

Chapitre 8

Essais et mesures en haute tension

1. Essais du matériel haute tension

La coordination de l'isolement nécessite divers types d'essais pour l'étude et la vérification des machines et appareils des installations à haute tension. On distingue 4 catégories d'essais :

1. Les essais à haute tension alternative et fréquences industrielles à 50 ou 60 Hz. La tension aux bornes des transformateurs d'essais à HT est le plus souvent non sinusoïdale à cause de la saturation du circuit magnétique.

On utilise actuellement des systèmes résonants pour lesquels la tension est parfaitement sinusoïdale. Le plus souvent, la tension d'essai est mesurée à l'aide d'un dispositif de mesure de tension de crête.

2. Les essais sous HT continue sont employés essentiellement pour les câbles et condensateurs qui nécessiteraient une énergie réactive alternative trop importante et pour le matériel destiné au réseau à HT continue.

3. Les essais de choc ou d'impulsion, c'est-à-dire sous onde unidirectionnelle.

4. Des essais spéciaux sous HT et haute fréquence par exemple pour des essais d'isolateurs, de transformateurs ou de vieillissement des câbles.

2. Générateurs 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 ...) ;
- de nombreuses applications utilisant la haute tension (rayons X, effet couronne, générateur d'ozone, séparation électrostatique, laser...).

2.1. Générateurs de tension alternative

2.1.1. Transformateurs

Dans la plupart des systèmes actuels à haute tension, l'élément central reste le transformateur.

Dans le domaine de la haute tension, on utilise différents types de transformateurs :

- Pour l'alimentation des réseaux électriques : les **transformateurs de puissance** monophasés ou triphasés, élévateur de tension (transport) ou abaisseur (distribution).
Isolation : papier – huile, papier – résine époxy, SF₆...
- Pour la mesure des hautes tensions (surveillance de la tension dans les réseaux) : **transformateur de potentiel** (abaisseur de tension). Isolation : résine époxy.
- Pour les essais en laboratoire : **les transformateurs d'essai monophasés**. Haute tension mais faible puissance. Isolation : papier – huile.
- Pour les essais à l'extérieur : le **transformateur à résonance série**. Isolation : résine époxy.

2.1.2. 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.

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.

2.1.3. Transformateurs d'essai

Les transformateurs d'essai sont généralement monophasés et de faible puissance. Principalement utilisés pour réaliser des tests sur des systèmes d'isolation.

Une isolation est un ensemble d'éléments constitués de matériaux isolants et servant à isoler les unes des autres les parties conductrices d'un dispositif.

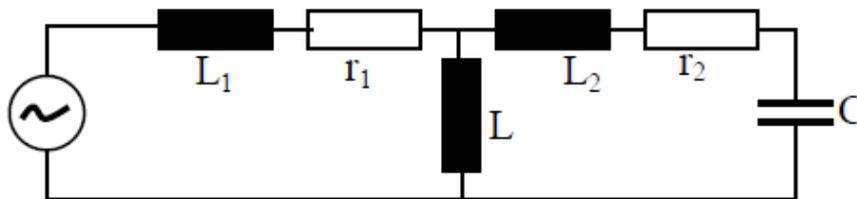
En général, les transformateurs d'essai comportent plusieurs enroulements primaires ou/et secondaires. Ceci offre une certaine souplesse pour s'adapter à différentes spécificités des essais à réaliser.

2.1.4. Générateur à circuit résonant série

Les générateurs à circuit résonant série sont principalement utilisés pour les tests de câbles sur site. 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 ci-dessous).



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

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

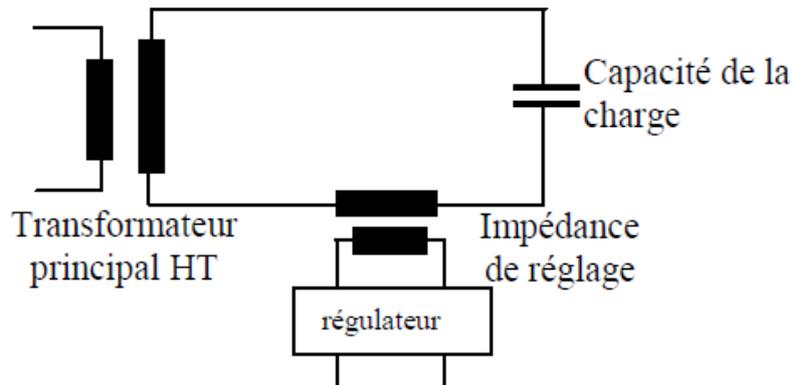
$L\omega$: Impédance shunt du transformateur, généralement négligée devant $L_1\omega$ et $L_2\omega$.

