

CHAPITRE VII

GENERATEURS DE HAUTE TENSION

Les générateurs de haute tension sont utilisés dans :

- les laboratoires de recherche scientifique ;
 - les laboratoires d'essai, pour tester les équipements haute tension avant leur utilisation (isolateur, câble, transformateur, appareils de coupure ...) ;
- remarque: par mesure de sécurité, les tensions d'essai utilisées sont bien entendu supérieures à la tension de service de l'équipement testé.
- de nombreuses applications utilisant la haute tension (rayons X, effet couronne, générateur d'ozone, séparation électrostatique, laser...).

Il y a trois types de tensions conventionnelles :

- Tension alternative
- Tension continue
- Tension de choc

D) GENERATEURS DE TENSION ALTERNATIVE

I.1) Transformateur élévateur

Le transformateur élévateur représente la source de haute tension la plus répandue et la plus utilisée dans la pratique. Ce sont des transformateurs de faible puissance (de quelques centaines de VA à quelques kVA) dont l'objectif principal est de procurer une haute tension au détriment du courant qui est de l'ordre du milliampère généralement. Ces transformateurs qui sont destinés principalement aux laboratoires d'essais, doivent avoir une très bonne isolation car ils sont appelés à supporter les nombreux claquages qui surviennent lors des tests.

La forme de la HT délivrée par un transformateur HT est généralement différente de la forme sinusoïdale, sans toutefois dépasser les tolérances permises. Ces transformateurs possèdent généralement une borne de l'enroulement qui est reliée à la terre.

De nombreux transformateurs sont des transformateurs à point milieu (voir figure).

Pour des tensions supérieures à 750 kV, le coût, le transport et l'encombrement deviennent très gênants; On préfère alors recourir aux transformateurs montés en cascade.

I.2) Circuit résonnant

Dans les essais réalisés en haute tension, quelques fois il se produit une explosion de l'équipement testé, suite à l'apparition d'une forte surtension générée par résonance électrique.

Exemple : considérons un isolant de capacité C alimenté par une Haute Tension délivrée par un transformateur (Figure 2).

$r_1 + jL_1\omega$: impédance de l'enroulement primaire du transformateur

$r_2 + jL_2\omega$: impédance de l'enroulement secondaire du transformateur

$L\omega$: impédance shunt du transformateur, généralement négligée devant $L_1\omega$ et $L_2\omega$.

C : charge capacitive d'impédance $1/\omega C$.

$$U = (r_1 + r_2)I + j\left(L_1\omega + L_2\omega - \frac{1}{\omega C}\right)I$$

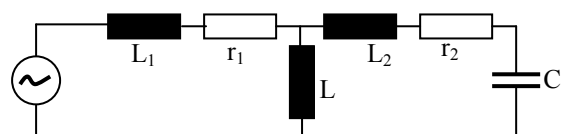


Figure 2 : Circuit électrique équivalent du transformateur et de l'isolant testé

Si par hasard $\omega(L_1+L_2)\approx\frac{1}{\omega C}$, une résonance accidentelle se produit, le courant devient tellement grand que la surtension aux bornes de la charge atteint jusqu'à 20 à 50 la tension appliquée et peut provoquer une explosion de la charge.

Le phénomène de résonance est mis à profit pour produire de très hautes tensions (figure 3) ; une impédance de réglage variable insérée en série avec la circuit du transformateur permet de régler et d'augmenter la tension à des valeurs très grandes (jusqu'à 600 kV).

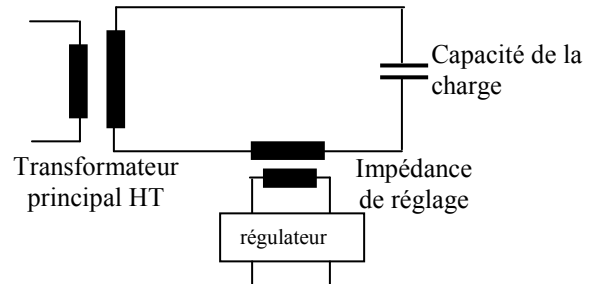


Figure 3 : Circuit résonnant

Le régulateur, alimenté par une source BT alternative, règle la tension en ajustant la valeur totale de l'impédance réactive.

Les circuits oscillants sont utilisés surtout dans les essais d'équipement à grande capacité, comme les câbles HT par exemple.

