kV
- Capacité équivalente de 140 et 500pF

#### RESULTATS :

- Amplitude de 170kV
- Temps de montée de 30ns
- Fréquence de répétition 1kHz

#### INTERETS :

- Temps de montée rapide
- Fréquence
- Modularité
- Robustesse



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Deux générateurs de Marx à éclateurs à air et à résistances de référence décalées ont été réalisés. Ces générateurs ont été conçus de façon à être modulables, c'est-à-dire que leurs résistances peuvent être facilement changées. Par contre, les condensateurs sont fixes et leurs valeurs ont été choisies pour favoriser la fréquence de répétition des impulsions pour l'un des générateurs (560pF) et l'aspect énergétique pour l'autre (2nF).

Ils sont donc constitués de...

Leurs inconvénients majeurs résident dans leur dynamique de fonctionnement et dans leur reproductibilité.

Une simulation probante de ces deux générateurs a été effectuée à l'aide du logiciel Spice, comme le montre cette figure, pour une configuration donnée.

## Générateurs de Marx à thyristors

### PRINCIPE :

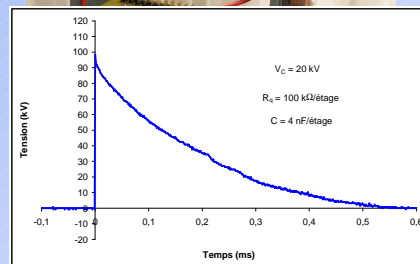
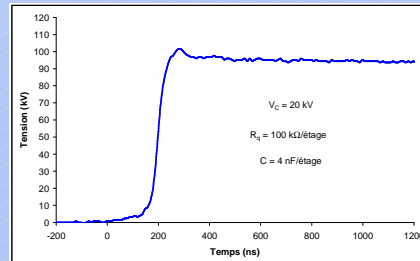
- 6 commutateurs à 20 thyristors
- Tension de charge de 20kV
- Capacité équivalente de 700pF

### RESULTATS :

- Amplitude de 100kV
- Temps de montée de 90ns
- Rendement en tension de 85%

### INTERETS :

- Jitter faible (~ ns)
- CEM



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Sur le principe des commutateurs à thyristors, nous avons réalisé 2 générateurs de Marx à thyristors.

Le premier...

L'intérêt de cette technologie réside dans le fait que le jitter est faible de l'ordre de la nanoseconde. De plus, cette technologie permet de minimiser les problèmes de CEM.

## Générateurs de Marx à thyristors

### PRINCIPE :

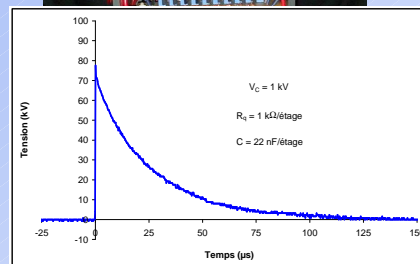
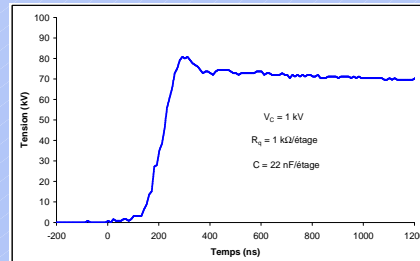
- 120 commutateurs à 1 thyristor
- Tension de charge de 1kV
- Capacité équivalente de 200pF

### RESULTATS :

- Amplitude de 80kV
- Temps de montée de 80ns
- Rendement en tension de 65%

### INTERETS :

- Ceux du générateur précédent
- Fonctionnement sur batterie
- Pas d'association  $\Rightarrow$  pas de risque



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Le deuxième générateur constitué à partir de la même technologie est composé...

Les intérêts sont les mêmes...

De plus, comme il n'y a pas d'association série, il n'y a plus de risque de surtensions sur les thyristors.

L'utilisation d'une tension de charge faible peut nous permettre de faire fonctionner le générateur sur batterie.