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

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

Si par hasard, $\omega(L_1 + L_2) \approx 1/\omega C$, 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 ci-dessous); 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.

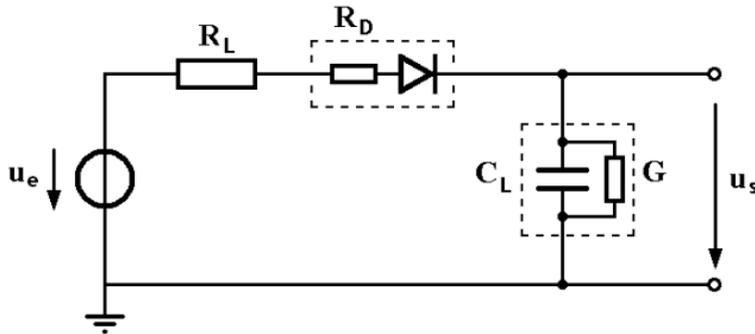
2.2. Générateurs de tension continue

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

- ✓ Réseaux à courant continu 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 ou les essais de test d'équipement à charge capacitive, très nombreux, on évite la tension alternative pour des raisons économiques.

2.2.1. Les redresseurs

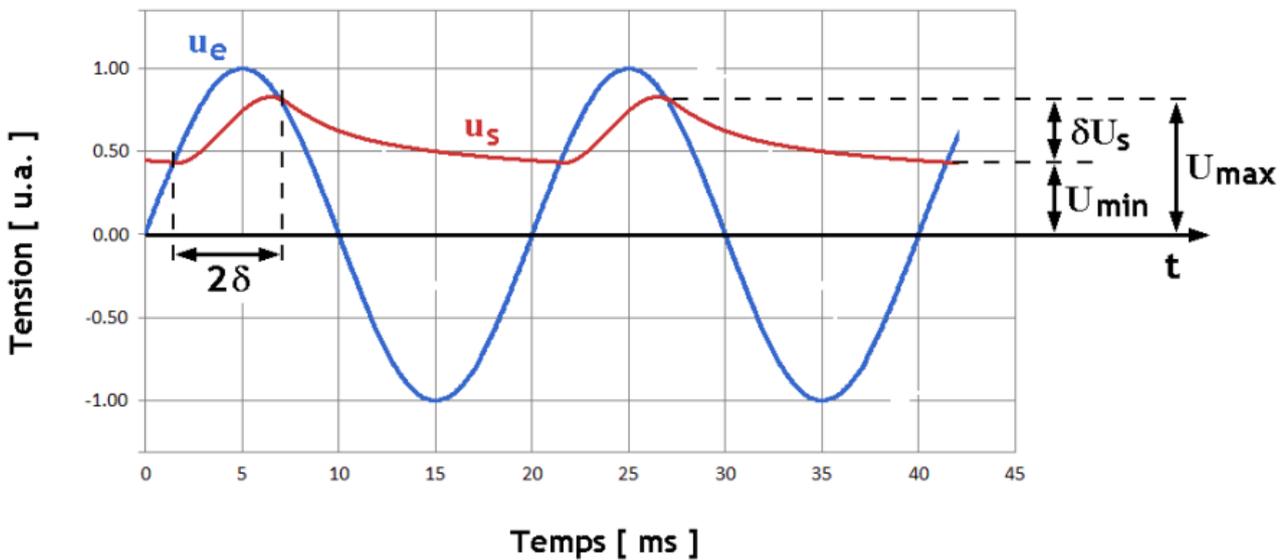
Les essais de haute tension en DC sont effectués au moyen d'un transformateur HT et d'un redresseur.



Redresseur à une alternance

- R_L : Résistance de limitation
- R_D : Résistance de la diode
- C_L : Capacité de lissage
- G : Conductance de fuite
- u_e : Haute tension d'entrée alternative
- u_s : Haute tension de sortie continue

Le redresseur peut comporter plusieurs diodes en série, de manière à limiter, à une valeur acceptable sur chaque diode, la tension inverse qui peut atteindre au total le double de la valeur de crête de u_e . Le redresseur fournit une tension lissée, présentant une ondulation.



