

# **Chapitre 3 : Production et mesure de hautes tensions en laboratoire: tension continue, alternative et de choc**

**I. Générateurs de la haute tension**

**II. Mesure en haute tension**

# I. Générateurs de la haute tension

Les générateurs de haute tension sont utilisés dans :

1. Les laboratoires de recherche scientifique ;
2. Les laboratoires d'essai, pour tester les équipements haute tension avant leur utilisation (isolateur, câble, transformateur, appareils de coupure ...) ;
3. 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 (Transitoire).

## II. Générateurs électrostatiques

Le *générateur électrostatique* est un dispositif qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrostatique emmagasinée dans un milieu diélectrique. Il comporte :

- une source d'excitation, fournissant des charges électriques ;
- un élément transporteur (convoyeur de charges) mû par un moteur et qui apporte les charges sur une électrode haute tension, entourée d'un matériau diélectrique ;
- un milieu diélectrique dans lequel est stockée l'énergie électrostatique.

### A. Machines à triboélectricité

Une sphère ou un cylindre de matériau isolant est mis en rotation et frotté à l'aide d'un coussinet également isolant, mais formé d'un matériau différent. Ces machines ont permis d'obtenir des tensions de plusieurs centaines de kV, si l'on en croit la longueur des étincelles annoncées par leurs utilisateurs du 18<sup>ième</sup> siècle.

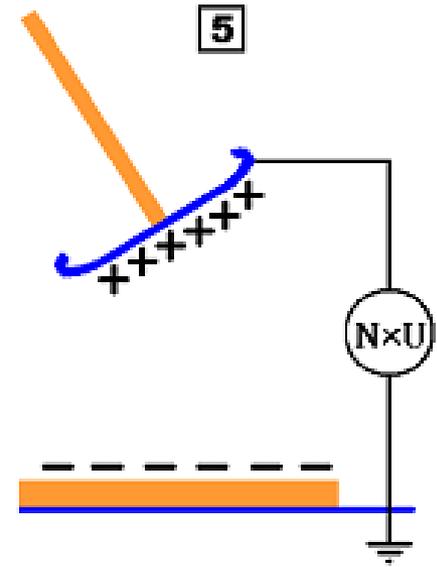


## B. Électrophore de Volta

Cet instrument, inventé en 1775, combine le principe du frottement à celui de la charge par influence. L'électrophore de Volta ouvre la porte aux générateurs électrostatiques modernes, combinant le phénomène de la triboélectricité à celui de la charge par influence, avec la possibilité d'opérer en continu.

## E. Générateur Van de Graaff

Un générateur de *Van de Graaff* est une machine électrostatique inventée par *Robert Van de Graaff* au début des années 1930 qui permet d'atteindre des tensions continues très élevées, mais des courants de faible intensité, avec des différences de potentiel de l'ordre de 5 à 10 mégavolts sur les générateurs industriels modernes.

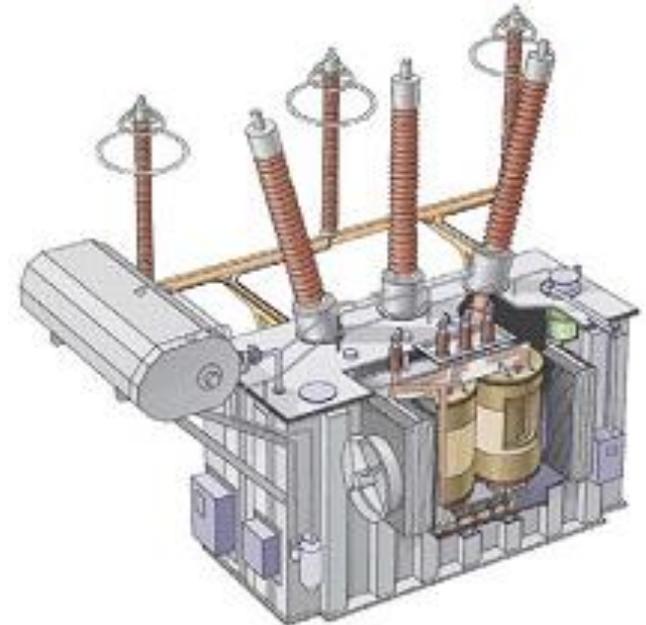


## II. Générateurs de Haute Tension Alternative

### A. 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.



## B. 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).

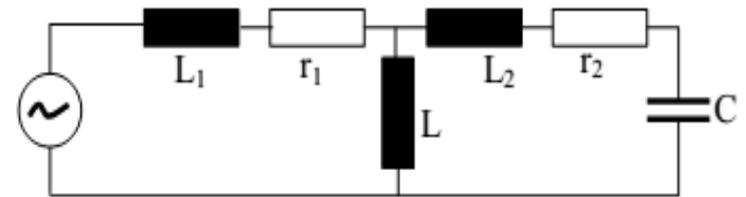
$r_1 + jL_1\omega$  : impédance de l'enroulement primaire du transformateur

$r_2 + jL_2\omega$  : 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** : 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.