### Transformateur à résonance à ferrites

#### REALISATION :

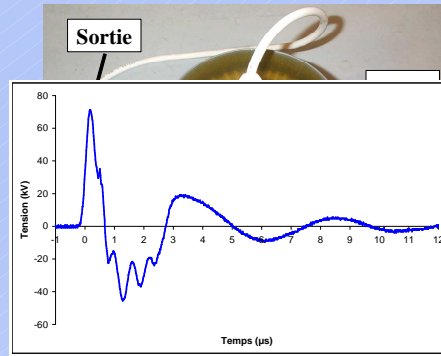
- 3 tores de ferrite
- 4 primaires – 36 secondaires
- Résine d'enrobage polyuréthane

#### RESULTATS :

- Amplitude de 70kV – Gain 7
- Temps de montée de 250ns
- Durée à mi-hauteur de 500ns

#### INTERETS :

- Fréquence de répétition de 500Hz
- Robustesse
- Compacité



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Le deuxième dispositif amplificateur de tension est le transformateur d'impulsions.

Sur ce principe, nous avons donc réalisé, de manière empirique, un transformateur d'impulsions constitué de 3 tores de ferrites accolés autour desquels sont bobinés 4 enroulements primaires et 36 secondaires et immergés dans une résine polyuréthane.

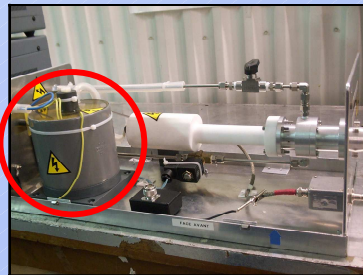
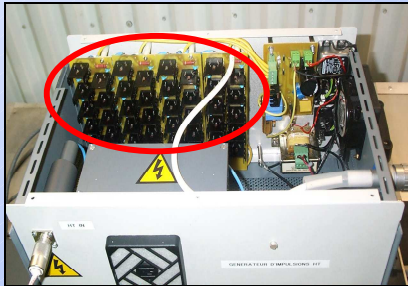
Une application de ce transformateur a été d'amplifier la tension délivrée sur son primaire par la décharge d'un condensateur à travers un commutateur à thyristors.

...

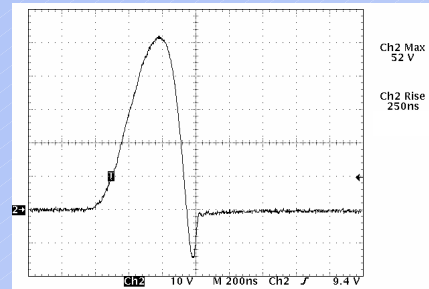
Ce système peut fonctionner à une fréquence de répétition de 500Hz. Il est robuste et relativement compact.



## Générateur d'impulsions à transformateur



Alimentation  
impulsionnelle



Transformateur à ferrites

+

Générateur ULB



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Ce dispositif a été utilisé comme alimentation pulsée d'un générateur d'impulsions 25kV/100ps réalisé au LGE pour le Centre d'Electronique de l'Armement.

Sur ces photographies, on distingue ici le commutateur à thyristors constitué de quatre circuits connectés en parallèle, composés, chacun, de dix thyristors associés en série. Chaque commutateur possède son propre condensateur de stockage. Et là on aperçoit le transformateur d'impulsions à ferrites associé au générateur subnanoseconde.

Cet oscillogramme présente l'allure des signaux obtenus en sortie du transformateur d'impulsions, à vide. Seule la première impulsion nous intéresse. L'ensemble a été réceptionné et fonctionne, maintenant, sur site.

- 1 – Les puissances électriques pulsées
- 2 – Commutateurs à thyristors
- 3 – Génération d'impulsions haute tension
- 4 – Commutation d'éclateurs à air**
- 5 – Conclusion générale et perspectives



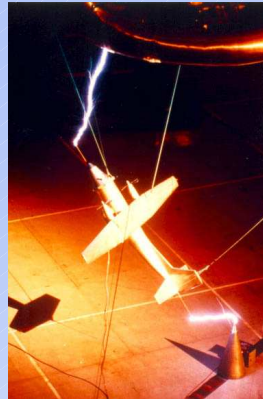
Je vais maintenant aborder la quatrième partie sur la technologie des commutateurs à air.

## Le générateur d'onde foudre SUPER DICOM - THALES

**FINALITE** : essais foudre sur des avions

Caractéristiques de l'onde :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_f < 10\mu\text{s} \\ I_M = 350\text{kA} \\ V_M = 250\text{kV} \end{array} \right.$$



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



L'étude qui m'a été proposée consiste à analyser la commutation des éclateurs à gaz du générateur d'onde foudre SUPER DICOM, réalisé par THALES pour le CEAT, afin d'en optimiser le fonctionnement.