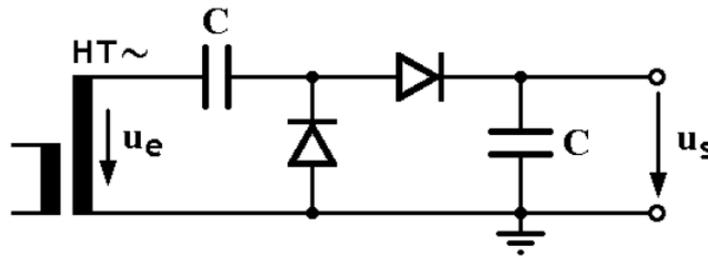
Tension moyenne :
$$U_s = \frac{U_{min} + U_{max}}{2}$$

2.2.2. Les multiplicateurs

Divers circuits ont été imaginés pour multiplier une haute tension redressée.

Doubleur de Schenkel

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



Pendant l'alternance négative le condensateur C_1 se charge à la tension U_{max} , à l'alternance suivante cette tension qui s'ajoute à la tension du transformateur donne une tension aux bornes de C égale à $2U_{max}$. La tension à vide obtenue à la sortie est donc $u_s = 2U_{max}$. Il présente l'inconvénient de donner la pleine tension sur un seul condensateur.

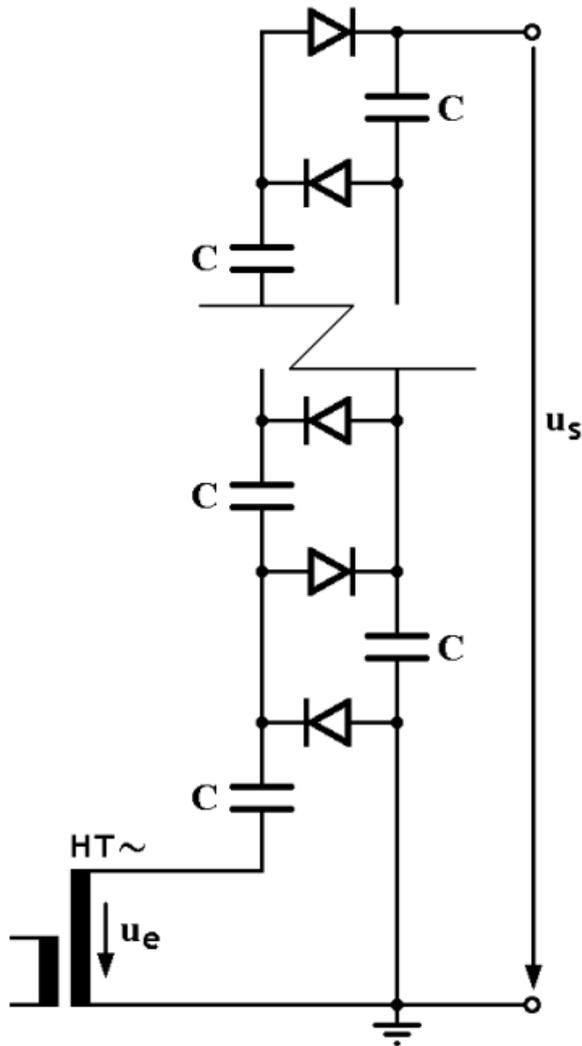
Cascade de Greinacher

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 $2U_{max}$, la tension obtenue (à vide) est $u_s = 2NU_{max}$ avec N : nombre d'étages.

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

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.



Le circuit de la cascade de Greinacher a été réalisé en 1932 dans un accélérateur de particules.

La cascade de Greinacher consiste en un empilement de N doubleurs de Schenkel, permettant d'obtenir une tension de sortie à vide :

$$u_s = 2NU_{max}$$

En débitant un courant I_R sur une résistance R , la cascade donne une tension maximale :

$$u_{s,R} = u_s - \Delta u$$

avec

$$\Delta u = \frac{I_R}{fC} \left(\frac{2}{3} N^3 + \frac{1}{2} N^2 - \frac{1}{6} N \right)$$

et

$$I_R = \frac{u_s}{R}$$

2.3. Générateurs de tensions de choc

Une **tension de choc** est une (onde de) tension transitoire, caractérisée par une montée rapide de la tension suivie généralement d'une décroissance plus lente.