Remarque : si l'on a besoin d'une tension plus grande, on utilise plusieurs circuits résonants en série.

Ce type de générateur est spécialement avantageux lorsque la capacité de l'objet en essai est élevée, tel que les câbles HT par exemple. L'avantage spécifique est que la tension délivrée est pratiquement sinusoïdale et qu'une compensation de l'énergie réactive s'en suit (résonance série).

II) GENERATEURS DE TENSION CONTINUE

La haute tension continue est utilisée dans de nombreuses applications, telles que :

- Réseaux HVDC (High Voltage Direct Current)
- Recherche fondamentale : il est plus facile de travailler et d'analyser les phénomènes avec une tension constante qu'avec une tension constamment variable.
- De nombreuses applications nécessitent une tension continue (rayons X de la radiologie, séparation électrostatique, filtre électrostatique...).
- Dans les applications où les essais de test d'équipement à charge capacitive sont très nombreux ; pour des raisons économiques on évite la tension alternative.

II.1) Redresseur de tension alternative

a) Redresseur à simple alternance :

avec :

C : capacité de lissage du redresseur + capacité de l'objet en essai + capacités parasites.

R : résistance de l'objet testé + résistance de fuite du condensateur de lissage.

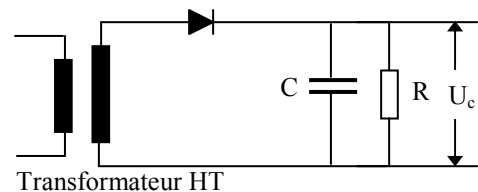
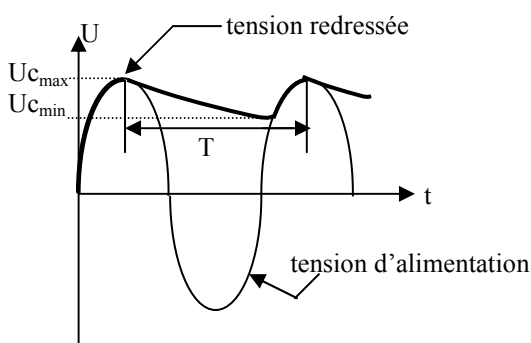
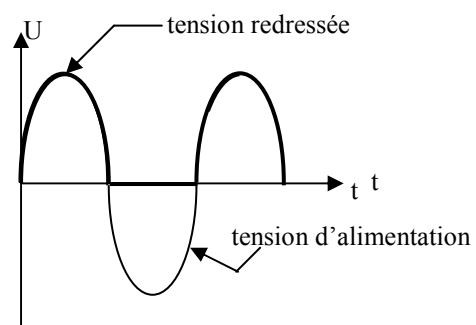


Figure 4 : redresseur à simple alternance en charge



Uc avec Capacité de lissage



Uc sans Capacité de lissage

Diode haute tension :

Elle est équivalente à la mise en série de n diodes conventionnelles. Le nombre de diodes n est déterminé suivant la tension inverse à supporter par l'ensemble. Par exemple, pour redresser une tension de 100 kV, on met en série 100 diodes de 1000 V chacune pour avoir une diode haute tension de 100 kV.

b) Redresseur double alternance :

Contrairement au redresseur à simple alternance, l'alternance négative est également redressée. Il n'y a pas de très grande différence entre les montages redresseurs à simple et à double alternance, en présence d'une capacité de lissage (figure 7).

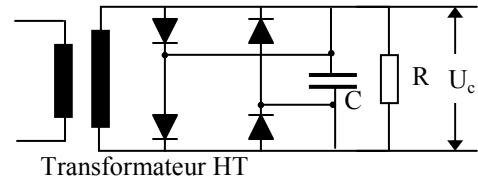


Figure 6 : Redresseur à double alternance en charge (pont de Graëtz)