Ce générateur, basé sur le principe du générateur de Marx, est utilisé afin d'effectuer des essais de foudroiement d'avions dont un exemple est visible sur cette photo.

Les caractéristiques de l'onde sont un temps de front inférieur à 10 $\mu$ s, une amplitude maximale de courant de l'ordre de 350kA et une tension de 250kV.

## Principe du générateur SUPER DICOM

✓ 5 générateurs de Marx associés en parallèle ( $\Sigma I$ ) :  
 $5 \times 70\text{kA} = 350\text{kA}$

✓ 5 étages par générateur de Marx ( $\Sigma V$ ) :  
 $5 \times 50\text{kV} = 250\text{kV}$

✓ double synchronisation :

➤ des étages de chaque générateur de Marx

➤ des générateurs de Marx entre eux



Ce générateur de Marx est constitué de cinq générateurs de Marx associés en parallèle qui permettent la sommation de leur courant pour obtenir les 350kA et chaque générateur de Marx est composé de cinq modules de stockage qui assurent la sommation des tensions pour fournir les 250kV.

Ces générateurs nécessitent une double synchronisation : des étages de chaque Marx et des Marx entre eux.

Ce sont ces deux synchronisations qui vont faire l'objet de la suite de notre étude.



Un des cinq générateurs de Marx associés en parallèle



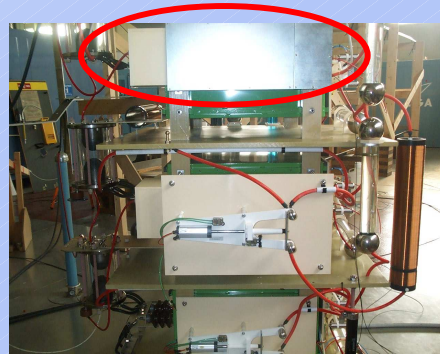
Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Voici sur cette photo un des cinq générateurs de Marx associés en parallèle où l'on aperçoit les condensateurs de stockage en vert.



Modules de stockage capacitif  
+  
éclateurs à gaz pressurisé



Commutateurs  
à thyristors

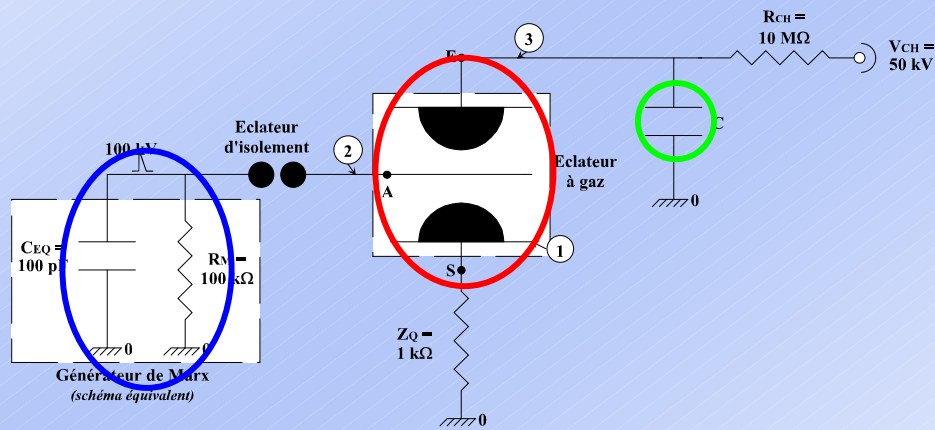


Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Et voici plus précisément un condensateur avec son éclateur à gaz pressurisé associé et sur cette photo nous apercevons le commutateur à thyristors protégé dans un boîtier blindé qui sert au déclenchement de l'éclateur à gaz.

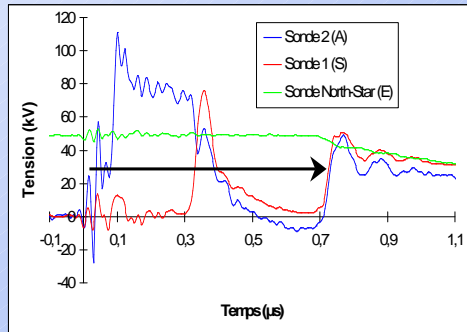
## Synchronisation des étages



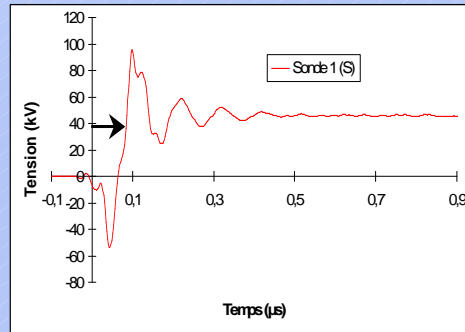
La synchronisation des étages d'un générateur de Marx s'effectue en minimisant le retard à l'amorçage de ses éclateurs ainsi que le jitter associé, ceci en jouant sur leurs distances inter-électrodes et sur la polarité de l'impulsion de déclenchement.