Le **front d'onde** est la partie de la tension de choc qui précède le passage par la crête.

La **durée conventionnelle du front** est la durée définie en remplaçant le front réel par un segment de droite passant par deux points spécifiés du front.

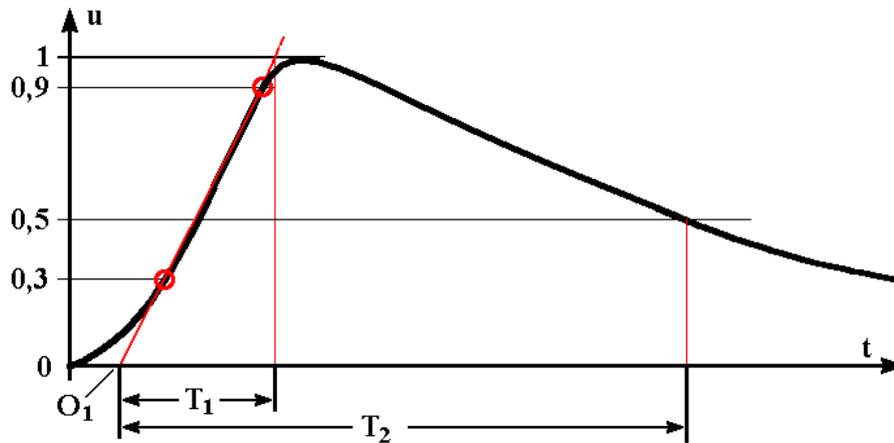
La **queue d'onde** est la partie de la tension de choc qui suit le passage par la crête.

La **durée jusqu'à mi-valeur** est l'intervalle de temps compris entre l'origine de la tension de choc et l'instant de la queue où la tension a décru à la moitié de sa valeur de crête.

Les essais de chocs servent à s'assurer de l'immunité du matériel, vis-à-vis de surtensions induites avec des niveaux inférieurs au niveau de protection.

2.3.1. Choc de foudre 1,2/50

Ce choc de foudre normalisé est largement utilisé pour les essais de matériel.



O₁ : origine conventionnelle

T₁ : durée conventionnelle du front

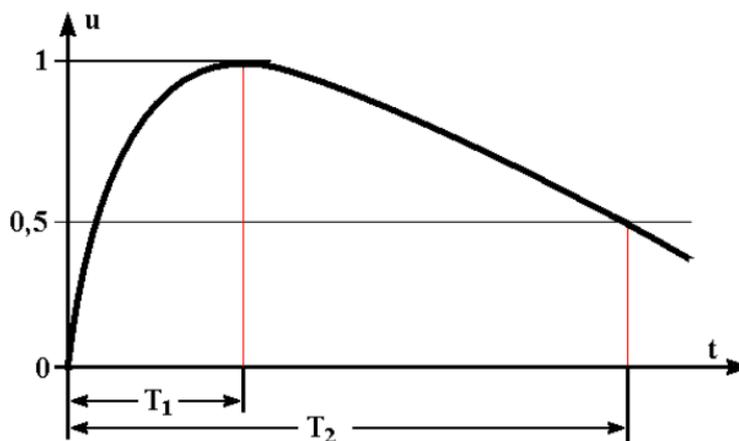
T₂ : durée jusqu'à mi-valeur

Norme CEI 60060-1 :

$$T_1 = 1,2\mu s \pm 0,36\mu s (30\%) \quad T_2 = 50\mu s \pm 10\mu s (20\%)$$

2.3.2. Choc de manœuvre 250/2500

Les chocs de manœuvre sont des surtensions du genre de celles que produisent des ouvertures ou des fermetures de disjoncteurs, de sectionneurs, etc.



Le choc de manœuvre normalisé (CEI 60060-1) est caractérisé par :

T₁ , **durée jusqu'à la crête** : intervalle de temps compris entre l'origine réelle du choc et l'instant de la crête.