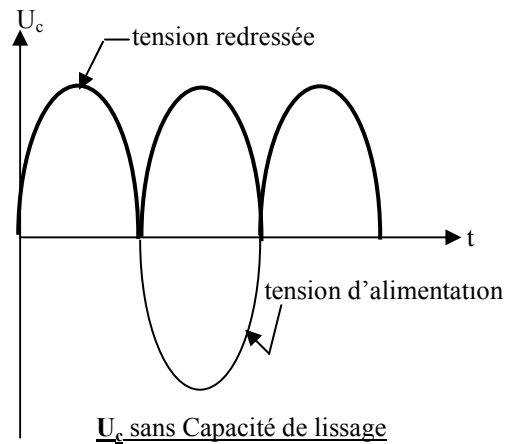
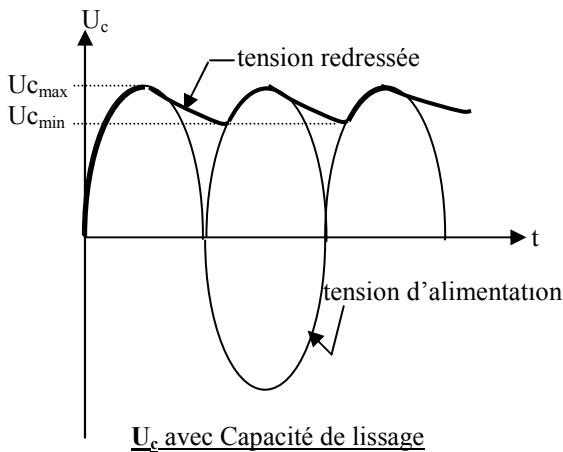


Figure 7 : courbes des tensions redressées délivrées par un pont de Graëtz.

c) Doubleur de tension :

Il y a plusieurs types de doubleurs de tension, mais le principe est le même; Le plus répandu est le doubleur de Schenkel.

Doubleur de Schenkel :

Pendant l'alternance négative le condensateur C_1 se charge à la tension V_{max} , à l'alternance suivante cette tension qui s'ajoute à la tension du transformateur donne une tension aux bornes de C égale à $2 V_{max}$. La tension à vide obtenue à la sortie est donc $U_c = 2 V_{max}$ (figure 8 et 9).

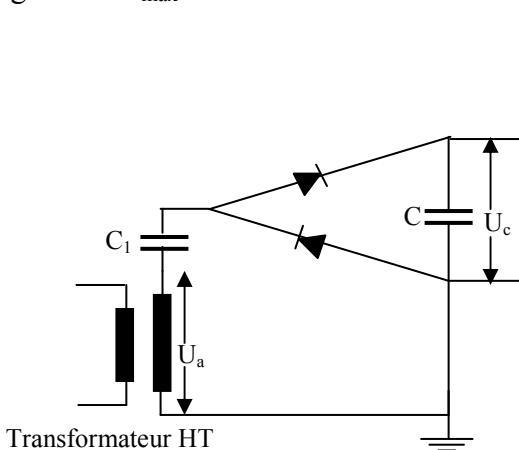


Figure 8 : Doubleur de Schenkel

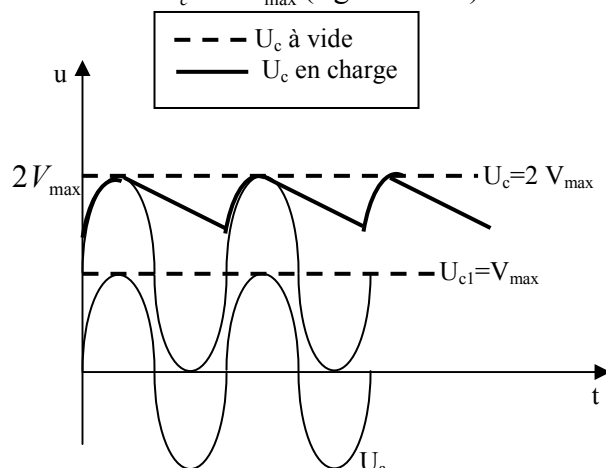


Figure 9 : Courbes des tensions redressées délivrées par le doubleur de Schenkel

Remarque : l'avantage du doubleur de Schenkel est qu'il constitue l'élément de base du redresseur en cascade.

d) Redresseur en cascade :

La cascade, appelée cascade de Greinacher ou de Cockcroft-walton, est constituée par une pile de doubleurs de type Schenkel.

Comme chaque étage délivre une tension à vide égale à $2V_{max}$, la tension obtenue (à vide) est $U_c = 2nV_{max}$ avec n : nombre d'étages.