Le principe du montage expérimental est de faire commuter un condensateur de stockage vers une utilisation à travers un éclateur à gaz déclenché par une impulsion de tension délivrée par un générateur de Marx sur l'électrode intermédiaire de l'éclateur à gaz.

## Synchronisation des étages



Impulsion de déclenchement  
positive



Impulsion de déclenchement  
négative



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires

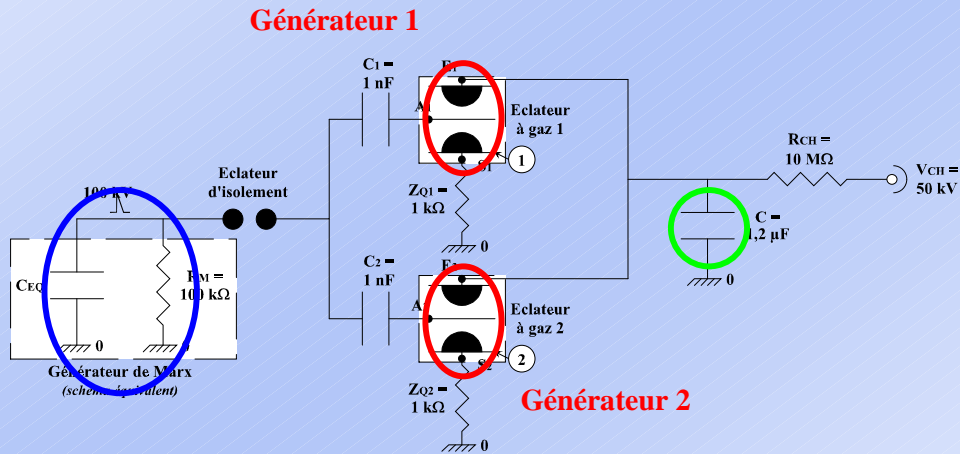


Sur cette première courbe, nous pouvons voir en bleu cette impulsion de déclenchement en polarité positive, en vert la décharge du condensateur et en rouge l'onde de tension générée en sortie de l'éclateur à gaz sur l'utilisation qui présente alors un retard par rapport à l'impulsion de déclenchement et un jitter importants certainement dus à un changement du sens du champ électrique au cours de la séquence de commutation.

Voici maintenant pour une polarité négative l'onde générée qui présente un retard beaucoup plus faible. Dans cette configuration, le sens du champ électrique ne s'inverse pas ce qui contribue à l'amélioration de la commutation.

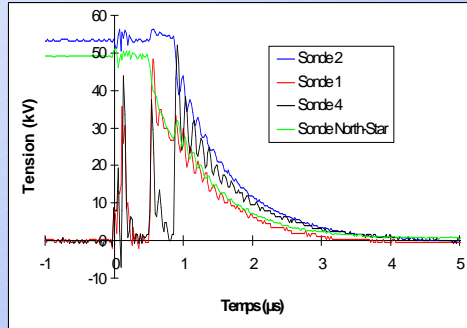


## Synchronisation des générateurs

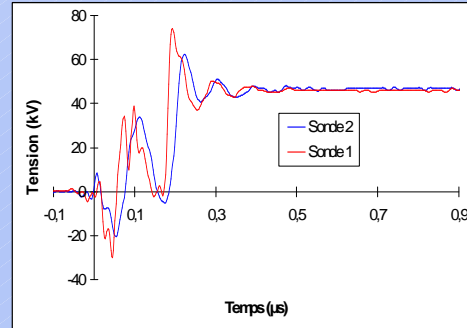


Nous nous intéressons maintenant à la synchronisation des générateurs de Marx entre eux, notamment à la synchronisation du premier étage de deux générateurs de Marx comme sur ce schéma, chacun étant déclenché par la même impulsion de commande.