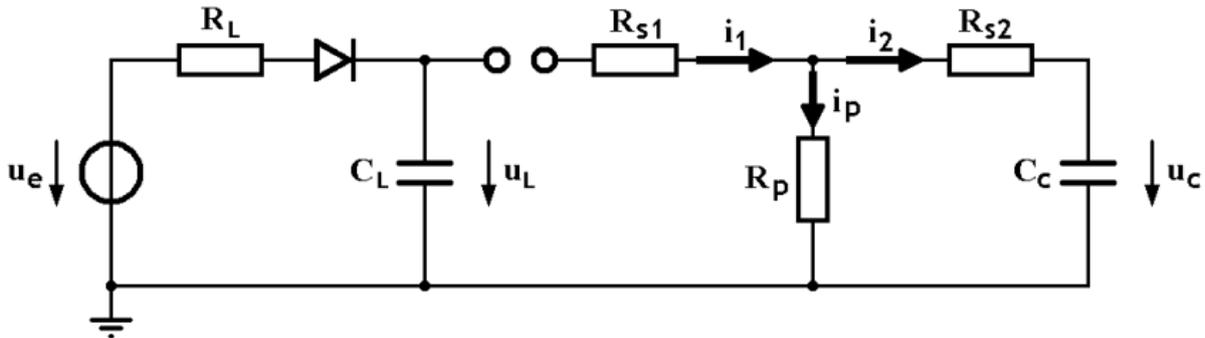
$$T_1 = 250\mu s \pm 50\mu s (20\%)$$

T_2 , **durée jusqu'à mi-valeur** : intervalle de temps compris entre l'origine réelle du choc et l'instant où la tension a décré jusqu'à la moitié de sa valeur de crête.

$$T_2 = 2500\mu\text{s} \pm 1500\mu\text{s} (60\%)$$

2.3.3. Générateur de chocs de foudre

Le générateur comporte un redresseur dont la capacité de lissage se décharge dans un circuit résistif, à travers un éclateur.



R_L : résistance de limitation

C_L : capacité de choc

R_{s1} , R_{s2} : résistances série

R_p : résistance parallèle

C_c : capacité de charge

La tension de sortie de ce type de générateur a la forme d'une double exponentielle (bi-exponentielle) :

$$u_c(t) = U_c(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2})$$

Le problème du dimensionnement d'un générateur de choc, permettant d'obtenir une tension conforme à la norme, n'a pas de solution analytique.

Principe :

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

Lorsque la tension disruptive U_0 de l'éclateur E est atteinte, C_L se décharge brusquement dans C_c à travers la résistance de front R_s . La résistance de queue d'onde R_p étant beaucoup plus grande que R_L , les capacités C_L et C_p vont se décharger ensuite plus lentement dans cette résistance R_p .

Les résistances R_S et R_P 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_C , et un temps de queue long nécessite une décharge plus lente ; ceci est réalisé en choisissant une résistance R_P très grande par rapport à R_S .

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

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_S et R_P 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.

Tensions de crête recommandées par la CEI pour la tenue au choc de foudre des équipements

Tension de service à 50 Hz [kV]	Tension d'essai au choc 1,2/50 [kV]
12	75
24	125
72.5	325
245	1050

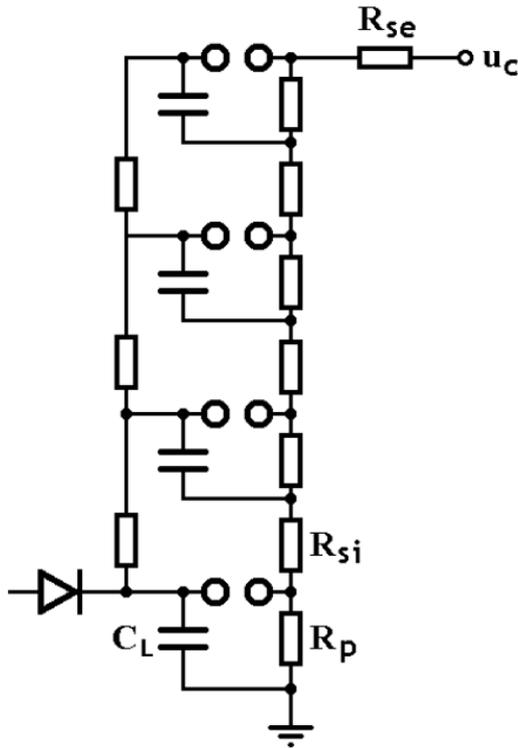
2.3.4. Générateurs multi-étage (type Marx)

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, On charge en parallèle les N condensateurs C_L 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, l'amorçage de tous les éclateurs E 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 se trouvent en série et constituent une source de tension égale à NU_0 .