En charge : $U_c = 2nV_{max} - \Delta U$

avec $\Delta U = \frac{I_R}{fC} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{n}{6} \right)$ où $I_R = \frac{U_c}{R}$

Chaque diode doit supporter une tension inverse égale à $2V_{max}$.

Remarque : le nombre optimal d'étages ne dépasse pas généralement 10, car au delà la chute de tension devient trop importante. Ce type de générateur délivre une tension qui peut atteindre 5 MV ; mais l'ordre de grandeur du courant délivré qui est de 10 mA reste faible.

II.2) Multiplicateur de tension

La première phase consiste à fermer les interrupteurs S_1 pour charger en parallèle les condensateurs C_i . Après, on ouvre les interrupteurs S_1 et on ferme S_2 : les tensions des condensateurs C_i qui sont maintenant en série, s'ajoutent pour donner aux bornes de C une tension de sortie $U_c = nU_0$.

avec n : nombre de condensateurs C_i .

Remarque : ce générateur qui ne peut être utilisé qu'une fois les condensateurs chargés, a une durée d'application bien déterminée (qui dépend de l'énergie emmagasinée dans le condensateur et de la constante de décharge) car quand les condensateurs se déchargent, la tension tombe à zéro.

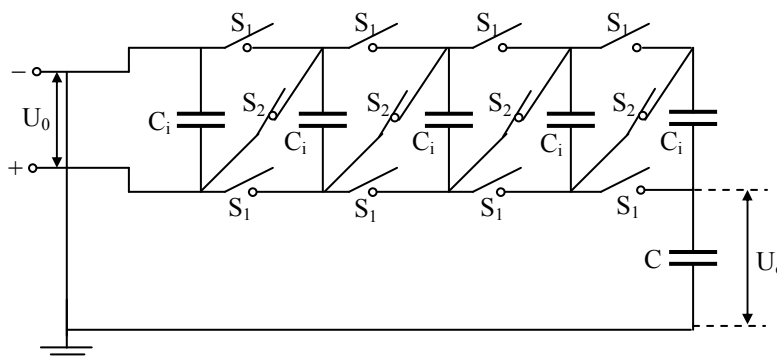


Figure 11 : Multiplicateur de tension

II.3) Générateurs électrostatiques : (Van de Graff)

Utilisé entre autres dans les laboratoire de recherche de physique nucléaire.

Principe de fonctionnement :

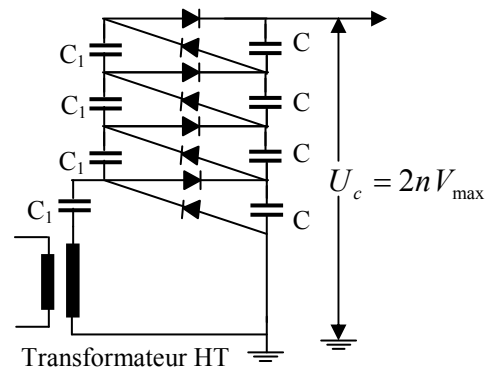
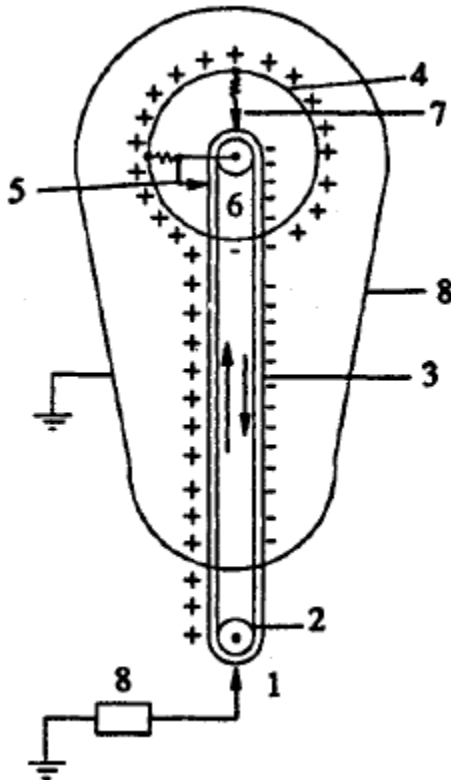


Figure 10 : Cascade de Greinacher ou de Cockcroft-walton à vide

Un ensemble d'électrode-pointes ou une lame très fine (électrode couronne) charge par effet couronne une courroie isolante. Celle-ci qui tourne avec une vitesse réglable, introduit les charges dans la partie supérieure du générateur (sphère) où elles sont prélevées par le collecteur. Les quelques charges qui « échappent » au collecteur sont neutralisées par effet couronne grâce à des aiguilles fixées sur la paroi interne de l'électrode haute tension. En arrivant en bas, ces charges négatives sont neutralisées par l'électrode couronne.