## Synchronisation des générateurs



Impulsion de déclenchement  
positive



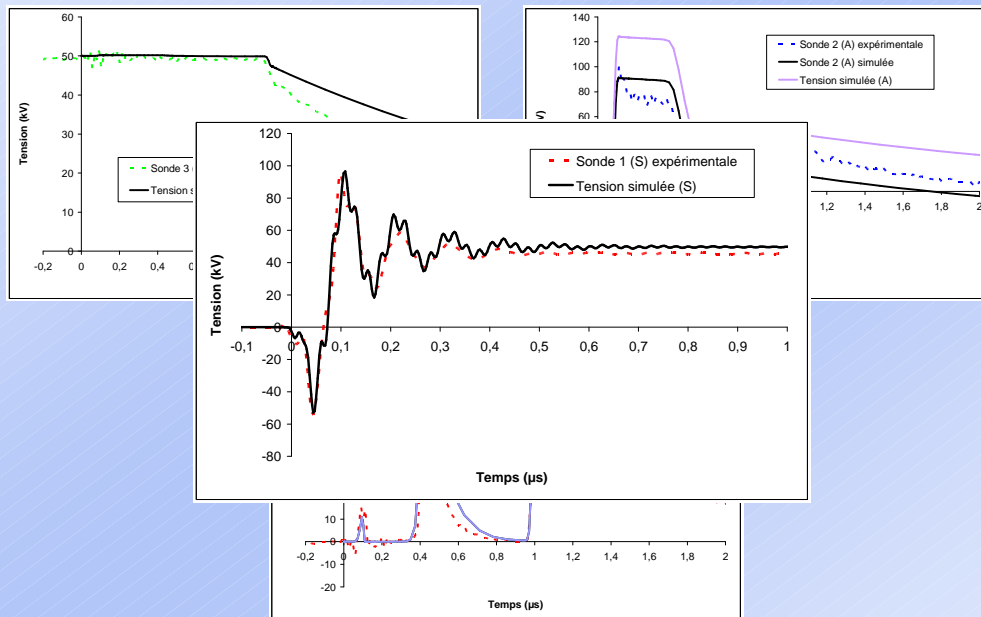
Impulsion de déclenchement  
négative



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires

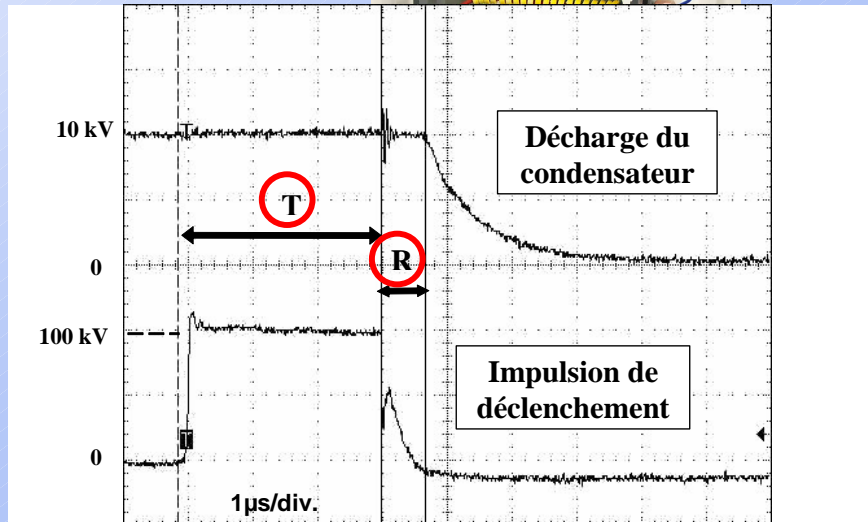


On montre là encore qu'une onde de déclenchement de polarité négative permet d'obtenir les meilleurs résultats sur les retards et le jitter que pour une onde de polarité positive.



Nous avons modélisé avec succès, à l'aide du logiciel Spice, la commutation d'un éclateur à gaz, dans un premier temps, déclenché par une impulsion de déclenchement positive. Ces trois figures représentent, respectivement, la décharge du condensateur de stockage, l'impulsion de déclenchement et celle recueillie au niveau de l'utilisation.

Puis, dans un deuxième temps, déclenché par une impulsion de déclenchement négative, qui donne un résultat probant sur cette impulsion générée en sortie de l'éclateur à gaz.