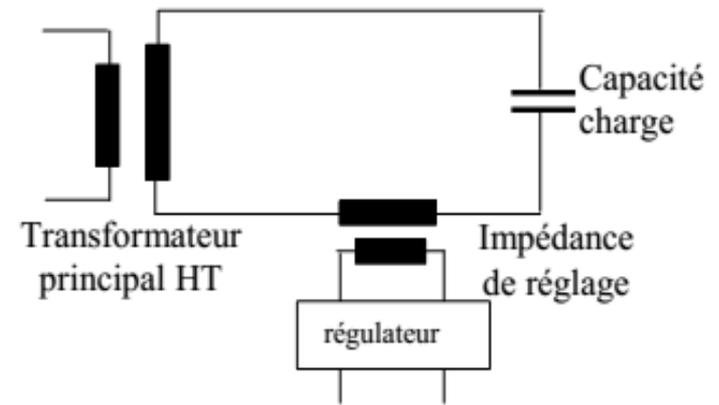
Le phénomène de résonance est mis à profit pour produire de très hautes tensions (figure 3) ; une impédance de réglage variable insérée en série avec le circuit du transformateur permet de régler et d'augmenter la tension à des valeurs très grandes (jusqu'à 600 kV).

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).



**Figure** : Circuit résonant

### III. Générateurs de Haute 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.

# A. Redresseur de tension alternative

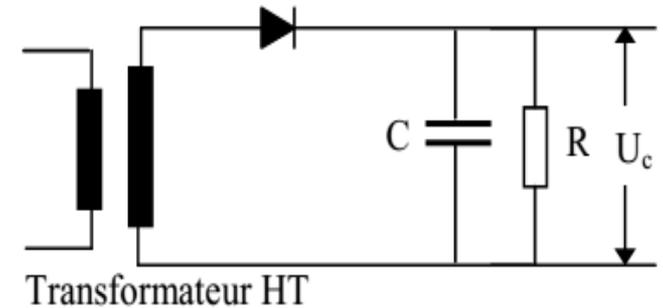
## ➤ Redresseur à simple alternance :

### a) Redresseur à simple alternance :

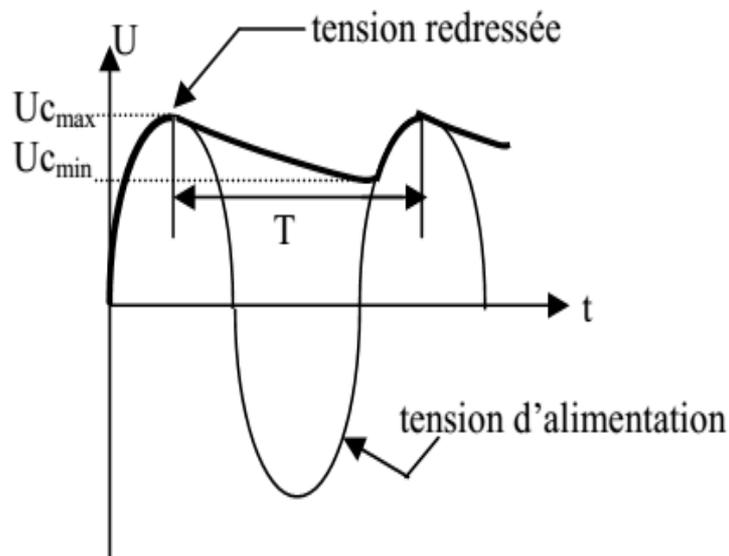
avec :

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

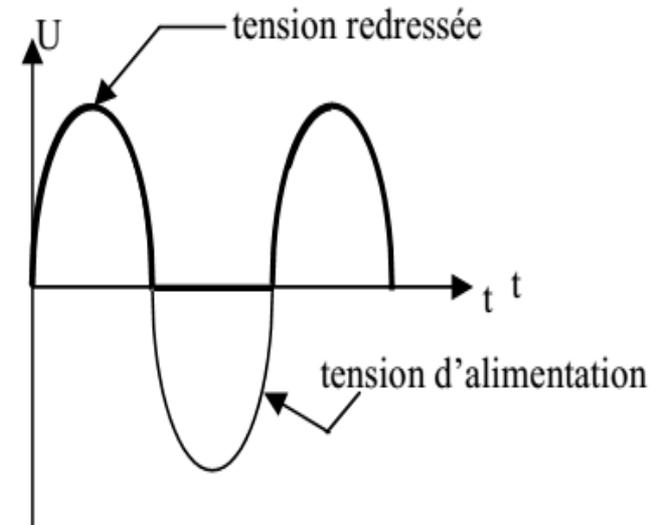
$R$  : *résistance de l'objet testé + résistance de fuite du condensateur de lissage.*



**Figure :** redresseur à simple alternance en charge



$U_c$  avec Capacité de lissage



$U_c$  sans Capacité de lissage

## IV. Générateurs de Haute tensions de choc (Transitoire)

### Définition :

La tension de choc (ou impulsion) est une très haute tension unidirectionnelle, appliquée pendant un temps très bref de l'ordre de quelques  $\mu\text{s}$ . 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 :