Générateur inventé en 1924, par l'ingénieur allemand Erwin Otto Marx, largement utilisé de nos jours.

Ce schéma correspond à un générateur simplifié, avec les éléments équivalents suivants :

$$R_{s1,eq} = 0$$

$$R_{s2,eq} = N \times R_{si} + R_{se}$$

$$R_{p,eq} = N \times R_p$$

$$C_{L,eq} = C_L / N$$

où N est le nombre d'étages.

3. Techniques de mesure en haute tension

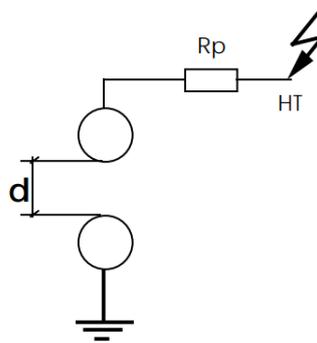
3.1. Éclateur à sphères

L'éclateur à sphères est la référence normalisée pour la mesure des hautes tensions. La norme CEI 60052 spécifie la conception et l'utilisation des éclateurs à sphères pour la mesure :

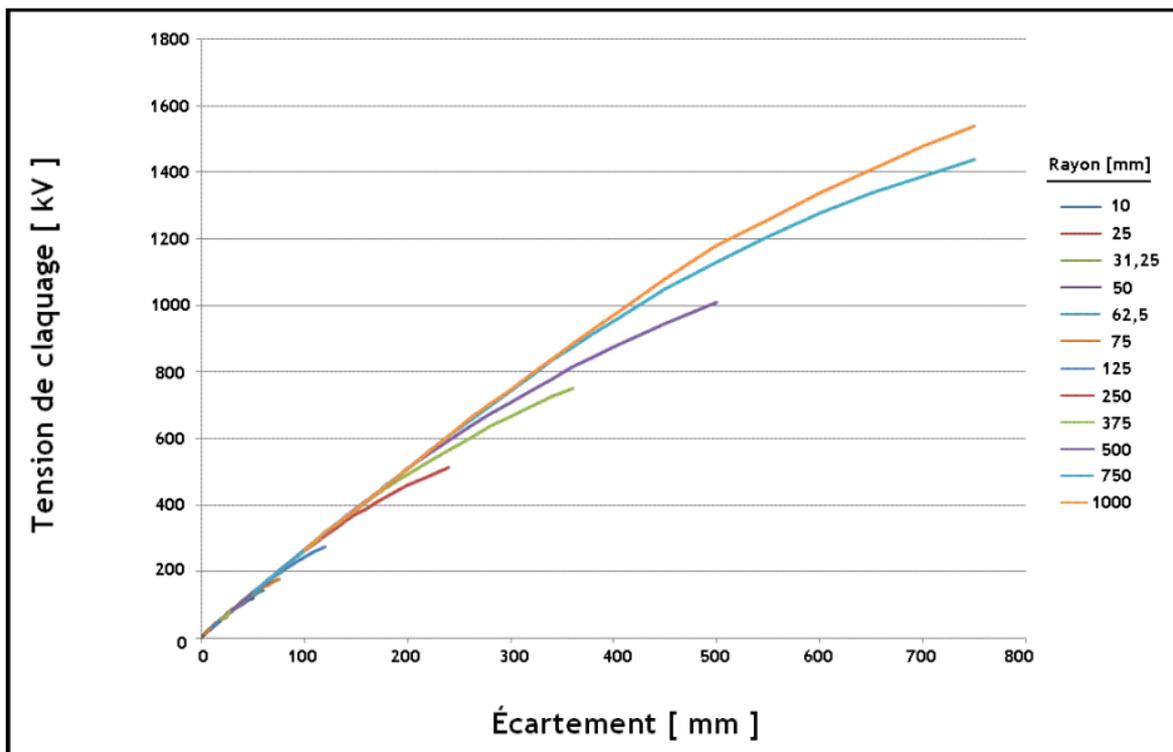
- des tensions alternatives à fréquence industrielle ;
- des tensions de chocs de foudre et de manœuvre ;
- des tensions continues.

L'éclateur est constitué de deux électrodes sphériques identiques, dont l'une est reliée à la terre et l'autre reliée au potentiel à mesurer, où la distance inter-électrodes d est réglable.

Chaque éclateur possède un abaque, qui est une courbe d'étalonnage entre la tension critique de claquage U_c et la longueur inter-électrodes d .