Déclenchement de  ctrodes

Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires

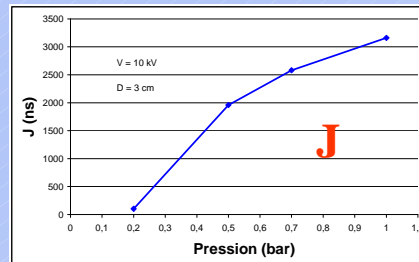
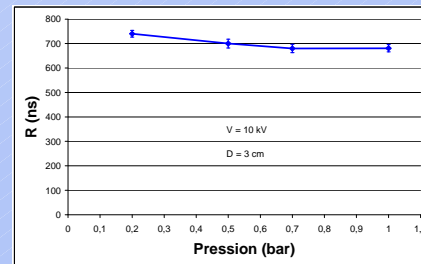
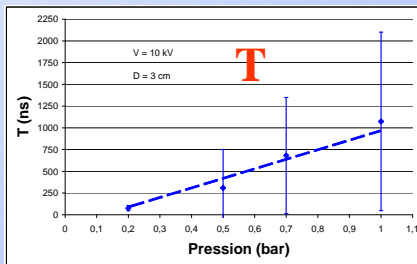


Après nous être intéressé à la commutation d'un éclateur à trois électrodes, nous nous sommes dirigés vers l'étude de celle d'un éclateur à deux électrodes afin d'en comparer les performances.

Le principe du montage expérimental consiste donc à faire commuter un condensateur de stockage, vers une résistance d'utilisation, à travers, cette fois-ci, cet éclateur à gaz, constitué de deux électrodes en graphite et de son manchon de plexiglas. Il est commandé par une impulsion de tension positive, délivrée par un générateur de Marx à thyristors, et appliquée sur l'électrode d'entrée de l'éclateur à gaz.

On obtient alors ces ondes de tension caractéristiques. Le retard à la commutation T et le retard à la décharge R du condensateur sont les deux paramètres qui vont nous permettre d'analyser l'influence de la variation de la distance inter-électrodes et de la pression sur la commutation de l'éclateur à gaz pressurisé.

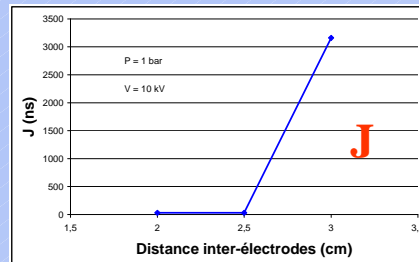
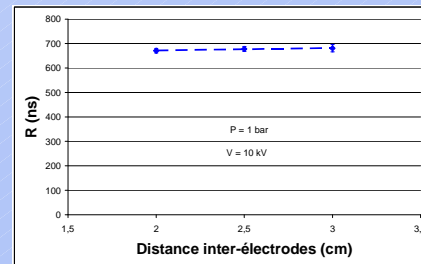
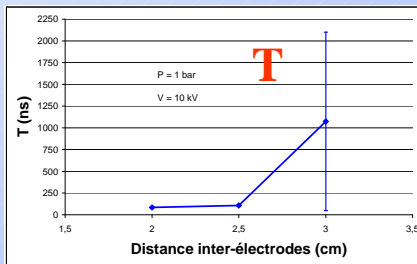
## Influence de la pression



Nous analysons d'abord l'influence de la pression sur ces deux retards, à tension à commuter et distance inter-électrodes constantes.

Le retard à la commutation  $T$  et le jitter associé diminuent fortement avec la pression  $P$ . En effet, dans la zone de la courbe de Paschen où nous nous situons, le champ disruptif diminue avec la pression et, comme l'amplitude de l'impulsion de déclenchement reste constante, la surtension augmente avec la diminution de la pression : le retard à la commutation  $T$  et le jitter correspondant diminuent en conséquence.