L'électrode sphérique continue de stocker les charges jusqu'à atteindre des tensions, sphère-terre, considérables. Le générateur Van de Graaff n'est pas très utilisé car le courant délivré est faible (de l'ordre du μA), mais la tension de sortie peut atteindre jusqu'à une centaine de MV.



1. Pointe créant des charges par frottement
2. Poulie entraînée par moteur
3. Bande isolante transporteuse de charges
4. Electrode HT
5. Collecteur de charges
6. Poulie supérieure isolée de la HT
7. Pointe pour décharger le surplus de charges.
8. Enceinte métallique mise à la terre.

III) GENERATEURS DE TENSIONS DE CHOC

Définition : La tension de choc (ou impulsion) est une très haute tension unidirectionnelle, appliquée pendant un temps très bref de l'ordre de quelques μs . C'est un courant ou une tension qui croît rapidement jusqu'à une valeur crête, puis décroît jusqu'à zéro.

Les générateurs de choc sont nécessaires pour :

- Simuler les surtensions des lignes comme l'onde de la foudre par exemple, pour l'étude et la recherche.
- réaliser des tests d'essais sur les appareillages haute tension destinés à fonctionner lors des surtensions, tels que les appareils de protection contre les surtensions.

Remarque : l'impact d'un coup de foudre sur un réseau électrique génère une onde de tension sur la ligne qui crée dans l'enroulement des transformateurs une distribution inégale du potentiel et provoque la détérioration de l'isolement.

Tous les générateurs de choc sont identifiés par les deux constantes de temps t_1 et t_2 :

$$t_1 = 1,67(T_{90} - T_{30}) \text{ et } t_2 = T_{50}.$$

L'onde de choc standard normalisée pour l'étude de :

- la foudre est l'onde 1,2/50 μs ($t_1 = 1,2 \mu s$ et $t_2 = 50 \mu s$).
- la surtension de manœuvre : l'onde 250/2500 μs ($t_1 = 250 \mu s$ et $t_2 = 2500 \mu s$).

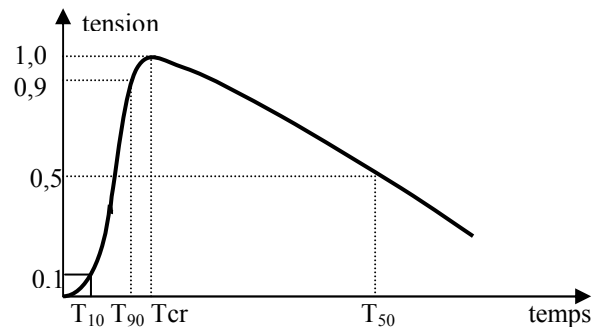


Figure 12 : Onde de choc conventionnelle

Remarque : le temps T_{cr} de montée à la valeur crête n'est pas utilisé car la crête est souvent plate et on distingue mal le maximum.

Le temps de montée à la valeur crête T_{cr} est appelé **temps de front**, et le temps de diminution T_{50} est appelé **temps de queue**.

III.1) Générateur de choc à un étage

La tension continue V charge le condensateur C_1 jusqu'à produire le claquage de l'éclateur E ; une tension brusque (choc) est ainsi appliquée aux extrémités de la charge capacitive C_2 .