La tension à mesurer est appliquée aux deux électrodes, puis on augmente la distance d jusqu'à une valeur critique d_c qui provoque le claquage. Comme chaque éclateur possède un abaque tracé $U_c = f(d_c)$ qui fait correspondre à chaque distance critique la tension critique U_c , cet abaque donne la mesure de la tension appliquée qui correspond à la valeur d_c .



Tensions de claquage aux conditions atmosphériques standards, applicables en AC 50 Hz et DC, ainsi qu'aux chocs de foudre et de manœuvre en polarité négative

Exemple :

Par exemple, la tension à mesurer provoque un claquage de l'éclateur pour une distance critique $d_c = 9$ cm. De la figure représentant l'abaque de cet éclateur, la tension mesurée est relevée égale à 200 kV. Si par exemple, l'éclateur claque à $d_c = 50$ cm, l'abaque montre que la tension appliquée dans ce cas est de 1000 kV.

Remarque :

Pour les chocs, les valeurs des tensions d'amorçage dépendent de la polarité. En courant continu, la CEI recommande plutôt l'éclateur pointe – pointe.

Corrections atmosphériques

La précision de mesure dépend entre autres de l'uniformité du champ entre les sphères (celle-ci pourrait être améliorée avec une forme géométrique des électrodes moins arrondie et plus plate) et aussi des conditions atmosphériques.

Les tensions de claquage données par les documents CEI sont valables aux conditions atmosphériques suivantes :

Température standard T_0 : 293 K (= 20°C)

Pression standard P_0 : 101,3 kPa

Humidité absolue standard $H_{absolue}$: 8,7 g/m³ ($H_{relative} = 50\%$ à P_0 et T_0)

Dans des conditions différentes, une valeur de tension U_c , tirée des tableaux doit être corrigée par un facteur de correction atmosphérique K .

La tension réelle U_r est donnée par : $U_r = U_c \cdot K$ avec $K = \delta \cdot k$

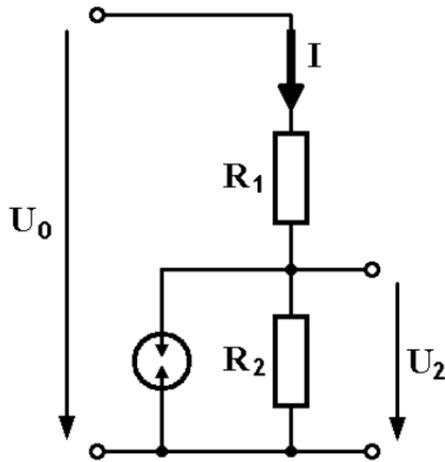
coefficient de densité : $\delta = \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T}$

coefficient d'humidité : $k = 1 + \left[0.002 \left(\frac{H_{abs}}{\delta} - 8.5 \right) \right]$

P : pression atmosphérique [kPa] ; T : température [K] ; H_{abs} : humidité absolue [g/m³]

3.2. Diviseurs de tension**3.2.1. Le diviseur résistif**

Dans la pratique courante, les hautes tensions continues sont mesurées à l'aide de diviseurs résistifs. Deux problèmes apparaissent dans le dimensionnement d'un diviseur résistif destiné à la mesure des hautes tensions : l'échauffement des résistances et la résistance parasite des supports.

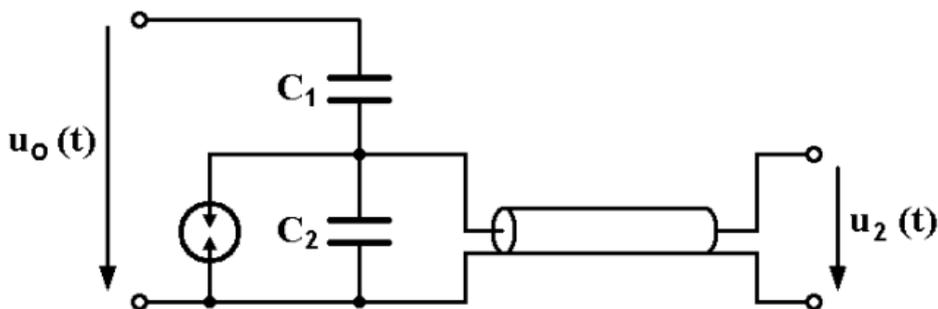


Un éclateur de protection est nécessaire pour protéger l'instrument de mesure, en cas d'ouverture accidentelle de la branche basse tension du diviseur.