## Influence de la distance inter-électrodes



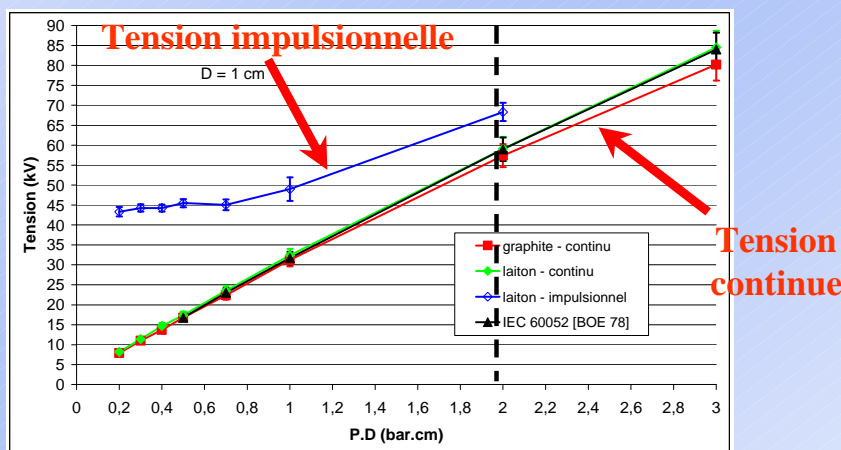
Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Nous nous intéressons maintenant à l'influence de la distance inter-électrodes, à pression atmosphérique et tension à commuter constante. La courbe de Paschen étant tracée en fonction du produit  $P.D$ , cela revient au même de diminuer la distance inter-électrodes à pression constante que de diminuer la pression à distance fixe, avec cependant l'avantage de pouvoir travailler à pression atmosphérique.

Nous obtenons des résultats intéressants : pour une distance inter-électrodes plus faible, à pression atmosphérique, les valeurs du retard à la commutation  $T$  et du jitter associé sont relativement faibles.

### Eclateur sphère/sphère sous tensions continue et impulsionnelle



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



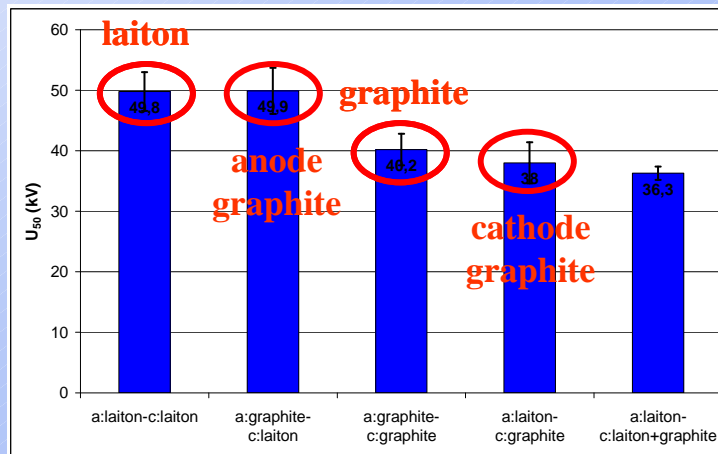
Nous complétons cette étude par la caractérisation diélectrique de notre éclateur à deux électrodes sous tensions continue et impulsionnelle.

Nous avons donc tracé les courbes de type Paschen reliant la tension disruptive au produit pression fois distance inter-électrodes.

Sous tension continue, nous observons que la courbe verte, obtenue pour des électrodes en laiton, est confondue avec celle en noir obéissant aux conditions expérimentales de la norme internationale. Par contre, lorsque les électrodes sont en graphite, la courbe rouge s'infléchit au-delà de 2 bar.cm. Cette anomalie peut être expliquée par l'émission par effet de champ au niveau cathodique.

Sous tension impulsionnelle, la courbe bleue, obtenue, pour une onde bi-exponentielle donnée, pour deux électrodes en laiton, majore les courbes précédentes. En effet, le déclenchement de la décharge nécessite un niveau de tension suffisant maintenu pendant un temps qui doit être supérieur au temps de retard statistique d'apparition du premier électron germe. Et à basse pression, cet écart est d'autant plus important que les molécules susceptibles de fournir un électron germe sont plus rares, donc que le retard statistique est plus long.

## Influence de la nature des électrodes



➤ Mise en évidence du rôle de la cathode en graphite comme source d'électrons germes pour le claquage



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Nous avons comparé, dans les mêmes conditions expérimentales, les caractéristiques d'un commutateur dont les électrodes sont en graphite à un éclateur dont les électrodes sont en laiton.