C_1 : capacité de choc (réservoir d'énergie)

C_2 : capacité de l'objet en essai ;

$$C_1 = (10 \dots 20) C_2$$

R_1 : résistance de front d'onde (série) ;

R_2 : résistance de queue d'onde (parallèle) ;

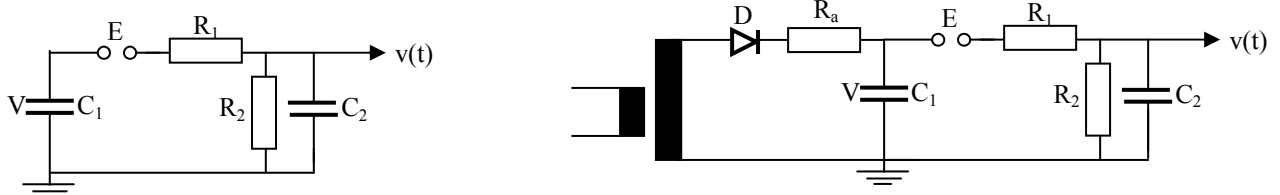


Figure 13 : Générateur de choc à un étage

En général, le condensateur C_1 se charge par l'intermédiaire d'un transformateur HT associé à une diode D . la résistance d'amortissement R_a empêche une charge trop rapide. La constante de temps lors du processus de charge $\tau = R_a C_1$ est de l'ordre de 10 à 20 s.

Lorsque la tension disruptive U_0 de l'éclateur E est atteinte, C_1 se décharge brusquement dans C_2 à travers la résistance de front R_1 . la résistance de queue d'onde R_2 étant beaucoup plus grande que R_1 , les capacités C_1 et C_2 vont se décharger ensuite plus lentement dans cette résistance R_2 .

Les résistances R_1 et R_2 servent à contrôler les constantes de temps respectivement de front et de queue de l'onde. Ainsi, un temps de front bref requiert une charge rapide du condensateur C_2 , et un temps de queue long nécessite une décharge plus lente ; ceci est réalisé en choisissant une résistance R_2 très grande par rapport à R_1 .

Quand $R_2 \gg R_1$, au moment de l'amorçage de l'éclateur, toute la tension U est pratiquement appliquée à R_1 et C_2 en série. La charge du condensateur C_2 est d'autant plus rapide que le produit $R_1 C_2$ est petit.

Calcul de la tension de choc : (EXERCICE)

Tension transitoire :

La conception et la réalisation des équipements utilisés dans les réseaux haute tension tiennent compte surtout à se prémunir contre les *surtensions transitoires de manœuvre* qui sont les plus fréquentes. Le réglage des résistances R_1 et R_2 de chaque étage permet de contrôler les temps de front et de queue de l'onde, et offre la possibilité de disposer à la sortie soit d'une tension de choc (pour simuler la foudre par exemple) soit d'une surtension transitoire.

III.2) Générateur de choc à plusieurs étages (Générateur de Marx)

Des tensions continues plus élevées sont obtenues avec le générateur de Marx, c'est un ensemble de générateurs de choc à un étage, montés en cascade. Les tensions obtenues sont de l'ordre du MV (maximum réalisé env. 6 MV).

Dans une première phase, le sectionneur I fermé permet la charge en parallèle des n condensateurs C à travers de grandes résistances de charge R_{ch} ; l'alimentation étant assurée par une source continue de tension U_0 (généralement comprise entre 50 et 200 kV).

Ensuite, dans une deuxième phase, le sectionneur est ouvert et l'amorçage de tous les éclateurs E_i est commandé presque simultanément (la tension de claquage des éclateurs à sphères étant ajustée légèrement au-dessus de U_0); à ce moment précis les condensateurs C se trouvent en série et constituent une source de tension égale à nU_0 .