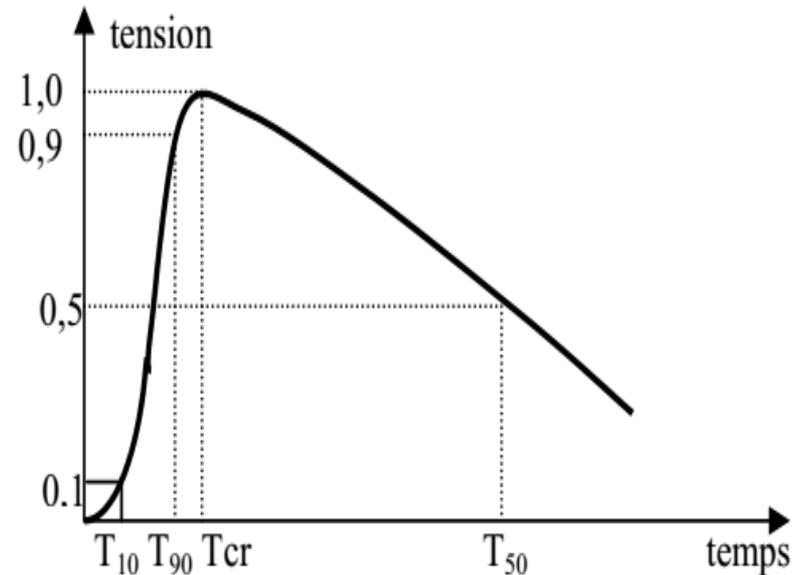
l'impact d'un coup de foudre sur un réseau électrique génère une onde de tension sur la ligne qui crée dans l'enroulement des transformateurs une distribution inégale du potentiel et provoque la détérioration de l'isolement.

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



**Figure :** Onde de choc conventionnelle

Remarque : le temps  $T_{cr}$  de montée à la valeur crête n'est pas ut 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*.

## ➤ 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) ;

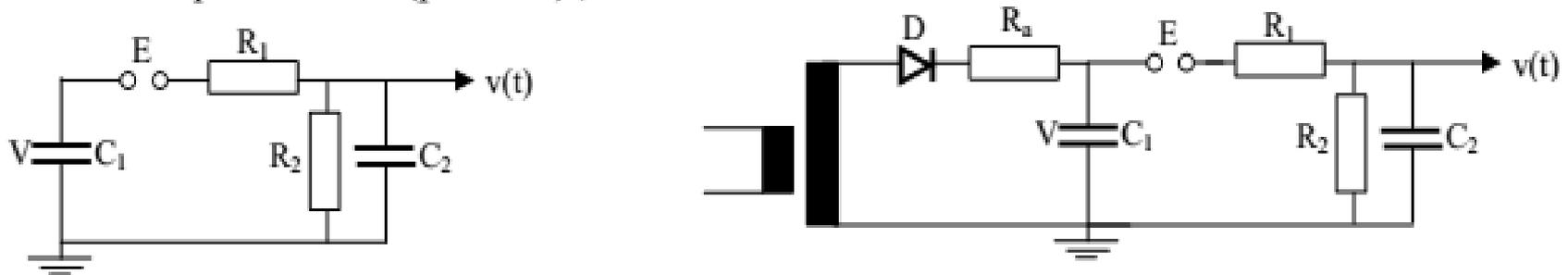


Figure 13 : Générateur de choc à un étage

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  $R_2$ .

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  $R_1$ .

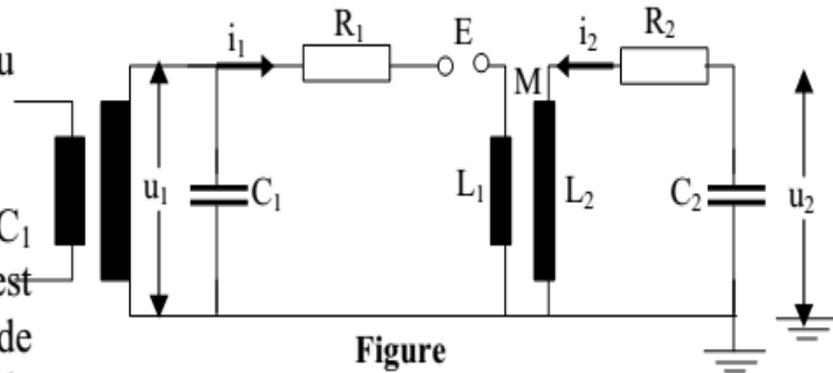
Quand  $R_2 \gg R_1$ , au moment de l'amorçage de l'éclateur, toute la tension U est pratiquement appliquée à  $R_1$  et  $C_2$  en série. La charge du condensateur  $C_2$  est d'autant plus rapide que le produit  $R_1 C_2$  est petit.

## ➤ 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.



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.