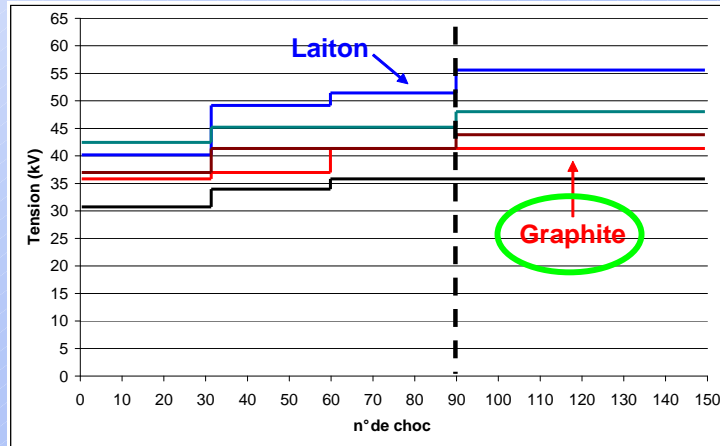
On note que la valeur de la tension de claquage est plus basse dans le cas où les deux électrodes sont en graphite que dans le cas où les deux électrodes sont en laiton.

De plus, lorsque seule la cathode est en graphite, la tension de claquage est voisine de celle obtenue lorsque les deux électrodes sont en graphite. En revanche, si seule l'anode est en graphite, on retrouve alors la tension de claquage obtenue lorsque les deux électrodes sont en laiton.

On a donc mis en évidence le rôle de la cathode en graphite comme source d'électrons germes pour le claquage.



## Conditionnement des électrodes



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Au cours de nos essais, nous avons également noté que la tension de claquage évoluait en fonction du nombre de chocs. On voit donc que la tension de claquage tend vers une valeur asymptotique atteinte à partir du 90<sup>ème</sup> choc sur 150.

Cette augmentation constante de la tension de claquage avec le nombre de chocs pourrait s'expliquer par la disparition progressive des sites émissifs à la surface de la cathode au fur et à mesure que le nombre de chocs augmente. Il y a ainsi un conditionnement des électrodes quelle que soit la nature des électrodes.

Par contre, l'effet du conditionnement est moins important dans le cas où la cathode est en graphite.

- 1 – Les puissances électriques pulsées
- 2 – Commutateurs à thyristors
- 3 – Génération d'impulsions haute tension
- 4 – Commutation d'éclateurs à air
- 5 – Conclusion générale et perspectives**



Pour terminer, je vous propose de résumer l'essentiel des résultats expérimentaux et les perspectives qui en découlent.

## Conclusion générale

- ✓ **Commutateurs à thyristors :**
  - facilement synchronisable
  - jitter < ns
  - $I_S < I_L$  :
    - \* fréquence de répétition de quelques kHz
    - \*  $T_f \sim$  quelques dizaines de ns
- ✓ **Générateur de Marx à résistances décalées**
- ✓ **Transformateur à résonance à ferrites**
- ✓ **Succès des applications sur le générateur SUPER DICOM du C.E.A.T. et sur l'alimentation pulsée d'un générateur subnanoseconde**



Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires



Au cours de cette thèse, plusieurs dispositifs impulsionnels ont été réalisés.

La technologie des thyristors nous a permis de réaliser des commutateurs fonctionnant à une fréquence de quelques kHz pour des courants d'anode inférieurs au courant de latching.

Ces commutateurs à thyristors sont facilement synchronisables et présentent des jitters inférieurs à la nanoseconde.

Deux générateurs de Marx basés sur cette technologie ont été conçus.

Une nouvelle structure de générateur de Marx à éclateurs à gaz à résistances de référence décalées a été développée. Le déclenchement des éclateurs en est ainsi nettement amélioré.

Nous avons réalisé, de façon empirique, un transformateur d'impulsions haute tension fonctionnant à la résonance qui présente des performances intéressantes.

Ces nouvelles technologies ont été installées avec succès sur...

## Perspectives

- Comparaison des performances thyristor/MOSFET
- Etude théorique du transformateur à résonance à ferrites et utilisation de nanocristaux
- Etude approfondie du rôle des électrodes d'un éclateur à gaz
- Modélisation des commutateurs à thyristors et du transformateur à résonance à ferrites



Concernant les commutateurs à semiconducteurs, il serait intéressant de comparer les performances du MOSFET avec celles du thyristors, les premiers résultats obtenus avec les MOSFET étant très intéressants.

Etant donné que la conception du transformateur d'impulsions fonctionnant à la résonance est essentiellement empirique, il faudra envisager un approfondissement théorique de son étude et, notamment, tester d'autres matériaux tels que les matériaux nanocristallins.

Il sera intéressant de mener une étude plus approfondie sur l'influence de la nature des électrodes et de leur conditionnement sur la tenue disruptive d'un éclateur à gaz.

Il resterait également à réaliser une modélisation des commutateurs à thyristors ainsi que du transformateur d'impulsions.

Je vous remercie de votre attention.