3.2.2. Le diviseur capacitif

Les hautes tensions alternatives peuvent être mesurées à l'aide de diviseurs capacitifs. L'avantage du diviseur capacitif est qu'il consomme très peu d'énergie active.

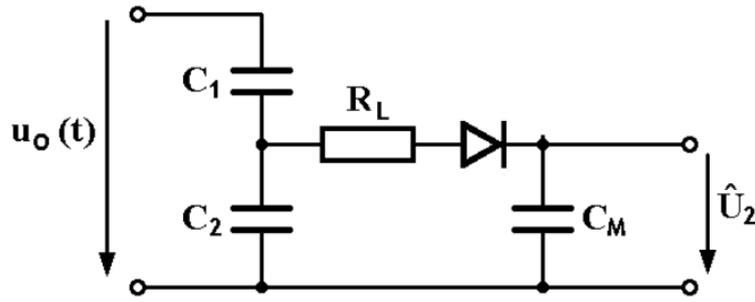
En pratique, le calcul du rapport de transformation d'un diviseur capacitif doit prendre en considération les capacités parasites, contre terre et contre l'électrode haute tension, la capacité du câble coaxial qui sert à la mesure de la tension, ainsi que la capacité de l'éclateur de protection.



3.2.3. Le diviseur capacitif de crête

Les valeurs de crête des hautes tensions de choc peuvent être mesurées à l'aide d'un diviseur capacitif combiné à une capacité de mesure.

La capacité de mesure C_M , qui est chargée à la valeur de crête de la tension de choc, doit être assez grande pour que sa décharge dans la résistance d'entrée de l'instrument de mesure de U_2 soit lente (constante de temps d'au moins dix secondes).



3.3. Transformateur de tension

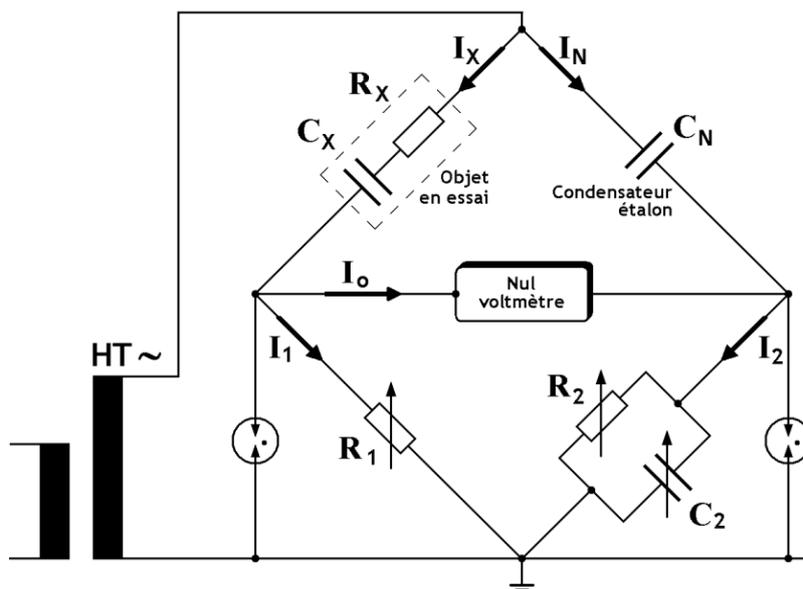
On utilise aussi tout simplement un transformateur de tension abaisseur de petite puissance ; afin de connaître la tension à mesurer il suffit de multiplier la tension mesurée au secondaire par le rapport de transformation.

Il donne des mesures très précises, mais il est surtout utilisé pour la mesure des tensions des réseaux de puissance et rarement utilisé dans les laboratoires. Le transformateur de tension est aussi appelé transformateur de potentiel (TP).

3.4. Pont de Schering

Dans un condensateur haute tension, la permittivité et la résistivité de l’isolant se traduisent par une capacité et un facteur de pertes.

Ces deux grandeurs sont mesurées simultanément, à l’aide du pont de Schering, qui est une variante du pont de Wheatstone.



A l’équilibre :

$$C_x = \frac{R_2}{R_1} C_N$$

$$tg\delta_x = \omega R_2 C_2$$