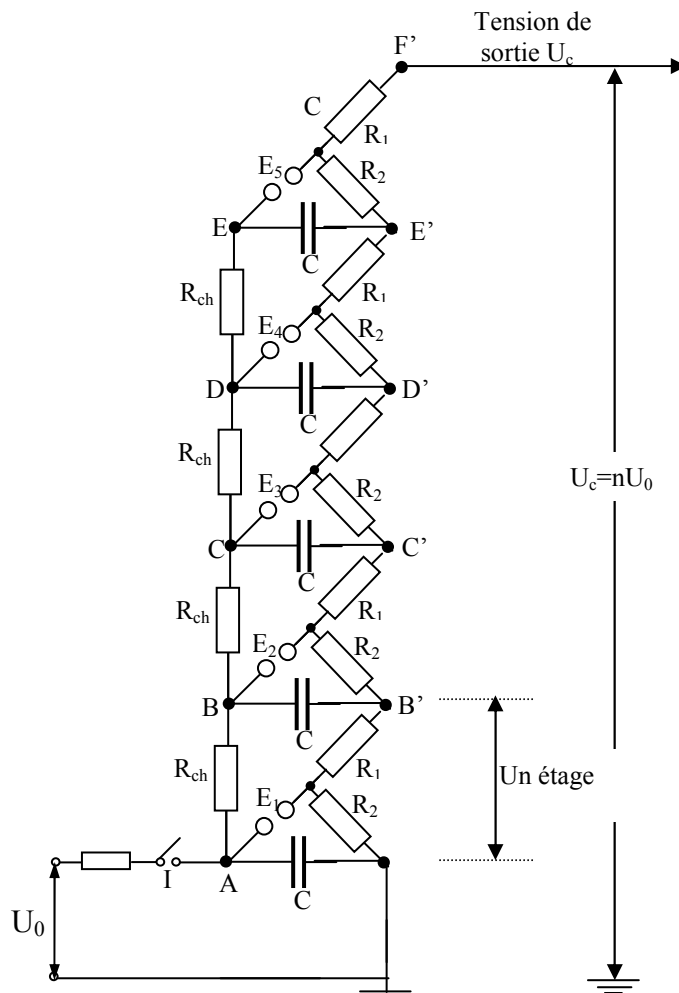


Figure 16 : Générateur de Marx à 5 étages

III.3) Générateur de Ruhmkorff

La haute tension est produite par l'interruption du courant dans un circuit inductif.

Les vibrations du rupteur ferment et ouvrent brusquement le circuit.

L'équation du circuit est :

$$u_p = R_p i_p + L_p \frac{di_p}{dt} + M \frac{di_s}{dt}$$

où R_p et L_p sont la résistance et l'inductance de l'enroulement primaire ;

i_p et i_s courants primaire et secondaire ;

M l'inductance mutuelle entre les circuits primaire et secondaire.

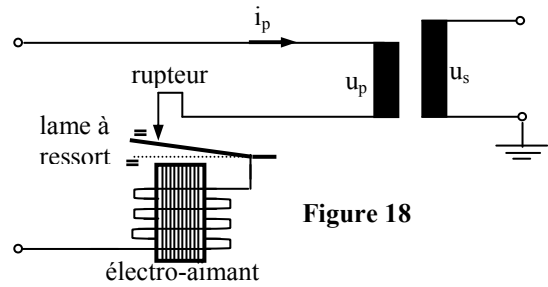


Figure 18

Comme l'interruption du courant est très brève ($dt \cong 0$), les termes $\frac{di_p}{dt}$ et $\frac{di_s}{dt}$ sont tellement élevés qu'ils produisent, pendant un bref moment, de la haute tension.

Ces générateurs sont utilisés, lorsqu'on a besoin d'une haute tension pendant une durée très brève, comme l'allumage par exemple. On les trouve pour l'allumage des lampes à décharge et l'allumage des moteurs à explosion (bobine HT des voitures).

III.4. Générateur de Tesla

Il fournit une haute tension oscillante.

Le condensateur C_1 se charge par l'intermédiaire du transformateur HT associé à la diode D.

- Le transformateur charge le condensateur C_1 à une tension U_1 . Quand la tension est suffisamment grande, le claquage de l'éclateur E provoque la décharge de l'énergie emmagasinée dans C_1 dans un système de deux circuits RLC couplés, générant une tension de sortie U_2 qui croît de façon oscillante.

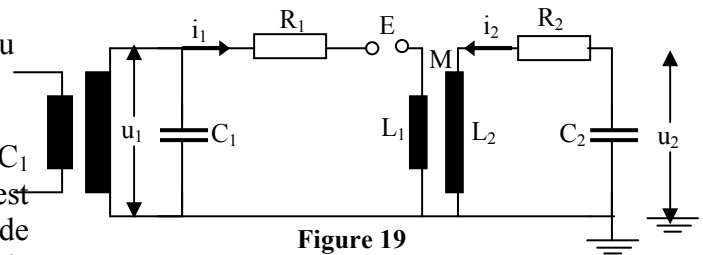


Figure 19

Les résistances R_1 et R_2 servent à amortir l'oscillation. L'arrêt de la tension oscillante s'effectue par l'extinction de l'arc aux bornes de l'éclateur par soufflage d'air. Des tensions à HF fréquence 10^4 à 10^5 Hz sont obtenues et qui peuvent atteindre des valeurs de 1 MV.